

MUNICIPIO DE MEDELLÍN - UNIVERSIDAD EAFIT

CONVENIO DE ASOCIACIÓN No. 4600076515 de 2018

OBJETO:

Convenio de asociación para la identificación del riesgo de detalle en algunas zonas del Municipio de Medellín.

SECTOR LA SIERRA

Junio de 2019

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	2
3. METODOLOGÍA	4
3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO	4
3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	4
3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base	4
3.2.2. Visitas de reconocimiento.	5
3.2.3. Generación de mapas temáticos	5
3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio	6
3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos.....	7
3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos.....	8
3.2.7. Evaluación de la estabilidad.....	8
3.2.8. Análisis de la distancia de viaje	9
3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa	10
3.3. AMENAZA POR INUNDACIONES.....	10
3.3.1. Hidrología	11
3.3.2. Hidráulica.....	11
3.3.3. Zonificación de la amenaza por inundación.....	12
3.4. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD.....	12

3.4.1.	Fichas de levantamiento de la información.....	13
3.4.2.	Trabajo de campo	13
3.4.3.	Análisis de la información	14
3.5.	VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES.....	14
3.5.1.	Cálculo de la fragilidad.....	14
3.5.2.	Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.	15
3.5.3.	Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones...	16
3.5.4.	Intensidad de las inundaciones en edificaciones.	16
3.6.	VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES	17
3.6.1.	Fragilidad en líneas vitales	17
3.6.2.	Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos	18
3.6.3.	Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos	19
3.6.4.	Intensidad en líneas vitales para inundaciones	19
3.7.	VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS.....	20
3.8.	CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	20
3.9.	EVALUACIÓN DEL RIESGO	21
3.9.1.	Riesgo por Elementos Expuestos.....	21
3.9.2.	Riesgo por Polígono.	22
4.	REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	24
5.	CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	30
5.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	30
5.1.1	Estratigrafía	32

5.2	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	36
5.2.1	Valle de Aburrá Medio (VM).	40
5.3	TECTÓNICA REGIONAL.....	44
5.3.1	Sistemas de fallas.	45
6.	CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL SECTOR LA SIERRA	47
6.1	DEFINICIÓN DE LA UMI	47
6.2	FOTOINTERPRETACIÓN	48
6.3	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	55
6.3.1	Derivados de roca in situ	56
6.3.2	Flujos de lodos y escombros	62
6.3.3	Depósitos antrópicos	64
6.4	MORFOMETRÍA	65
6.5	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	70
6.5.1	Bloque Santa Elena.....	72
6.6	MORFODINÁMICA	83
6.6.1	Reporte histórico de eventos	83
6.6.2	Identificación de procesos morfodinámicos	85
6.7	CLASIFICACIÓN Y USOS DEL SUELO	88
7.	EVALUACION GEOTÉCNICA	91
7.1	EXPLORACION INDIRECTA DE CAMPO.....	91
7.1.1	Exploración indirecta	91
7.1.2	Exploración Directa	98

7.2	RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO	102
7.3	ANALISIS GEOTECNICO	104
7.3.1	Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos	104
7.3.2	Definición de modelos geológico-geotécnicos.....	113
7.3.3	Análisis de estabilidad condición actual	121
8.	HIDROLOGÍA.....	143
8.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE	144
8.1.1	Información Cartográfica	144
8.1.2	Información Hidroclimática	144
8.1.3	Usos del Suelo y Coberturas Vegetales	145
8.2	PROCESAMIENTO DEL MODELO DEL TERRENO Y MORFOMETRÍA 146	
8.2.1	Trazado automático de cuencas a partir de modelos digitales de elevación (MDE).....	147
8.2.2	Parámetros morfométricos de la cuenca estudiada.....	147
8.3	CICLO DE LA PRECIPITACIÓN	149
8.4	PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL	150
8.5	CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS	150
8.5.1	Tiempo de Concentración	151
8.5.2	Intensidad de la Lluvia de Diseño.....	153
8.5.3	Método de las Hidrógrafas Unitarias	156
8.5.4	Método Racional Probabilístico	167
8.6	RESULTADOS.....	170

8.7	COMPARACIÓN RESULTADOS – ESTUDIOS PREVIOS.....	172
9.	ESTUDIO HIDRÁULICO	174
9.1	DESCRIPCIÓN DE CAMPO	174
9.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE	180
9.2.1	Topografía	180
9.2.2	Obras Hidráulicas Existentes	183
9.2.3	Caudal de Diseño	184
9.3	DIAGNÓSTICO - EVALUACIÓN CONDICIONES EXISTENTES	184
9.3.1	Descripción del Modelo Hidráulico	185
9.3.2	Coeficiente de Rugosidad	186
9.3.3	Condiciones de Frontera	188
9.3.4	Calibración del Modelo Hidráulico	190
9.3.5	Resultados	191
9.4	CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN.....	201
9.4.1	Socavación general método campo – Ordoñez.....	201
9.4.2	Resultados	202
10.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	206
10.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL.....	206
10.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS LOCALES.....	209
10.2.1	Exploración de campo	210
10.3	PERMEABILIDAD.....	217
11.	ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS.....	219

11.1	AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA	219
11.1.1	Amenaza por estabilidad	219
11.1.2	Amenaza por Run-Out	223
11.1.3	Amenaza total	225
11.1.4	Amenaza por inundación	228
12.	VULNERABILIDAD	230
12.1	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	230
12.1.1	Cálculo de la fragilidad de las construcciones	230
12.1.2	Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.....	234
12.1.3	Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones.....	235
12.2	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	237
12.2.1	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía.....	237
12.2.2	Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía	238
12.2.3	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía	239
12.2.4	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías	240
12.2.5	Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías.....	241
12.2.6	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías.....	242
12.2.7	Cálculo de la fragilidad del acueducto	243
12.2.8	Cálculo de la intensidad del acueducto.....	244
12.2.9	Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto	245
12.2.10	Cálculo de la fragilidad del alcantarillado	246

12.2.11	Cálculo de la intensidad del alcantarillado	247
12.2.12	Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado	248
12.3	VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTO EN MASA...	249
12.3.1	Análisis de vulnerabilidad de personas.....	249
12.4	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR INUNDACIÓN	250
12.4.1	Cálculo de la fragilidad de las construcciones	250
12.4.2	Cálculo de la intensidad de las construcciones.....	253
12.4.3	Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones.....	254
12.5	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR INUNDACIÓN	255
12.5.1	Cálculo de la fragilidad de las líneas vitales – energía	256
12.5.2	Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía	256
12.5.3	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía	257
12.5.4	Cálculo de la fragilidad de las líneas vitales – vías	258
12.5.5	Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías.....	259
12.5.6	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías.....	260
12.5.7	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – acueducto.	261
12.5.8	Cálculo de la intensidad de la línea vital – acueducto.....	262
12.5.9	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – acueducto.....	263
12.5.10	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – alcantarillado.....	264
12.5.11	Cálculo de la intensidad de la línea vital – alcantarillado.	265
12.5.12	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – alcantarillado.	266

12.6	VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR INUNDACIÓN	267
12.6.1	Análisis de vulnerabilidad de personas	267
12.7	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.....	268
13.	ZONIFICACIÓN DE RIESGO.....	269
13.1	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	269
13.1.1	Riesgo de elementos expuestos	269
13.1.2	Análisis de riesgo de personas.	274
13.1.3	Riesgo por polígono.....	275
13.2	RIESGO POR INUNDACIONES.....	278
13.2.1	Riesgo de elementos expuestos.	278
13.2.2	Riesgo por polígono.....	283
14.	APTITUD GEOLÓGICA	284
15.	RECOMENDACIONES	288
15.1	RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS	288
15.1.1	Análisis de estabilidad condición proyectada.....	290
15.1.2	Dimensionamiento geotécnico de obras	304
15.1.3	Plan de Seguimiento y Monitoreo	311
15.1.4	Recomendaciones particulares construcción de anclajes.....	314
15.2	RECOMENDACIONES GENERALES	318
15.2.1	Modificaciones del terreno	319
15.2.2	Control de drenaje	322

15.2.3	Viviendas afectadas por obras propuestas	326
15.2.4	Viviendas en zona de riesgo no mitigable.....	326
15.3	RECOMENDACIONES HIDRÁULICA	328
15.3.1	Diseño de obra.....	328
15.3.2	Evaluación condiciones futuras.....	347
15.3.3	Comparación de resultados	357
15.3.4	Especificaciones técnicas de obras	360
15.3.5	Otras Recomendaciones Hidráulicas.....	373
15.4	RECOMENDACIONES VULNERABILIDAD.	374
15.4.1	Servicios públicos domiciliarios.....	374
15.4.2	Líneas vitales – energía y alumbrado público	374
15.4.3	Vías de acceso y obras de drenaje.....	374
15.4.4	Mejoramiento saludable	375
15.4.5	Mejoramiento locativo	375
15.5	OTRAS RECOMENDACIONES.....	376
16.	CONCLUSIONES	381
17.	LIMITACIONES.....	389
18.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	391

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del polígono denominado La Sierra	3
Figura 2. Mapa geológico regional. Tomado de AMVA - Alcaldía de Medellín, 2017. 31	
Figura 3. Macrounidades. Tomado de AMVA, 2007.....	37
Figura 4. Geomorfología regional. Tomado de AMVA, 2007.	39
Figura 5. UMI definida para el polígono La Sierra	48
Figura 6. Fotografía aérea de 1983, polígono La Sierra.....	50
Figura 7. Fotografía aérea de 1994, polígono La Sierra.....	51
Figura 8. Fotografía aérea de 2004, polígono La Sierra.....	52
Figura 9. Fotografía aérea de 2010, La Sierra	53
Figura 10. Fotografía aérea de 2016, La Sierra	54
Figura 11. Geología local del polígono La Sierra	55
Figura 12. Perfil geológico generalizado del polígono La Sierra.....	56
Figura 13. Saprolito del Stock de Las Estancias en la perforación 8 del polígono La Sierra 57	
Figura 14. Suelo residual de la Dunita (IB), en inmediaciones de la placa polideportiva y quebrada La Meditadora.....	58
Figura 15. Saprolito de la Dunita, taludes de la vía 56B.....	59
Figura 16. Roca alterada	60
Figura 17. Transición suelo roca, Perforación P - 2 del polígono La Sierra	61
Figura 18. Roca parcialmente meteorizada.....	61
Figura 19 Roca parcialmente meteorizada, perforaciones P - 1 y P - 2.....	62

Figura 20. Depósito de Flujo de lodos y escombros.....	63
Figura 21. Flujos de lodos y escombros reportado en la perforación 7.....	64
Figura 22. Características de los materiales que conforman el lleno antrópico.....	65
Figura 23. Mapa de morfometría del polígono La Sierra	66
Figura 24. Unidad con pendientes en el rango entre 0 -10%, sector de la placa polideportiva y senderos.....	67
Figura 25. Zonas con pendientes en el rango entre 10% – 25%,.....	68
Figura 26. Sector occidental de la placa polideportiva, zona con pendientes en el rango entre 25% - 40%.....	68
Figura 27. Sector comprendido entre las calles 54A y 54 B.....	69
Figura 28. (a), vertiente izquierda de La quebrada Meditadora, (b) vertiente derecha de la quebrada El Nato.....	70
Figura 29. Mapa geomorfológico local del polígono La Sierra.....	71
Figura 30. Vía principal del Barrio La Sierra- Calle 54B	72
Figura 31. Ladera convexa, corta y abrupta, sector de la carrera 5E, entre calles 53D y 54 ^a 73	73
Figura 32. Ladera irregular, muy corta y muy abrupta, en inmediaciones de la carrera 7E con la calle 54B	74
Figura 33. Ladera irregular, corta y muy abrupta, parte alta de la calle 54B	75
Figura 34. Ladera irregular, moderada y muy abrupta, margen derecha de la quebrada La Meditadora	76
Figura 35. Ladera recta, moderada y abrupta, sector entre las calles 54A y 54B y entre la quebrada la Meditadora y la carrera 7AE.....	77
Figura 36. Ladera recta, larga y muy abrupta, margen derecha de la quebrada El Nato	78
Figura 37. Ladera recta, muy corta y muy inclinada.....	79
Figura 38. Ladera recta, muy corta y suave, sector de la placa polideportiva	80

Figura 39. Ladera en depósito cóncava, muy corta e inclinada, a la altura de la carrera 7AE con calle 54ª	81
Figura 40. Ladera en depósito recta, larga y abrupta, sector comprendido entre entre las calles 54A y 54B y carreras 7AE y 10E.....	82
Figura 41. Eventos reportados por el DAGRD (2018)	84
Figura 42. Reporte eventos DAGRD para el polígono La Sierra	84
Figura 43. Procesos morfodinámicos en el polígono La Sierra	86
Figura 44. Movimiento en masa sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora 87	
Figura 45. (a) Movimiento en masa sobre la margen izquierda de la quebrada El Nato. (b) proceso morfodinámico en el sector de la placa polideportiva	87
Figura 46. Mapa de clasificación del suelo en el polígono La Sierra. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	89
Figura 47. Mapa de usos del suelo del polígono La Sierra. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	90
Figura 48. Localización Geográfica para las líneas sísmicas para el polígono La Sierra..	92
Figura 49. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_01.....	93
Figura 50. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_LS_01.....	94
Figura 51. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_02.....	95
Figura 52. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_LS_02.....	96
Figura 53. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_03.....	97
Figura 54. Modelo de capas de refracción sísmica línea SIS_LS_03.....	98
Figura 55. Localización sondeos exploratorios polígono La Sierra.....	100
Figura 56. Muestreador estándar para el ensayo SPT	102
Figura 57. Muestreador de pared delgada	102
Figura 58. Localización perfiles y sondeos Polígono La Sierra.....	114

Figura 59. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 La Sierra.....	115
Figura 60. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 La Sierra.....	116
Figura 61. Modelo geológico-geotécnico perfil 3 La Sierra.....	117
Figura 62. Modelo geológico-geotécnico perfil 4 La Sierra.....	118
Figura 63 Modelo geológico geotécnico perfil 5 La Sierra.	119
Figura 64 Modelo Geológico Geotécnico Perfil 6 La Sierra.....	120
Figura 65 Modelo Geológico Geotécnico perfil 7 La Sierra.	121
Figura 66. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual estático.....	126
Figura 67. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudoestática.....	126
Figura 68. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.	127
Figura 69. Análisis de estabilidad Perfil 2 condición actual estática.	128
Figura 70. Análisis de estabilidad perfil 2 actual pseudoestático.....	129
Figura 71. Análisis de estabilidad perfil 2 actual saturado.....	129
Figura 72. Análisis de estabilidad perfil 3 actual estático.	131
Figura 73. Análisis de estabilidad perfil 3 actual pseudoestático.....	131
Figura 74. Análisis de estabilidad perfil 3 actual saturado.....	132
Figura 75. Análisis de estabilidad perfil 4 actual estático.	133
Figura 76. Análisis de estabilidad perfil 4 actual pseudoestático.....	134
Figura 77. Análisis de estabilidad ´perfil 4 actual saturado.....	134
Figura 78. Análisis de estabilidad perfil 5 actual estático.	136
Figura 79. Análisis de estabilidad perfil 5 actual pseudoestático.....	136
Figura 80. Análisis de estabilidad perfil 5 actual saturado.....	137
Figura 81. Análisis de estabilidad perfil 6 actual estático.	138

Figura 82. Análisis de estabilidad perfil 6 actual pseudoestático.....	139
Figura 83. Análisis de estabilidad perfil 6 actual saturado.....	139
Figura 84. Análisis de estabilidad perfil 7 actual estático.	141
Figura 85. Análisis de estabilidad perfil 7 actual pseudoestático.....	141
Figura 86. Análisis de estabilidad perfil 7 actual saturado.....	142
Figura 87. Estaciones pluviométricas en la zona de estudio.	146
Figura 88. Modelo Digital del Terreno en la cuenca de interés.....	148
Figura 89. Variación mensual multianual de la precipitación de la estación de influencia.	149
Figura 90. Perfil del cauce principal de la quebrada La Meditadora.	150
Figura 91. Variación de Tiempos de Concentración en la Cuenca.....	153
Figura 92. Curva IDF estación Planta Villa Hermosa (2701045).	155
Figura 93. Curva IDF estación Mazo (2701034).....	156
Figura 94. Coberturas vegetales en la cuenca de la corriente de estudio.	160
Figura 95. Diagrama distribución temporal de la lluvia, según Huff – 1967, Chow et al, 1994.	163
Figura 96. Hietogramas de precipitación efectiva, quebrada La Meditadora.	165
Figura 97. Hidrogramas de crecientes, quebrada La Meditadora.	166
Figura 98. Caudales máximos diferentes métodos, quebrada La Meditadora.	171
Figura 99. Vertiente quebrada La Meditadora, aguas arriba de la Carrera 7 Este.....	175
Figura 100. Cauce poco definido en zona alta de la vertiente, sin canal principal.....	176
Figura 101. Juegos infantiles y coliseo ubicado en el centro de la vertiente de la quebrada La Meditadora.....	176
Figura 102. Canal piedra pegada descole aguas lluvias proveniente de la vía Carrera 7 Este.	177

Figura 103. Vertiente principal quebrada La Meditadora entre calle 59 B y 54 B.	177
Figura 104. Zona de cruce quebrada La Meditadora a través de la calle 54 B. Tubería de 0,70 m de diámetro, descarga en canal.	178
Figura 105. Entrega de flujo sobre MH existente, final de canal rectangular.	179
Figura 106. Ruptura MH para recepción de aguas en la quebrada La Meditadora y ocupación de retiros y zonas aledañas al cauce, aguas abajo de calle 54 B.	179
Figura 107. Esquema del tramo analizado y las secciones transversales usadas. .	181
Figura 108. TR233 años para quebrada La Meditadora.	191
Figura 109. Secciones zona 0+000 a 0+150, escenario actual.	193
Figura 110. Secciones zona entre calle 56 B y 54 B.	194
Figura 111. Secciones zona aguas abajo de la calle 54 B.	195
Figura 112. Perfil del flujo escenario actual.	197
Figura 113. Campo de profundidad escenario actual.	200
Figura 114. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.	208
Figura 115. Localización Geográfica para las tomografías eléctricas para el polígono de La Sierra.	211
Figura 116. Zona de ejecución línea TER_LS_01.	212
Figura 117. Interpretación de la tomografía TER_LS_01.	213
Figura 118. Zona de ejecución línea TER_LS_02.	214
Figura 119. Interpretación de la tomografía TER_LS_02.	215
Figura 120. Zona de ejecución línea TER_LS_03.	216
Figura 121. Interpretación de la tomografía TER_LS_03.	217
Figura 122. Mapa de amenaza por estabilidad del polígono de La Sierra.	220

Figura 123. Zonificación de amenazas por estabilidad en condiciones de saturación para el polígono La Sierra	223
Figura 124. Mapa amenaza Runout del polígono La Sierra.	224
Figura 125. Mapa amenaza final del polígono La Sierra.	226
Figura 126. Mapa amenaza por inundación.....	229
Figura 127. Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificadas en el polígono de La Sierra.....	231
Figura 128. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono La Sierra.	232
Figura 129. Tipología construcciones simples (F). Estructura ubicada en el polígono La Sierra.....	233
Figura 130. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono La Sierra.	234
Figura 131. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	235
Figura 132. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	236
Figura 133. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	238
Figura 134. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	239
Figura 135. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	240
Figura 136. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono de La Sierra.....	241
Figura 137. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono La Sierra.....	242
Figura 138. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono La Sierra.....	243

Figura 139. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono de La Sierra.	244
Figura 140. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	245
Figura 141. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	246
Figura 142. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	247
Figura 143. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	248
Figura 144. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	249
Figura 145. Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la La Meditadora.	251
Figura 146. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.....	252
Figura 147. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.....	253
Figura 148. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	254
Figura 149. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	255
Figura 150. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	256
Figura 151. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	257
Figura 152. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	258
Figura 153. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	259

Figura 154. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	260
Figura 155. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	261
Figura 156. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	262
Figura 157. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	263
Figura 158. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	264
Figura 159. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	265
Figura 160. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La meditadora.	266
Figura 161. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	267
Figura 162. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	270
Figura 163. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	271
Figura 164. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vías por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	272
Figura 165. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	273
Figura 166. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.	274
Figura 167. Mapa de riesgo por polígono del polígono La Sierra.	277

Figura 168. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	278
Figura 169. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	279
Figura 170. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	280
Figura 171. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	281
Figura 172. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.	282
Figura 173. Riesgo por inundación de la quebrada La Meditadora	283
Figura 174. Mapa de Aptitud geológica para el polígono La Sierra.....	287
Figura 175. Análisis estabilidad perfil 1. Solución final condición estática.	291
Figura 176. Análisis estabilidad perfil 1. Solución final, condición pseudoestática.	292
Figura 177. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.	293
Figura 178. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición pseudoestática.	294
Figura 179. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición estática.	295
Figura 180. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final, condición pseudoestática.	296
Figura 181. Análisis estabilidad perfil 4. Solución final condición estática.	297
Figura 182. Análisis estabilidad perfil 4. Solución final, condición pseudoestática.	298
Figura 183 Perfil 5 obra propuesta estático.....	299
Figura 184 Análisis de estabilidad perfil 5 obra pseudoestático.	300
Figura 185 Análisis de estabilidad perfil 6 obra estático.....	301
Figura 186 Análisis de estabilidad perfil 6 obra pseudoestático.	302
Figura 187 Análisis de estabilidad perfil 7 obra estático.....	303
Figura 188 Análisis de estabilidad perfil 7 obra pseudoestático.	304

Figura 189. Localización de las obras proyectadas polígono La Sierra	305
Figura 190. Detalle de inclinómetro.....	312
Figura 191. Detalle de piezómetro de tubo abierto.....	313
Figura 192. Tensionamiento de anclajes.....	316
Figura 193. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.	320
Figura 194. Esquema de recomendaciones para taludes	321
Figura 195. Características de las cunetas	322
Figura 196. Forma de construcción de las cunetas propuestas	323
Figura 197. Esquema de bajantes	323
Figura 198. Características de los filtros propuestos.....	325
Figura 199. Resultados Flow Pro, pre dimensión hidráulica canal.	330
Figura 200. Elementos de una curva circular.	332
Figura 201. Ubicación en planta del canal proyectado.	334
Figura 202. Régimen de flujo saltante en un canal escalonado (tomado de Suárez, 2001).....	336
Figura 203. Perfil del canal proyectado en la quebrada La Meditadora.	337
Figura 204. Secciones transversales del canal propuesto.	337
Figura 205. Sección transversal en topografía del canal propuesto.	338
Figura 206. Localización en planta de las redes de alcantarillado planteadas.	343
Figura 207. Perfil longitudinal de la conducción planteada.	345
Figura 208. Detalles obra de encole y descole en conducción.	346
Figura 209. Secciones transversales sector canal en concreto proyectado.....	350
Figura 210. Secciones transversales obra de paso futura calle 56 B.	351

Figura 211. Secciones transversales zona de cruce en zona de calle 54 B.	352
Figura 212. Perfil del flujo a lo largo del canal, condición proyectada.....	353
Figura 213. Campo de profundidad escenario futuro.....	356
Figura 214. Comparación velocidades en zona de interés.....	358
Figura 215. Comparación profundidades en zona de interés.....	359
Figura 216. Esquema típico de obra de descole.....	366
Figura 217. Tipo cimentaciones para redes, según EPM.	368

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	21
Tabla 2. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	23
Tabla 3. Jerarquía geomorfológica regional	38
Tabla 4. Fotografías aéreas empleadas para el proceso de fotointerpretación..	48
Tabla 5. Perforaciones donde se reporta el nivel IB de la Dunita.....	58
Tabla 6. Perforaciones donde se reporta el nivel transición suelo roca de la Dunita	60
Tabla 7. Roca parcialmente meteorizada.....	61
Tabla 8. Flujo de lodos y escombros.....	63
Tabla 9. Distribución de la variable pendientes	66
Tabla 10. Clasificación geomorfológica del polígono La Sierra.....	70
Tabla 11. Configuración geométrica de la línea sísmica.	91
Tabla 12. Ubicación sondeos exploratorios.....	99
Tabla 13. Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.	101
Tabla 14. Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.	103
Tabla 15. Resultados de laboratorio Polígono La Sierra.	103
Tabla 16. Clasificación a partir del GSI.	106
Tabla 17. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos	108

Tabla 18. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico	110
Tabla 19. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del Depósito de vertiente.....	110
Tabla 20. Parámetros geomecánicos del estrato Depósito de vertiente.	110
Tabla 21. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.	111
Tabla 22. Parámetros geomecánicos del horizonte IB de Dunita.....	111
Tabla 23 Parámetros de laboratorio para la transición suelo roca.	112
Tabla 24 Parámetros estadísticos para la transición suelo roca.	112
Tabla 25 Parámetros geomecánicos Roca.....	113
Tabla 26. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos). 122	
Tabla 27. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño (Tomado Microzonificación sísmica Medellín, 2006)	123
Tabla 28. Valores de Kst/amax (Tomado NSR-10)	123
Tabla 29. Ubicación del sitio de control para análisis hidrológico.....	143
Tabla 30. Generalidades de la estación de precipitación utilizada.	145
Tabla 31. Parámetros morfométricos de la cuenca de interés.	148
Tabla 32. Tiempos de concentración para la cuenca estudiada.....	152
Tabla 33. Parámetros para la ecuación IDF de las estaciones utilizadas.	154
Tabla 34. Influencia de las estaciones en la cuenca de interés.....	154
Tabla 35. Intensidad de diseño y precipitación total de la lluvia para la cuenca de análisis.	155
Tabla 36. Número de Curva para los diferentes tipos de cobertura.	159

Tabla 37. Usos del suelo en la cuenca de análisis.....	160
Tabla 38. Número de Curva estimado para la cuenca de estudio.....	161
Tabla 39. Distribución en porcentaje de la lluvia con relación a la duración	164
Tabla 40. Distribución de la lluvia en el tiempo según el método asumido.	164
Tabla 41. Coeficientes de escorrentía según Chow, 1994.	168
Tabla 42. Coberturas y Coeficiente de Escorrentía (Ven Te Chow, 1994).....	169
Tabla 43. Corrección de Coeficiente de Escorrentía – Ven Te Chow, 1994.	169
Tabla 44. Comparación coeficiente de escorrentía por diferentes procedimientos.	170
Tabla 45. Caudales máximos estimados por diferentes métodos (m ³ /s).	170
Tabla 46. Caudales (m ³ /s) corrientes de estudio, quebrada La Meditadora.....	171
Tabla 47. Ecuación de Regresión de Caudales Máximos (PIOM, 2007).....	172
Tabla 48. Secciones usadas en la modelación hidráulica.	182
Tabla 49. Caudales usados en la modelación hidráulica en la corriente de estudio.	184
Tabla 50. Coeficiente de rugosidad de manning en cada tramo de interés (Cowan).	187
Tabla 51. Coeficientes de contracción y expansión.	189
Tabla 52. Resultados numéricos, obra de cruce calle 54 B, caudal POMCA.	196
Tabla 53. Resultados numéricos, caudal POMCA escenario actual.	197
Tabla 54. Socavación general para las quebradas de estudio.	203
Tabla 55. Unidades hidrogeológicas del centro y sur del Valle de Aburrá (Modificado de AMVA, 2013)	206
Tabla 56. Configuración geométrica de la línea geoelectrica.	210

Tabla 57. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_01.....	213
Tabla 58. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_02.....	215
Tabla 59. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_03.....	217
Tabla 60. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)	218
Tabla 61. Factores de seguridad condición estática	221
Tabla 62. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	269
Tabla 63. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	275
Tabla 64 Viviendas afectadas por obras propuestas.....	326
Tabla 65 Viviendas localizadas en zonas de alto riesgo no mitigable en el polígono La Sierra.....	327
Tabla 66. Definición del alineamiento para canal, zona calle 56 B.....	332
Tabla 67. Elementos geométricos de curvas en canal proyectado.	333
Tabla 68. Cotas de fondo en el canal propuesto.	335
Tabla 69. Validación de capacidad hidráulica para diferentes pendientes y diámetros.....	340
Tabla 70. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.	342
Tabla 71. Especificaciones de los tramos de tubería.	344
Tabla 72. Verificación de capacidad hidráulica para la conducción.	345
Tabla 73. Resultados numéricos, obra de cruce calle 56 B proyectada, caudal POMCA.	350
Tabla 74. Resultados, tramo E00 – C01 obra de cruce calle 54 B, caudal POMCA.	352

Tabla 75. Resultados numéricos, caudal POMCA escenario con obras.	353
Tabla 76. Elementos geométricos de curvas en canal proyectado (retomada del capítulo 15.3.1).....	361
Tabla 77. Cotas de fondo en el canal propuesto (retomada del capítulo 15.3.1).	362
Tabla 78. Coordenadas de ubicación para el canal.	364
Tabla 79. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.	365
Tabla 80. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.	366
Tabla 81. Especificaciones tramos de red de conducción quebrada La Meditadora.	367
Tabla 82. Especificaciones tubería en concreto con refuerzo (TITAN).	369

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Metodología
- Anexo 2. Registros de perforación
- Anexo 3. Resultados de laboratorio
- Anexo 4. Memoras de cálculo geotécnico
- Anexo 5. Fichas de vulnerabilidad
- Anexo 6. Hidráulica
- Anexo 7. Memorias de cálculo y diseños estructurales
- Anexo 8. Sísmica y geoelectrica

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Convenio No. 4600076515 de 2018 cuyo objeto es *“La identificación del riesgo de detalle en algunas zonas del municipio de Medellín”*, entre el Municipio de Medellín y la Universidad EAFIT, se realizaron los estudios de diferentes polígonos ubicados en las comunas 6, 7, 8, 9, 16 y en el corregimiento de Altavista.

Estos estudios, corresponden a los estudios de detalle requeridos para las zonas de condición de riesgo por el decreto Nacional 1077 de 2015 y por el decreto Municipal 1626 de 2015, e igualmente recoge el decreto Metropolitano 09 del 25 de mayo de 2012.

En el desarrollo de este proyecto, se realizaron discusiones metodológicas y de los resultados por parte de los grupos técnicos del Municipio de Medellín y la Universidad EAFIT, integrando la experiencia obtenida a partir de convenios anteriores, al igual que el conocimiento técnico y académico de los dos grupos en torno a los resultados esperados.

Los tipos de amenaza evaluada en los polígonos de interés, corresponden a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Para el polígono denominado La Sierra, las amenazas que definen la condición de riesgo en el Acuerdo 48 de 2014 – POT, corresponden a movimientos en masa e inundaciones, amenazas que fueron evaluadas en detalle en el presente estudio.

Además de la amenaza, se evaluó la vulnerabilidad física de acuerdo a las características de los elementos expuestos, (construcciones y líneas vitales), a partir de la definición de la fragilidad y la intensidad de los fenómenos que los podrían afectar.

Igualmente, se evaluó el riesgo, integrando la información de la amenaza y la vulnerabilidad. Este riesgo se determinó a nivel de cada elemento expuesto y a nivel de polígono, determinando de esta manera los polígonos de riesgo alto no mitigable, riesgo alto mitigable, riesgo medio y riesgo bajo.

Finalmente, de acuerdo a las condiciones encontradas en cada polígono, se definieron las acciones estructurales y no estructurales necesarias para la mitigación del riesgo y que una vez ejecutadas y monitoreadas permitirán reducir la amenaza o la vulnerabilidad y cambiar el nivel de riesgo donde fuera posible.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza sobre el flanco oriental del valle medio del río Aburrá, sobre las laderas de la microcuenca de la quebrada La Meditadora, en los barrios La Sierra y Las Estancias, de la comuna 8 – Villa Hermosa y sector de la vereda Media Luna del corregimiento de Santa Elena. El polígono denominado La Sierra, abarca un área de 6,28 ha (Figura 1) e incluye las áreas con condición de riesgos denominadas en el POT con los códigos 0815-3, 0815-4, 0815-5, 0816-1, 0817-1, 0819-1.

El área analizada corresponde a un polígono de forma irregular delimitado al occidente por la carrera 7E, -Cr 6E y luego por la Cr 5E entre las calles 56 B y 53 B; al sur por la calle 53B hasta su intersección con la quebrada La Meditadora, al oriente por la quebrada El Nato; al norte por la calle 54 AA hasta su intersección con la carrera 7E, continuando en dirección norte por la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, hasta las inmediaciones de la placa polideportiva (Figura 1).

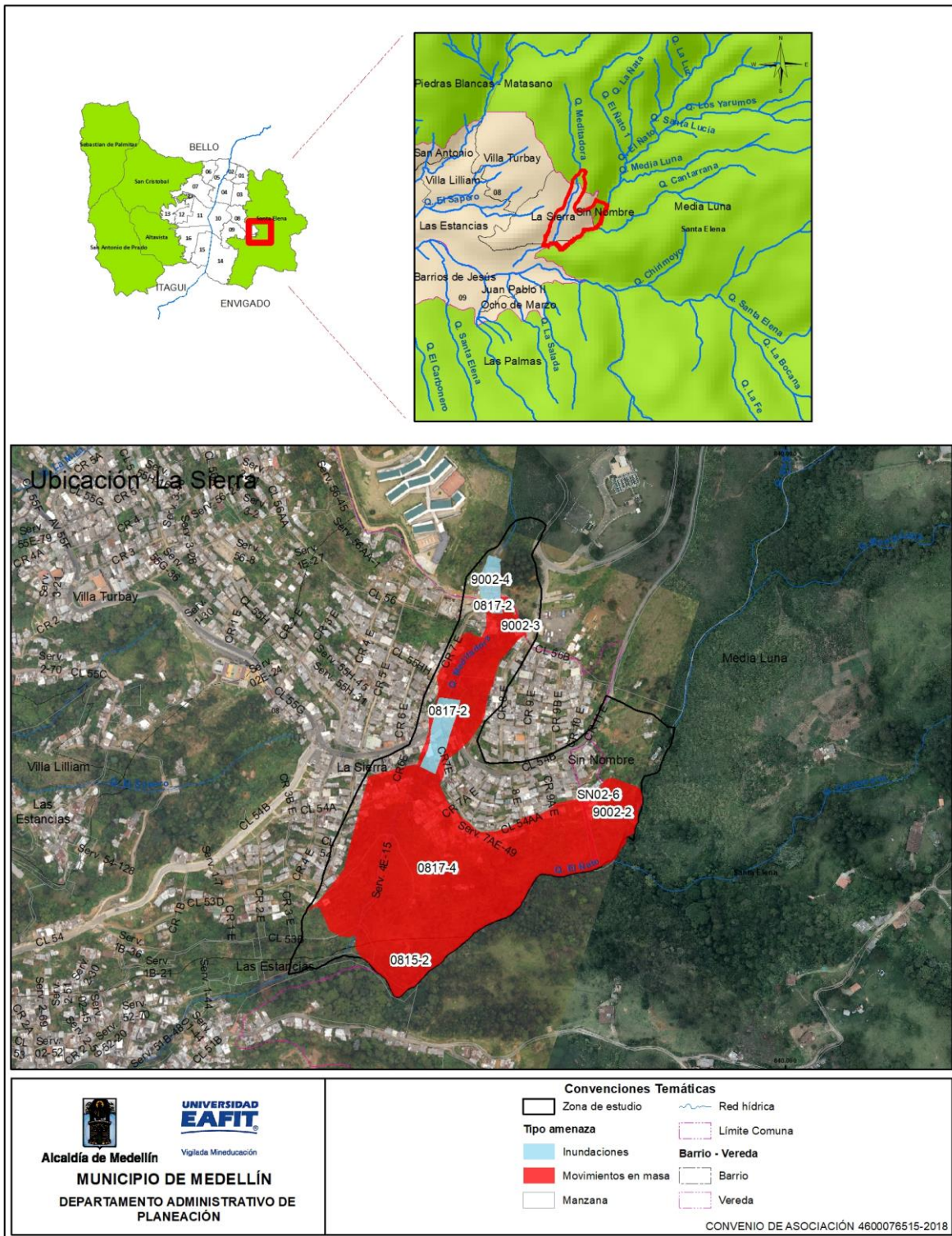


Figura 1. Localización general del polígono denominado La Sierra

3. METODOLOGÍA

Los procedimientos seguidos para realizar los estudios de riesgo de detalle por movimientos en masa e inundaciones, con sus respectivas medidas de intervención, se describen con detalle en el 1 “Documento metodológico”.

Cada componente tiene su propia metodología, la cual se describe brevemente a continuación.

3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO

De acuerdo al decreto nacional 1077 de 2015 y al decreto municipal 1626 de 2015, para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se utilizó la escala 1:2.000, específicamente se tuvo en cuenta la información de la restitución de la EDU, la información del POT de Medellín y levantamientos puntuales donde no se contó con esta. Para la amenaza por inundaciones se trabajó a una escala 1:500, para lo cual se realizaron levantamientos topográficos específicos de los tramos afectados por esta problemática; sin embargo, la escala de presentación fue 1:2.000.

3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El propósito de este capítulo consiste en la definición de la metodología empleada para generar los mapas de zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa mediante la utilización de métodos determinísticos, y cuyos procesos principales consisten en los siguientes: generación de mapas temáticos, exploración del subsuelo, estratigrafía, análisis de estabilidad, evaluación de la amenaza. A continuación, se explican cada uno de estos procesos:

3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base

En esta fase inicial se acopió y revisó la información disponible para la caracterización geológica y geomorfológica del área de interés. Los estudios de Microzonificación sísmica detallada realizados para Medellín y su área metropolitana, son la base para los análisis geológicos locales, además de otros informes realizados por diferentes entidades como se sintetiza en el capítulo 4.

3.2.2. Visitas de reconocimiento.

Con el objeto de realizar un reconocimiento de los sectores o polígonos con “condición de riesgo” a estudiar, se realizó una visita de reconocimiento con el supervisor del Departamento Administrativo de Planeación Municipal y profesionales de la Universidad. En estas visitas se discutió la delimitación de las unidades morfológicas independientes UMI con base en los criterios definidos por el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 y la ubicación de las perforaciones y sus cantidades, se dieron las recomendaciones sobre cada uno de los polígonos en función de sus características particulares y se plantearon acciones generales a ejecutarse por parte de la Universidad.

3.2.3. Generación de mapas temáticos

Durante este proceso se recopiló la información cartográfica disponible sobre cada uno de los mapas temáticos o mapas índices empleados en el desarrollo de esta metodología, los cuales en este caso correspondieron a geología y formaciones superficiales, geomorfología, pendiente y procesos morfológicos.

Las UMI fueron delimitadas por el grupo de profesionales del proyecto de las áreas de geología, geomorfología, geotecnia, hidrología e hidráulica a la escala de trabajo, de acuerdo a los lineamientos establecidos en el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012.

Geología y formaciones superficiales: para el desarrollo de esta variable fue necesaria la realización de un mapa preliminar, para el cual se utilizó como insumo base la cartografía geológica existente a escala 1:10.000 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la cual fue actualizada y redelimitada con base en la información obtenida del análisis de sensores remotos y la interpretación fotografías aéreas donde fue posible identificar unidades principalmente cuaternarias y estructuras geológicas.

Durante el trabajo de campo y con el objetivo de obtener información de detalle del suelo y subsuelo para la zonificación de amenazas en el área de estudio, se realizó la caracterización y mapeo de las unidades geológicas y formaciones superficiales a escala 1: 2.000 a partir del mapa preliminar, de acuerdo a la disponibilidad de afloramientos y los sondeos exploratorios. La clasificación de las unidades de suelo y definición del grado de meteorización de la roca se basó en el perfil de meteorización de Deere & Patton (1971).

Geomorfología: la construcción de los mapas geomorfológicos primero correspondió a la generación de un mapa preliminar donde se delimitaron los elementos geomorfológicos usando la información básica disponible como información secundaria, análisis de sensores remotos y fotografías aéreas, mapas topográficos, mapa de pendientes y un modelo de elevación digital (MED).

La caracterización y jerarquización geomorfológica se basó en la definición presentada en el estudio “Microzonificación sísmica detalladas del Valle de Aburrá, a escala 1:10.000” (AMVA, 2007). Para la caracterización de la morfología de los elementos geomorfológicos, se utilizaron los atributos de inclinación, longitud y forma de la ladera.

Morfometría: para este estudio de amenaza por movimientos en masa a escala detallada se utilizó la pendiente como variable morfométrica. La definición del mapa de pendientes se realizó en porcentajes, que representa la tangente del ángulo de inclinación del terreno.

Inventario de movimientos en masa: para la generación del mapa de amenaza por movimientos en masa, la cartografía de los procesos morfodinámicos ocurridos en el área de estudio representa uno de los insumos básicos con el fin de identificar las condiciones dinámicas, la continuidad y recurrencia de eventos y su distribución dentro de cada zona.

Para el desarrollo de esta variable fue igualmente necesaria la realización de un mapa preliminar, en donde se incluyeron los procesos morfodinámicos identificados a partir del análisis de fuentes secundarias como bases de datos del DAGRD, SIMMA, Desinventar, Planeación Municipal y demás estudios que se han realizado en la zona. Adicionalmente, se incluyeron los procesos identificados durante la etapa de análisis de sensores remotos.

Este mapa preliminar fue verificado, ajustado y redefinido de acuerdo con las condiciones actuales vistas durante el trabajo de campo. El producto final es la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o polígonos.

3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

La exploración del subsuelo se realizó a partir de métodos directos e indirectos. Exploración directa: el programa de exploración del subsuelo para conocer las condiciones geotécnicas se realizó de acuerdo a la extensión de cada sector y a las

problemáticas detectadas, las cuales alcanzaban profundidades que permitían generar el modelo geológico – geotécnico para la evaluación de la estabilidad y determinación de la amenaza por movimientos en masa.

La metodología de exploración consistió en la ejecución de perforaciones de pequeño diámetro (entre 65 y 100 mm). En los sondeos exploratorios se ejecutó el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m en los materiales de suelo, donde esto fuera posible y se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar “Split Spoon”; adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada “Shelby”. Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar columnas estratigráficas utilizadas posteriormente para correlacionar la distribución espacial de los materiales.

Exploración indirecta: las técnicas de geofísica aplicadas estaban orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encontraban en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica, etc. La prueba utilizada en el presente estudio fue la conocida como MASW 2D (Análisis multicanal de onda superficial) la cual sirvió para determinar el perfil de velocidad de las ondas de corte Vs.

Resultados y análisis de laboratorio: las muestras recuperadas en campo fueron clasificadas visualmente en el momento de ejecución de los sondeos para posteriormente ser enviadas al laboratorio, donde el geólogo responsable del proyecto las revisó, evaluó, caracterizó y correlacionó con respecto a la información recuperada en campo, con la finalidad de definir las muestras representativas de cada unidad estratigráfica, a las cuales se les practicaron los ensayos de identificación de sus propiedades de estado (humedad natural – límites de consistencia – índice de plasticidad), y parámetros de resistencia (compresión simple o confinada y corte directo).

A las muestras alteradas se les realizaron ensayos de límites de plasticidad, granulometría y humedad natural, con el fin de obtener su clasificación con base en el sistema USCS.

3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

De acuerdo con la información de campo obtenida de la exploración geotécnica, los recorridos de los geólogos y los análisis de laboratorio, se levantó la estratigrafía del sector y a las unidades se les asignaron los parámetros geotécnicos.

Estratigrafía: concluida la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustaron y complementaron los perfiles topográficos representativos de la estructura del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo a las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Parámetros geomecánicos: la definición de estos parámetros se realizó a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios, del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos, de las pruebas en campo y laboratorio como la prueba SPT adelantada in-situ y los ensayos de caracterización como granulometrías, límites de Atterberg, humedad natural y corte directo, de acuerdo a los estratos identificados. Al analizar esta información en conjunto fue posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

Con la información anterior y con los resultados de los ensayos de laboratorio se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presentaron en campo y que se evidenciaron durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtuvo un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y ángulo de fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis los parámetros geomecánicos característicos para cada material.

3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos

Con base en la determinación de la estratigrafía para cada perfil topográfico seleccionado por parte de los geólogos, se plasmaron las condiciones geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los polígonos, incluyendo en el mismo, los parámetros anteriormente definidos, al igual que las condiciones de nivel freático.

3.2.7. Evaluación de la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales se plasmaron las

condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores.

Para evaluar la estabilidad de cada sector se consideraron tres situaciones: inicialmente se analizó el modelo para el caso estático, seguidamente se realizó el análisis bajo consideraciones normales y extremas de lluvia y posterior a esto se evaluó el comportamiento del terreno bajo sollicitaciones sísmicas, obteniendo los factores de seguridad de cada superficie de falla, verificando el cumplimiento de los valores mínimos planteados por el decreto municipal 1626 de 2015

La condición sísmica se simuló considerando la actuación de fuerzas sísmicas que dependen del coeficiente de aceleración pico efectiva (A_a) dado para cada municipio por la NSR-10 y bajo las consideraciones además del estudio de microzonificación sísmica para el área urbana de Medellín (1999).

3.2.8. Análisis de la distancia de viaje

La distancia de viaje o Run-Out se determinó siguiendo la metodología propuesta por Guimarães (2015), donde se tomó en cuenta la distancia de la masa del deslizamiento a partir del cálculo de parámetros geométricos, tomando las siguientes variables y su relación con la expresión:

$$Z = \frac{H}{d}$$

Dónde:

H= Es la relación o diferencia de cotas entre el punto de desprendimiento del material y la parte más baja de la vertiente, es decir, los valores de cota máxima (C_{Tmax}) y cota mínima (C_{Tmin}).

d= Es la distancia entre el punto de desprendimiento del material y un pixel con un valor de cota mínima determinado.

Z= Se asocia al isocontorno formado por las diferentes trayectorias o valores de d resultantes.

Los puntos críticos o zonas desde las cuáles se pudo generar un desprendimiento de materiales en la parte alta de las laderas analizadas, se determinaron a partir de los resultados obtenidos en los análisis de amenaza. Una vez realizado este proceso y en conjunto con las diferencias de cotas obtenidas a partir del MDE, se

aplicó la ecuación para cada uno de los puntos analizados, obteniendo como resultado la generación de un isocontorno con diferentes probabilidades de trayectoria de desplazamiento.

Para el presente estudio se tomó el valor del cociente aplicado entre la variable H y la d , a partir de 0.4, ya que este concentra hasta el 90% de probabilidad de las trayectorias, por lo tanto, el isocontorno arrojado no se asocia en sí a la trayectoria del material, sino que se entiende en términos de probabilidad.

3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Para el correcto desarrollo de la zonificación de amenaza por movimientos en masa se tuvo como principal criterio los parámetros establecidos en el decreto 1626 de 2015, basados en la información de detalle obtenida de la inspección de campo y la exploración del subsuelo para posteriormente calcular los factores de seguridad al deslizamiento de cada perfil. Estos modelos requirieron de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se tomó de acuerdo a lo planteado en el decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo. Para el caso seudoestático se consideró que factores por encima de 1.1 garantizan la estabilidad de la ladera, siendo este criterio utilizado en la práctica general.

Los resultados de los análisis de estabilidad se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

3.3. AMENAZA POR INUNDACIONES

Los análisis para esta amenaza se realizaron con base en los estudios hidrológicos e hidráulicos.

3.3.1. Hidrología

El estudio hidrológico se llevará a cabo mediante la estimación de los parámetros morfométricos para así calcular las tormentas de diseño para la cuenca; a partir de esta información se hallará las crecientes de diseño mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias sintéticas de Clark, Soil Conservation Service y Snyder, así como la aplicación del método racional probabilístico.

El procesamiento modelo del terreno y morfometría se realizó con base en modelos digitales de elevación y con estos se obtuvieron las cuencas hidrográficas. Se usó el software HidroSIG 4.0 el cual es un paquete que modela algunas variables hidrometeorológicas, genera cuencas y con la unión de algoritmos determina un balance hidrológico a largo plazo.

3.3.2. Hidráulica

El estudio hidráulico evaluó los cambios de las variables hidráulicas a través de los canales naturales de ríos y quebradas. Para ello se implementaron los caudales de diseños que fueron calculados en el estudio hidrológico de las cuencas, teniendo como caudal de diseño el estimado para el periodo de retorno de 100 años para el caso de la amenaza por inundación. Este aumento de caudal fue usado para considerar el arrastre de grandes volúmenes de sedimentos, recomendaciones presentada en el estudio: Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Aburrá – POMCA, adelantado en el año 2007, por la comisión conjunta (UNALMED et al., 2007).

Teniendo como base los caudales de diseño y el levantamiento topográfico de los canales y márgenes en las corrientes de interés, se implementó el modelo HEC – RAS V 5.0 (U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2002) para obtener los cambios en la velocidad, profundidad, número de Froude, niveles máximos de inundación y zonas afectadas por dicha situación, entre otras variables, en toda la longitud de las corrientes, información que se presenta de forma gráfica (secciones transversales con la lámina de agua), o como tablas de resultados.

Para la caracterización sedimentológica de la corriente se propuso el procedimiento “Conteo Aleatorio de piedras” de Wolman (1954) en Chow et. al, (1994) para obtener una distribución granulométrica del material del lecho en una corriente de gravas. De igual forma, se tomaron muestras de material fino, procedente de las barras de la corriente, las cuales permitieron obtener parámetros para la estimación de la profundidad de socavación de la corriente

Condiciones geomorfológicas: durante este proceso se recopiló la información cartográfica disponible sobre cada uno de los mapas temáticos o mapas índices a emplear en el desarrollo de esta metodología, los cuales en este caso corresponden a geomorfología con énfasis en unidades de origen fluvial y fluvio – torrencial y levantamiento de depósitos torrenciales.

Geomorfología de depósitos aluviales y aluvio – torrenciales: para el desarrollo de esta temática se requirió la realización de mapas geomorfológicos a escala 1:2.000 para los tramos evaluados. La construcción de este mapa geomorfológico se dividió en dos etapas. La primera, correspondió a la generación de un mapa preliminar donde se delimitaron unidades geomorfológicas con énfasis en las asociadas a eventos aluviales y aluvio- torrenciales (planicies de inundación, terrazas aluvial y los abanicos aluviales recientes, en los tramos con evidencias de ocurrencia de avenidas torrenciales), usando la información básica disponible como información secundaria, análisis de sensores remotos y fotografías aéreas, mapas topográficos, mapa de pendientes y un modelo de elevación digital (MED).

Levantamiento de depósitos torrenciales: esta fase consistió en la verificación y levantamiento de perfiles estratigráficos en las zonas delimitadas desde el punto de vista geomorfológico como de origen aluvial o aluvio - torrenciales.

3.3.3. Zonificación de la amenaza por inundación.

Finalizados los análisis hidrológicos e hidráulicos, se definió como amenaza alta por inundación el área cubierta por la mancha de inundación correspondiente al periodo de retorno de 100 años.

3.4. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Para la evaluación de la vulnerabilidad por movimientos en masa e inundaciones se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), con la cual se caracterizaron los elementos expuestos y se evaluó la fragilidad de los mismos. Finalmente se estimó la intensidad para los escenarios de movimientos en masa lentos, rápidos e inundaciones de acuerdo a las características de cada una de las zonas en estudio. Es de anotar que, de acuerdo a la normatividad nacional y municipal, la vulnerabilidad evaluada fue únicamente la de tipo físico.

Para la definición de la vulnerabilidad física en los polígonos que comprendieron el área de estudio se realizó un análisis para las construcciones y para las líneas vitales.

3.4.1. Fichas de levantamiento de la información.

Esta etapa comprendió la revisión de la información secundaria, la generación de mapas que integraron la información de catastro y la red vial, además de la generación y validación de las fichas de levantamiento de la información. Estas últimas se modificaron a partir de la metodología del SGC (2015) y fueron adaptadas según las condiciones encontradas en los polígonos.

Las fichas elaboradas para el levantamiento de información y el diligenciamiento para su instructivo se encuentran en la carpeta de anexos y se enumeran a continuación:

- Ficha de levantamiento de construcciones
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Acueducto
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Energía
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Vías
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Alcantarillado

3.4.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo incluyó dos etapas, la primera de ellas relacionada con la validación y construcción de las fichas de levantamiento de información y la segunda, que comprendió el mayor porcentaje de las actividades de campo, estuvo asociada al diligenciamiento de las fichas en cada uno de los polígonos que incluyó un registro fotográfico de cada uno de los elementos. La identificación de las construcciones se realizó por medio del código catastral CBML (Comuna – Barrio – Manzana – Lote), cuando se presentaron viviendas nuevas en los polígonos, se les asignó un nuevo código CBML según la ubicación del lote, para permitir su referenciación y levantamiento.

Para el análisis de las líneas vitales, se realizó el levantamiento de la totalidad de ellas en el caso de las redes viales; mientras que para las de acueducto y alcantarillado su levantamiento estuvo supeditado a su visualización. Finalmente, las fichas de las estructuras relacionadas con las redes de energía se diligenciaron para aquellas que presentaron daños o algún tipo de deterioro.

Es de anotar que, para el levantamiento de las fichas de campo, se realizó un aplicativo digital, el cual garantizó la integridad de la información y la digitalización directamente en campo.

3.4.3. Análisis de la información

Una vez concluido el trabajo de campo, se realizó el procesamiento de la información, los distintos parámetros obtenidos permitieron la identificación y localización de los elementos expuestos, la evaluación de la fragilidad y la resistencia de cada una de las construcciones y las líneas vitales levantadas.

3.5. VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES

Para la evaluación de la vulnerabilidad por construcción como se mencionó anteriormente, se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), sin embargo, a esta se le realizaron algunos ajustes en función de incluir algunos factores que para el contexto de la ciudad de Medellín son importantes, como la inclusión del tema de servicios públicos específicamente acueducto y alcantarillado. De igual manera, fueron ajustados los valores de fragilidad de algunos factores, pues la aplicación en otros ejercicios anteriores, mostraban que eran muy restrictivos

3.5.1. Cálculo de la fragilidad

Para el caso de los elementos a evaluar (construcciones y líneas vitales) dependió de las características de estos.

Fragilidad para movimientos en masa: siguiendo la metodología propuesta por Li et al. (2010), modificada por Du et al. (2013), se consideraron cuatro parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones, relativos al tipo de estructura (S_{tip}), su altura (S_{alt}), su conservación (S_{con}) y su edad (S_{ed}), adicional a los anteriores, se adicionaron la fragilidad de acueducto y de alcantarillado, debido a la influencia de estos factores en la vulnerabilidad de las construcciones ubicadas en las laderas de la ciudad. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de la estructura (S_e) con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_e = 1 - \pi (1 - S_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip}) (1 - S_{alt}) (1 - S_{con}) (1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Fragilidad para inundaciones: se consideraron los mismos parámetros para la evaluación de la fragilidad de las construcciones asociadas a la; con la salvedad, de que la fragilidad asociada a la altura de la construcción presenta unos valores diferentes para este tipo de fenómenos, el cual estará expresado como S_{alt_inun} .

Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de la estructura (S_e) con la siguiente ecuación:

$$S_e = 1 - \pi (1 - s_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip}) (1 - S_{alt_inun}) (1 - S_{con}) (1 - S_{ed}) (1 - S_{Acueducto}) (1 - S_{Alcantarillado})$$

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5.2. Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.

Los parámetros de intensidad para este escenario de análisis, según la propuesta de Du et al. (2013), son la velocidad, las deformaciones locales y la profundidad del deslizamiento, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{len} = 1 - (1 - I_{l-def}) (1 - I_{l-vel}) (1 - I_{l-prof})$$

Donde

I_{len} es la intensidad para movimientos lentos. Un valor de intensidad de 1,0 indica que el evento tiene el potencial de destruir todos los elementos en su trayectoria.

I_{l-def} es el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen asentamientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones. El parámetro de intensidad I_{l-def} se da para la relación de estas deformaciones con respecto a los umbrales tolerables según la tipología de la edificación.

I_{l-vel} es el parámetro de intensidad por velocidad.

I_{l-prof} es el parámetro de intensidad por profundidad de la masa deslizada. Para edificaciones localizadas sobre deslizamientos activos, el grado de daño depende principalmente de la profundidad relativa de la cimentación de la estructura con respecto a la profundidad de la superficie de falla.

En el anexo metodológico se encuentra las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5.3. Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones.

En términos generales, la intensidad de los movimientos en masa en este escenario se definió en función de su profundidad y de la presión de impacto según la siguiente ecuación la ecuación propuesta por Du et al. (2014):

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof})$$

I_{rap} es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos.

I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura.

I_{f-prof} es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5.4. Intensidad de las inundaciones en edificaciones.

De igual manera que para los movimientos en masa, la intensidad de las inundaciones se definió en función de la profundidad de la lámina de agua y de la presión de impacto según la siguiente ecuación:

$$I_{inun} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof_inun})$$

I_{inun} es la intensidad para el escenario de inundaciones

I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del fluido y la presión límite soportada por la estructura.

If-prof_inun es el parámetro de intensidad por la profundidad de la lámina de agua o del fluido. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad de la lámina de agua o del fluido y la altura de la edificación.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.6. VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES

De manera análoga, la evaluación de la vulnerabilidad en las construcciones para las líneas vitales se calculó la fragilidad de acuerdo a la característica de cada línea y posteriormente la intensidad.

Para los diferentes fenómenos amenazantes, la fragilidad se consideró igual y la intensidad si presenta variaciones de acuerdo al fenómeno.

3.6.1. Fragilidad en líneas vitales

La fragilidad en las líneas vitales se evaluó para las redes viales, de acueducto y alcantarillado y energía, esta última evaluada a partir de los postes.

Fragilidad en vías: para evaluar la fragilidad en las vías se consideraron los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y daños. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de las vías con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_{vías} = 1 - (1 - S_{mat})(1 - S_{dr})(1 - S_{da})$$

$$S = S_i \cdot \text{Factor incidencia}$$

Dónde *S_{mat}* es el factor de fragilidad por material/tipo; *S_{dr}* es el factor de fragilidad por existencia de obras de drenaje y *S_{da}* es el factor de fragilidad por existencia de daños en el tramo de estudio.

Fragilidad en acueducto: para evaluar la fragilidad en el acueducto se consideraron los parámetros de operador de red, el estado, el diámetro, la deflexión y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del acueducto con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_{acued} = 1 - (1 - S_{operad \text{ de red}})(1 - S_{estado})(1 - S_{diám})(1 - S_{mat})$$

Dónde *Soperad de red* es el factor de fragilidad por operador de red; *Sestado* es el factor de fragilidad por estado, *Sdiam* es el factor de fragilidad por diámetro y *Smat* es el factor de fragilidad por material.

Fragilidad en alcantarillado: para evaluar la fragilidad en el alcantarillado se consideraron los parámetros de operador de red, el estado y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del alcantarillado con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Salcant} = 1 - (1 - \text{Soperador de red})(1 - \text{Sest})(1 - \text{Smater})$$

Donde *Soperador* de red es factor de fragilidad por operador de red, *Sest* es el factor de fragilidad por estado de red y *Smater* es el factor de fragilidad por material

Fragilidad en la energía: para evaluar la fragilidad en la energía se consideraron los parámetros de carga y estado de las redes. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad con la ecuación que se presenta a continuación, que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Senergía} = 1 - (1 - \text{Scarga})(1 - \text{Sestado})$$

Donde *Scarga* es el factor de fragilidad por carga de red y *Sestado* es el factor de fragilidad por estado de la red.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.6.2. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos

Para el cálculo de la intensidad por movimientos en masa lentos para líneas vitales, se siguió la metodología propuesta por el SGC (2015), en donde se empleó el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen hundimientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones.

Intensidad en vías: para el caso de vías, de acuerdo con los niveles de daño definidos para los pavimentos flexibles y rígidos en las guías de inspección visual del Invías (2006 a y b), el umbral tolerable de deformación es 40 mm.

Intensidad en acueducto: considerando que el deslizamiento impone una carga uniforme a lo largo del tubo, los umbrales tolerables están dados por la ecuación

$$\delta = 0,0075 \frac{1}{D}$$

Con el diámetro D en metros.

Intensidad en alcantarillado: teniendo en cuenta las características de las uniones de las tuberías de gres, se definió un umbral tolerable de 5 cm.

Intensidad en energía: para este caso se utilizó la mitad de la flecha máxima permitida para el diseño de los postes, correspondiente al 3 % de la altura nominal de estos.

3.6.3. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos

Para este tipo de eventos según el SGC (2015), en las vías se contemplaron los parámetros de intensidad en función del ancho invadido, para redes de acueducto y alcantarillado los desplazamientos inducidos al terreno y para las redes de electricidad la presión ejercida por masa deslizada sobre los postes.

El parámetro de intensidad de la amenaza para redes viales se definió a partir del ancho de vía invadido u ocupado por la masa deslizada.

Para evaluar la intensidad en redes de acueducto y alcantarillado, con un escenario de movimiento rápido de la masa inestable, se estableció el parámetro en función de la relación de desplazamientos inducidos y el umbral tolerable, como se definió para movimientos lentos (SGC, 2015).

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para calcular cada uno de los parámetros.

3.6.4. Intensidad en líneas vitales para inundaciones

La intensidad para las inundaciones está en función de la velocidad y la altura de la lámina de agua. En la metodología anexa se presentan los parámetros de intensidad para cada una de las líneas vitales.

3.7. VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS

La evaluación de la vulnerabilidad en las personas, se desarrolló a partir de la metodología planteada por el SGC (2015). Sin embargo, como el inventario de elementos expuestos se realizó por construcción y no correspondió a un censo de población, se tomó para su cálculo el número de personas promedio por vivienda del barrio.

La vulnerabilidad física de personas se evaluó en conjunto con la vulnerabilidad de edificaciones). Para este trabajo, la fragilidad de personas en estructuras se determinó en función de la fragilidad de tales estructuras, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_{per} = (S_e)^{3.2}$$

Donde S_{per} es la fragilidad de las personas.

La intensidad en las personas se evaluó de la misma manera que se evaluó para las construcciones.

3.8. CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es función de la fragilidad y de la intensidad del evento amenazante, para su cálculo se evaluaron las metodologías propuestas por Guimarães (2015) y por Du et al. (2013, 2014, en SGC, 2015). Los resultados de las metodologías son muy similares, siendo un poco más conservadora la metodología de Du et al, la cual fue empleada para este estudio y la cual se resume en la siguiente ecuación.

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1 - S \end{cases}$$

Dónde:

V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza

I es la intensidad del evento

S es la fragilidad del elemento expuesto

Los rangos dados a la vulnerabilidad fueron: para vulnerabilidad baja valores menores de 0,1, para vulnerabilidad media valores entre 0,1 y 0,5, y para vulnerabilidad alta valores superiores a 0,5.

Se definieron las categorías de vulnerabilidad para personas en edificaciones basados en Li et al. (2010), Du et al. (2013) y Coburn (2002, en Du et al., 2013). Para el cálculo y la zonificación de la vulnerabilidad en las personas, se partió de la misma ecuación y se tomó el valor de S como la fragilidad de las personas.

3.9. EVALUACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo se realizó para cada uno de los elementos expuestos (construcciones y líneas vitales) en función de definir acciones puntuales de mitigación y para los polígonos de análisis en función de definir restricciones de uso desde la planificación.

3.9.1. Riesgo por Elementos Expuestos.

El riesgo es función de la amenaza y la vulnerabilidad, para fines cartográficos se definió la siguiente regla de decisión para determinar el nivel de riesgo para los elementos expuestos, la cual ha sido modificada del decreto 1626 de 2015 (**Tabla 1**).

Tabla 1. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

La regla de decisión utiliza los valores de los rangos de amenaza y vulnerabilidad definida en los componentes anteriores. De igual manera, en función de determinar la probabilidad de que se generen daños y su magnitud a partir de la vulnerabilidad y el fenómeno amenazante, se realizó la estimación de la probabilidad anual para la amenaza. Para el caso de los movimientos en masa esta probabilidad anual estuvo en función de los periodos de retorno de los eventos de lluvia que tienen una incidencia sobre los movimientos en masa y de los sismos, para el cual se trabajó con el periodo de retorno de 475 años. Para la amenaza por inundaciones fue en función del periodo de retorno de 100 años. El valor de la amenaza se multiplicó con

la vulnerabilidad y de esta manera se obtuvo el indicador de riesgo por elemento expuesto.

Para el riesgo por personas se aplicó esta misma tabla de decisión y la cantidad total de personas en riesgo se evaluó a partir de un valor promedio de habitante por vivienda en cada barrio. Es de anotar que el número de personas en riesgo es un estimado, ya que no se realizó un censo de población.

3.9.2. Riesgo por Polígono.

Para realizar la evaluación de riesgo por polígono para movimientos en masa, se revisaron varias metodologías como la de Cardinali et al., (2002) y de Fell y Hartford (1997). Finalmente, a partir de los posibles escenarios y de integrar la magnitud de la amenaza, que depende de la velocidad y la profundidad, con la probabilidad de que se presente el fenómeno, obtenida de la amenaza o del análisis de estabilidad, se elaboró la siguiente regla de decisión. Es de anotar que la condición de mitigabilidad de una zona está en función no solo de las características de la amenaza y la vulnerabilidad, sino de la relación costo beneficio (Tabla 2).

Los parámetros de magnitud y probabilidad de la amenaza, se combinaron en la regla de decisión generando un criterio para determinar la zona de riesgo. Ahora bien, el nivel de mitigabilidad está en función de la relación de los elementos expuestos, específicamente de su cantidad y calidad, con los costos de las obras de mitigación, por lo tanto, la definición de mitigabilidad se hizo de manera particular para cada polígono estudiado y no obedece a una regla de decisión fija.

Para la inundación, el riesgo por polígono se definió en función de la velocidad del flujo y la altura de la lámina de agua, tomando como base La Metodología para la Formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (Universidad Nacional de Colombia et al., 2003). El grado de mitigabilidad estuvo en función de la relación costo beneficio de los elementos expuestos respecto a las obras de reducción del riesgo. Es de anotar que, si las zonas de amenaza por inundación se localizan en los retiros de quebrada, las viviendas localizadas en estos sectores no podrán ser legalizadas, por lo tanto, no se podrán realizar obras en este sentido.

Tabla 2. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Alta	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Media	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Baja	0.7	Bajo
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Alta	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Media	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Baja	0.4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0.1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0.1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0.1	Bajo

Los parámetros de magnitud y probabilidad de la amenaza, se combinaron en la regla de decisión generando un criterio para determinar la zona de riesgo. Ahora bien, el nivel de mitigabilidad está en función de la relación de los elementos expuestos, específicamente de su cantidad y calidad, con los costos de las obras de mitigación, por lo tanto, la definición de mitigabilidad se hizo de manera particular para cada polígono estudiado y no obedece a una regla de decisión fija.

4. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para la elaboración de este documento, se tuvo en cuenta la información secundaria recopilada en varias instituciones, tales como el Departamento Administrativo de Planeación, Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia. La información utilizada se sintetiza a continuación, donde se indica cuáles son los datos más relevantes y de utilidad para el proyecto.

Título	Estudio hidrometeorológico y geomorfológico de 10 quebradas del Valle de Aburrá
Autor (es)	Juan José Montoya y Jorge Eduardo Patiño, para optar al título de maestría en Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT
Año	2001
Localización de referencia: Cuencas de las quebradas Santa Elena y la Iguañá	
Resumen: Se realizaron los estudios hidrometeorológicos, geomorfológicos y edafológicos de las cuencas estudiadas para elaborar los mapas de amenaza por inundación y avenidas torrenciales. Adicionalmente, se implementó una base de datos georeferenciada con la información secundaria y primaria en los estudios hidrometeorológicos con el fin de simular el comportamiento de las cuencas con modelos de precipitación – escurrimiento.	
Como anexo para cada una de las cuencas y sus principales afluentes se presentan los parámetros morfométricos, el mapa de usos del suelo, formaciones superficiales y los análisis hidrológicos e hidráulicos.	
Observaciones: Levantamiento de depósitos aluvio – torrenciales identificados en los cauces de las quebradas y los mapas de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años superpuesta con información de viviendas e infraestructura.	

Título	Mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas en la jurisdicción de Corantioquia
Autor (es)	Corantioquia
Año	2002
Localización de referencia: Jurisdicción de Corantioquia	
Resumen: Este mapa representa la geomorfología de los municipios que conforman la jurisdicción de Corantioquia, organizada de forma jerárquica a escala 1:100.000, donde se tienen en cuenta el origen de las unidades. Además, se presenta el mapa de amenazas y áreas degradadas, donde se señalan las áreas prioritarias para la intervención de la corporación.	
Observaciones: La jerarquización establecida en el mapa geomorfológico de Corantioquia permite amarrar los a niveles regionales los mapas geomorfológicos de cada polígono.	

Título	Plan de ordenación y manejo (PIOM) de la microcuenca de la quebrada Santa Elena. Municipio de Medellín
Autor (es)	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Año	2006
Localización de referencia: Municipio de Medellín, Vertiente oriental	
<p>Resumen: El estudio diseña e implementa una metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas urbanas (PIOM), específicamente para las fases de diagnóstico, formulación e instrumentación para la quebrada Santa Elena.</p> <p>El objetivo principal de éste informe fue determinar las características físicas, biológicas y socioeconómicas de la microcuenca de la quebrada Santa Elena, y detallar la problemática de uso y manejo de sus recursos naturales y elementos ambientales, como el suelo, la vegetación, la fauna, el agua, el aire y los residuos sólidos, entre otros, y, de esta manera justificar y sentar las bases para la formulación del plan de ordenación y manejo de la Microcuenca.</p> <p>Dentro de la caracterización física se incluye el análisis de riesgo encaminado en la evaluación, caracterización y cartografía de las condiciones de amenaza por fenómenos naturales, específicamente movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, y el cruce de los Mapas resultante con las condiciones de vulnerabilidad física y social para determinar los niveles de riesgo que presenta la Microcuenca.</p> <p>Observaciones: Realiza dentro de su fase de diagnóstico la caracterización física entre los que contempla la caracterización geológica, geomorfológica e hidráulica que aportan información para el marco regional del presente estudio.</p>	

Título	Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado
Autor (es)	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Año	2007
Localización de referencia: Municipios del Valle de Aburrá	
<p>Resumen: Un estudio detallado de la geología, geomorfología, neotectónica, geotecnia y de la amenaza sísmica para los municipios del Valle de Aburrá, permitieron obtener la Microzonificación Sísmica detallada de estos municipios. Se define para el municipio de Medellín que la aceleración máxima en el basamento rocoso con un periodo de retorno promedio de 475 años es de 0,22 g y se pueden presentar desplazamientos máximos del terreno de 22 cm.</p> <p>Observaciones (Pertinencia para el estudio): Información básica de geología y geomorfología escala 1:10.000, de la cual se parte para detallar a escala 1:2.000 en los polígonos objeto de estudio.</p>	

Título	Plan de ordenación y manejo (PIOM) de la microcuenca la quebrada Santa Elena
Autor (es)	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Año	2007
Localización de referencia: Cuenca de la Quebrada Santa Elena	
Resumen: El estudio diseña e implementa una metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas urbanas (PIOM), específicamente para las fases de diagnóstico, formulación e instrumentación para la cuenca de la quebrada Santa Elena.	
Observaciones: Realiza dentro de su fase de diagnóstico la caracterización física entre los que contempla la caracterización geológica, geomorfológica e hidráulica que aportan información para el marco regional del presente estudio.	

Título	Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión
Autor (es)	Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín
Año	2009
Localización de referencia: Valle de Aburrá	
Resumen: objeto es la realización de una Zonificación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales; en este capítulo se presenta el informe técnico correspondiente al proceso de elaboración de la Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa, teniendo en cuenta como detonante principal la lluvia. La metodología empleada está basada en una herramienta computacional conocida como redes neuronales artificiales (RNA), la cual está siendo cada vez más empleada en la solución de problemas que involucran gran cantidad de variables con bases de datos.	
Observaciones: Teniendo en cuenta lo anterior se pretende obtener como resultado un mapa que evalúe de manera probabilística la amenaza por movimiento en masa para el Valle de Aburrá, y refinar el modelo para el municipio de Medellín con el fin de obtener un mapa más detallado. Basta aclarar que, para lograr dicho objetivo en el municipio de Medellín, se refinaron la base de datos, se agregaron las variables permeabilidad y curvatura, y se hizo uso de la metodología descrita anteriormente, con lo cual se obtuvo un mapa probabilístico de amenaza por movimiento en masa con un detalle de 1:5000.	

Título	Descripción de zonas homogéneas - Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2011
Localización de referencia: Municipio de Medellín	

Resumen: Después de entrar en vigencia la norma NSR-2010 y el estudio de Microzonificación sísmica del 2007, se definieron 14 zonas homogéneas para el municipio de Medellín de acuerdo con el comportamiento particular de los diferentes tipos de suelos frente a los sismos. También se presenta el mapa con la distribución espacial de estas zonas y los coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño para cada una de éstas, valores que corresponden a la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno.

Observaciones (Pertinencia para el estudio): De esta información se obtiene el valor de aceleración máxima en el terreno para el sismo para los análisis geotécnicos de estabilidad de las laderas.

Título	Elaboración de estudios geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, de estabilidad de laderas, análisis de la vulnerabilidad estructural de las edificaciones y diseños de obras en zonas vulnerables de las comunas 1, 8 y 13 del municipio de Medellín
Autor (es)	GEOCING
Año	2013
Localización de referencia: Comuna 8 – sector Enciso (calle 59 A con carrera 22 A)	
<p>Resumen: Este documento presenta la recopilación de información, la interpretación de las observaciones realizadas durante la fase de reconocimiento en campo, indicando características geológicas – geotécnicas de la zona de estudio, que corresponde a dos sectores incluidos dentro de la UMI. Dentro de los elementos realizados dentro de este estudio, se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> Definición de las características geológicas y geomorfológicas Identificación de procesos de inestabilidad actual y potencial, estableciendo los mecanismos de falla presentes, área de influencia y grado de actividad. Identificación de factores contribuyentes y detonantes de los procesos de remoción en masa. Zonificación de amenazas por movimientos en masa de acuerdo a análisis geotécnicos. Identificación de la vulnerabilidad estructural de las viviendas ubicadas en la zona Elaboración de los diseños para construcción de las obras recomendadas, soportados técnicamente en los análisis de ingeniería, representados en planos y esquemas. 	
<p>Observaciones: Para los polígonos se realizaron 2 perforaciones de 20m cada una de ellas, 12 trincheras y 4 líneas sísmicas, las cuales se utilizan como referencia para los análisis de este proyecto. Para los perfiles analizados se plantea la colocación de Anclajes de 10 Ton, de 15 m de longitud cada 3.0 m instalados con un ángulo de 15° con la horizontal</p>	

Título	Formulación, planificación y estudios técnicos del proyecto cinturón verde metropolitano, en el área perteneciente al municipio de Medellín, Escala Media : Formulación de planes maestros del cinturón verde metropolitano en Medellín / Empresa de Desarrollo Urbano ; Departamento Administrativo de Planeación
Autor (es)	Empresa de Desarrollo Urbano (EDU)

Año	2013
Localización de referencia: Medellín	
<p>Resumen: El documento desarrolla el diagnóstico y la formulación de 14 planes maestros para las áreas del CVM. Se identificaron las problemáticas y potencialidades del territorio, se plantearon los objetivos y estrategias específicas para cada tipo de borde, y se establecieron las diferentes tipologías de proyecto. Así mismo se definieron los proyectos a priorizar para una intervención a mediano plazo (tomado de la metodología)</p>	

Título	Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín. Acuerdo 048 de 2014
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2014
Localización de referencia: Municipio de Medellín.	
<p>Resumen: Plan de Ordenamiento Territorial se consigna el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo urbano y rural del municipio de Medellín.</p>	
<p>Observaciones: El acuerdo 048 de 2014, define las zonas con condiciones de riesgo y las zonas de amenaza alta, que son objeto para la elaboración de los estudios de riesgo o de amenaza de detalle que definan su mitigabilidad o no. Dichos estudios, determinarán la posibilidad de desarrollo del suelo o su permanencia dentro de la categoría de suelo de protección. Una vez sean redelimitadas dichas zonas, les aplicarán las demás normas generales del polígono en el que se ubiquen.</p> <p>A partir del POT igualmente se determina la clasificación del suelo y se determinan las otras restricciones que desde el punto de vista ambiental exhiben cada uno de los polígonos estudiados.</p>	

Título	Estudios y Diseños técnicos para la ruta de campeones, segunda etapa, en el tramo Tinajas-Santa Elena, en el municipio de Medellín.
Autor (es)	Deacivil S.A.
Año	2015
Localización de referencia: Municipio de Medellín, Vertiente Nororiental	
<p>Resumen: En el documento se presentan todos los estudios exploratorios, directos e indirectos, y de los cuales se obtuvo la información para los diseños geométricos verticales y horizontales, diseños geotécnicos, estudios hidrológicos e hidráulicos, diseños hidrosanitarios, diseños de puentes y viaductos, diseños estructurales y estudios forestales</p>	
<p>Observaciones: Con la información recolectada, se zonifica la aptitud geológica, se estima la susceptibilidad y la amenaza a movimientos en masa, no se define el riesgo. Finalmente con toda la información recolectada y analizada, se entregan las cantidades de obra y las especificaciones técnicas de construcción.</p>	

Título	Gestión del riesgo y desastre en el Municipio de Medellín, Lecciones aprendidas
Autor (es)	Mario Augusto Flórez Arroyave
Año	2016
Localización de referencia: Municipio de Medellín	
Resumen: El libro presenta una recopilación y un análisis detallado de los principales eventos (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) que han ocurrido en la ciudad de Medellín desde el año 1954, con énfasis en los grandes desastres como Villatina, El Socorro, Alto Verde, etc, y a partir de los cuales se precisa en la ciudad el concepto de riesgos, a partir de una serie de estudios, proyectos y programas, para el manejo integral de la gestión del riesgo, los cuales han permitido su incorporación en el ordenamiento territorial y desarrollo de la ciudad.	
Observaciones: Los datos de obtenidos de esta información permite reportar los eventos ocurridos en cada polígono para entender el contexto de la morfodinámica del sector.	

Título	Inventarios de eventos reportados por el DAGRD y departamento de Planeación Alcaldía de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2017
Localización de referencia: Medellín	
Resumen: La información relacionada con visitas a diferentes sectores de la ciudad, donde han ocurrido emergencias por diferentes fenómenos (movimientos en masa, inundaciones, incendios, etc.) son consignadas en fichas y mapas que permiten tener construir un registro histórico de los eventos en la ciudad.	
Observaciones: Los datos de obtenidos de esta información permite reportar los eventos ocurridos en cada polígono para entender el contexto de la morfodinámica del sector.	

5. CARACTERISTICAS GENERALES

5.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se localiza sobre la vertiente oriental del Valle de Aburrá, donde el basamento rocoso y las rocas más antiguas se encuentran representadas por rocas metamórficas de edad Triásica denominadas Anfibolita de Medellín (TRaM) las cuales se presentan como una secuencia de rocas intercaladas que afloran especialmente asociados a salientes topográficos. Esta unidad de rocas, fue obducida durante el Jurásico por cuerpos alargados de composición dunítica, basaltos y sedimentos de origen marino, fuertemente afectados tectónicamente representados por la denominada “Dunita de Medellín (JKuM)”. Adicionalmente estas unidades han sido intruídas por las rocas ígneas de edad Cretácica representadas por el Stock de San Diego, además de un pequeño cuerpo del Stock de las Estancias. Finalmente y asociado a los procesos naturales que han afectado dicha vertiente se identifican una serie de materiales recientes de edad Cuaternaria, correspondientes a depósitos de vertiente asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y que se han acumulado en zonas de menor pendiente, representando una compleja secuencia de depósitos con edades desde el Terciario Tardío hasta el Cuaternario, además de depósitos aluviales y aluvio – torrenciales asociados a la dinámica depositacional de algunos cuerpos de agua como la quebrada Santa Elena y algunos de sus principales afluentes (Figura 2).

A continuación, se describen las características principales asociado a los materiales de roca que desde el punto de vista regional afloran en la zona de estudio.

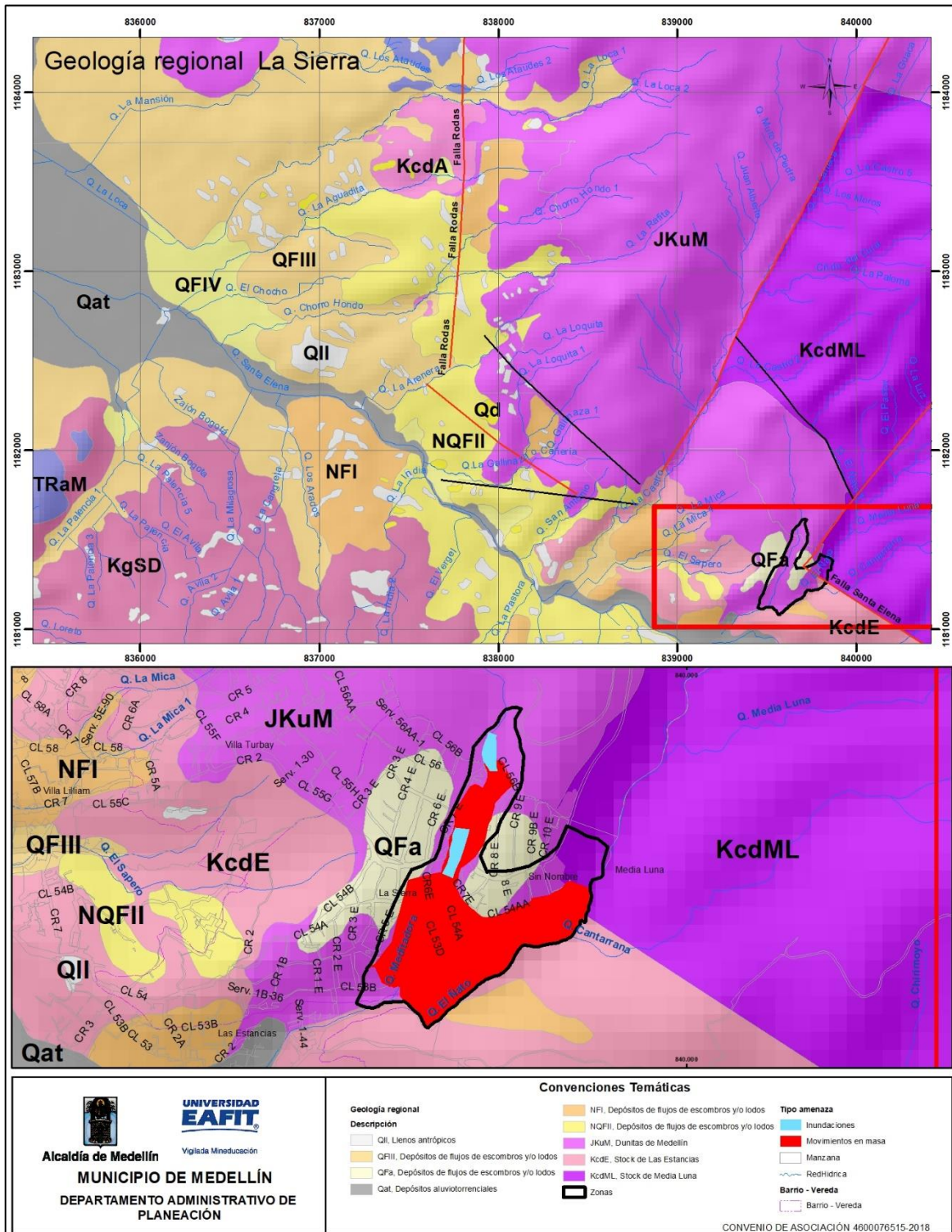


Figura 2. Mapa geológico regional. Tomado de AMVA - Alcaldía de Medellín, 2017

5.1.1 Estratigrafía

- **Anfibolita de Medellín (TRaM)**

Definidas por Jaramillo (1971), como Anfibolitas de Medellín, están incluidas dentro del Complejo El Retiro; posteriormente ha sido estudiada recientemente por Correa et al. (2005), Pereira et al (2006), Restrepo (2008) y Rodríguez et al. (2008), y proponen diferentes formas de agruparla con otros cuerpos metamórficos, origen y edad. En este trabajo se describe la unidad Anfibolitas de Medellín, en el sentido de Correa et al (2005) conservando la nomenclatura usada por AMVA (2007).

Estas rocas conforman un cuerpo elongado con dirección N – S, que se extiende el municipio de Belmira al norte hasta los municipios de El Retiro y La Ceja al sur. Está compuesta por metabasitas de alto grado asociadas localmente con paquetes de esquistos y paraneises cuarzo feldespáticos con biotita. Macroscópicamente la unidad se caracteriza por la presencia de pocas bandas cuarzo-feldespáticas de espesor milimétrico a centimétrico, y por lineación de anfíboles (Correa et al.; 2005). En general, la roca está profundamente meteorizada, desarrolla suelos residuales con espesores superiores a los 20 m, la textura es limosa y el color predominante es amarillento a amarillo rojizo. Se presentan comúnmente un cambio gradual a un saprolito limo arenoso de color gris verdoso con láminas blancas, el cual presenta estructuras heredadas de la roca parental y donde se define la textura de la roca bandeada. Con frecuencia están cubiertos por depósitos de vertiente derivados de estas mismas rocas (AMVA, 2007).

- **Dunitas de Medellín (emplazamiento) (JKuM)**

Conforman una faja en forma de cuña dispuesta NNW, ubicada al oriente del Valle de Aburrá, la cual se extiende desde el sector de las Palmas hasta el municipio de San Pedro. Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; con alteraciones parciales a minerales del grupo de la serpentinita y está asociada en su origen con los metagabros mencionados. La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto (AMVA, 2007).

Esta litología conforma las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del Valle de Aburrá (comuna nororiental), entre las que se incluyen las vertientes escarpadas. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que dependiendo de factores tales como el grado de fracturamiento del macizo,

inclinación de la vertiente, geoformas presentes y condiciones hidrológicas, presentan condiciones y características muy diversas, con espesores variables entre 10 y 40 m. Dichos suelos poseen capas con un alto contenido de hierro, evidenciado por la presencia hacia la superficie de gran cantidad de nódulos de este mineral. Hacia los horizontes más profundos del perfil se observa una mezcla de bloques residuales embebidos en una matriz de material fino, correspondiente a suelo residual, generando una apariencia de depósito de vertiente (AMVA, 2007).

- ***Batolito Antioqueño (KcdA)***

Mencionado inicialmente por Boussignault (1825) y posteriormente descrito por Ospina (1911). El nombre de Batolito Antioqueño fue dado por Botero en el año de 1940 (Ingeominas, 2001). Este cuerpo que está localizado en la parte central del departamento de Antioquia es el más grande y septentrional en la cordillera Central, aflora en un área de 7 221 Km² (Feininger y Botero, 1982). Ingeominas (2001) describe la forma del Batolito como trapezoidal; Feininger y Botero (1982) describen el piso del batolito como una superficie planar, quebrada en algunos lugares por intrusiones de fallas regionales. El contacto con rocas metamórficas regionales es discordante y tajante, generalmente intrusivo con desarrollo de aureolas de contacto, excepto contra anfibolita donde han tenido lugar algunas mezclas (Feininger y Botero, 1982).

- ***Stock de San Diego (KgSD)***

Descrito por Botero, 1963; quien lo consideró como una cúpula menor del Batolito Antioqueño. Posteriormente Restrepo y Toussaint (1984), lo clasifican como stock, determinan un área de unos seis kilómetros cuadrados y le dan el nombre de Stock de San Diego. Es un cuerpo plutónico constituido por rocas ígneas básicas que varían composicionalmente desde dioritas hasta gabros. Mineralógicamente se presentan plagioclasas y hornblenda principalmente, además de algún contenido de olivino y piroxenos. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada, desarrollando suelos residuales, que pueden alcanzar hasta 45 m de espesor, como en el área del Seminario Mayor. Dichos suelos son predominantemente limo - arcillosos, en tonalidades claras de amarillo y blanco con manchas pardas, variando comúnmente a arenas finas (AMVA, 2007).

- ***Stock de Media Luna (KcdML)***

Esta unidad hace parte de un cuerpo menor del Batolito Antioqueño, el cual es bastante similar en características físicas, composición y grado de meteorización con una composición cuarzodiorítica de textura fanerítica media. El contacto, con la Anfibolita de Medellín, se encuentra sepultado por un depósito de deslizamiento y por lo tanto se observa es un cambio geomorfológico.

Se desarrolla suelo (Horizonte IC) producto de la meteorización de la roca original, el cual se caracteriza por ser de color moteado blanco con tonalidades rojizas y amarillosas cuyo espesor visible es de siete metros. Éste se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que de Santa Elena conduce a Medellín (AMVA, 2007).

- ***Stock de Las Estancias (Kcd)***

Corresponde a cuerpos menores de granitoides que, aunque separados geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con éste. El Stock de Las Estancias es un cuerpo localizado entre los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado con esta unidad e intrusivo en anfibolitas, presenta una forma irregular con una extensión de 3,6 km², longitud mayor de dirección SW-NE de unos dos kilómetros y una amplitud NW-SE de 1,2 km (AMVA, 2007).

- ***Depósitos de vertiente (FI, FII, FIII)***

Un conjunto de depósitos no litificados que están intercalados con las rocas antes descritas se presentan en el área de interés. Se encuentran depósitos de diferentes edades, que de acuerdo con las características que exhiben en cuanto a grado de consolidación, madurez y grado de incisión son considerados de edades anteriores al Cuaternario y por medio de las relaciones entre ellos son agrupados por eventos. En este grupo se encuentran depósitos de flujos de escombros y/o lodos frescos y maduros y depósitos de deslizamiento.

Los flujos de escombros y/o lodos (NQFI, NQFII, QFIII, QFIV, QFa) representan una serie de eventos relacionados con depósitos de vertiente, donde los depósitos más antiguos se localizan en la parte media y alta de las laderas y los más jóvenes están en la parte baja de éstas. Estos depósitos se caracterizan por la variación en la relación matriz/bloques, la cual confiere el carácter de flujo de lodos o flujo de escombros a los eventos, y aunque esta proporción está muy relacionada con la

fuelle de donde se originaron los depósitos, también es frecuente encontrar una mezcla de ambos depósitos para un único evento. En términos generales se componen por un conjunto de bloques de roca que presentan diferentes grados de meteorización y están embebidos en una matriz más fina, por lo general arcilla o limo, que también puede estar meteorizada (AMVA, 2007).

Los depósitos de deslizamiento o depósitos coluviales (Qd), representan la acumulación de materiales producto de procesos de inestabilidad o movimientos en masa, y que se localizan sobre las vertientes donde hay zonas de baja pendiente y topografía suave (AMVA, 2007).

En general, los depósitos de flujo de lodo y/o escombros se caracterizan por presentar grandes diferencias en el grado de meteorización y mezclas caóticas (fabrica aleatoria) de fragmentos de roca (principalmente de origen Metamórfico) que varían de tamaño grava a bloques, embebidos en una matriz arcillosa principalmente, con una relación matriz - clastos muy variable (AMVA, 2007).

- ***Depósitos aluviales y aluvio - torrenciales (Qat)***

Son los depósitos encontrados en el fondo de los valles de los principales drenajes del sector; están dispuestos como franjas angostas, alargadas e irregulares a lo largo de las quebradas y se identifican por presentar una morfología suave. De acuerdo con su dinámica pueden ser de dos tipos: depósitos aluviales y depósitos aluviotorrenciales (AMVA, 2007).

Los depósitos aluviales (Qal) se presentan conformando las llanuras de inundación y terrazas aluviales de las corrientes. Son superficies suaves, generalmente planas, conformadas por clastos que tienen una selección moderada, alto grado de redondez y ligera imbricación (AMVA, 2007).

Los depósitos aluviotorrenciales (Qat) se caracterizan por su composición heterogénea, donde el tamaño de sus componentes varía desde bloques rocosos hasta arenas finas y limos. Estos depósitos están asociados a cuencas de montaña, donde los canales tienen altas pendientes y se desarrollan flujos turbulentos con alta energía, que moviliza materiales de diferente granulometría hasta encontrar zonas de pendientes suaves aledañas al cauce, donde se depositan los materiales (AMVA, 2007).

- **Llenos antrópicos (QII)**

Constituyen depósitos artificiales, con una composición muy heterogénea, incluyendo aquellos materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas, y materiales mixtos tales como basura, materia orgánica y escombros vertidos sin disposiciones geotécnicas adecuadas. También se consideran llenos antrópicos las acumulaciones artificiales realizadas para la construcción de obras de infraestructura (AMVA, 2007).

5.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se ubica en la zona más septentrional de la cordillera Central, asociada directamente al valle del río Medellín - Porce. La evolución geomorfológica se retoma para este estudio de la interpretación evolutiva es a partir del análisis desarrollado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el estudio de Microzonificación sísmica del Valle de aburra, donde jerarquiza el valle en unidades de Paisaje, Macrounidades y unidades geomorfológicas.

De acuerdo con la Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, la zona evaluada se localiza dentro de la unidad de paisaje denominada Valle de Aburrá – Valle Medio. En cada uno de las unidades se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas en este informe como Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes (Figura 3).

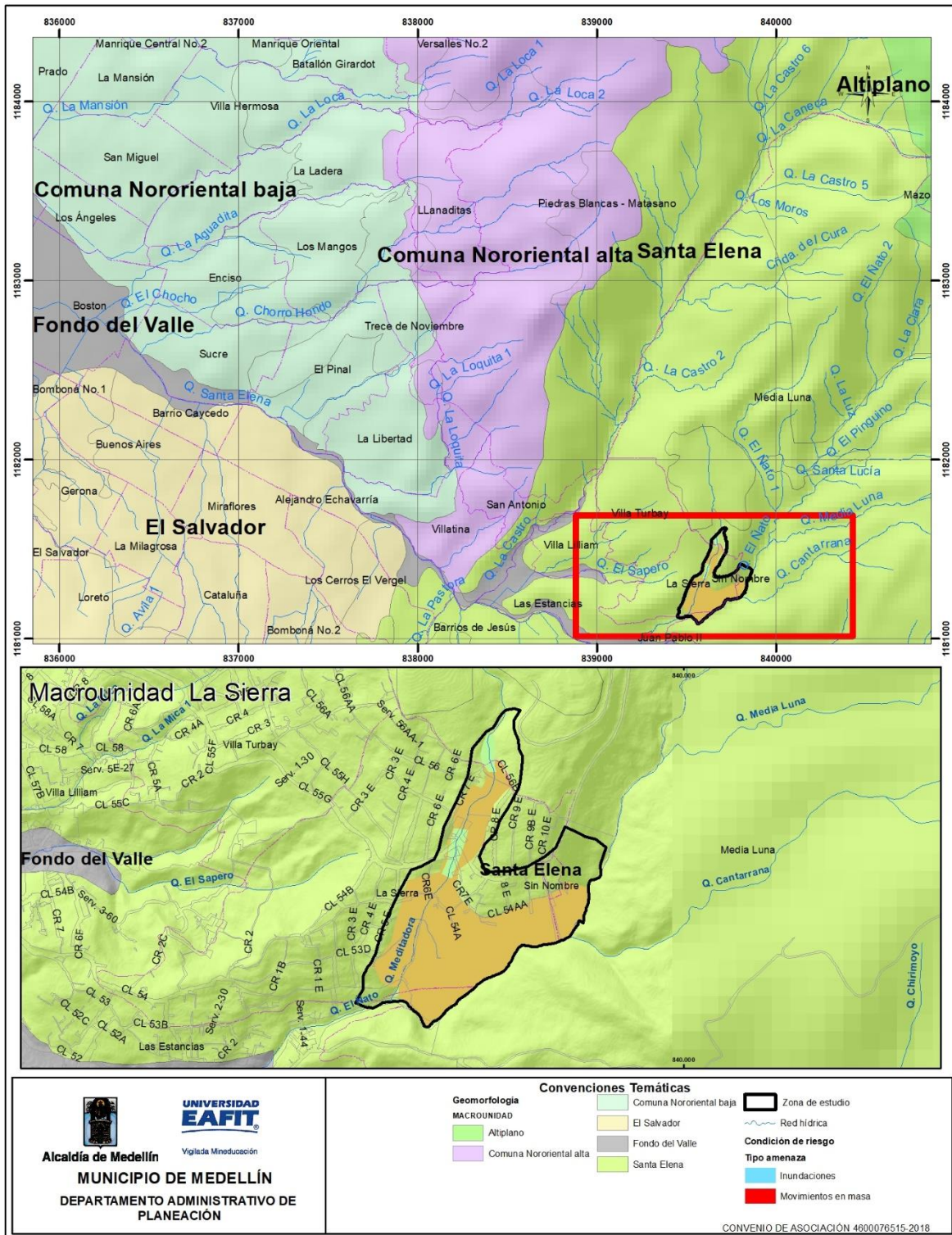


Figura 3. Macrounidades. Tomado de AMVA, 2007.

De acuerdo con esta metodología, la zona de estudio se encuentra enmarcada en la siguiente clasificación geomorfológica (Figura 4).

Tabla 3. Jerarquía geomorfológica regional

UNIDAD DE RELIEVE	UNIDAD DE PAISAJE	MACROUNIDAD	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Norte de la cordillera central	Valle de Aburra -Valle Medio (VM)	Bloque comuna nororiental Alta	Lomos
			Rasgos morfotectónicos
			Peldaño
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisada
		Bloque comuna nororiental Baja	Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisadas
		Bloque Santa Elena	Lomos
			Peldaños
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisadas
			Escarpes semicirculares superiores
		Bloque El Salvador	Lomos
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Vertientes en suelos residuales poco incisadas
			Picacho
		Bloque Fondo del Valle	Llanura Aluvial
			Superficies suaves en depósito poco incisada

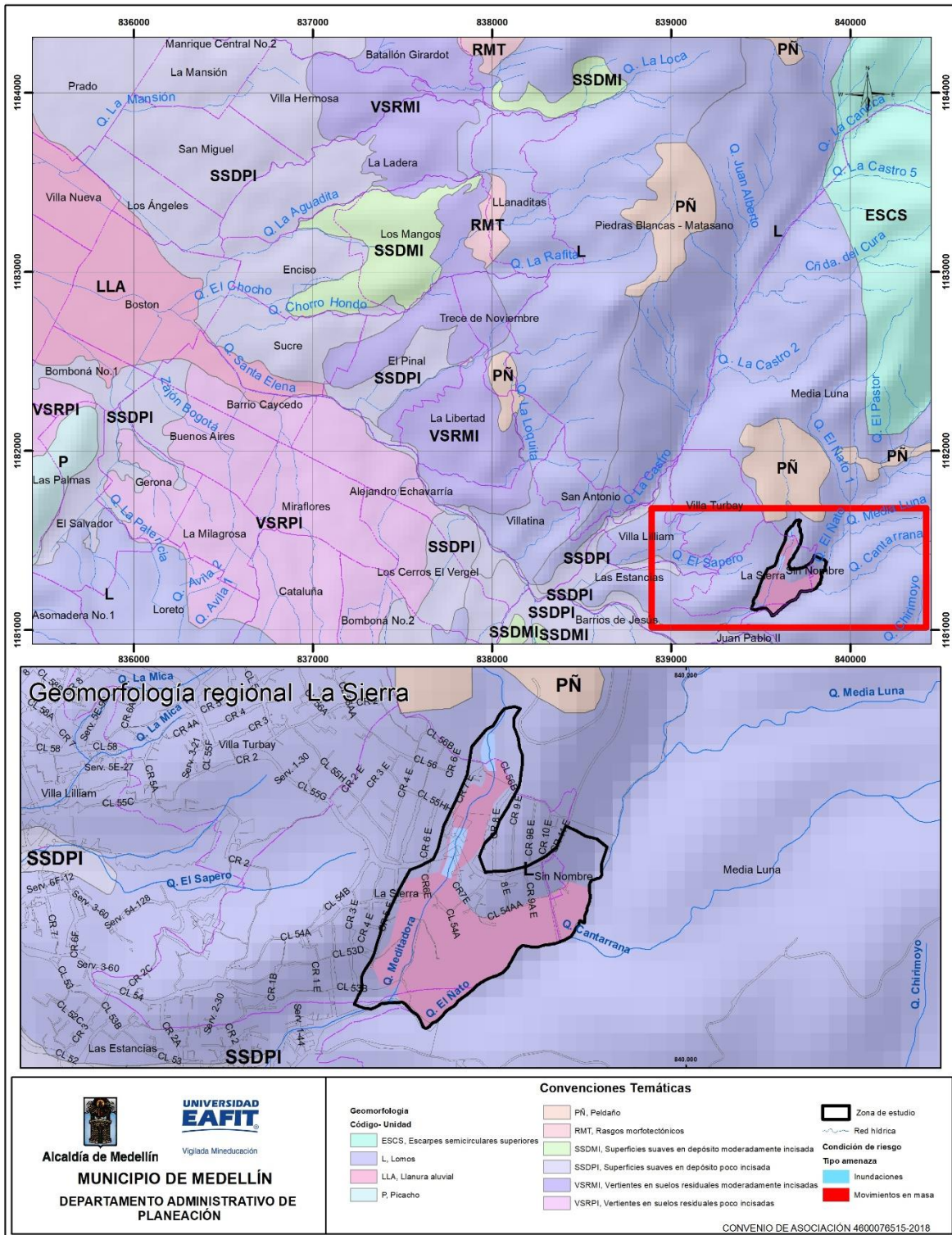


Figura 4. Geomorfología regional. Tomado de AMVA, 2007.

5.2.1 Valle de Aburrá Medio (VM).

Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. La zona estudiada, se localiza dentro de los bloques denominados como: bloque Comuna Nororiental Alta, Bloque comuna Nororiental baja, Bloque Santa Elena, bloque El Salvador y Bloque Fondo del Valle. Estas macrounidades se localizan sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá.

- ***Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA)***

Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural.

Está limitada al noreste por el cauce de la quebrada Rodas, que coincide con la traza de la falla de igual nombre; al sureste por el altiplano de Santa Elena; al sur por el filo que sirve de divisoria de aguas con la quebrada Chorro Hondo y al este por varias fallas (entre ellas la falla Manrique) de tendencia N-S, las cuales a su vez tienen asociado un marcado cambio morfológico. Esta franja de terreno involucra alturas desde los 2 600 msnm en inmediaciones de Santa Elena hasta los 1 750 msnm por debajo de los barrios San Blas y Santo Domingo Savio.

Dentro de este polígono predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello - Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente. El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares.

En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S y desarrolladas sobre suelos residuales de dunitas. Por su paralelismo con estructuras regionales

se interpretan como Peldaños, cuya correlación altitudinal con otras zonas suaves localizadas en esta misma vertiente y en las adyacentes debe ser motivo de investigaciones posteriores, de tal manera que se refine su modelo genético. En el sector de Santo Domingo Savio se presenta en medio de la vertiente un cerro de carácter regional, el cual tiene una base oval de tendencia N-S y laderas empinadas, el cual fue cartografiado como Picacho. Finalmente, hacia la parte baja de polígono y en estrecha relación espacial con las fallas N-S se identificaron una serie de facetas triangulares, definidas en este trabajo como rasgos morfotectónicos (AMVA, 2007).

- ***Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB)***

En estrecha relación con la macrounidad anterior se presenta otra franja de terreno de tendencia también N-S, localizada en la misma vertiente nororiental del Valle Medio, pero más abajo, ocupando terrenos entre los 1.750 y 1.450 msnm. Esta macrounidad está limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S, que coincide con un marcado incremento de la pendiente; al sur por la zona suave de los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada Santa Elena, al oeste y norte por el río Aburrá y/o sus depósitos aluviales asociados.

Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente por espesos suelos residuales de rocas ultrabásicas cizalladas y localmente por depósitos de vertiente; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas. Este tipo de morfología se extiende al sur siguiendo el borde oriental de la macrounidad. Al sur del polígono se presentan pendientes suaves que descienden hasta confundirse con el fondo del valle y cuya configuración morfológica indica una génesis depositacional, asociada a los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Dentro de estos materiales es factible identificar sectores con diverso grado de incisión. Por otro lado, dentro del polígono también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños (AMVA, 2007).

- ***Bloque Santa Elena (VM-BSE)***

Como su nombre lo indica esta macrounidad coincide con la parte alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, aunque vale la pena aclarar que las cabeceras de esta

corriente están por fuera del Valle de Aburrá. Este polígono tiene la forma semicircular característica de un frente erosivo, realizada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa el predominio de laderas empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2.650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos.

Sobre la vertiente sur (margen derecha de la quebrada Santa Elena), los lomos tienen orientación S-N a SSE-NNW, con topes redondeados, flancos convexos y vaguadas intermedias, estrechas y moderadamente entalladas. Por el contrario, los lomos de la vertiente norte exhiben topes agudos, flancos rectos, empinados y con vaguadas profundamente encañonadas (p.e. quebradas La Castro y Chorro Hondo); además, presentan orientación diversa con claros efectos tectónicos en la parte inferior, sector de Las Estancias y La Sierra, siguiendo los lineamientos cartografiados. Un rasgo característico de esta macrounidad es la presencia de descansos topográficos o zonas de pendiente suave en medio de las laderas, definidos en este trabajo como peldaños. Especial atención merece el ubicado sobre la vertiente derecha de la cuenca, con una altura de aproximadamente 1.900 msnm (centro de meditación Las Mercedes), el cual, por el fuerte control estructural en todos sus bordes, la morfología reinante y los espesores de suelos parece un bloque descendido desde los altiplanos circundantes. Esta hipótesis deberá ser objeto de investigaciones académicas más detalladas.

Finalmente, en la parte centro occidental del polígono, especialmente sobre la parte baja de la ladera izquierda (sector de Quinta Linda y Cauces de Oriente) se observan zonas de topografía ondulada e inclinaciones suaves, que corresponden a depósitos de vertiente con diverso grado de incisión.

- ***Bloque El Salvador (VM-BES)***

Corresponde a la margen izquierda de la cuenca baja de la quebrada Santa Elena, sobre el extremo occidental y el flanco norte del lomo regional que involucra los terrenos del Seminario Mayor de Medellín. Este polígono ocupa terrenos desde los 2100 y los 1500 msnm, con vertientes suaves a moderadas, cóncavas e irregulares; las cuales están constituidas por suelos residuales del Gabro de San Diego y depósitos de vertiente. Hacia la parte alta de la margen norte de la cuenca de la Santa Elena y toda la vertiente occidental (hacia el río Medellín) se presentan lomos

irregulares, poco incisados y de baja altura, con topes redondeados y amplios. Más abajo, cerca de la quebrada Santa Elena, se presenta una ladera regular poco incisada desarrollada en suelos residuales. En el extremo noroccidental de este polígono se presenta un cerro bajo, de vertientes moderadas, tope suave y amplio que resalta en el oriente de Medellín, denominado cerro El Salvador; el cual fue cartografiado como un picacho. En sus flancos, especialmente hacia la quebrada Santa Elena, se identifican una serie de laderas muy suaves, cuya configuración revela su origen depositacional (flujos de lodos y/o escombros) además de superficies en suelos residuales poco incisados (p.e. barrio Las Palmas). (AMVA, 2007).

- **Bloque Fondo de Valle (VM-BFV)**

Corresponde como su nombre lo dice, al fondo del valle del río, caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de deposición del río Medellín y su red de drenaje asociada.

Como parte de la identificación de las unidades geomorfológicas se presentan en el área de estudio las siguientes geoformas:

L - Lomos: Son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del área de estudio.

VSRMI - Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas: Son vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan. Afloran en el municipio de Medellín en la comuna nororiental, están enmarcadas en rocas duníticas y metagabros.

SSDPI - Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja.

SSDMI - Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderado.

RMT - Rasgos Morfotectónicos: Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos. Hacia el municipio de Medellín en límites con Bello se presentan pequeñas unidades asociadas con los rasgos tectónicos de la falla Rodas.

PÑ – Peldaño: Son geoformas relativamente continuas, con una pendiente suave a moderada. Se presentan en la parte alta de las zonas de estudio.

VSRPI - Vertientes en Suelos Residuales Poco Incisadas: Son pequeñas vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos, presentan un bajo grado de incisión. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan.

ESCS - Escarpes semicirculares superiores: Son geoformas ubicadas entre zonas escarpadas en superficies rocosas hacia los límites de los altiplanos, presentan además fuertes pendientes.

LLA - Llanura Aluvial: Esta unidad involucra el cauce y las riberas del río Aburrá y algunas de sus quebradas o tributarios principales como la quebrada Santa Elena. Es una forma continua, de pendientes suaves y topografía plana; contiene materiales producto de la sedimentación aportada por estas corrientes e incluye además algunos niveles de terrazas bajas.

P – Picacho: Son cerros o prominencias que se destacan en el paisaje, ubicados a diferentes alturas y con formas diferentes, sus pendientes son de moderadas a fuertes y localmente escarpadas.

5.3 TECTÓNICA REGIONAL

Debido a la localización en el flanco Oeste de la Cordillera Central, la tectónica del Valle de Aburra está dominada por las fallas del Sistema Cauca-Romeral; el cual atraviesa el territorio nacional con una dirección aproximada N-S. Este sistema está

compuesto por dos grupos de estructuras, hacia el oeste se tiene el sistema Cauca y al Este el sistema Romeral. Este último sistema es el más cercano a la ciudad de Medellín.

El complejo sistema de fallas N-S, del sistema de falla de Romeral involucra el flanco Oriental de la ciudad y las estribaciones de las superficies de erosión; posee una moderada a baja expresión geomorfológica en la cual se dificulta su observación por la presencia de lineamientos N-W y E-W que los desplazan (AMVA, 2007).

Rendón en 1999 plantea en el área Urbana de Medellín, la presencia de al menos tres grupos de estructuras tectónicas principales, las relacionadas con la obducción de una secuencia ofiolítica; las de tendencias N-S y las de tendencia N-W (AMVA, 2007).

Las estructuras tectónicas de obducción o cabalgamiento están relacionadas a un extenso cuerpo dunítico que cruza el sector Oriental de la ciudad con dirección general N-NE; el cual corresponde a una antigua escama de material ultrabásico oceánico, emplazado tectónicamente por un complejo proceso de obducción durante el Cretáceo Inferior (102 m.a., aproximadamente) sobre las anfibolitas (Restrepo, 1986). Asociadas a este fenómeno se desarrollaron una serie de estructuras tectónicas que marcan el contacto aproximadamente subhorizontal entre las dunitas y las anfibolitas (AMVA, 2007).

5.3.1 Sistemas de fallas.

A continuación se describen las características regionales, de las fallas reportadas a lo largo del corredor evaluado:

- **Falla La Acuarela**

Ingeominas (2007) propone este nombre a la falla de rumbo de N-S a N NW, que ha sido denominada por otros autores como falla Pericos y falla Rodas (Rendón, 1999; GSM, 1999), con el fin de diferenciarla de la falla de cabalgamiento de Rodas y de la falla Otú -Pericos. Ingeominas (2007) la propone con una longitud de 35 km y su continuidad hacia el norte con las trazas de falla del Sistema Belmira. Esta falla presenta una bifurcación y se presenta como dos trazas bien diferenciadas, desde la quebrada Las Palmas (Sector Paulandia) hasta la Curva de Rodas sobre la vía Medellín- Bogotá. Estos autores la describen como una falla en cola de caballo con dos trazas que localmente alcanzan una separación mayor a 1,1 km (AMVA, 2007).

Geomorfológicamente, la describen como una falla que presenta un fuerte cambio de pendiente, y alineamiento de drenajes (quebrada Rodas y quebrada Seca; quebrada Santa Elena y quebrada Espíritu Santo), forma además una depresión a lo largo de su traza y entre las dos trazas de la falla se forman colinas alongadas en sentido NS en los sectores de las veredas Pericos y Santa Elena. La traza occidental de la falla presenta rumbo NS y N15°W con buzamientos de 58°W a verticales, mientras que la traza oriental presenta valores entre N10°E y N10°W, y buzamientos entre 56° y vertical generalmente hacia el oriente. Le asignan un movimiento lateral izquierdo (AMVA, 2007).

- ***Falla de Rodas***

De dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y se ha determinado de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido (AMVA, 2007).

- ***Falla Santa Elena***

Documentada por Sierra y Zapata, 1989, como lineamiento Buenos Aires, y asociado a la Falla Santa Elena. Evidenciado por cambios notables de pendiente y facetas triangulares, hacia la parte baja del cerro El Gallo sobre el cauce de la quebrada El Viento, presenta una zona de unos seis metros de material cizallado y dirección EW a N80°NS/45°E y buzamiento subvertical (AMVA, 2007).

6. CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL SECTOR LA SIERRA

6.1 DEFINICIÓN DE LA UMI

Teniendo en cuenta que la unidad morfodinámica se define como aquella porción de terreno cuya estabilidad no depende del comportamiento de las zonas vecinas y complementariamente el caso inverso, es decir que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes. La delimitación de estas unidades morfodinámicas se fundamenta en la combinación de aspectos geomorfológicos e hidráulicos (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012) como son las divisorias de aguas, drenajes o expresiones geomorfológicas. La unidad o unidades morfodinámicas puede por lo general ocupar áreas de terreno mayor que el polígono de estudio, por lo cual será necesario evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de toda la unidad para determinar las afectaciones por fuera del polígono estudiado cuya influencia repercute negativamente en la estabilidad del mismo (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012).

Teniendo en cuenta las características anteriormente referenciadas, para el área de estudio se delimitan tres (3) UMIs de la siguiente forma (Figura 5):

UMI 1. Esta UMI se ubica sobre la margen derecha de la quebrada La Meditadora y los límites están definidos de la siguiente forma:

Por el oriente el límite lo define el cauce de la quebrada La Meditadora, por el sur por el canal de la quebrada El Ñato. Al occidente por la divisoria de aguas que forma un pequeño lomo que presenta una dirección preferencial SW-NE.

UMI 2. Esta UMI es contigua a la anterior y corresponde a la vertiente izquierda de la quebrada La Meditadora y los límites están definidos por:

Al oriente por la divisoria de aguas que marca un pequeño lomo que tiene una dirección preferencial SW-N.E. Por el sur por el canal de la quebrada El Ñato. Al occidente por el canal de la quebrada La Meditadora.

UMI 3. Esta UMI corresponde a la zona más oriental de la zona de estudio y está asociada a la vertiente derecha de la quebrada El Ñato; los límites están definidos por:

Al suroriente por el canal de la quebrada El Ñato, al occidente por la divisoria de aguas que marca un pequeño lomo que tiene una dirección preferencial SW-N.E. Al norte por un cambio en la pendiente en inmediaciones de la calle 54B y carrera 11E, continuando en dirección NW-SE por la divisoria de un pequeño lomo.

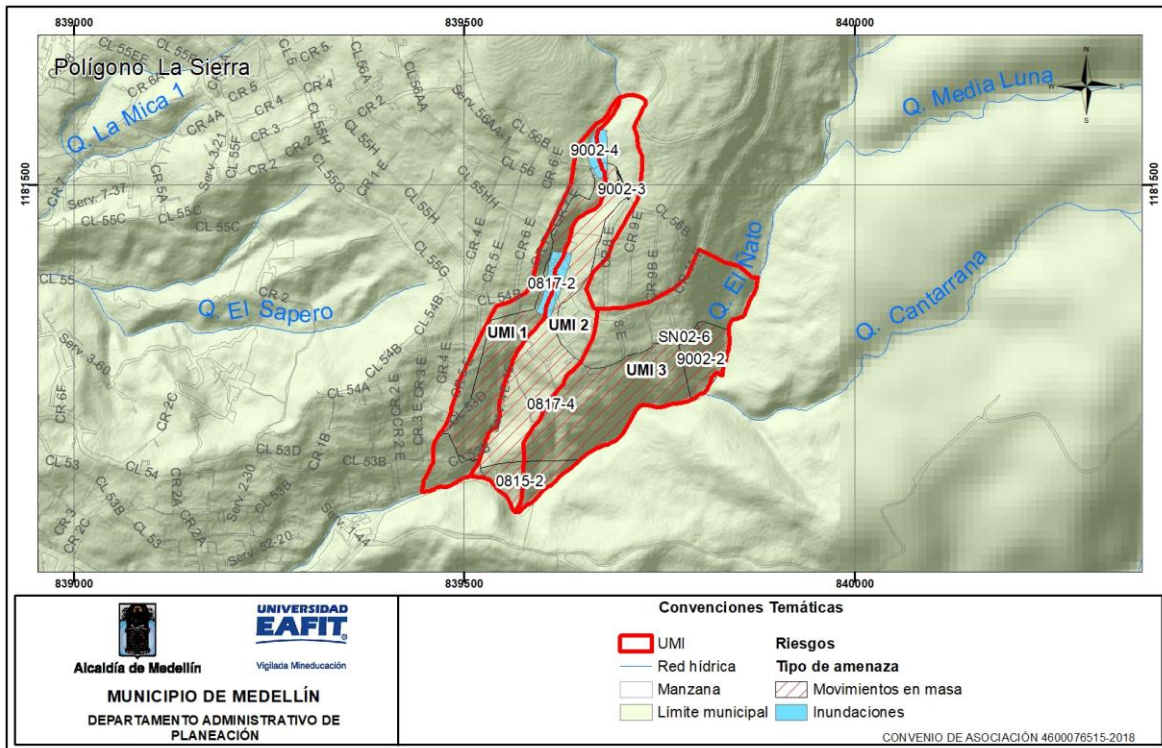


Figura 5. UMI definida para el polígono La Sierra

6.2 FOTOINTERPRETACIÓN

Se realiza la interpretación de sensores remotos a partir de un análisis multitemporal con fotografías aéreas y ortofotos que varían entre los años de 1983 y el 2016. Este análisis tiene como objetivo identificar las condiciones morfológicas, los procesos morfodinámicos y su evolución en el tiempo, al igual que las intervenciones de tipo antrópico. A continuación, se presenta el listado de fotografías aéreas empleadas, al igual que los mapas resultantes de este proceso para el área de estudio para cada uno de los años estudiados.

Tabla 4. Fotografías aéreas empleadas para el proceso de fotointerpretación

Zona	Vuelo	Faja	Fotos	Año
La Sierra			93 -94	1983

Zona	Vuelo	Faja	Fotos	Año
			151-152	1994
			725-725	2004
	Ortofoto cinturón verde			2010
	Ortofoto			2016

En el año 1983 la zona se encuentra intervenida por construcciones, apertura de vías y caminos, presenta amplias zonas verdes sin evidencia visible de movimientos en masa.

Geomorfológicamente se observan las dos laderas de la quebrada La meditadora caracterizadas por fuertes pendientes y buena cobertura vegetal, la intervención antrópica está relacionada a la parte alta de las mismas que corresponden a los topes de los lomos. La zona centro y oriental del polígono a la fecha se encuentra urbanizada hacia la zona central, sobre la parte alta de la ladera. La vertiente aledaña a la quebrada El Nato, no presentan intervenciones antrópicas de asentamientos, caracterizada por pendientes muy abruptas, poco incisadas y con cobertura predominante de rastrojo y arbustos; esta zona es de características muy homogéneas morfológicamente; para este año se observa la ocurrencia de procesos erosivos superficiales. (Figura 6).

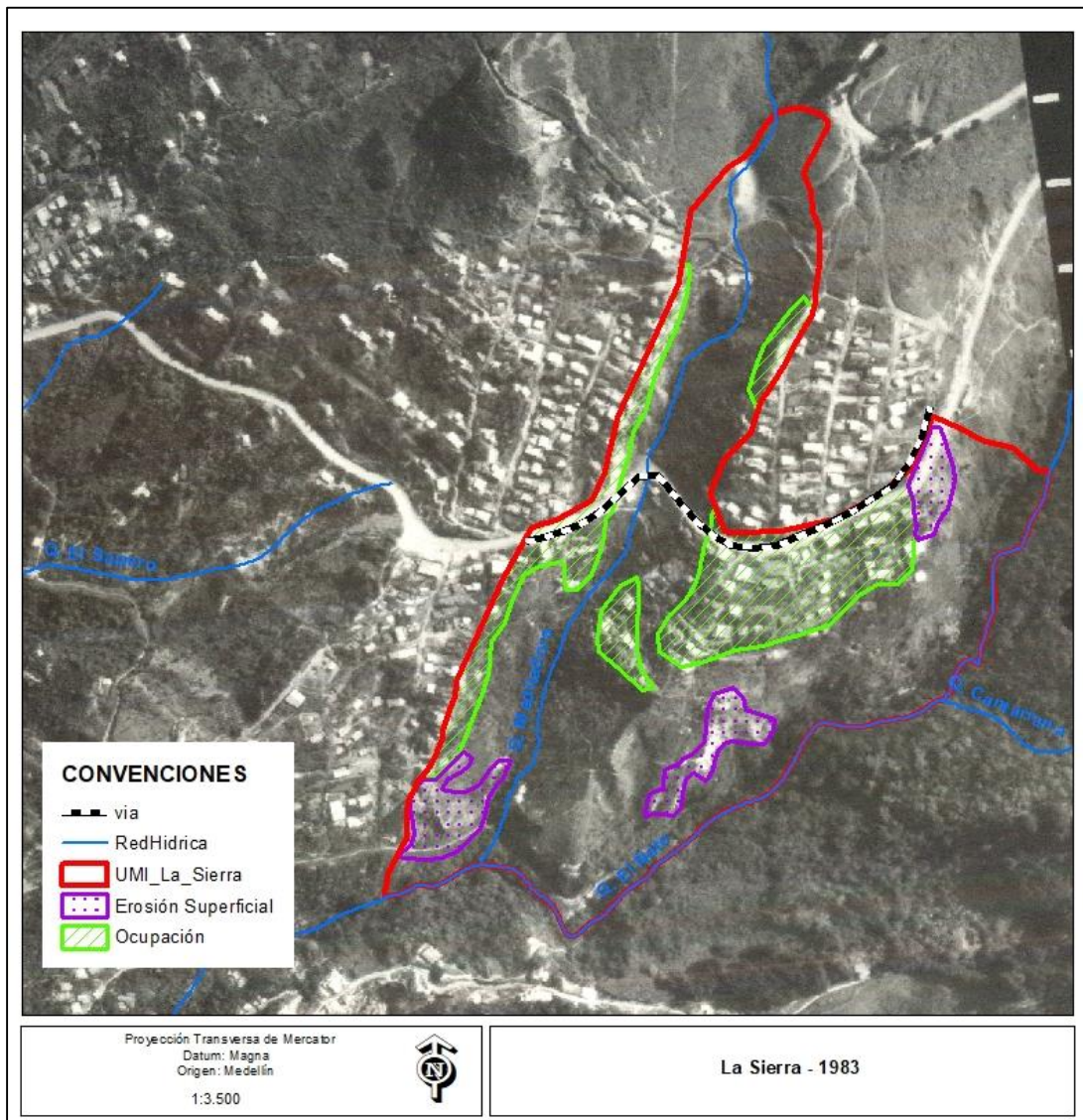


Figura 6. Fotografía aérea de 1983, polígono La Sierra

Para el año 1994, presenta características muy similares a las del año 1983, la urbanización del barrio está un poco más consolidada. Hacia la vertiente de la quebrada El Ñato se observa unas pequeñas zonas sin cobertura vegetal, que puede estar asociado a intervenciones para la construcción. Geomorfológicamente, no presentan cambios morfológicos significativos, conservan las características de pendiente fuerte, forma cóncavas y cobertura de rastrojos y arbustos del análisis anterior (Figura 7).

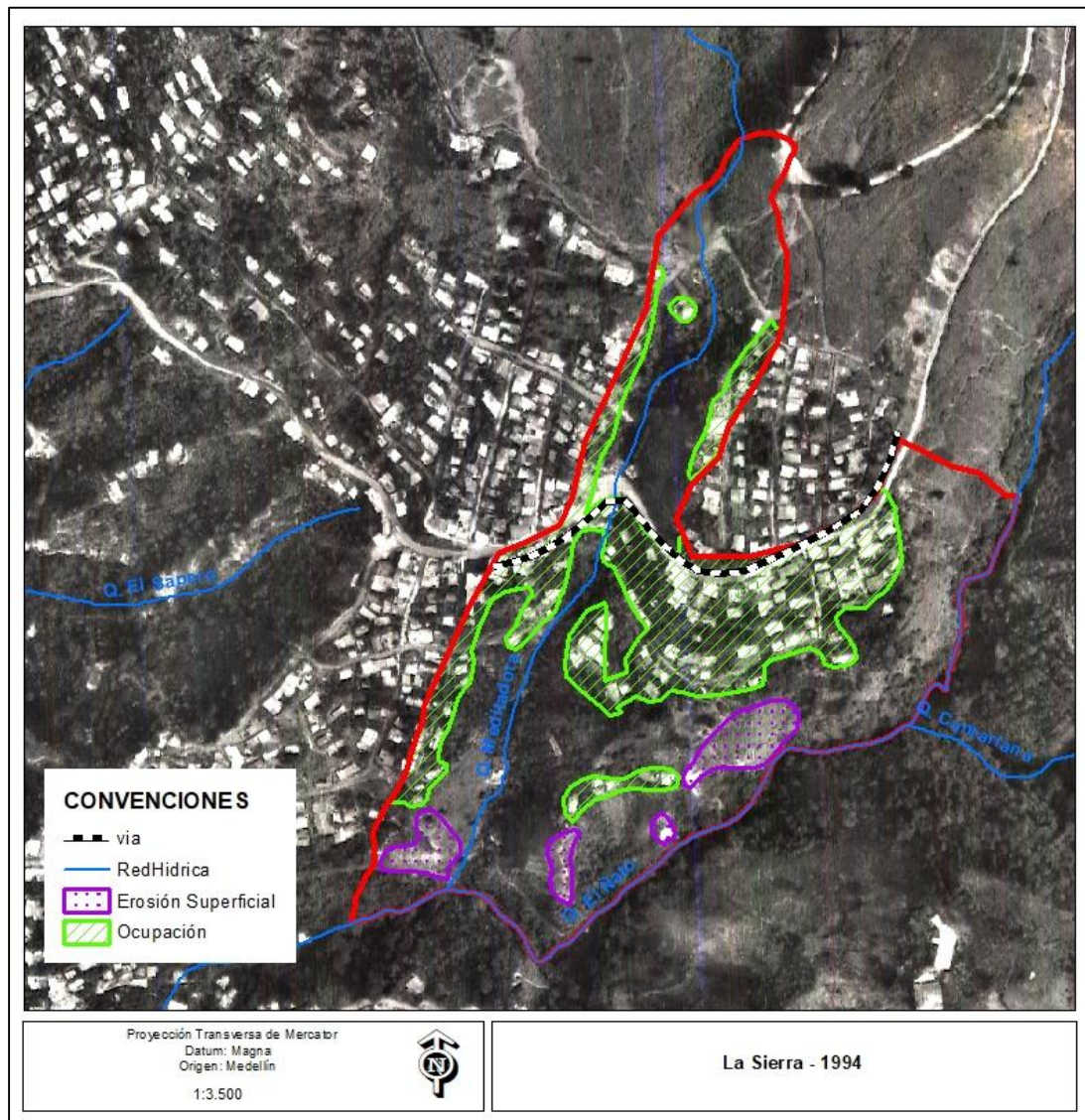


Figura 7. Fotografía aérea de 1994, polígono La Sierra

Para los años 2004 y 2010 la zona presenta condiciones de consolidación del barrio del polígono entre las calles 54A y 54B, y se observa un mayor número de edificaciones en inmediaciones de la carrera 7 y 7E. Se observa la construcción de la placa polideportiva al norte del polígono en inmediaciones de la carrera 56B.

Geomorfológicamente solo se presentan pequeños cambios relacionados a la construcción de llenos para la edificación de vivienda. Las coberturas vegetales se conservan sobre las márgenes de las quebradas La Meditadora y El Ñato. No se

observan procesos morfodinámicos importantes, solo algunas zonas desprovistas de vegetación que pueden presentar procesos erosivos superficiales (Figura 8).

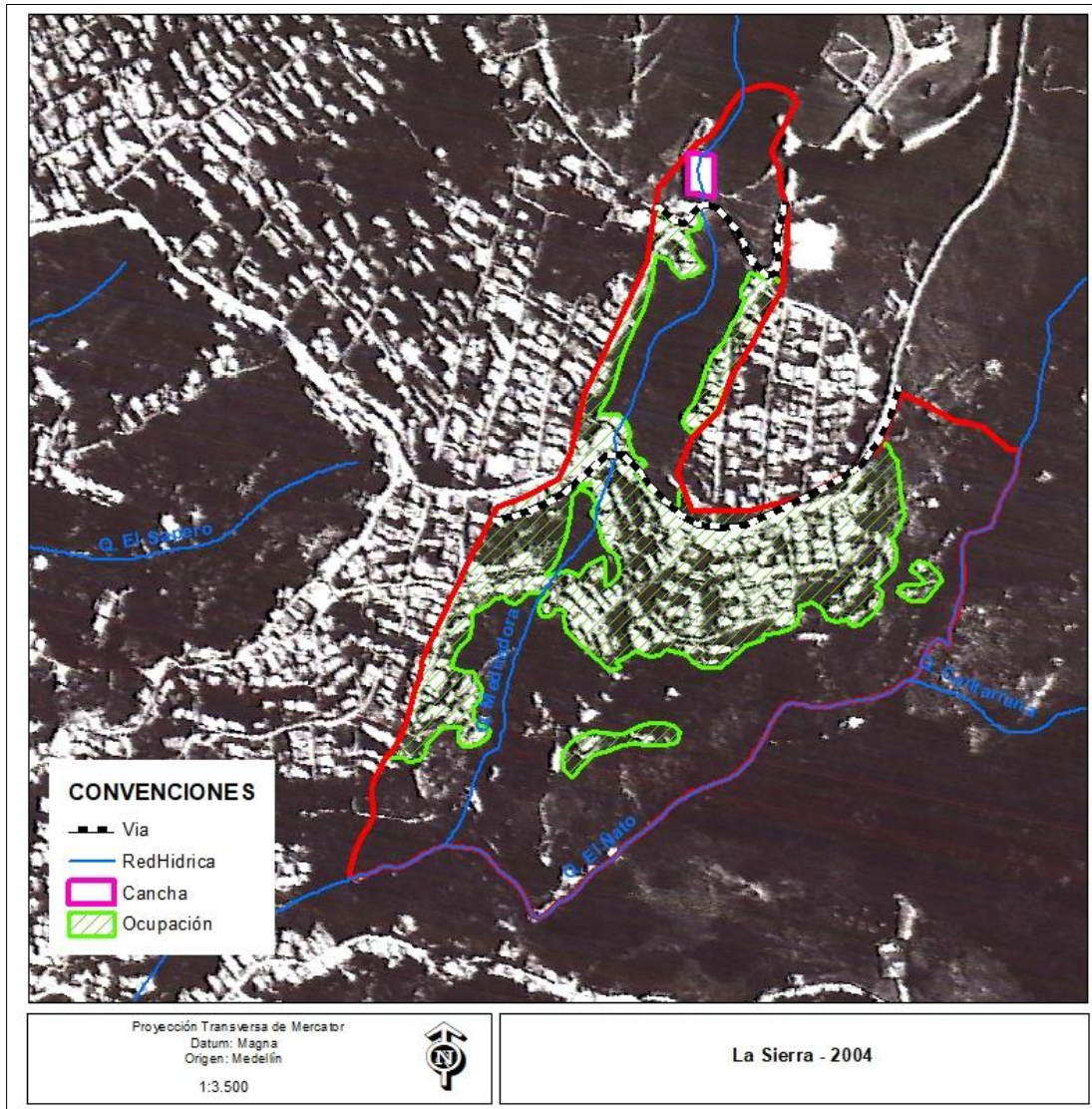


Figura 8. Fotografía aérea de 2004, polígono La Sierra

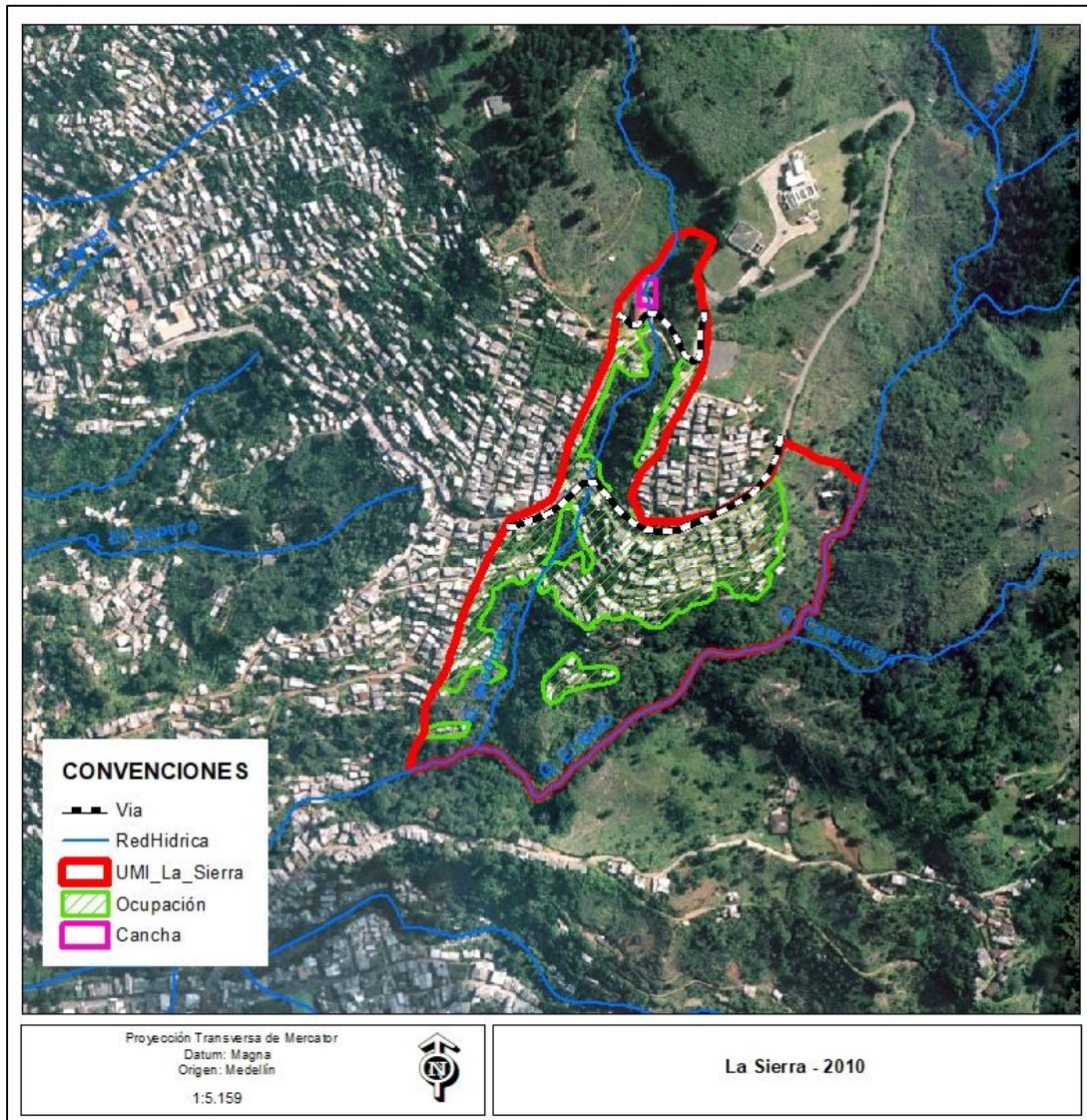


Figura 9. Fotografía aérea de 2010, La Sierra

Para el año 2016 la zona presenta condiciones muy similares a las observadas en el año 2010. Geomorfológicamente continúa la consolidación urbanística que implica modificaciones de la forma de la pendiente, convirtiéndola en una ladera escalonada por la apertura de taludes y construcción de llenos para la adecuación de la zona para la construcción de vivienda.

Las vertientes de las quebradas La Mediadora y El Ñato continúan sin trasformaciones importantes, continúan la cobertura vegetal caracterizada por

rastreros y arbustos. Se observan cuatro procesos morfodinámicos, dos asociados a la quebrada Meditadora y dos a la quebrada El Nato (Figura 10).

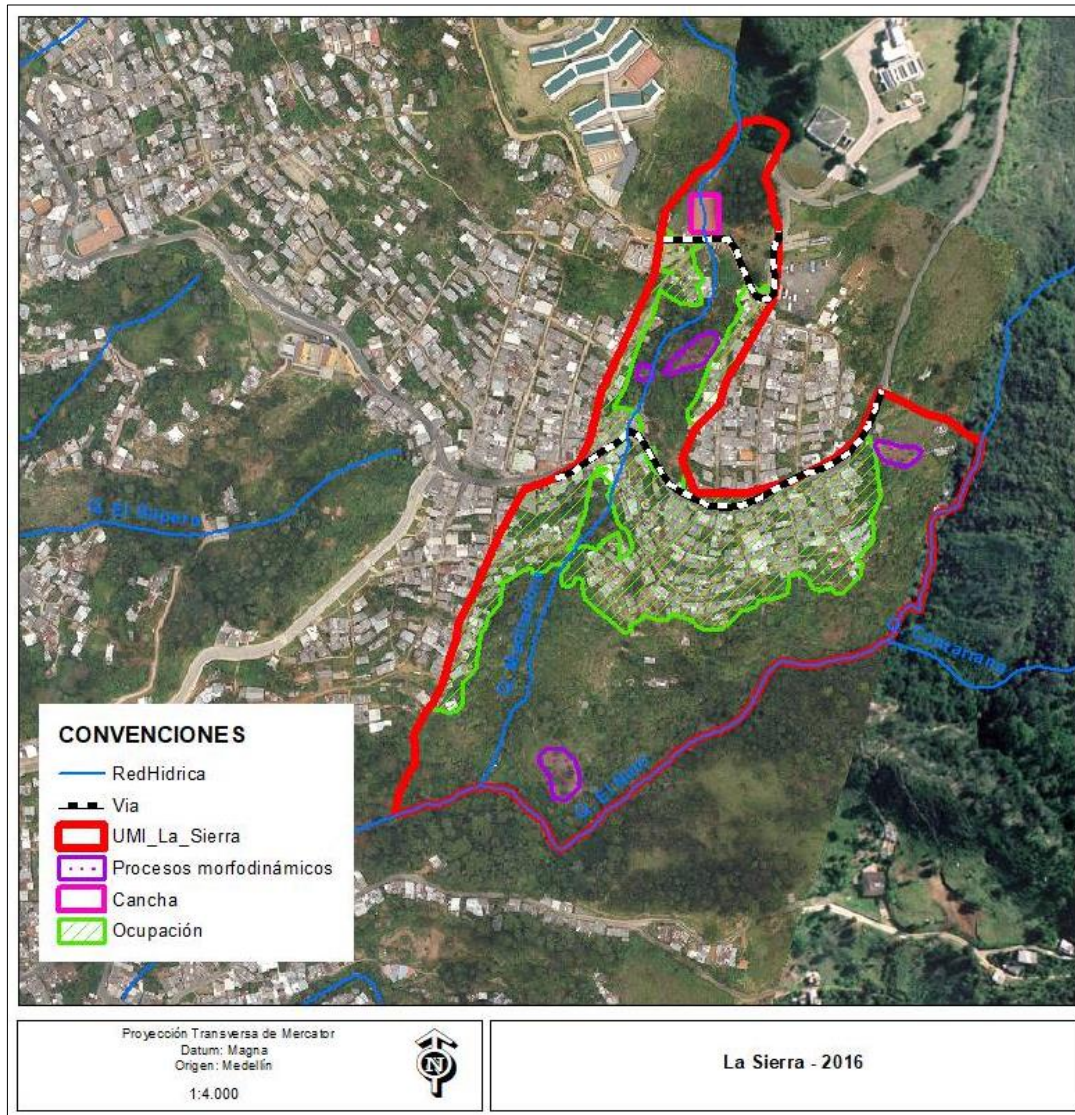


Figura 10. Fotografía aérea de 2016, La Sierra

A partir del proceso de fotointerpretación llevado a cabo para el polígono La Sierra, se puede concluir que la zona no sufrió cambios geomorfológicos significativos, las laderas han sufrido una evolución en el proceso de ocupación e intervención antrópica reportada desde la fotografía del año 1984, cuya ocupación se consolida entre las calles 54 A y 54B.

Durante los años analizados no se identifica la presencia de procesos morfodinámicos importantes, sin embargo la intervención antrópica que representa la conformación de llenos y apertura de taludes, así como los usos del suelo y la disposición de aguas de escorrentía y servidas, pueden ser causas de la generación de procesos no visibles a la escala de las fotografías analizadas.

6.3 UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA

Las unidades geológicas para ingeniería (UGI) que afloran en la zona del proyecto, corresponden principalmente a suelos residuales derivados de la meteorización de las rocas ígneas pertenecientes a la Dunita de Medellín, la cual corresponde a la unidad geológica predominante en la zona y que representa el basamento de la mayor parte de la zona estudiada y sobre la cual suprayace un flujo de lodos y escombros; por otra parte se identifican llenos antrópicos asociado a los procesos urbanísticos e intervenciones humanas (Figura 11).

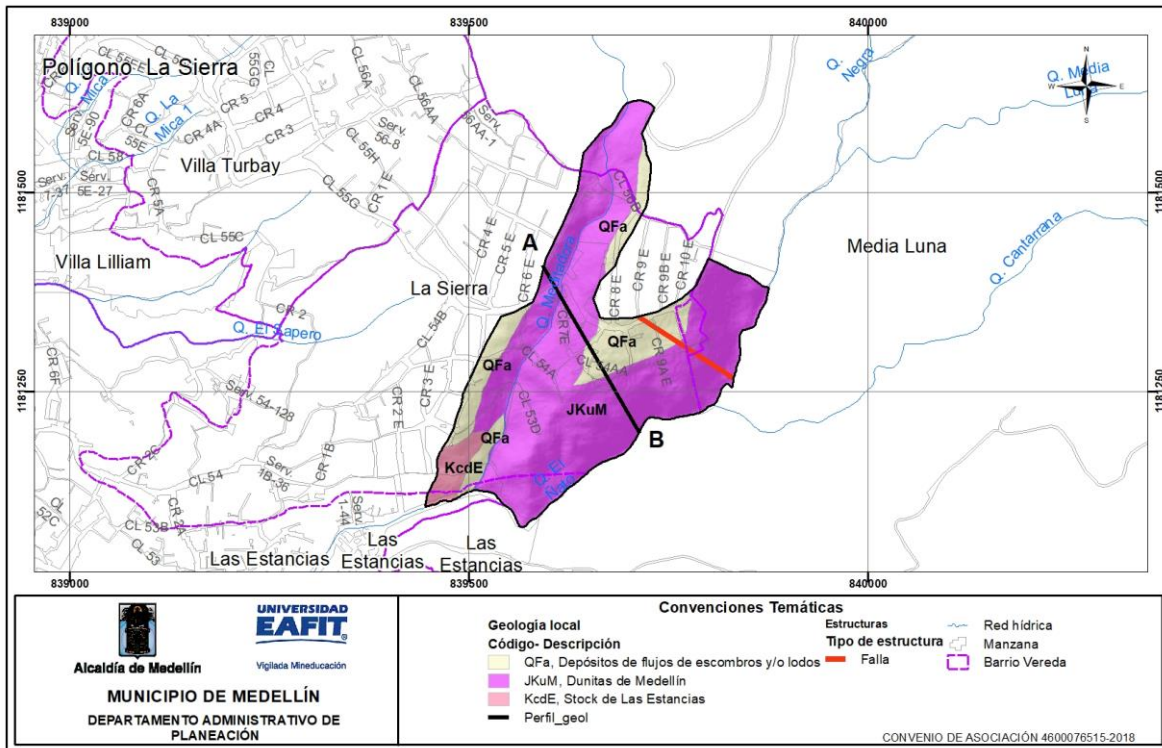


Figura 11. Geología local del polígono La Sierra

A continuación, se describe el perfil y las unidades geológicas para ingeniería identificadas para la zona de estudio, teniendo en cuenta para su caracterización

los diferentes afloramientos encontrados en los recorridos de campo y los sondeos exploratorios ejecutados para el análisis geotécnico. En la **Figura 12** se presenta el perfil geológico generalizado del polígono La Sierra, donde se muestran las relaciones estratigráficas del sector.

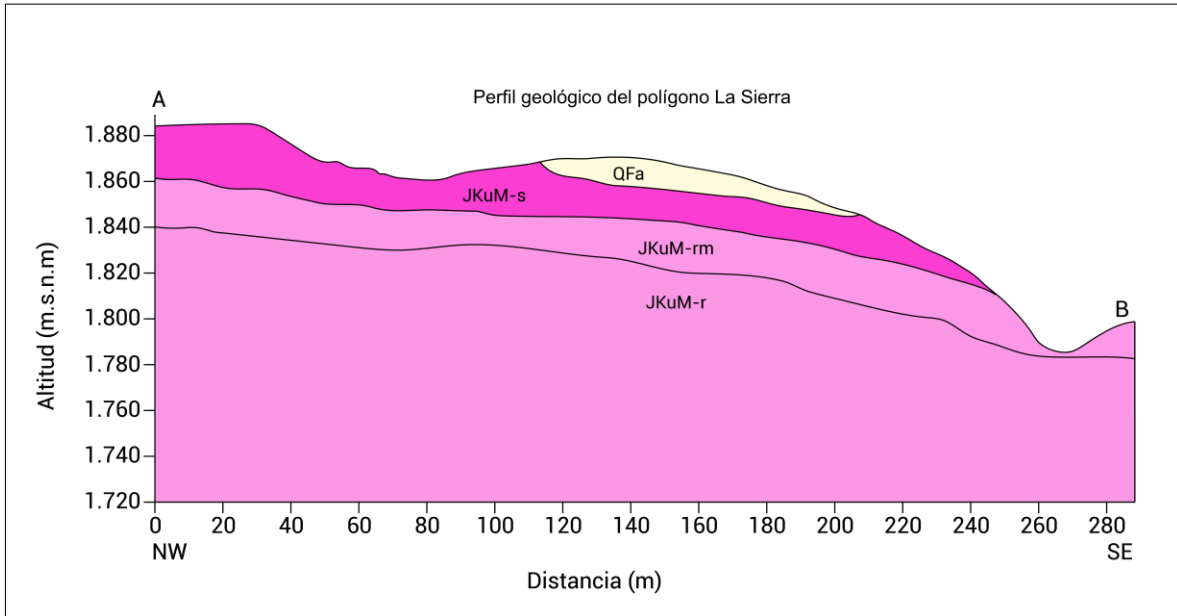


Figura 12. Perfil geológico generalizado del polígono La Sierra

6.3.1 Derivados de roca in situ

Stock de Las Estancias (KCDE): Esta unidad litológica hace parte del basamento rocoso del sector sur del polígono de estudio. En el polígono La Sierra no se identifican afloramientos de esta formación, pero se reporta el saprolito IC en los sondeos 8 y 9.

Saprolito - nivel IC (KCdA-IC): En general los saprolitos derivados del Stock de Las Estancias, el material conserva parte de la textura de la roca original, donde predomina una textura limo-arenosa, con tonalidades crema. En algunos casos se conservan minerales oscuros con tonalidades verdosas y blancas asociadas a la meteorización de minerales como plagioclasa. Esta unidad no se observó a nivel de afloramiento, pero se reporta en la perforación 8 a una profundidad entre los de 13 m y 15m y en la perforación 9 a una profundidad de 11 a 15 m (Figura 13).



Figura 13. Saprolito del Stock de Las Estancias en la perforación 8 del polígono La Sierra

Dunita de Medellín (JKum): Esta unidad litológica representa el basamento rocoso de la mayor parte del polígono de estudio. Los principales afloramientos se identifican principalmente las quebradas La Meditadora y El Ñato

En afloramiento se observan diferentes características mineralógicas y texturales del material parental (Dunita), y en algunos sectores también se presentan fragmentos de roca no mayores a 25 cm en su diámetro, dentro de una matriz arenolimsa de color café claro – ocre, por su forma de meteorización de esta roca presenta características muy similares a un depósito, por lo que pueden confundir fácilmente.

A continuación, se describe el perfil de meteorización generalizado observado en la zona:

Suelo residual – nivel IB (JKuM-sr): este estrato está constituido por limos arcillosos de color café y pardo amarillento con zonas grises verdosas, de consistencia blanda y compacidad suelta, con espesores en afloramiento entre 1 y 2 m; completamente meteorizados, donde no se observa la textura original de la roca (Figura 14).



Figura 14. Suelo residual de la Dunita (IB), en inmediaciones de la placa polideportiva y quebrada La Meditadora

Los principales afloramientos asociados a esta unidad se observan en los cortes realizados para la apertura de vías de acceso hacia el sector norte del polígono en inmediaciones de la placa polideportiva, quebrada La Meditadora y en taludes realizados para las adecuaciones de las viviendas allí asentadas.

Este nivel se identificó en los siguientes sondeos realizados en el polígono La Sierra.

Tabla 5. Perforaciones donde se reporta el nivel IB de la Dunita

Perforación	Profundidad (m)
P-4	3.0 -7.0
P-5	3.0 - 7.0
P-6	3.0 – 8.0

Saprolito – nivel IC (JKuM-s): En general los saprolitos derivados de la Dunita de Medellín, se caracterizan por ser limos arenosos de coloraciones café amarillenta combinado con tonalidades verdosas y donde se observan bloques de roca, que dan la apariencia de ser un depósito. El material conserva parte de la textura de la roca original donde se observa parcialmente la serpentinita en los bloques menos meteorizados (Figura 15).



Figura 15. Saprolito de la Dunita, taludes de la vía 56B.

Este nivel se reportó solo en afloramientos, no se observó en los sondeos.

Roca alterada - nivel IIA (JKuM-ra): este nivel de afloramiento se observan bloques de roca principalmente hacia las zonas de mayor pendiente que corresponde a las laderas de las quebradas La Meditadora y El Ñato. infrayaciendo el nivel de meteorización anterior. Esta unidad se presenta como bloques de dunita, altamente fracturados, y meteorizados, caracterizados por ser finogranular, de color gris verdoso a amarillento. Se destaca que los afloramientos de esta unidad son escasos (Figura 16).



Figura 16. Roca alterada

En los sondeos este nivel se reportó en las perforaciones 1,2,3 y 4, donde se observan la roca con meteorización hacia las zonas de fractura (Tabla 6 y Figura 17).

Tabla 6. Perforaciones donde se reporta el nivel transición suelo roca de la Dunita

Perforación	Profundidad (m)
P-1	1.0 – 5.0
P-2	2.0 -12
P-3	5.0 -15
P-6	8.0 -12



Figura 17. Transición suelo roca, Perforación P - 2 del polígono La Sierra

Roca parcialmente meteorizada –IIB (JKuM-rpm): esta unidad se identificó sobre la vertiente de la quebrada El Ñato, al oriente de la calle 54 AA con carrera 10E. La roca se caracteriza por presentar textura afanítica de color gris verdosa a gris oscura, con zonas de serpentinización a lo largo de planos de debilidad de la roca.(Figura 18)



Figura 18. Roca parcialmente meteorizada

A nivel de sondeo se registró en las siguientes perforaciones (Tabla 7).

Tabla 7. Roca parcialmente meteorizada

Perforación	Profundidad (m)
P-1	5.0 - 15
P-2	12 - 15
P-4	7.0 - 15
P-5	7.0 - 15
P-6	12 - 15



Figura 19 Roca parcialmente meteorizada, perforaciones P - 1 y P - 2.

6.3.2 Flujos de lodos y escombros

Depósitos de flujos de lodos y escombros (Qfle): Corresponden a depósitos originados como antiguos deslizamientos de roca y suelo, desprendidos de la parte superior de las laderas. Estos depósitos de vertiente se encuentran reposando discordantemente sobre el basamento rocoso o el suelo residual (dunita).

En el polígono de análisis los depósitos se encuentran sobre el sector central, caracterizando las zonas con menor pendiente del área de estudio y las cuales han sido altamente intervenidas de manera antrópica sobre las calles 53 A y 54B y entre las carreras 7AE y 10E. Se clasifican principalmente como flujos de lodos y escombros, son depósitos mal seleccionados se encuentran conformados principalmente por una matriz limo – arenosa de color café amarillento a rojizo, la cual contiene fragmentos de roca dunitica subredondeadas a subangulares, mayores a 20 cm de diámetro, moderadamente meteorizados (Figura 20).



Figura 20. Depósito de Flujo de lodos y escombros

Los flujos de lodos y escombros se reporta en las siguientes perforaciones (Tabla 8 y Figura 21).

Tabla 8. Flujo de lodos y escombros

Perforación	Profundidad (m)
P - 7	2.0 - 15
P - 8	0.0 - 13
P - 9	2.0 - 11



Figura 21. Flujos de lodos y escombros reportado en la perforación 7.

6.3.3 Depósitos antrópicos

En la categoría de depósitos de origen antrópico, se identificaron en la zona de estudio, llenos de dimensiones importantes, los cuales se describen a continuación.

Llenos antrópicos (QII): Corresponden a depósitos artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor importantes. La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, materia orgánica, basura, roca, cemento y/o escombros simplemente vertidos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante, es común observar enrocados como parte de estos llenos (Figura 22).



Figura 22. Características de los materiales que conforman el lleno antrópico

6.4 MORFOMETRÍA

La pendiente, como componente del relieve, se refiere al grado de inclinación del terreno o gradiente, expresado en porcentaje o grados. El mapa resultante de este análisis, muestra la distribución de las pendientes naturales del área de estudio, de acuerdo con los rangos preestablecidos. La importancia de este análisis radica en que, en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, este análisis no se puede pasar por alto, ya que cada material superficial posee un comportamiento geomecánico diferente, según la pendiente donde este localizado. Igualmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo se encuentran restringidos por esta variable.

La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes muy inclinadas y abruptas en una gran porción de su extensión, la mayor parte de éstas, asociado a las vertientes cortas y formas que van desde rectas a cóncavas y convexas que se extienden a lo largo de toda la zona.

En la Tabla 9 y Figura 23 se presenta la distribución de los diferentes rangos de pendientes para el polígono La Sierra:

Tabla 9. Distribución de la variable pendientes

Rango pendiente	Nombre	Total Área (ha)	Porcentaje (%)
1 - 3%	Muy suave	0,090	1,0%
3 - 10%	Suave	0,112	1,2%
10 - 25%	Inclinada	0,502	5,4%
25 - 40%	Muy Inclinada	1,127	12,2%
40 - 60%	Abrupta	2,512	27,2%
60 - 100%	Muy Abrupta	3,905	42,2%
>100%	Escarpado	0,998	10,8%
Total		9,247	100,0%

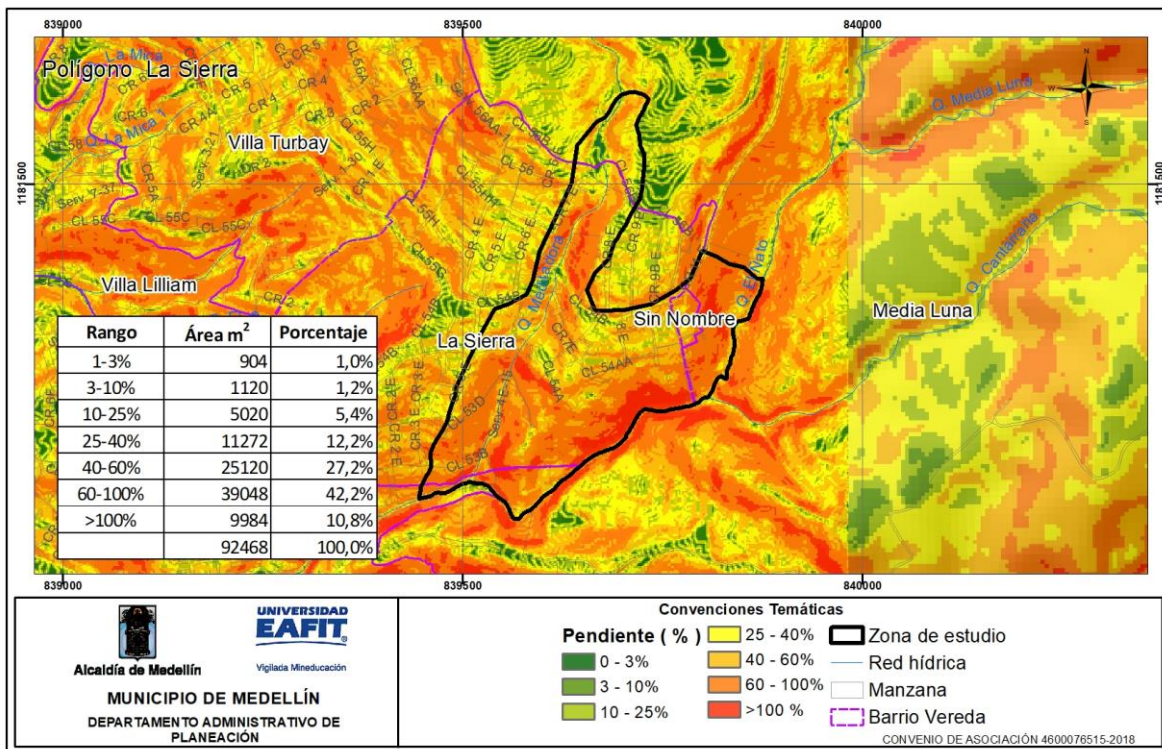


Figura 23. Mapa de morfometría del polígono La Sierra

Rango de pendientes 0 – 10%: Corresponde a un rango que se encuentra representado por el 2,2% del área, correspondientes a las pendientes suaves y muy suaves; corresponde a áreas modificadas antrópicamente mediante la realización

de explanaciones y llenos, en la zona está asociado a la placa polideportiva, vías y senderos (Figura 24).

En este rango de pendientes, la topografía no condiciona el diseño urbanístico, pero se recomienda el cuidado con respecto a cumplir las normas técnicas en la elaboración de cortes, banquetes y llenos que normalmente son requeridos para un desarrollo urbanístico.



Figura 24. Unidad con pendientes en el rango entre 0 -10%, sector de la placa polideportiva y senderos

Rango de pendientes 10% – 25%: Está representando el 5,4% del área de interés. Esta categoría se encuentra en pequeños sectores y está asociado al rango anterior (Figura 25).

En este rango de pendientes, la topografía condiciona moderadamente el diseño urbanístico, se requiere cuidado en el desarrollo de cortes para vías, banquetes para el establecimiento de viviendas y llenos.



Figura 25. Zonas con pendientes en el rango entre 10% – 25%,

Rango de pendientes 25% - 40%: Es el rango comprende el 12,20% del área de la zona de estudio, corresponde a pequeñas áreas distribuidas hacia el tope de los lomos y en el sector central comprendido entre las calles 54Ay 54B (Figura 26).

En este rango de pendientes, la topografía condiciona de manera importante el desarrollo urbanístico, por lo que se requiere de un estudio geológico – geotécnico de detalle para su desarrollo y donde igualmente se incluyan las recomendaciones de manejo y las obras de mitigación a llevar a cabo en caso de ser necesaria la realización de cortes o llenos para la apertura de vías de acceso, o la ocupación urbana.



Figura 26 Sector occidental de la placa polideportiva, zona con pendientes en el rango entre 25% - 40%

Rango de pendientes 40% - 60%: Representa el 27,20% del área, y se localiza en áreas distribuidas hacia las vertientes de las quebradas La Meditadora y El Ñato (Figura 27).

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



Figura 27. Sector comprendido entre las calles 54A y 54 B

Rango de pendientes > 60%: este rango es el de mayor representación en el área con un 53%% del área del polígono, están asociadas a las vertientes de las quebradas La Meditadora y El Ñato, en casi su totalidad no están afectadas por la intervención antrópica (Figura 28).

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



Figura 28. (a), vertiente izquierda de La quebrada Meditadora, (b) vertiente derecha de la quebrada El Ñato

6.5 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El polígono de interés presenta características geomorfológicas contrastantes, donde los procesos exógenos y los materiales han moldeado el relieve. Teniendo en cuenta la escala del trabajo y a partir de las unidades geomorfológicas definidas por AMVA (2007), se han diferenciado las subunidades geomorfológicas de acuerdo con las características particulares que exhiben cada una, entre las que se destacan la forma, longitud de la ladera y la inclinación del terreno.

Tabla 10. Clasificación geomorfológica del polígono La Sierra

Unidad de paisaje	Macrounidad	Unidad	Subunidad
Valle Medio (VM)	Bloque Elena Santa	Lomos (VM-BISE-L)	Tope plano y corto
			Explanación
			Ladera convexa, corta y abrupta
			Ladera irregular, muy corta y muy abrupta
			Ladera irregular, corta y muy abrupta
			Ladera irregular, moderada y muy abrupta
			Ladera recta, moderada y abrupta

Unidad de paisaje	Macrounidad	Unidad	Subunidad
			Ladera recta, larga y muy abrupta
			Ladera recta, muy corta y muy inclinada
			Ladera recta, muy corta y suave
			Ladera en depósito cóncava, muy corta e inclinada
			Ladera en depósito recta, larga y abrupta

Partiendo de estos rasgos regionales se delimitan las diferentes subunidades geomorfológicas a escala 1:2.000 para el polígono La Sierra. A continuación se describen cada una de las subunidades geomorfológicas (Figura 29):

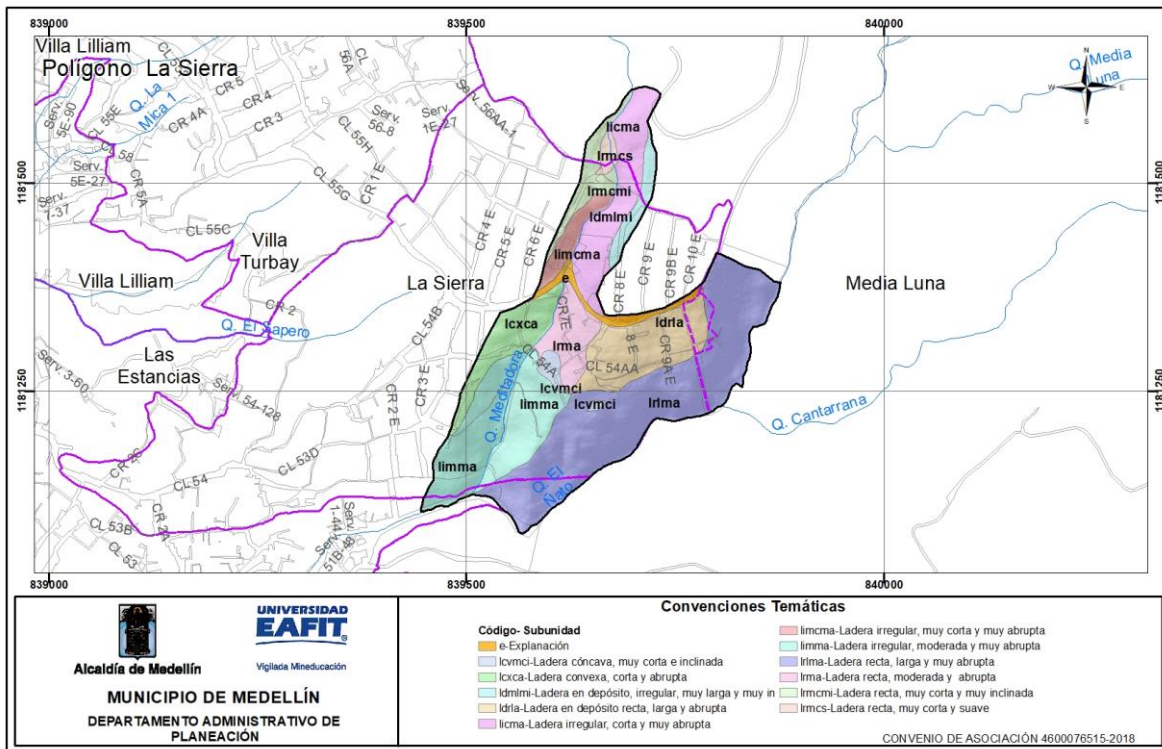


Figura 29. Mapa geomorfológico local del polígono La Sierra.

6.5.1 Bloque Santa Elena

Lomos: Regionalmente esta unidad geomorfológica se ubica sobre las márgenes de las quebradas La Meditadora y El Ñato. A continuación, se presentan las subunidades identificadas en esta unidad:

Explanación (VM-BISC-L-e): Esta unidad corresponde a la calle 54B, que es la vía principal del sector. Se caracteriza por ser un descanso en la vertiente, con un ancho promedio de 6 metros. Geológicamente están asociados a suelo residual de la Dunita y flujos de lodos y escombros; esta unidad ocupa el 2,31% del área total del polígono y no presenta procesos morfodinámicos (Figura 30).



Figura 30. Vía principal del Barrio La Sierra- Calle 54B

Ladera convexa, corta y abrupta (VM-BISE-L-lcxca): Esta unidad se ubica sobre la margen derecha de la quebrada La Meditadora, entre las calles 53D y 54B a la altura de la carrera 5E; corresponde a una zona de pendientes entre el 40 -60%, laderas con longitudes entre los 10 y 40 m y forma convexa. Geológicamente están asociados a suelo residual de la Dunita; esta unidad ocupa el 6,58% del área total del polígono y en ella no se observan procesos morfodinámicos (Figura 31).



Figura 31. Ladera convexa, corta y abrupta, sector de la carrera 5E, entre calles 53D y 54ª

Ladera irregular, muy corta y muy abrupta (VM-BISE-L-limcma): Esta unidad se ubica el noroccidente del polígono, y corresponde a la vertiente derecha de la quebrada La Meditadora en el sector de la carrera 7E con la calle 54B; ocupa el 2,84% del área total del polígono. Se caracteriza por presentar pendientes superiores al 60%, laderas con longitudes inferiores a los 20 m y forma irregular. Geológicamente está asociada al suelo residual de la Dunita. No se observan procesos de inestabilidad en esta unidad (Figura 32).



Figura 32. Ladera irregular, muy corta y muy abrupta, en inmediaciones de la carrera 7E con la calle 54B

Ladera irregular, corta y muy abrupta (VM-BISE-L-licma). Esta unidad se ubica el noreste del polígono, y corresponde a la vertiente izquierda de la quebrada La Meditadora, parte alta de la calle 54B; ocupa el 10,36% del área total del polígono. Se caracteriza por presentar pendientes superiores al 60%, laderas con longitudes entre los 20 y 40 m, forma irregular. Geológicamente está asociada al suelo residual de la Dunita. Se observa un proceso morfodinámico relacionado a un movimiento en masa (Figura 33).



Figura 33. Ladera irregular, corta y muy abrupta, parte alta de la calle 54B

Ladera irregular, moderada y muy abrupta (VM-BISE-L-limma): Ubicada hacia el sector sur del polígono, entre la quebrada La Meditadora y carrera 5E, entre las calles 53B y 54A. Se caracteriza por ser una zona con pendientes entre el 40 y 60%, longitud que oscila entre los 40 y 70 m y forma irregular. Geológicamente está conformada por suelo residual de la Dunita. Esta unidad ocupa un área de 18,45% del área total del polígono, esta zona presenta, pequeños movimientos en masa asociados al inadecuado manejo de aguas y vertimiento de escombros (Figura 34).



Figura 34. Ladera irregular, moderada y muy abrupta, margen derecha de la quebrada La Meditadora

Ladera recta, moderada y abrupta (VM-BISE-L-Irma). La unidad se localiza hacia el centro occidente del polígono, entre las calles 54A y 54B y entre la quebrada la Meditadora y la carrera 7AE. Se caracteriza por presentar una pendiente entre el 40 y 60%; longitud entre 60 y 80 m y forma recta; geológicamente está asociada al suelo residual de la Dunita. Esta unidad ocupa el 5,44% del área del polígono y no presenta procesos morfodinámicos evidentes (Figura 35).



Figura 35. Ladera recta, moderada y abrupta, sector entre las calles 54A y 54B y entre la quebrada la Meditadora y la carrera 7AE

Ladera recta, larga y muy abrupta (VM-BISE-L-Irlma): Esta unidad corresponde a la vertiente derecha de la quebrada El Nato, caracterizada por pendientes superiores al 60 %, longitudes inferiores a los 50 y 100 m y forma recta. Geológicamente están asociados al suelo residual de la Dunita. La unidad ocupa el 34,24% del área total del polígono y presenta procesos morfodinámicos activos, tipo deslizamiento rotacional (Figura 36).



Figura 36. Ladera recta, larga y muy abrupta, margen derecha de la quebrada El Nato

Ladera recta, muy corta y muy inclinada (VM-BISE-L-Irmcmi): Esta unidad se ubica al noroccidente del polígono, entre la quebrada La Meditadora y la carrera 7E, caracterizada por pendientes entre el 25 y 40 %, longitud entre los 5 y 30m y forma recta. Geológicamente están asociados a suelo residual de la Dunita. La unidad ocupa el 3,70% del área total del polígono y presenta evidencias de procesos morfodinámicos superficiales (Figura 37).



Figura 37. Ladera recta, muy corta y muy inclinada

Ladera recta, muy corta y suave (VM-BISE-L-Irmcs): Esta unidad corresponde a la placa polideportiva y al talud de gaviones que se ubica en la parte inferior de la cancha, presenta pendientes entre el 40 y 60 %, longitud entre los 20 m de ancho y 50 de largo, forma recta. Geológicamente están asociados a suelos residuales derivados de la Dunita. La unidad ocupa el 0,97% del área total del polígono y no presenta evidencias de movimientos en masa activos (Figura 38).



Figura 38. Ladera recta, muy corta y suave, sector de la placa polideportiva

Ladera cóncava, muy corta e inclinada (VM-BISE-L-ldcvmci): Esta unidad se ubica en la zona central del polígono, corresponde a dos sectores, el primero ubicado a la altura de la carrera 7AE con calle 54A y el segundo hacia la zona verde, al oriente del anterior; caracterizadas por presentar pendientes entre el 10 y 25 %, longitud entre los 10 y 25 m y forma cóncava. Geológicamente están asociados a la Dunita. La unidad ocupa el 1,23% del área total del polígono y no presenta evidencias de procesos morfodinámicos (Figura 39).



Figura 39. Ladera en depósito cóncava, muy corta e inclinada, a la altura de la carrera 7AE con calle 54^a

Ladera recta, larga y muy inclinada (VM-BISE-L-Idlrmi): Esta unidad se ubica sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, en inmediaciones de la carrera 8E, corresponde a una ladera caracterizada por pendientes entre el 25 - 40%, con longitudes entre los 10 y 15 m y forma recta. Geológicamente están asociados al flujo de lodos y escombros; esta unidad ocupa el 8,86% del área total del polígono y en ella no se observan procesos morfodinámicos.

Ladera en depósito recta, larga y abrupta (VM-BISE-L-Idrmla): Esta unidad se ubica en la zona central del polígono, aproximadamente entre las calles 54A y 54B, entre carreras 7AE y 10E, pendientes en el rango del 40 y 60 %, longitud entre los 70 y 80 m y forma recta. Geológicamente están asociados a depósitos de flujo de lodos y escombros. La unidad ocupa el 11,22% del área total del polígono y no presenta evidencias de procesos morfodinámicos activos (Figura 40).



Figura 40. Ladera en depósito recta, larga y abrupta, sector comprendido entre las calles 54A y 54B y carreras 7AE y 10E

6.6 MORFODINÁMICA

En el polígono de estudio se identifican pocos procesos morfodinámicos, correspondiente principalmente a procesos de movimientos en masa, estos son generados por factores naturales como las características geológicas, geomorfológicas y topográficas de la zona y por intervenciones antrópicas asociados la apertura de taludes para la construcción de vivienda y al manejo de aguas servidas.

A continuación se presenta la información sobre procesos morfodinámicos de acuerdo con la disponibilidad del reporte de eventos y los procesos identificados en la elaboración de este trabajo.

6.6.1 Reporte histórico de eventos

Para el análisis del registro histórico de eventos del polígono de estudio se recopila la información que contienen los reportes de las bases de datos del DAGRD y del Departamento Administrativo de Planeación, al igual que los estudios llevados a cabo en la zona, esto con el fin de verificar la ocurrencia de movimientos en masa en la zona y que debido a las condiciones de intervención antrópica no sean posibles de determinar. Este registro de eventos igualmente sirve como insumo para determinar la continuidad o recurrencia de los movimientos en masa identificados para el polígono en estudio.

Para el polígono en estudio, la base de datos del DAGRD reporta la ocurrencia de 99 visitas, de las cuales 73 corresponde a eventos de movimiento en masa, 24 a problemas estructurales y 1 a inundaciones (Figura 41 y Figura 42).

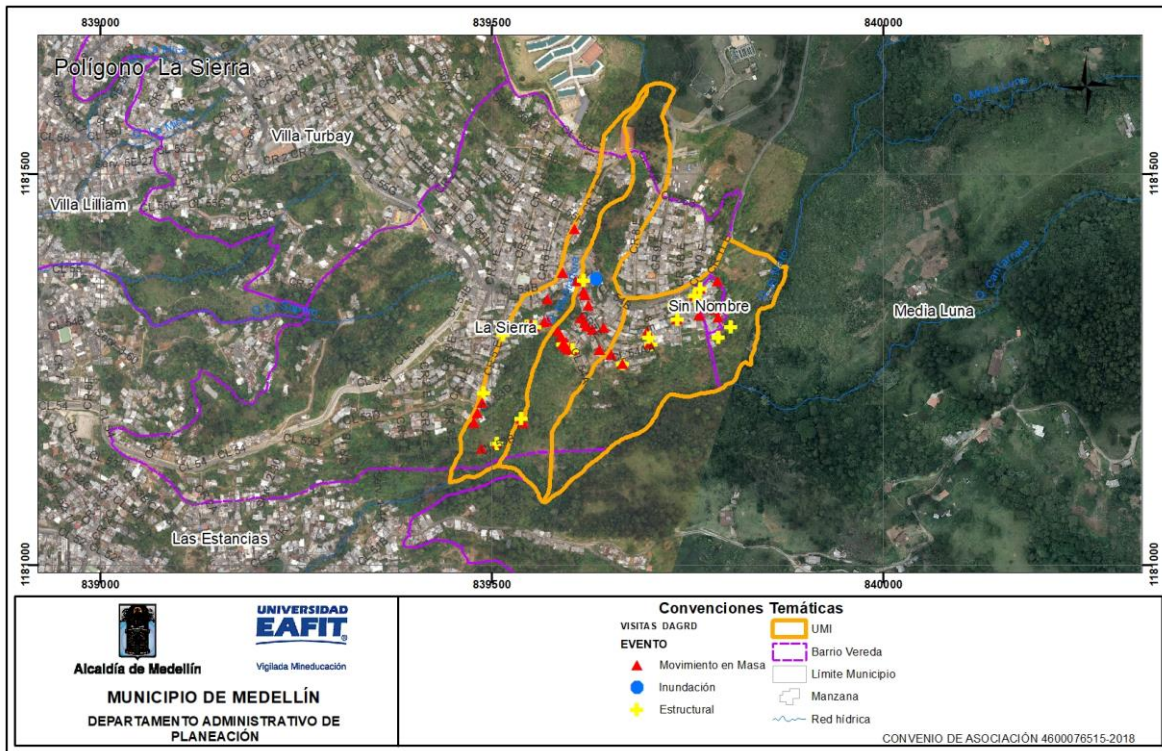


Figura 41. Eventos reportados por el DAGRD (2018)

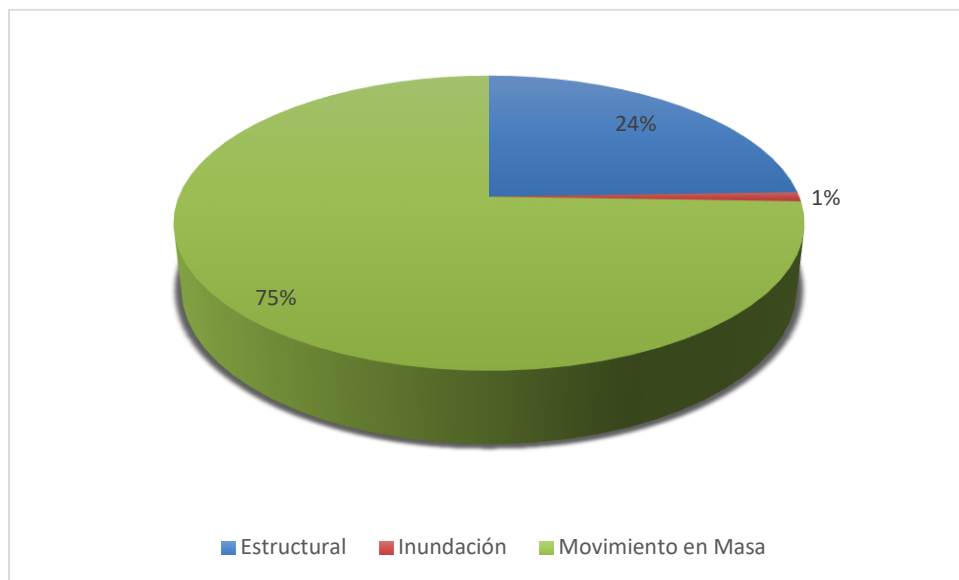


Figura 42. Reporte eventos DAGRD para el polígono La Sierra

Además de los procesos anteriormente descritos, se revisó la base de datos del Departamento Administrativo de planeación, donde se identificaron 5 procesos morfodinámicos de los cuales tres se ubican sobre la margen derecha de la quebrada El Ñato y dos sobre la vertiente izquierda de la quebrada La Meditadora.

6.6.2 Identificación de procesos morfodinámicos

Dentro del polígono en estudio, los movimientos en masa identificados son pocos y corresponden principalmente a deslizamientos con características rotacionales, siendo más predominantes hacia las unidades geomorfológicas de mayor pendiente localizadas en las diferentes laderas predominantes en la zona evaluada.

Estos movimientos en masa tienen origen por diferentes factores, tanto naturales como antrópicos. Entre las causas naturales se encuentran la saturación de los suelos por períodos intensos de lluvias, además de la pendiente, la forma y longitud de las laderas. Las causas atribuidas a factores antrópicos son principalmente sobrecargas, pérdida de soporte en taludes, ausencia de sistemas de drenaje o en su defecto sistemas mal contruidos e inadecuado uso y manejo del suelo.

Durante el recorrido de campo y caracterización del polígono La Sierra se identificaron trece procesos morfodinámicos, ocho activos y cinco cicatrices; siete de ellos se ubican sobre las vertientes de la quebrada la Meditadora y seis sobre la vertiente derecha de la quebrada El Ñato (Figura 43 y Figura 45).

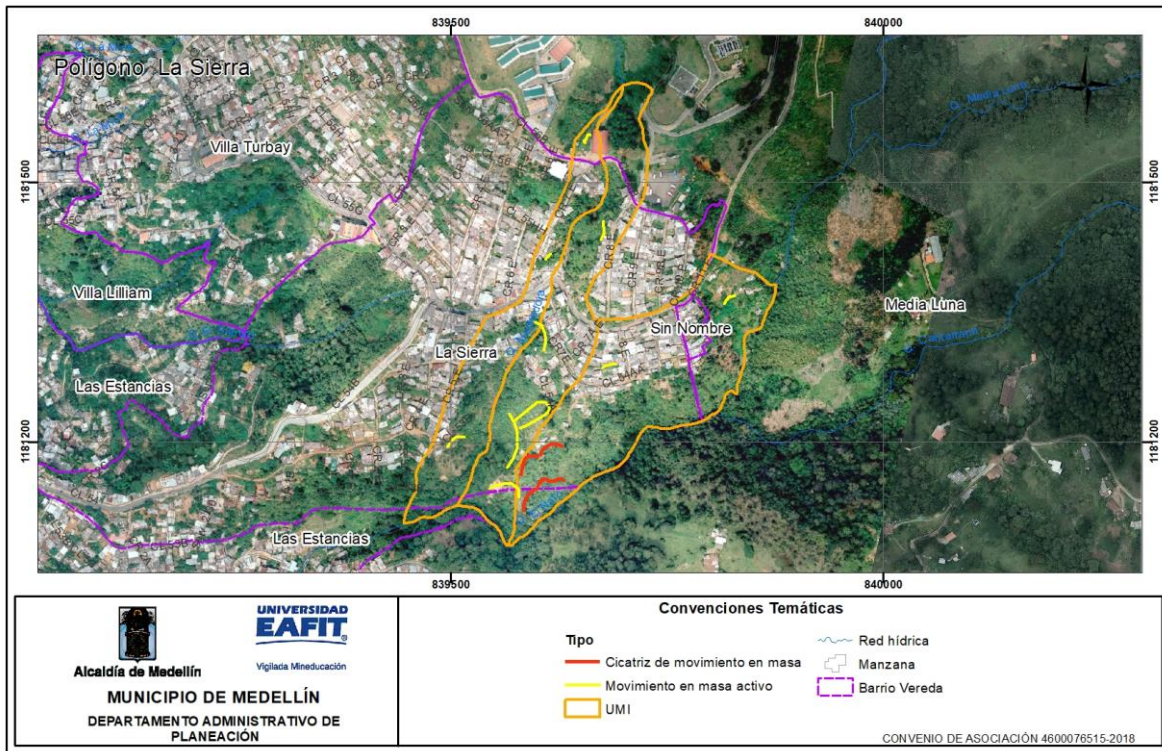


Figura 43. Procesos morfodinámicos en el polígono La Sierra

El movimiento en masa de mayor importancia se localiza en la zona media del polígono, sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, comprendido aproximadamente entre las calles 54 A y 54AA y carreras 6E y 7A, se identifica un movimiento en masa activo sobre suelo residual de la Dunita, en este sector ya hace algún tiempo se reubicaron las viviendas, y en la actualidad no presenta ninguna infraestructura (Figura 44).



Figura 44. Movimiento en masa sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora

El segundo proceso de importancia se encuentra ubicado sobre sobre la vertiente de la margen derecha de la quebrada El Nato, corresponde a un proceso de tipo traslacional, sobre suelo residual de la Dunita, se encuentra en una zona verde sin afectación de infraestructura (Figura 45).

En inmediaciones de la placa polideportiva se ubica un movimiento en masa superficial sobre suelo residual de la Dunita, relacionado a aguas de escorrentía provenientes de la parte superior del talud y falta de una contención en la parte baja del mismo. (Figura 45).



Figura 45. (a) Movimiento en masa sobre la margen izquierda de la quebrada El Nato.
(b) proceso morfodinámico en el sector de la placa polideportiva

En el polígono La Sierra no hay evidencias de procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de las quebradas La Meditadora y El Ñato.

6.7 CLASIFICACIÓN Y USOS DEL SUELO

Basado en el Acuerdo 48 de 2014, el polígono en estudio se localiza en suelo urbano y sobre él se identifican categorías del suelo de protección correspondientes a áreas de la estructura ecológica principal y áreas de amenaza, como las más representativas en la zona de estudio.

Las áreas de la Estructura Ecológica Principal incluyen las áreas protegidas públicas, así como las áreas de interés estratégico que contienen el sistema hidrográfico (ríos y quebradas con sus retiros), el sistema orográfico (cerros tutelares), los elementos estructurantes de la red de conectividad ecológica y las áreas de interés recreativo y paisajístico (Acuerdo 48 de 2014). Para el polígono en estudio, estas áreas de interés estratégico corresponden a un retiro asociado a las quebradas La Meditadora y El Nato, para las cuales se establecen unos retiros de 15 y 30m respectivamente y a las áreas de protección y conservación ambiental ubicada hacia la parte alta de la quebrada La Meditadora.

Las áreas de amenaza y riesgo, que incluye las áreas de amenaza alta (por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) y las áreas de alto riesgo no mitigable, así como las áreas con condiciones de riesgo (Acuerdo 48 de 2014). Para este caso corresponde a la zona con condición de riesgo que corresponde al área de análisis de este estudio (Figura 46).

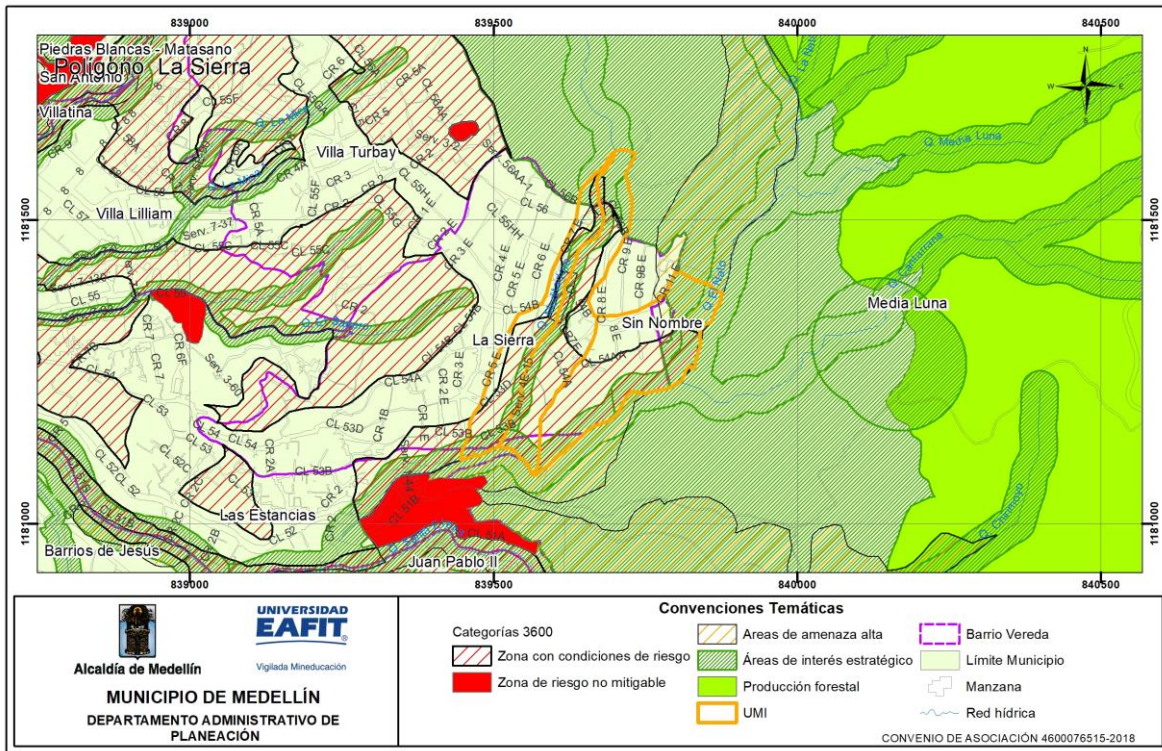


Figura 46. Mapa de clasificación del suelo en el polígono La Sierra. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.

Igualmente, en el Acuerdo 48 de 2014 se define que los usos del suelo corresponden a la distribución espacial de las actividades desarrolladas por agentes públicos y privados, que permiten establecer las características de animación de la ciudad y la utilización y ocupación del suelo. Estas normas generales buscan optimizar las infraestructuras de urbanización y fomentar relaciones socio-económicas más eficientes a partir de la interrelación entre las actividades, mitigando los impactos generados y atendiendo a las características del territorio. Teniendo en cuenta éstas premisas y dicho acuerdo, para el polígono de La Sierra se define como uso predominante el de tipo residencial y en menor porcentaje áreas y corredores de media mixtura; hacia la zona norte y oriental del polígono que corresponde al área rural de jurisdicción del corregimiento de Santa Elena se define como uso predominante el Forestal protector (Figura 47).

Se destaca que el uso residencial se asocia a todo terreno que de acuerdo con el concepto general de urbanización se adecúe específicamente para el uso principal de la vivienda, constituye un desarrollo urbanístico residencial, éstos se podrán desarrollar en cualquier parte del área urbana, con excepción de las zonas de alto

riesgo no mitigable y las zonas con condiciones de riesgo hasta tanto los estudios de detalle no sean realizados (Acuerdo 48 de 2014).

En cuanto a las regulaciones sobre la altura permitida para las construcciones según el Acuerdo 48 de 2014 para el polígono La Sierra (Z3_MI_10) se establece un tope máximo de aprovechamiento de 1 piso (Figura 47)

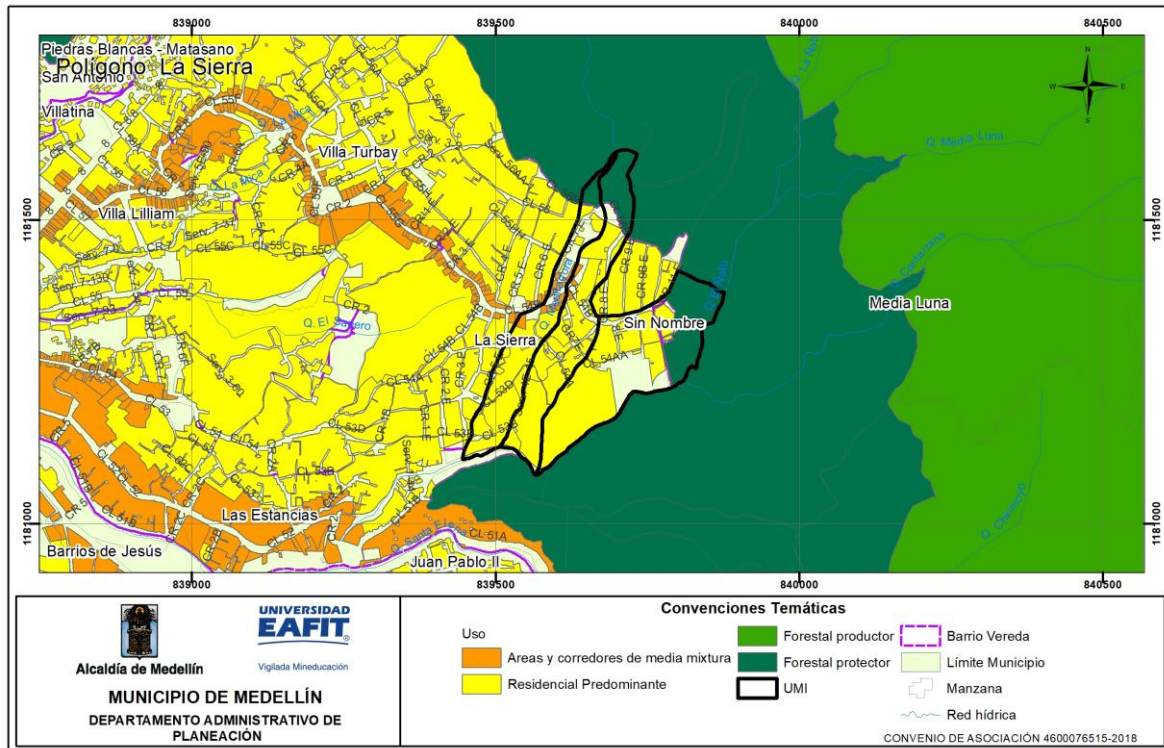


Figura 47. Mapa de usos del suelo del polígono La Sierra. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.

7. EVALUACION GEOTÉCNICA

En este capítulo se presentan los principales aspectos geotécnicos del polígono La Sierra, los cuales fueron el resultado de las visitas de inspección y reconocimiento, de las exploraciones de campo, de los resultados de laboratorio y de los análisis geotécnicos en general.

7.1 EXPLORACION INDIRECTA DE CAMPO

7.1.1 Exploración indirecta

Para el complemento y ajuste de la caracterización de los terrenos que conforman el polígono La Sierra, se auscultó el subsuelo mediante técnicas de exploración indirecta, en este caso líneas sísmicas que mediante la medición de la respuesta del suelo a impulsos u ondas generadas en superficie se pueden obtener los parámetros estratigráficos y geotécnicos del sector.

Las técnicas de geofísica aplicada están orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, etc.

Trabajo de campo

La línea sísmica SIS_LS_01 se realizó específicamente junto a la cancha polideportiva del INDER, situada en el canal de la quebrada La Meditadora y a la institución educativa La Sierra, y las líneas sísmicas SIS_LS_02 se realizó más al sur, referente a la línea anteriormente realizada, más específicamente por la calle 54B, y finalmente la línea SIS_LS_03 se dispone en las laderas ubicadas en la zona nororiente del mismo polígono. Las coordenadas planas de la ubicación de los puntos de cada una de las líneas sísmicas están consignadas en la **Tabla 11**:

Tabla 11. Configuración geométrica de la línea sísmica.

Línea	Inicio		Espaciamiento (m)	Longitud (m)	Orientación de la línea (°)	No° de Geófonos
	E	N				
SIS_LS_01	881404	1875385	1.5	30	095	20
SIS_LS_02	881487	1875177	2	30	036	20
SIS_LS_03	881181	1875035	2	48	229	24

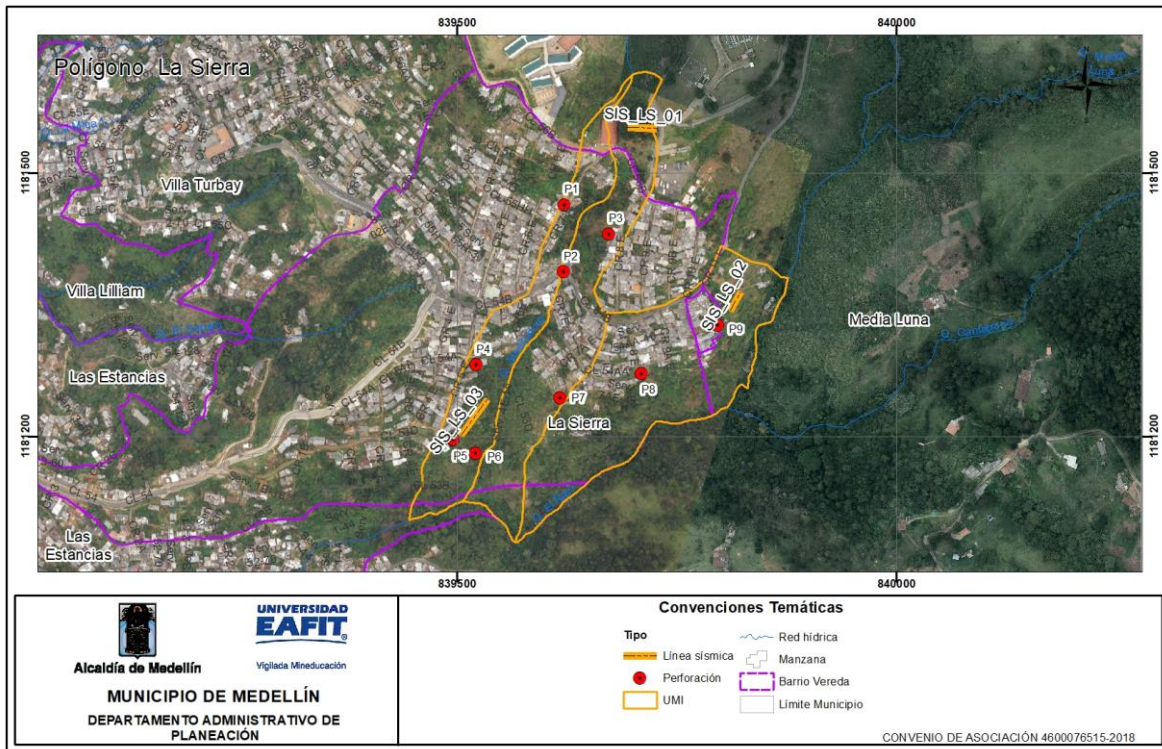


Figura 48. Localización Geográfica para las líneas sísmicas para el polígono La Sierra.

- *Resultado línea SIS_LS_01*

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 49, en ellas se observa la presencia de dos estratos que presentan velocidades diferentes, representadas en las pendientes de las líneas.

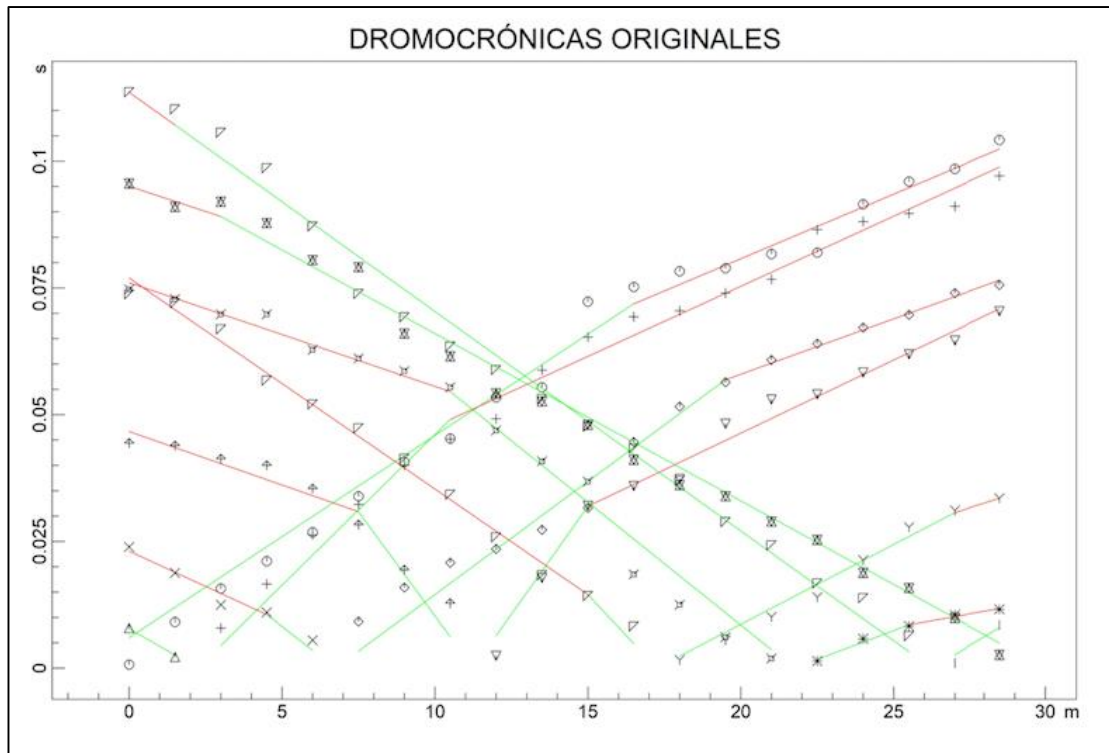


Figura 49. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_01.

La Figura 50 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_LS_01. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas primarias (P) de 214.4 m/s, y con un espesor de variable entre 2 y 5 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas primarias (P) de 407.7 m/s, con espesores variables, hacia el inicio de la línea alcanza los 4 m, mientras que al final de esta es de aproximadamente 1.5 m.

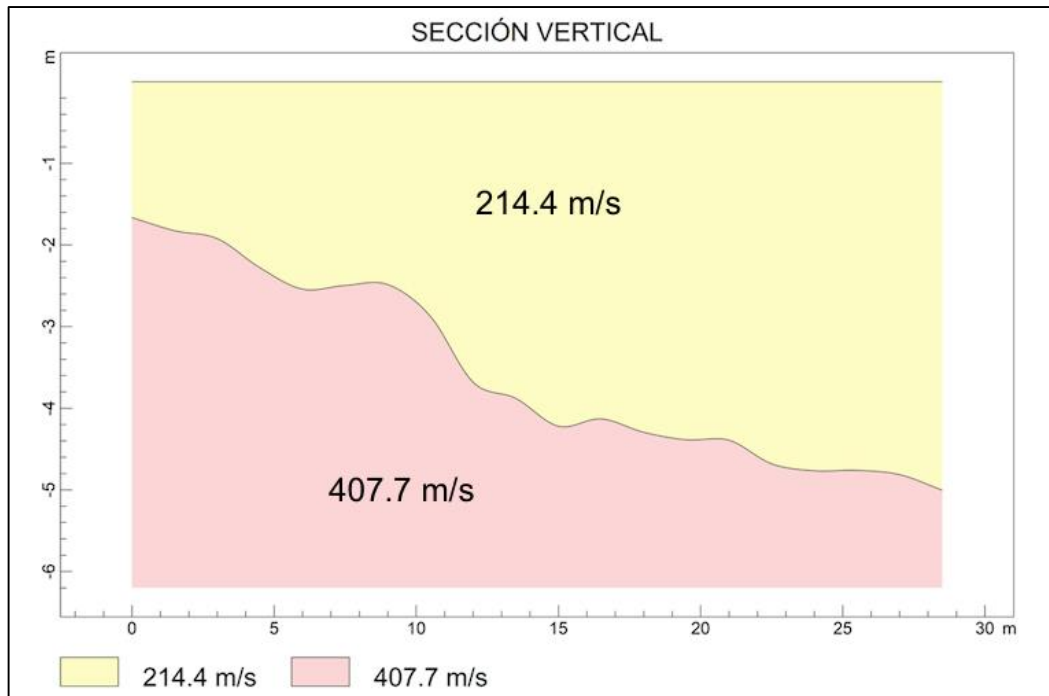


Figura 50. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_LS_01.

- *Resultados línea SIS_LS_02*

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 51, en ellas se observa la presencia de dos estratos, que presentan velocidades diferentes, reflejadas en las pendientes de las líneas.

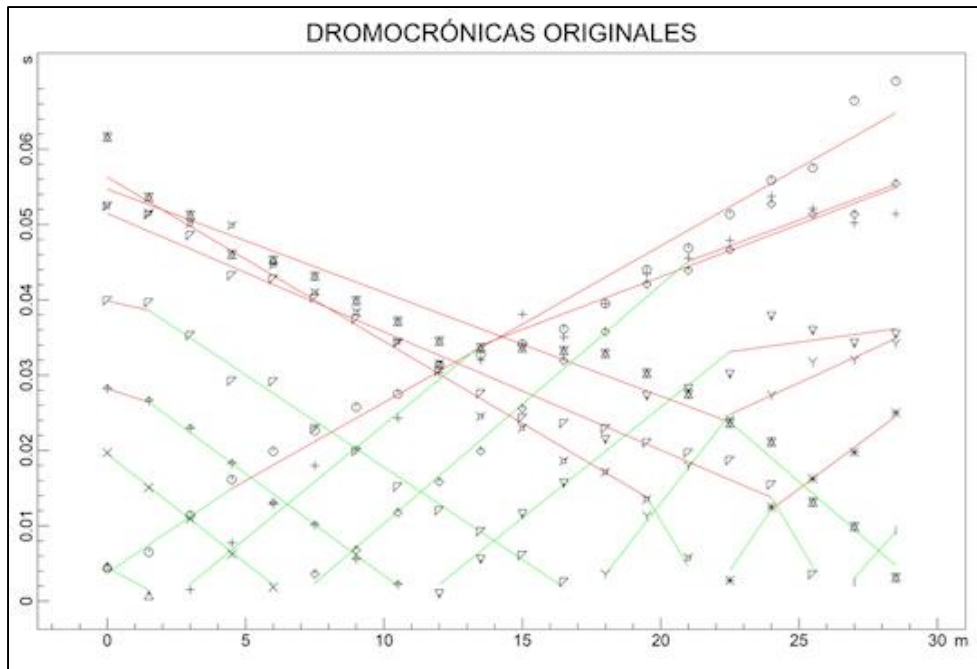


Figura 51. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_02.

La Figura 52 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_LS_02. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas Primarias (P) de 273 m/s, y con un espesor de variable desde 0,5 m hasta 2 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas Primarias (P) de 576.3 m/s, con espesores variables, hacia el inicio de la línea de 2.25 m, mientras que al final de esta es de aproximadamente 0.75 m.

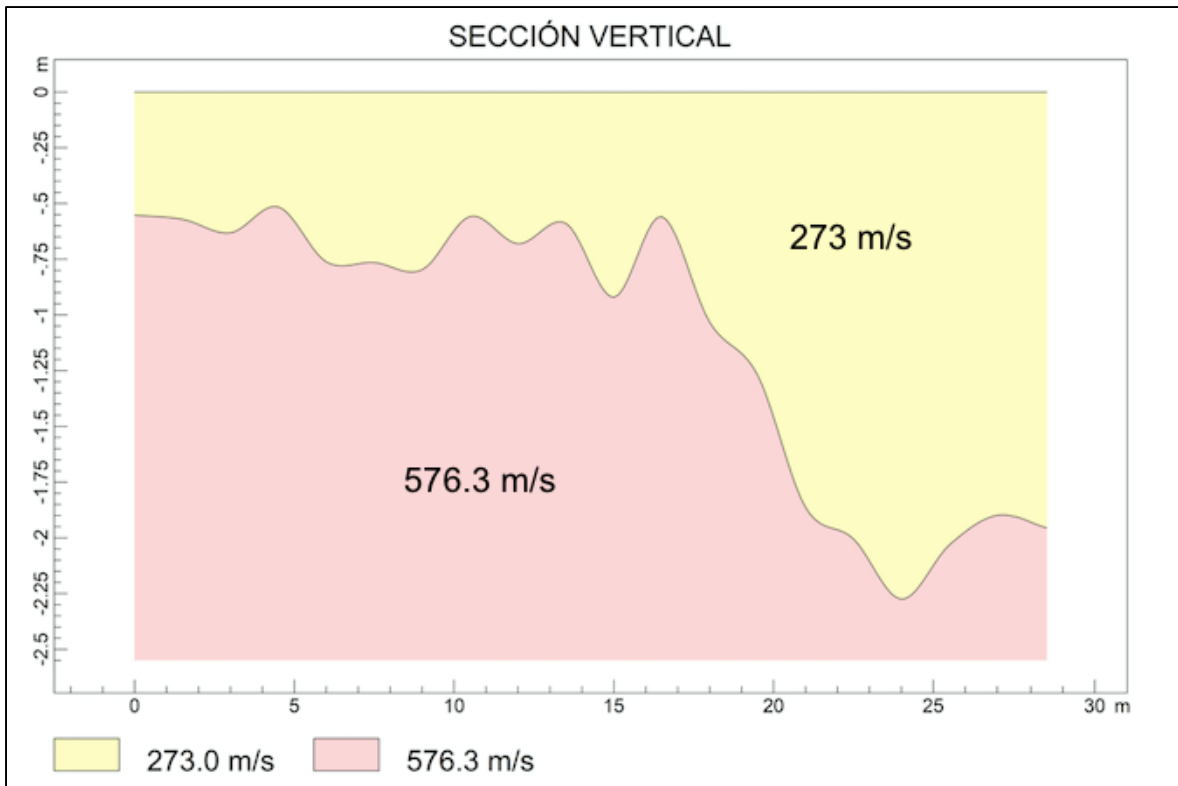


Figura 52. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_LS_02.

- *Resultados línea SIS_LS_03*

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 53, en ellas se observa la presencia de dos estratos que presentan velocidades diferentes como atestiguan las pendientes de las líneas.

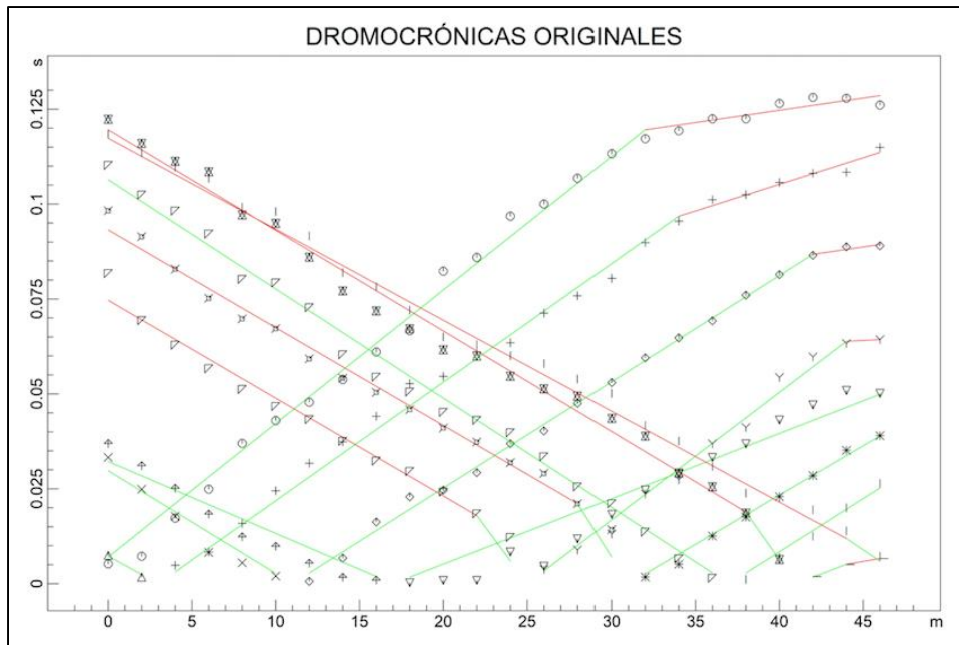


Figura 53. Curva dromocrónicas para la línea SIS_LS_03.

La Figura 54 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_LS_03. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas Primarias (P) de 297.5 m/s, y con espesores variables entre 2 a 12.5 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas Primarias (P) de 594.4 m/s, con espesores variables entre 2 a 12.5 m.

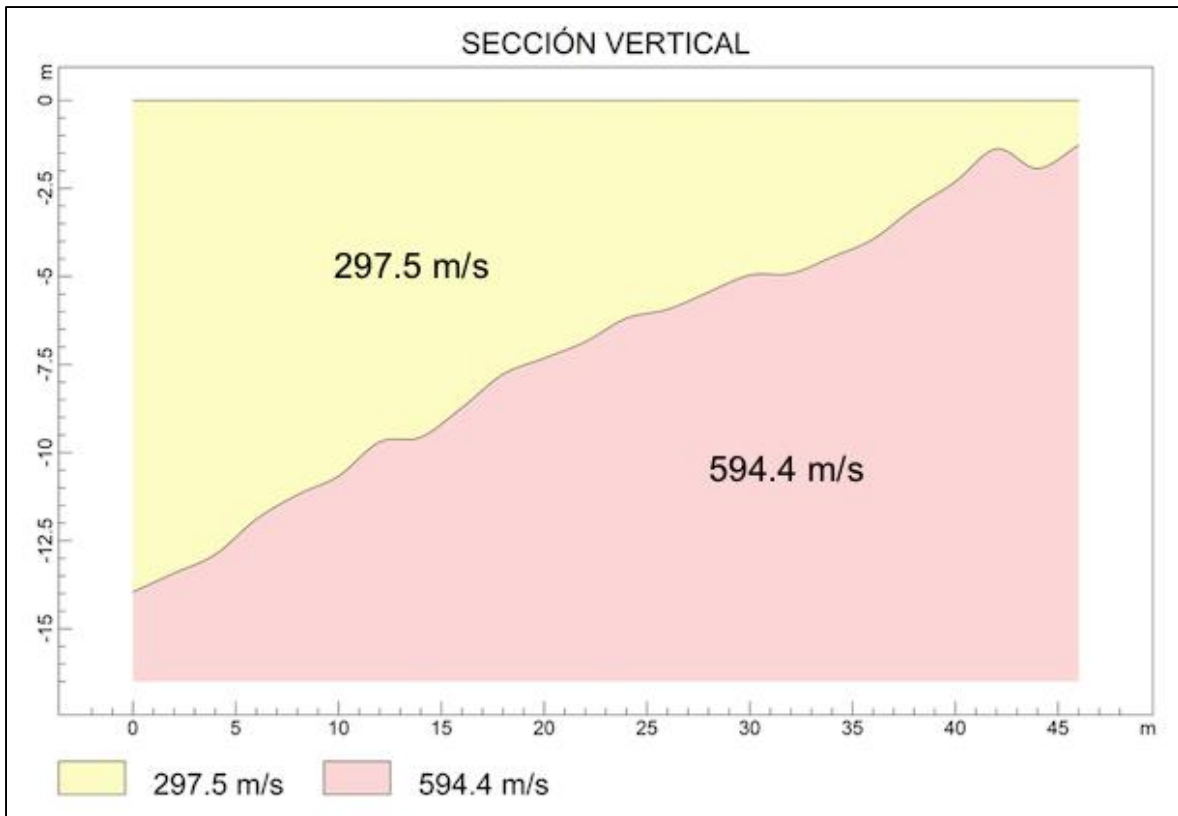


Figura 54.Modelo de capas de refracción sísmica línea SIS_LS_03.

7.1.2 Exploración Directa

Basado en las características topográficas y las formaciones geológicas de la zona a estudiar, se planteó un programa de exploración, que permitió definir el modelo geológico y geotécnico del polígono y sus características estratigráficas como físico-mecánicas, insumo fundamental en los análisis de estabilidad y en la definición y diseño de las obras de estabilización que se puedan requerir.

El trabajo de exploración contempló la ejecución de ocho (9) perforaciones exploratorias, para definir siete (7) perfiles o secciones de análisis.

El programa de exploración directa se realizó con taladros mecánicos, por el sistema de rotopercusión, que permitió explorar tanto suelos como rocas o mezclas de estos. La localización de los sondeos estuvo igualmente gobernada por la disponibilidad de espacios aptos para tal fin, pues como se puede verificar las condiciones de altas pendientes y la presencia de viviendas e infraestructura dificultaban la ubicación de estos.

Los sondeos definidos para el análisis fueron distribuidos de tal manera que se lograra la mayor cobertura del área a evaluar y adicionalmente se ubicaron para conformar pares de sondeos con el fin de establecer perfiles estratigráficos. Estos sondeos fueron denominados en este informe como P-1 hasta P-9.

La localización geográfica de los sondeos se detalla en la Tabla 12:

Tabla 12. Ubicación sondeos exploratorios

Sondeo	Coordenada Norte	Coordenada Este
P-1	839622	1181464
P-2	839622	1181388
P-3	839673	1181431
P-4	839522	1181282
P-5	839496	1181197
P-6	839522	1181181
P-7	839617	1181245
P-8	839710	1181272

En la Figura 55 se representa la ubicación de cada uno de los sondeos.

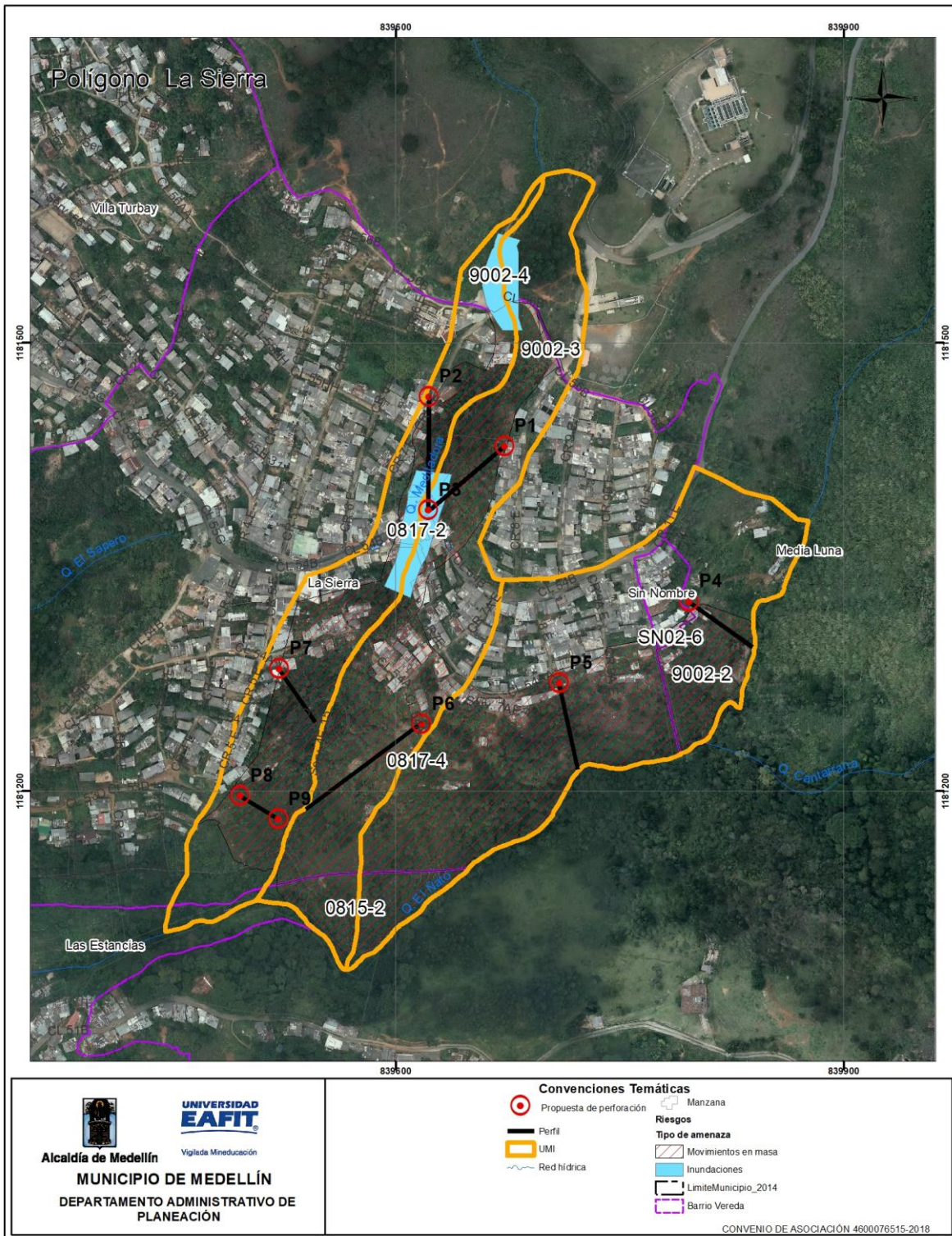


Figura 55. Localización sondeos exploratorios polígono La Sierra.

Las perforaciones que se ejecutaron en este proyecto, para el polígono La Sierra alcanzaron profundidades entre 15.0 y 17.0 m, donde se recuperaron tanto muestras alteradas como inalteradas. En la Tabla 13 se indica la profundidad alcanzada en cada uno de los sondeos. De cada sondeo ejecutado se levantó una columna estratigráfica que contiene la descripción de los materiales y sus propiedades, las cuales son presentadas en este documento en el Anexo No 2.

Tabla 13. Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.

Sondeo	Profundidad (m)
P-1	15.0
P-2	15.0
P-3	15.0
P-4	15.0
P-5	15.0
P-6	15.0
P-7	15.0
P-8	17.0
P-9	15.0

Durante la campaña exploración e investigación del subsuelo para cada uno de los sondeos ejecutados se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m, el cual permite conocer el número de golpes requerido al introducir un muestreador 45 cm, obteniendo un valor de N que corresponde a la suma de los golpes necesarios para penetrar los últimos 30 cm; este valor resulta útil en la determinación de la consistencia del material y la obtención de parámetros geomecánicos que caracterizan del subsuelo que conforma los diferentes estratos a partir del uso de correlaciones disponibles en la literatura.

Metro a metro para cada uno de los sondeos proyectados se toman muestras del material, el cual es visualmente caracterizado y almacenado en bolsas plásticas a fin de preservar sus características propias de estado límite, estas se conocen como muestras alteradas o remoldeadas por ser extraídas con un muestreador estándar, las muestras representativas son llevadas al laboratorio donde se les practican ensayos de clasificación para conocer el tipo de suelos, propiedades como humedad y límites de Atterberg. Adicionalmente se toman muestras inalteradas, extraídas con tubo Shelby, las cuales por la forma en que fueron recuperadas permiten obtener a través de ensayos específicos, como corte directo y compresión confinada, parámetros de resistencia que posteriormente son comparados con los

obtenidos a través de las correlaciones disponibles en la literatura especializada y que se apoyan en los resultados obtenidos del ensayo en campo SPT. La Figura 56 y Figura 57 presentan los muestreadores utilizados.



Figura 56. Muestreador estándar para el ensayo SPT



Figura 57. Muestreador de pared delgada

7.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO

Finalizado el trabajo de los sondeos o exploración directa, las muestras obtenidas en estos son llevadas al laboratorio de suelos, donde el equipo técnico conformado por geólogos y geotecnistas inspeccionaron los materiales y definieron para cada sondeo, una columna estratigráfica del material que compone el terreno, para posteriormente integrar la información de la totalidad de sondeos y establecer el modelo geológico de la zona, verificando y ajustando las descripciones dadas por el operario técnico que ejecuta el trabajo de exploración.

Una vez se tiene el perfil estratigráfico del subsuelo, se seleccionaron las muestras representativas de cada estrato las cuales son enviadas al laboratorio de suelos en donde se practican diferentes ensayos de caracterización. Para las muestras remoldeadas tomadas con el muestreador estándar se llevan a cabo ensayos como humedad natural, límites de Atterberg que dan como resultado los límites de consistencia e índice de plasticidad y el ensayo de granulometría que permite la

clasificación del material por el método U.S.C.S o ASHTHO. Sobre las muestras inalteradas tomadas en tubos shelby se llevan a cabo ensayos como corte directo o compresión inconfiada que permiten la obtención de las propiedades de resistencia de los suelos.

La Tabla 14 contiene la cantidad de muestras analizadas por cada tipo de ensayo:

Tabla 14. Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.

Tipo de ensayo	Cantidad
Limite Liquido	25
Limite Plástico	25
Humedad Natural	29
Granulometría por lavado sobre tamiz N° 200	25
Corte directo CD	4

En la Tabla 15 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos realizados a las muestras recuperadas.

Tabla 15. Resultados de laboratorio Polígono La Sierra.

RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO										
Ensayos Sondeo-Muestra	Prof. muestr a (m)	Humeda d Natural (%)	Límit e líquid o (%)	Limite plástic o (%)	Índice plástic o (%)	Pasa malla 200 (%)	Cohesió n KPa	Ang Fricció n (°)	Peso unitari o (kN/m3)	Clasifica ción USCS
P2	7.5	43.4	-	-	-	-	36	26.4	17	-
P3	3.0	40.99	63.9	32.5	31.4	71.9	-	-	-	MH
P3	10	27.39	48.2	23.3	24.9	52.6	-	-	-	CL
P4-M4	3	51.49	72	36.8	35.2	86.1	-	-	-	MH
P4-M7	6	51.71	73.1	35.5	37.6	85.8	-	-	-	MH
P5-M2	1	37.2	61.7	32.5	29.2	78.2	-	-	-	MH
P5-M5	4	42.77	74.3	38.6	35.7	75.5	-	-	-	MH
P5-M7	6	47.90	70	35.7	34.2	65.3	-	-	-	MH
P4-M6	5	45.4					4.2	27.6	17	
P5-M6	5	47.3					8.2	37.9	17	
P6-M5	4	47.7					68.7	32.8	16	
P6-M6	5	33.3					21.3	47.9	17	
P9-M4	3	35.9	0				0	45	18	

7.3 ANALISIS GEOTECNICO

Con base en la caracterización geológica y los resultados del programa de exploración, así como los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras seleccionadas, se realizó el análisis geotécnico que, basado en la definición y caracterización del modelo geológico y geotécnico, permitió realizar los análisis de estabilidad de las zonas evaluadas.

7.3.1 Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

Concluidas la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustan y complementan perfiles representativos de la conformación del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo con las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Estratigrafía

Para el sector del polígono La Sierra se detectaron materiales antrópicos en superficie dispuestos sin ninguna especificación técnica, subyaciendo estos llenos se encontraron depósitos de vertiente en las perforaciones 7,8 y 9 y suelo residual en las perforaciones 4,5 y 6. En las perforaciones 1,2 y 3 se encontró transición suelo roca subyaciendo el lleno. A continuación, se hace una descripción de los estratos identificados y sus variaciones significativas.

- **Llenos antrópicos:** El material de origen antrópico fue detectado de forma superficial en todos los sondeos ejecutados excepto en las perforaciones 1 y 8 con espesores entre y 5 metros, este material conforma principalmente los terrenos de vías y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo. Están compuestos por fragmentos de roca, fragmentos de concreto y ladrillo en matriz limosa.

Clasificación USC: MH

Humedad natural: Varía entre 37.2% - 40.99%

Límite líquido: Varía entre 70% - 74.3%

Índice plástico: Varía entre 29.2% - 31.4%

Pasa malla 200: Varía entre 71.9% - 78.2%

- **Depósito de vertiente:** Este material fue detectado subyaciendo el lleno antrópico en los sondeos P7, P8 y P9, con espesor variable entre 9 y 13.0 m. Material conformado por fragmentos y bloques de roca en matriz limosa.

Estos materiales presentan las siguientes propiedades:

Clasificación USC: MH

Humedad natural: 35.9%

Cohesión: 0 Kpa

Angulo de fricción interna: 45°

Peso unitario: 18 KN/M³

- **Suelo residual de dunita IB:** Correspondiente al nivel superior del perfil de meteorización; se observó en los sondeos P4, P5 y P6 perfiles 4,5 y 6 corresponde a un limo color café. Las siguientes son las propiedades físicas principales:

Clasificación USC: MH

Humedad natural: Varía entre 33.3% y 51.71%

Límite líquido: Varía entre 70% y 74.3%

Índice plástico: Varía entre 34.2% Y 37.6%

Pasa malla 200: Varía entre 65.3% Y 86.1%

- **Suelo residual del Stock de Las Estancias (Horizonte IB):** Estos materiales se detectaron en las perforaciones P8 y P9 corresponden a arenas.

Transición de suelo a Dunita (Horizonte IIA): Identificado en las perforaciones 1, 2 y 3 compuesto por fragmentos y bloques de roca en matriz limosa.

En la perforación 2 fue posible recuperar una muestra inalterada correspondiente a la matriz de esta transición con una cohesión de 36 Kpa y un ángulo de fricción interna de 26.4°.

Horizonte III de Dunita.

Encontrado en las perforaciones P1, P2 perfiles 1 y 2 con un RQD=20% corresponde a roca muy fracturada. En la perforación 1 se encontró a partir de los 5 metros de profundidad y en la perforación 2 a partir de los 12 metros.

Los parámetros geomecánicos se definieron a partir del modelo Generalizado de Hoek y Brown. A continuación se presentan los parámetros utilizados.

Tabla 16 Clasificación a partir del GSI.

Definición de parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos se obtuvieron a partir de la información recopilada de los sondeos exploratorios y de los análisis de los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras extraídas en cada uno de ellos, teniendo en cuenta también el comportamiento del suelo a partir del ensayo SPT realizado en

campo y los valores de referencias bibliográficas de reconocidos autores. Al analizar esta información en conjunto es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

En la literatura especializada existen diversas correlaciones entre el valor de N , obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados por el personal técnico de acuerdo con su experiencia y conocimientos sobre la zona de objeto de estudio.

Las correlaciones disponibles para la obtención de parámetros como cohesión y ángulo de fricción que se encuentran en la literatura requieren el análisis del valor de N obtenido en el ensayo SPT y corregirlo posteriormente, para lo cual se utiliza la ecuación propuesta por Bowles, la cual permite obtener un valor de N corregido que posteriormente permite una mejor aproximación a los valores de resistencia. Dicha ecuación tiene en cuenta correcciones por confinamiento, energía del martillo, longitud de las barras de perforación, por el tomamuestras y finalmente por el diámetro de la perforación.

La ecuación propuesta por Bowles (1988) para el valor de N corregido se la define de la siguiente manera:

$$N_s = N * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

Donde:

N : N de Campo

C_n : Corrección por confinamiento.

η_1 : Corrección por energía del martillo.

η_2 : Corrección por longitud de barras de perforación

η_3 : Corrección por tomamuestras.

η_4 : Corrección por diámetro de la perforación

Con el valor de N corregido a partir de lo anterior y los resultados de laboratorio obtenidos para cada estrato se ajusta el parámetro de cohesión y fricción que se

definirá para cada material siendo congruente con las observaciones realizadas en campo.

Para cada estrato se hizo un análisis de los parámetros obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura, despreciando aquellos valores que no resultaban representativos con base en la experiencia del equipo técnico que adelanta el presente estudio. Las correlaciones usadas se presentan en la Tabla 17:

Tabla 17. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos

CORRELACIONES USADAS PARA DETERMINAR PARÁMETROS DE RESISTENCIA A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)	
Kulhawy y Mayne (1990)	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma'_0}{Pa} \right)^{0.34}} \right)$
Wolff (1989)	$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N_{corr} - 0.00054 N_{corr}^2$
Hatanaka y Uchida (1996)	$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 20} \quad \phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 17}$
Parra y Ramos (2006)	$\phi = 5.35 \ln(N) + 14.44$ $Cu = 0.22 \cdot \ln(N) - 0.4$
Müller (1970)	$\phi = 24 + 5.77 \ln(0.1667 N_{SPT})$
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{145}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 * \left(2 - e^{\left(-\frac{N_{145}}{62} \right)} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20 * N_{145})}$
Schmertmann	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{43.3} \right)^{0.34}$
Japan National Railway	$\phi = 27 + 0.1875 * N_{145}$
Japan Road Bureau	$\phi = 15 + (9.375 * N_{145})^{0.5}$
Stroud (1974)	$C_u = K \cdot N [kN/m^2] \quad K \begin{cases} 3.5 \text{ kN/m}^2 \\ 6.5 \text{ kN/m}^2 \end{cases}$
Hara y otros (1971)	$C_u = 29 \cdot N^{0.72} [kN/m^2]$
Mesri (1989)	$Cu = 0.22 * \sigma'_0$

Para cada uno de los sondeos ejecutados se corrigió el valor de N de campo a partir de la ecuación propuesta por Bowles y hallando los parámetros de cohesión y fricción según los golpes del ensayo SPT, delimitando dentro de cada sondeo los estratos litológicos que se identificaron en el mismo. Posteriormente se hizo un análisis para cada estrato, agrupando los parámetros de cohesión y fricción obtenidos de cada sondeo para el estrato correspondiente, los resultados se presentan en el anexo 3.

Con la información anterior se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se evidenció durante los recorridos del equipo técnico. Se utilizaron todas las correlaciones presentadas en la tabla anterior, de las cuales se descartaron aquellas que arrojaron magnitudes que a criterio del geotécnista y apoyado en valores de la literatura especializada, se encuentran fuera de los intervalos considerados “representativos” para cada tipo de suelo. El procedimiento para obtener los valores finales de cohesión y fricción consiste en la obtención de un valor promedio, mínimo y máximo de dichos valores para cada una de las correlaciones utilizadas, descartando aquellas consideradas no representativas. Posteriormente, a criterio del geotécnista se selecciona ya sean los valores mínimos, máximos o promedios que se constituirán como la muestra estadística final para obtener la media, la desviación estándar, el mínimo y el máximo de los parámetros geomecánicos.

De igual manera, es preciso aclarar que en el proceso de selección de los parámetros geomecánicos, se realizó adicionalmente un proceso de ajuste de estos, mediante los análisis de estabilidad en la condición actual, que permitieron calibrar el modelo para que los resultados reflejaran las condiciones observadas en campo. Para este aspecto se consideraron criterios propuestos por los autores Rodrigo Arellano, Javier Bielefeldt y Dennys Correa en su documento “Análisis de taludes mediante ensayos y back análisis de fallas” donde mencionan que para taludes que no han fallado “Si el talud exhibe grietas de tracción incipientes en su coronación se puede utilizar un $1.1 < FS < 1.15$ para el análisis retrospectivo. Si no se encuentran grietas el factor de seguridad debería ser mayor a 1.3

A continuación, se detallan los parámetros de resistencia de los diferentes estratos que conforman el perfil geológico-geotécnico:

LLENO ANTRÓPICO

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 29° a partir de Kishida, JRB, Muller, Parra y Ramos y 9 kPa para la cohesión según Mesri ya que es el mínimo valor obtenido teniendo en cuenta que son llenos que no fueron conformados técnicamente.

Tabla 18. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	28.5	9.0
Desviación	0.9	0.0
Mínimo	27	9.0
Máximo	29	9.0

DEPOSITO DE VERTIENTE

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 26° y 45° Descartando Kulhaway para la cohesión entre 0 kPa y 20kPa según Mesri, Parra y Ramos.

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados (Tabla 19):

Tabla 19. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del Depósito de vertiente.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
P9	Dep Vert	Corte CD	45	0

En los análisis estadísticos se incluyó el valor del resultado de laboratorio (Tabla 20).

Tabla 20. Parámetros geomecánicos del estrato Depósito de vertiente.

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	31.2	12.7
Desviación	4.8	9.0
Mínimo	26	0
Máximo	45	20

HORIZONTE IB DE DUNITA

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 37° descartando Kullhaway, Peck y Schmertman y entre 4 kPa y 25 kPa para la cohesión (según Mesri y Parra).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados (Tabla 21):

Tabla 21. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción ($^\circ$)	Cohesión (kPa)
P4 a 5m.	Residual IB	Corte CD	27.6	4.2
P5 a 5m.	Residual IB	Corte CD	37.9	8.2
P6 a 4m.	Residual IB	Corte CD	32.8	68.7
P6 a 5m.	Residual IB	Corte CD	47.9	21.3

Los resultados de los análisis de laboratorio se incluyeron en los análisis estadísticos. A continuación se presentan los resultados obtenidos (Tabla 22):

Tabla 22. Parámetros geomecánicos del horizonte IB de Dunita

	Fricción ($^\circ$)	Cohesión (kPa)
Media	31	15.5
Desviación	2.8	8.0
Mínimo	27	4.2
Máximo	37.9	25

TRANSICIÓN SUELO ROCA IIA

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 37.9° descartando Kullhaway, Peck y Schmertman y entre 4.2 kPa y 36 kPa descartando Stroud.

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados (Tabla 23):

Tabla 23 Parámetros de laboratorio para la transición suelo roca.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
P2 a 7.5m	Transición suelo roca	Corte CD	28.4	36

A continuación se muestran los parámetros estadísticos obtenidos (**Tabla 24**):





Tabla 24 Parámetros estadísticos para la transición suelo roca.

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	30.8	19
Desviación	2.8	10.5
Mínimo	27	4.2
Máximo	37.9	38

DUNITA FRACTURADA Y METEORIZADA

Para la definición de los parámetros geomecánicos del material clasificado como roca fracturada y meteorizada se utilizó la metodología generalizada de Hoek and Brown fundamentada en el GSI (Tabla 25).

Tabla 25 Parámetros geomecánicos Roca.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	a
Lleno		17	Mohr-Coulomb	15.5	31				
Transición suelo roca (IIA)		17	Mohr-Coulomb	19	30.8				
Dunita (III)		17	Generalised Hoek-Brown			175000	0.1954	8.57494e-006	0.522344
Lleno antropico		16	Mohr-Coulomb	9	28.5				

Para los análisis estadísticos de los parámetros y propiedades, se asumirá una función de distribución de probabilidad normal para cada uno de los parámetros involucrados (cohesión y ángulo de fricción interna). Se considera que una función normal, es una de las que mejor se ajusta a la distribución de variables o propiedades en la naturaleza. Las variables determinadas por una compleja combinación de múltiples factores tienden a comportarse, ‘normalmente’, es decir, tienden a estar bien representadas por una ‘distribución normal’ o ‘curva de campana’.

Nivel Freático: El nivel freático solo se encontró en las perforaciones 3 y 7, sin embargo en todos los análisis se asumió existencia de nivel frático ya que este varía a lo largo del año y las perforaciones se realizaron en una época específica del año y para un perfil una o dos perforaciones lo cual resulta insuficiente para asumir que no se encuentra nivel freático a lo largo del perfil.

7.3.2 Definición de modelos geológico-geotécnicos

Una vez terminado el programa de exploración y obtenidos los resultados de laboratorio, se plasmó en los perfiles topográficos, la información geológica y geotécnica, construyendo de esta manera el modelo de análisis, que involucra la estratigrafía, las características físicas y mecánicas de los estratos, la presencia de nivel freático entre otros.

Como se mencionó anteriormente, para el polígono La Sierra se levantaron siete (7) perfiles topográficos, con los cuales se hicieron los respectivos análisis geotécnicos. En la Figura 58 se muestra la ubicación de los sondeos y los perfiles correspondientes.

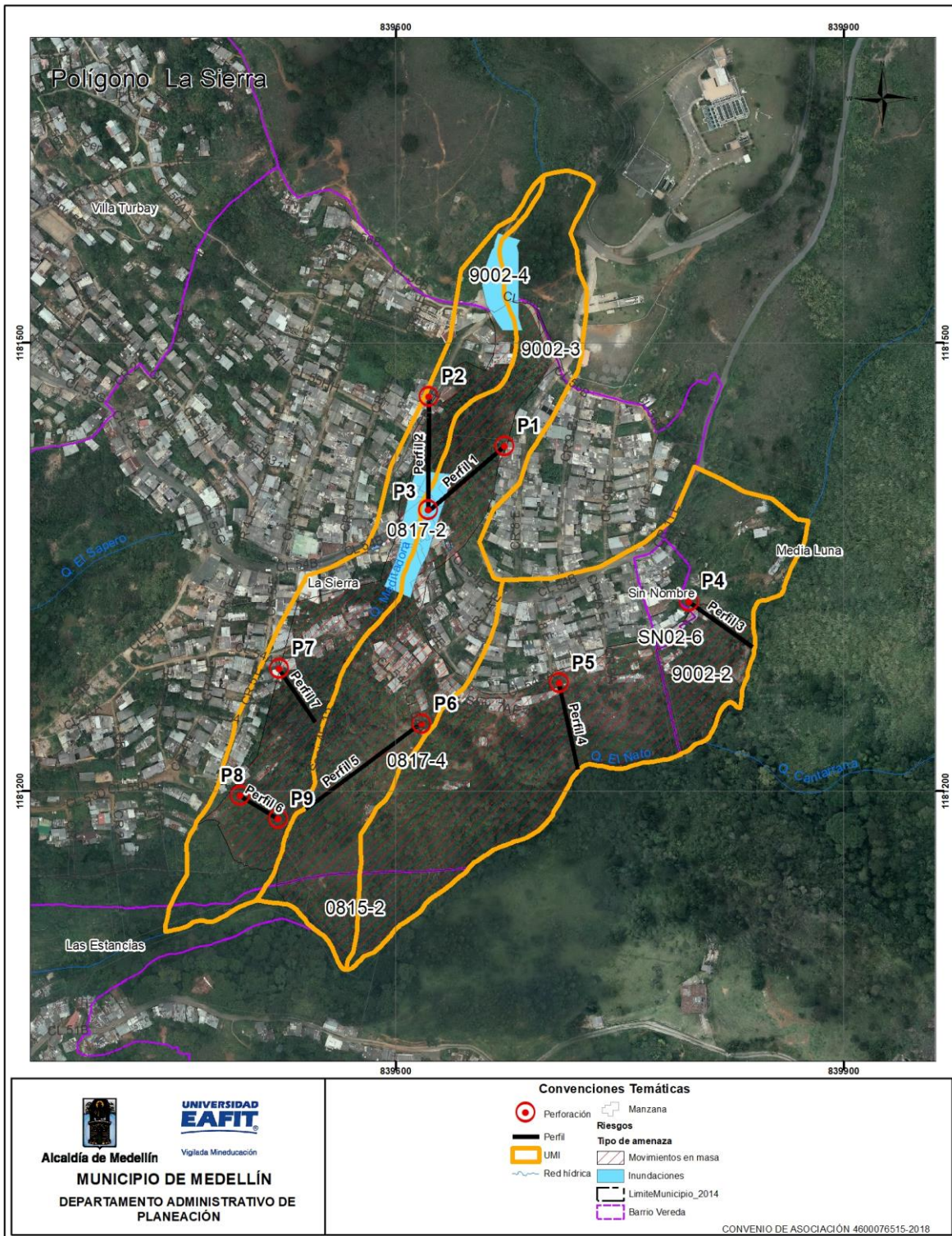


Figura 58. Localización perfiles y sondeos Polígono La Sierra

Perfil 1. Ubicado en el extremo NW del polígono en la carrera 8E con la calle 54B con una dirección NE, está definido estratigráficamente por los sondeos P1 y P-3.

Estratigráficamente se conforma por un lleno superficial, subyaciendo el lleno transición suelo roca con un espesor promedio de 4 metros, debajo de la Transición suelo roca dunita muy fracturada (Figura 59).

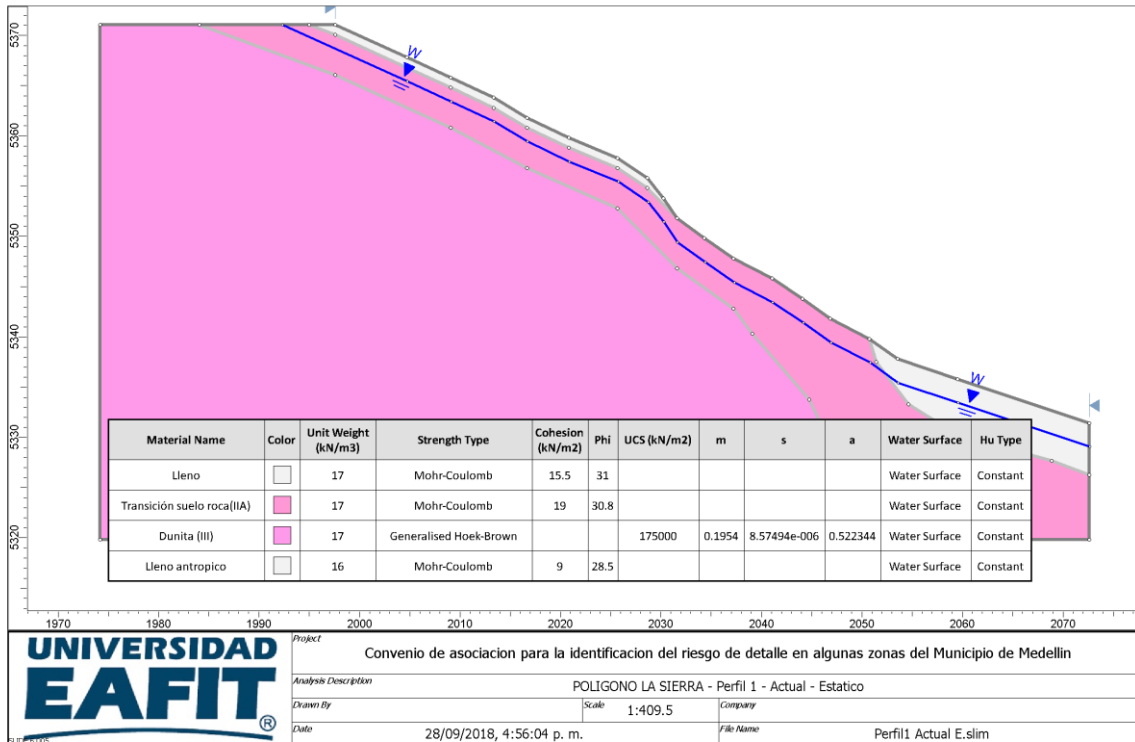


Figura 59. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 La Sierra.

Perfil 2. El perfil 2 se ubica en el extremo NW del polígono entre la carrera 7E y la calle 54B con una longitud de 80 metros y una dirección NW está conformado por un lleno superficial con un espesor de 2 metros subyacido por transición suelo roca con un espesor de 10 metros, debajo de la transición suelo roca dunita muy fracturada (Figura 60).

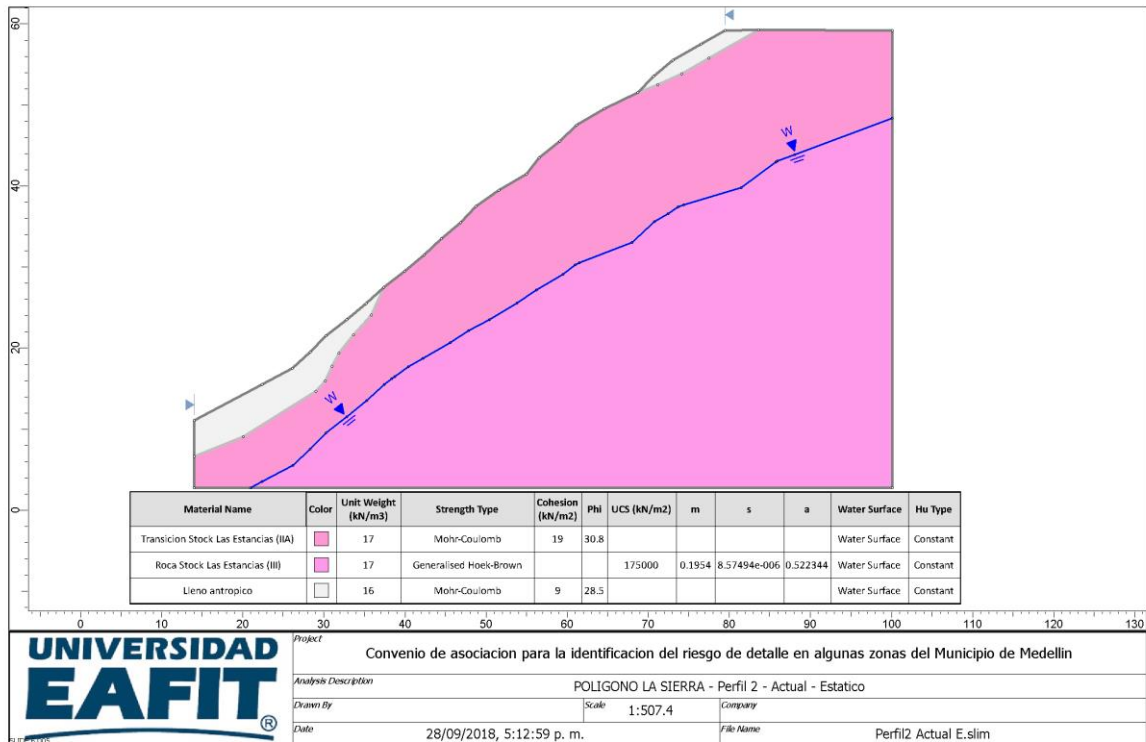


Figura 60. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 La Sierra.

Perfil 3. El perfil 3 se ubica en el extremo NE del polígono entre la carrera 10E y la calle 54AA con una longitud de 68 metros y una dirección NW está conformado por un lleno superficial en la parte superior del perfil con un espesor de 3 metros subyacente por suelo residual con un espesor de 4 metros, debajo del suelo residual dunita muy fracturada (Figura 61).

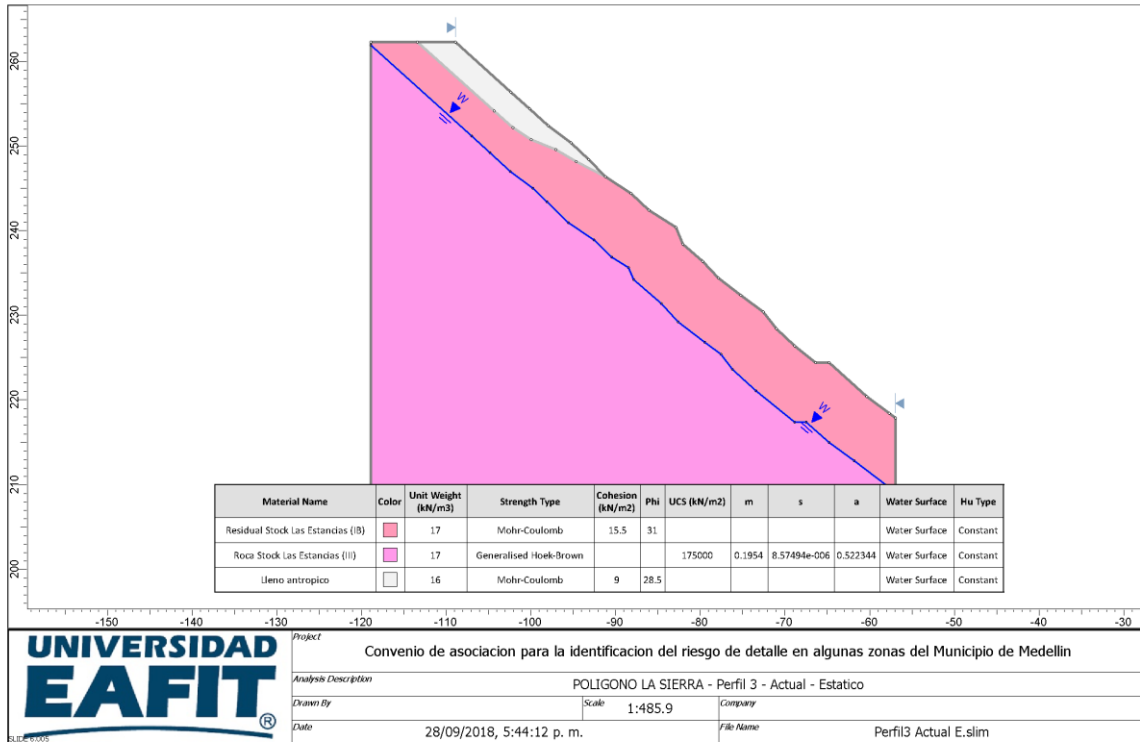


Figura 61. Modelo geológico-geotécnico perfil 3 La Sierra.

Perfil 4. El perfil 4 se ubica en el extremo oriental del polígono entre la carrera 9AE y la calle 54AA con una longitud de 80 metros y una dirección NW está conformado por un lleno superficial en la parte superior del perfil con un espesor de 3 metros subyacido por suelo residual con un espesor de 4 metros, debajo del suelo residual dunita muy fracturada (Figura 62).

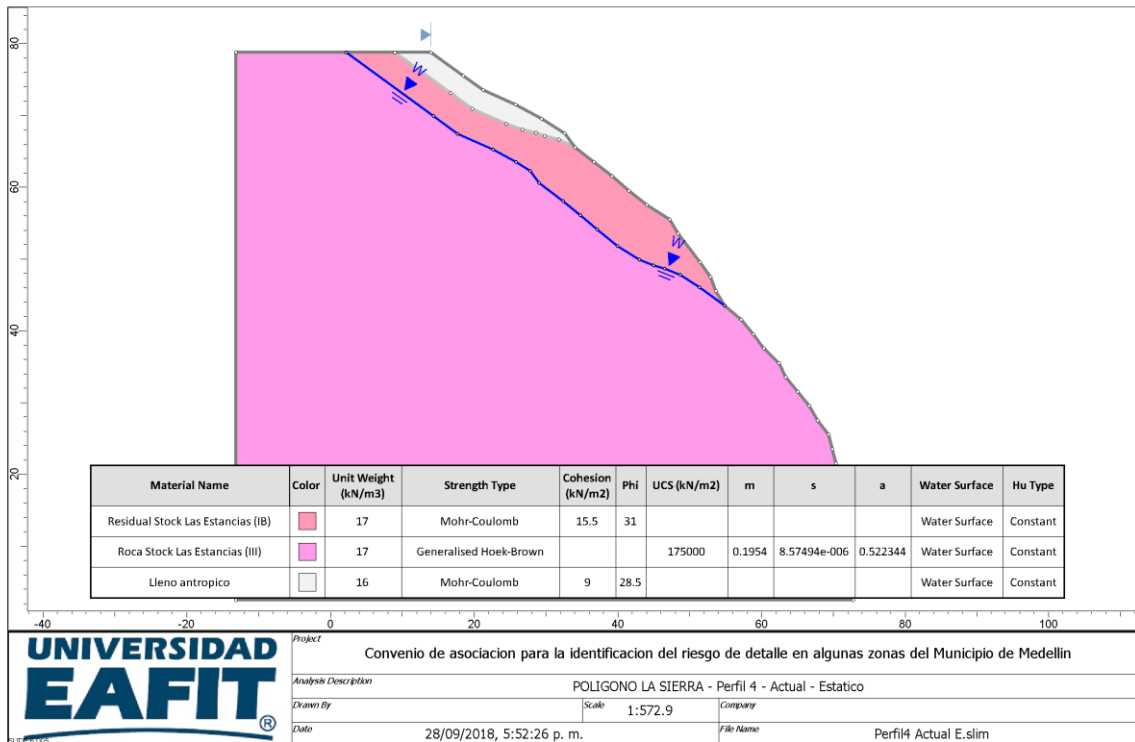


Figura 62. Modelo geológico-geotécnico perfil 4 La Sierra.

Perfil 5. El perfil 5 se ubica en el extremo sur del polígono entre la carrera 7AE y la calle 54A con una longitud de 120 metros y una dirección NE está conformado por un lleno superficial en la parte superior del perfil con un espesor de 3 metros subyacido por suelo residual con un espesor de 5 metros, debajo del suelo residual transición suelo roca con un espesor de 4 metros, subyaciendo la transición suelo roca dunita muy fracturada (Figura 63).

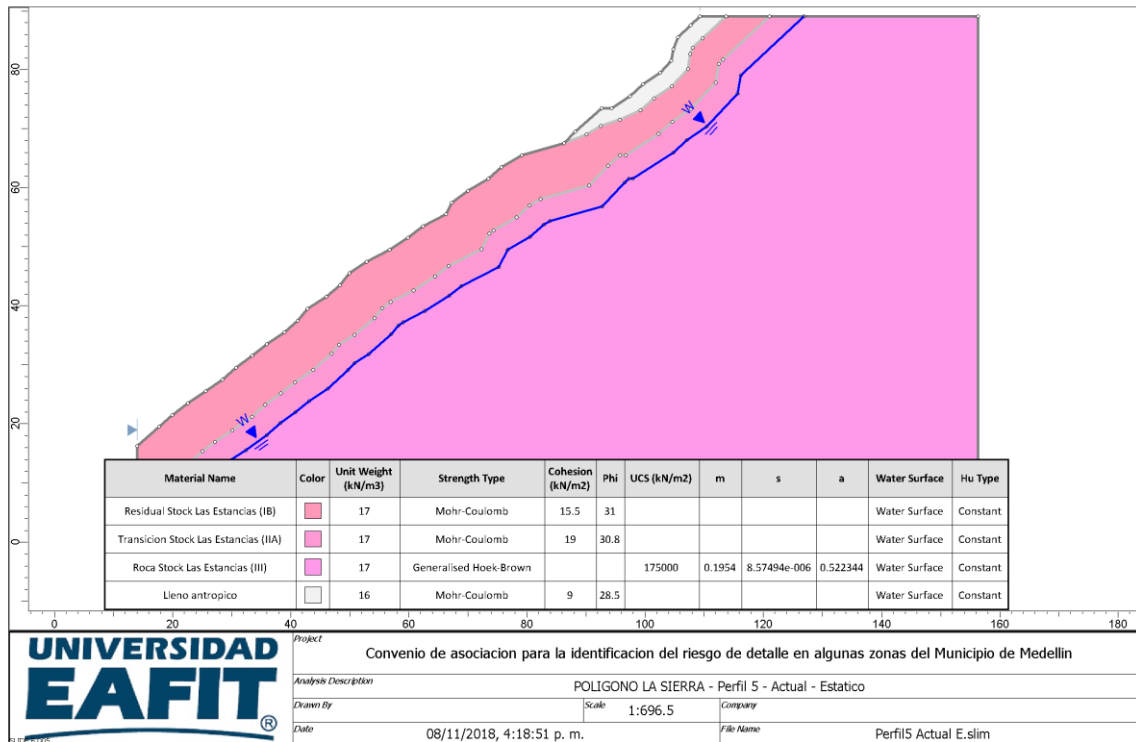


Figura 63 Modelo geológico geotécnico perfil 5 La Sierra.

Perfil 6. El perfil 6 se ubica en el extremo SW del polígono entre la carrera 5E y la calle 53D con una longitud de 35 metros y una dirección NW está conformado por un lleno superficial en la parte inferior del perfil con un espesor de 2 metros subyacido por depósito de vertiente con un espesor de 11 metros, debajo del depósito de vertiente suelo residual del Stock de Las Estancias (arena) con un espesor de 4 metros, subyaciendo el suelo residual roca dunita muy fracturada (Figura 64).

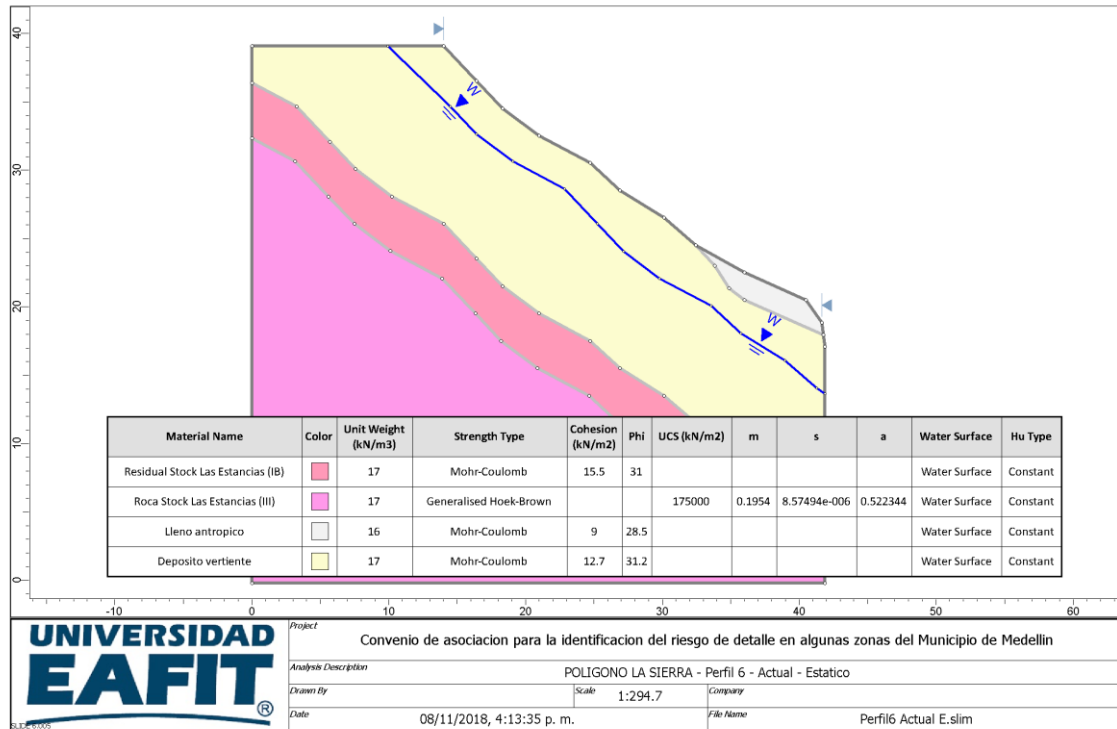


Figura 64 Modelo Geológico Geotécnico Perfil 6 La Sierra

Perfil 7. El perfil 7 se ubica en el extremo occidental del polígono entre la carrera 6E y la calle 54A con una longitud de 58 metros y una dirección NW está conformado por un lleno superficial en la parte superior del perfil con un espesor de 2 metros subyacente por depósito de vertiente con un espesor de 10 metros, debajo del depósito de vertiente transición suelo roca del Stock de Las Estancias (Figura 65).

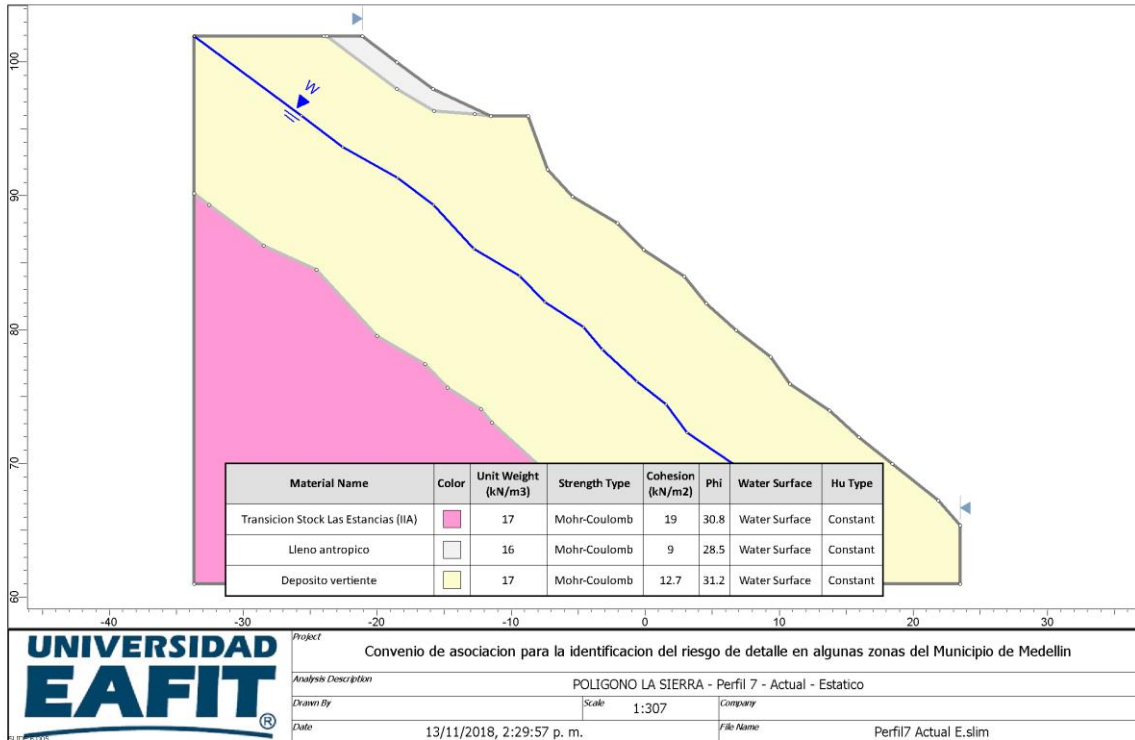


Figura 65 Modelo Geológico Geotécnico perfil 7 La Sierra.

7.3.3 Análisis de estabilidad condición actual

Para evaluar la estabilidad de la zona de estudio se consideraron 2 diferentes situaciones o escenarios: Una situación actual y una situación futura con las obras propuestas. Estos escenarios fueron considerados tanto en condiciones estáticas como seudoestáticas. El análisis con las obras propuestas o situación futura o proyectada se presentará en un numeral posterior, una vez se haya definido la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 que se fundamenta en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Janbu, Bishop etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud. Para este caso se consideró de acuerdo con observaciones de campo, tipo de material, condiciones topográficas, que la falla más probable corresponde a fallas circulares.

Como se mencionó anteriormente, para el polígono La Sierra se levantaron siete (7) perfiles topográficos típicos que representaban las condiciones morfométricas del sector, en los cuales se plasmó la información estratigráfica y geotécnica.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y seudoestático fue tomado de las recomendaciones de la Norma de construcciones sismoresistentes (NSR-10) (Tabla 26).

Tabla 26. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos)

Condición	FSBM		FSBUM	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo-estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Para el análisis seudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sismo de diseño, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestáticos de taludes (KST) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se calcula en función de la aceleración pico efectiva (A_a), del factor de amplificación F_a y del coeficiente de importancia (I) como:

$$a_{max} = a_a * F_a * I$$

Para el caso de la zona 10 donde se ubica el Polígono La Sierra, el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Medellín estableció un valor de a_{smax} 0.09 para sismos de servicio y F_a como 2.78 (Tabla 27). Considerando el tipo de edificaciones (grupo III), el coeficiente de importancia es 1.0. Si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que: $a_{max} = 0.25g$

Tabla 27. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño
(Tomado Microzonificación sísmica Medellín, 2006)

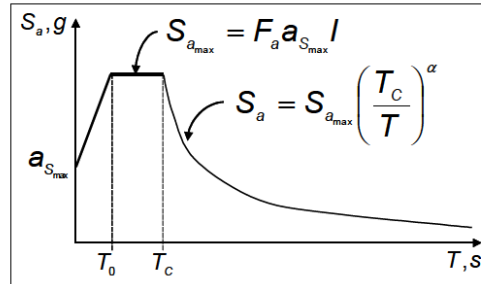


Figura 0. Espectro generalizado

Zona Homogénea	Sismo de control de daños						Sismo de diseño					
	aSmx	Fa	Smx/I	T0	Tc	α	aSmx	Fa	Smx/I	T0	Tc	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

El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los siguientes valores mínimos de KST/ a_{max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis (Tabla 28).

Tabla 28. Valores de Kst/ a_{max} (Tomado NSR-10)

Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales téreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales téreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Para el caso de suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados se tiene una relación $KST/a_{max} = 0.80$, entonces El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático sería $(KST) = 0.20$.

Para definir amenaza por estabilidad, el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se toma de acuerdo a lo planteado en el Decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo.

Para el caso estático se determina la condición de amenaza de acuerdo al factor de seguridad obtenido, para los casos seudoestático y saturado se tomarán como valores de referencia los correspondientes a la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla presentada en los diferentes análisis realizados es un valor adimensional y corresponde a la probabilidad de que ocurra una falla en el talud, dado que se está presentando un escenario específico, por ejemplo, en el caso seudoestático la probabilidad de falla presentada corresponde a la probabilidad de falla dado que en ese momento se está presentando el sismo definido, sin embargo, para obtener la probabilidad real debe considerarse también la probabilidad que el sismo realmente ocurra.

La lluvia y el sismo son los factores detonantes considerados dentro de los escenarios planteados y estos factores se encuentran asociados a un periodo de retorno determinado, por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento viene definido por $1/Tr$, donde Tr es el periodo de retorno del factor detonante con unidades $1/\text{año}$; al realizar el producto de esta probabilidad de ocurrencia por la probabilidad de falla presentada en cada modelo se obtendrá la probabilidad final para cada escenario analizado, (la cual responde a la probabilidad de que ocurra X dado que ocurrió Y), por ejemplo, la probabilidad de que se dé un deslizamiento dado que se está presentando el sismo (que es finalmente el factor detonante).

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y considerando que el periodo de retorno del sismo incorporado en los análisis es de 475 años ($PF=0.0021/\text{año}$) se calculan las probabilidades de falla para este escenario y se presentan en cada perfil de manera detallada, lo cual se presenta de manera similar para ese escenario saturado donde el periodo de retorno es de 25.1 años ($PF=0.04/\text{año}$).

Perfil 1

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.26 y el factor de seguridad medio es de 1.46 con una probabilidad de falla del 0.0% (**Figura 66**). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.92 y el factor de seguridad medio es de 1.06 con una probabilidad de falla de 40.8%. Finalmente, para el perfil No 1 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.83 y un factor de seguridad medio de 1.02, con una probabilidad de falla de 51.2%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como media para la condición estática, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad se ubican entre 1.2 y 1.5. La profundidad de falla se estima en 3.5 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que $FS=0.83$. En la Figura 67 y Figura 68 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

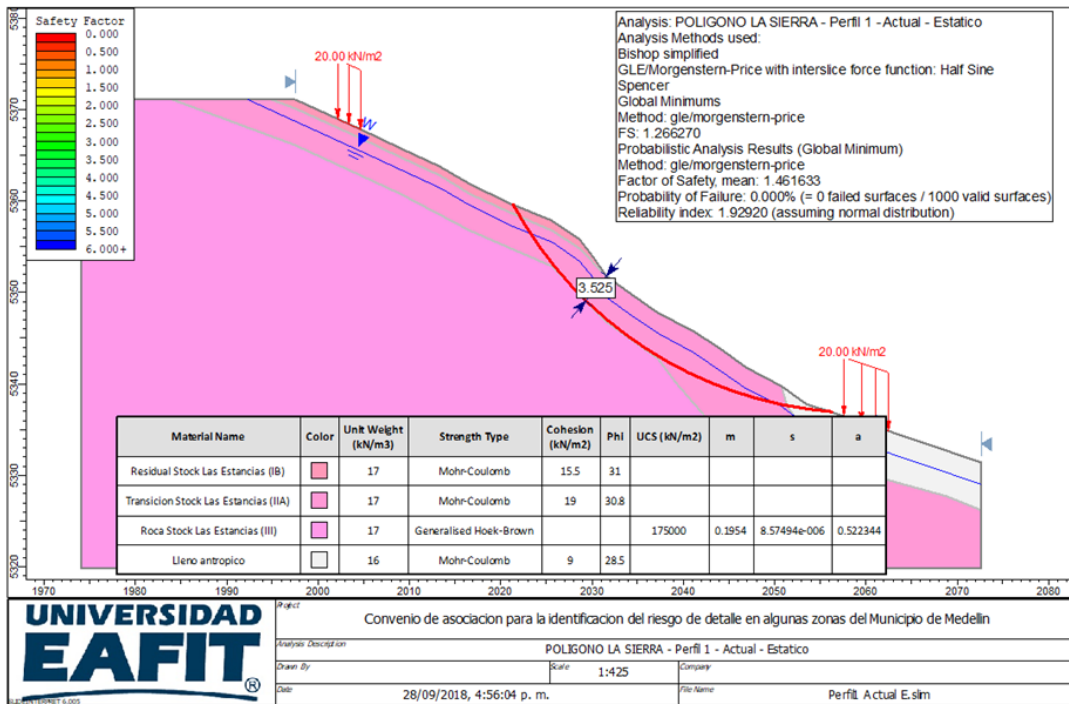


Figura 66. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual estático.

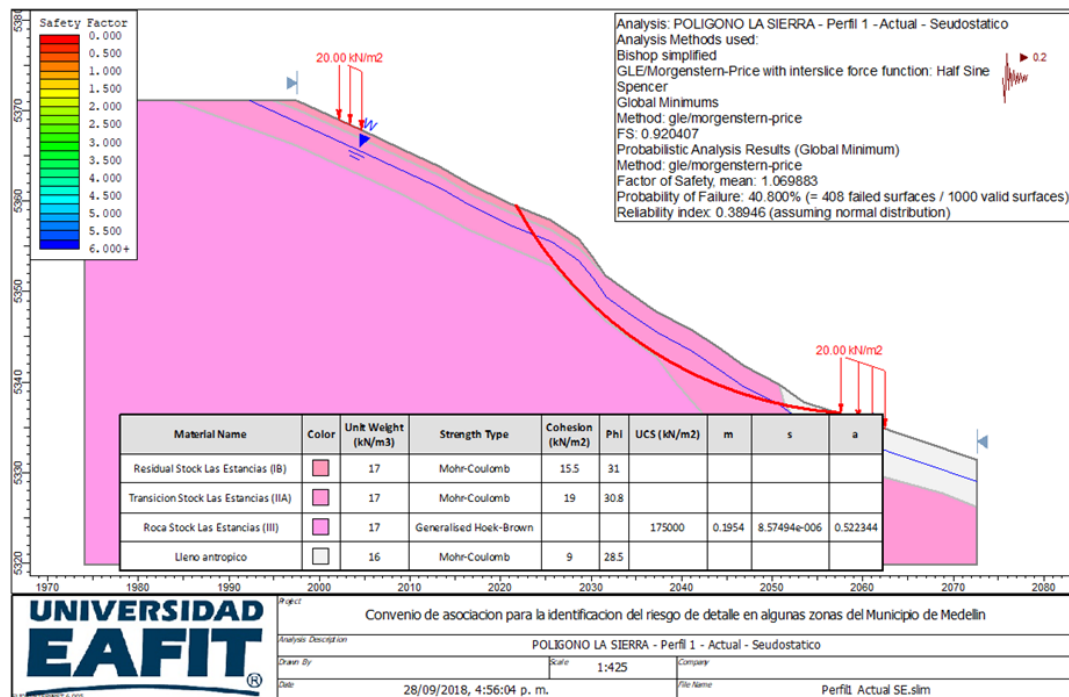


Figura 67. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudoestática.

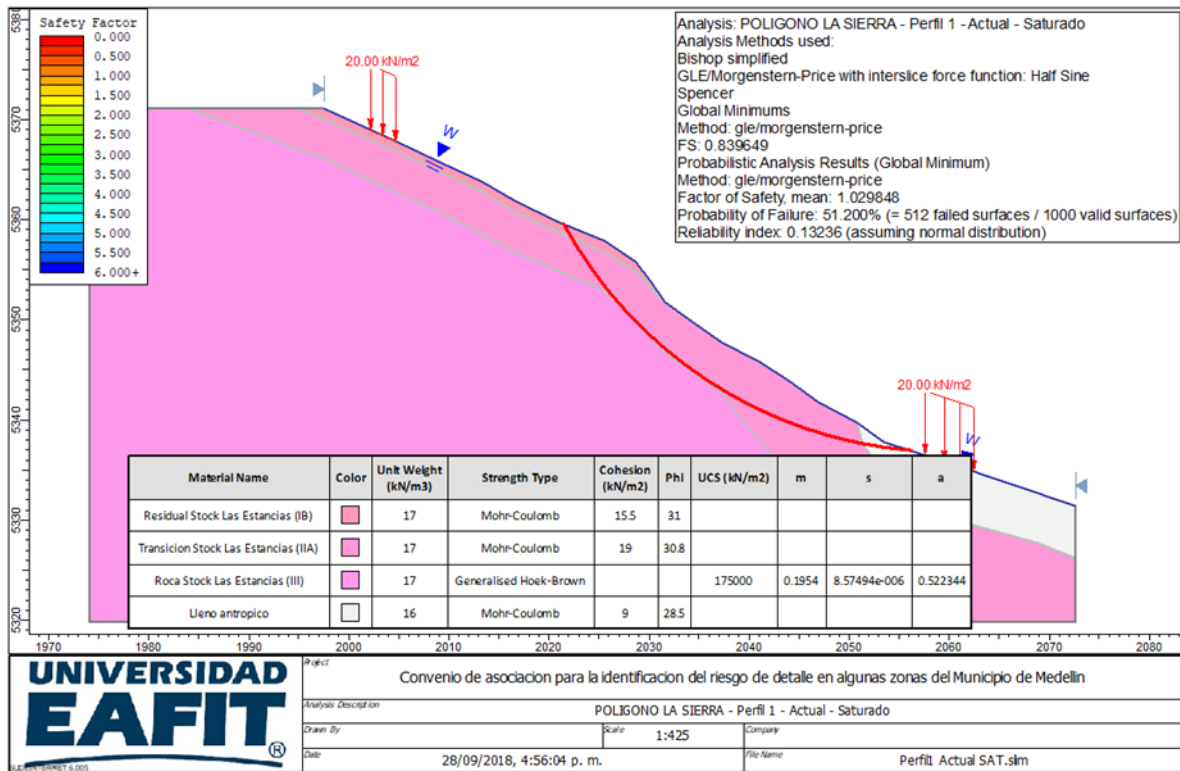


Figura 68. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.

Perfil 2

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.13 y el factor de seguridad medio es de 1.21 con una probabilidad de falla del 3.5% (Figura 69). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.82 y el factor de seguridad medio es de 0.89 con una probabilidad de falla de 84%. Finalmente, para el perfil No 2 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.41 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad

de falla se estima en 8.89 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que tiene un $FS=0.41$. En la Figura 70 y Figura 71 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

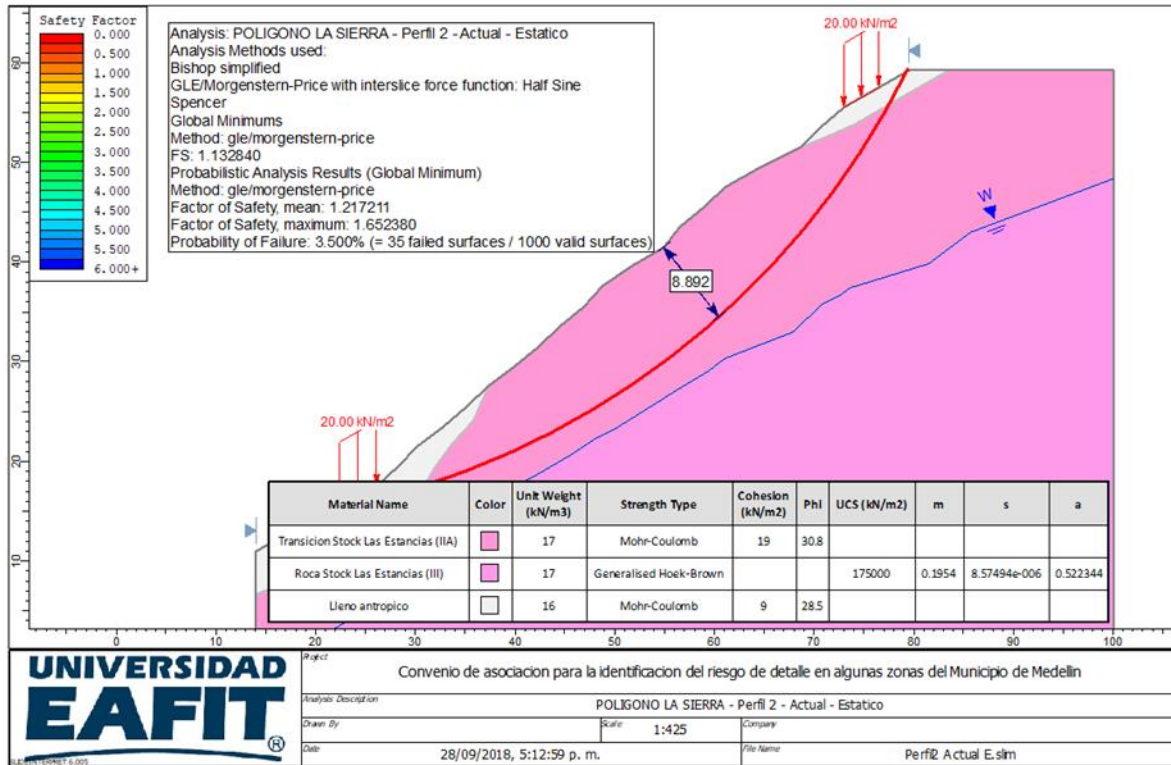


Figura 69. Análisis de estabilidad Perfil 2 condición actual estática.

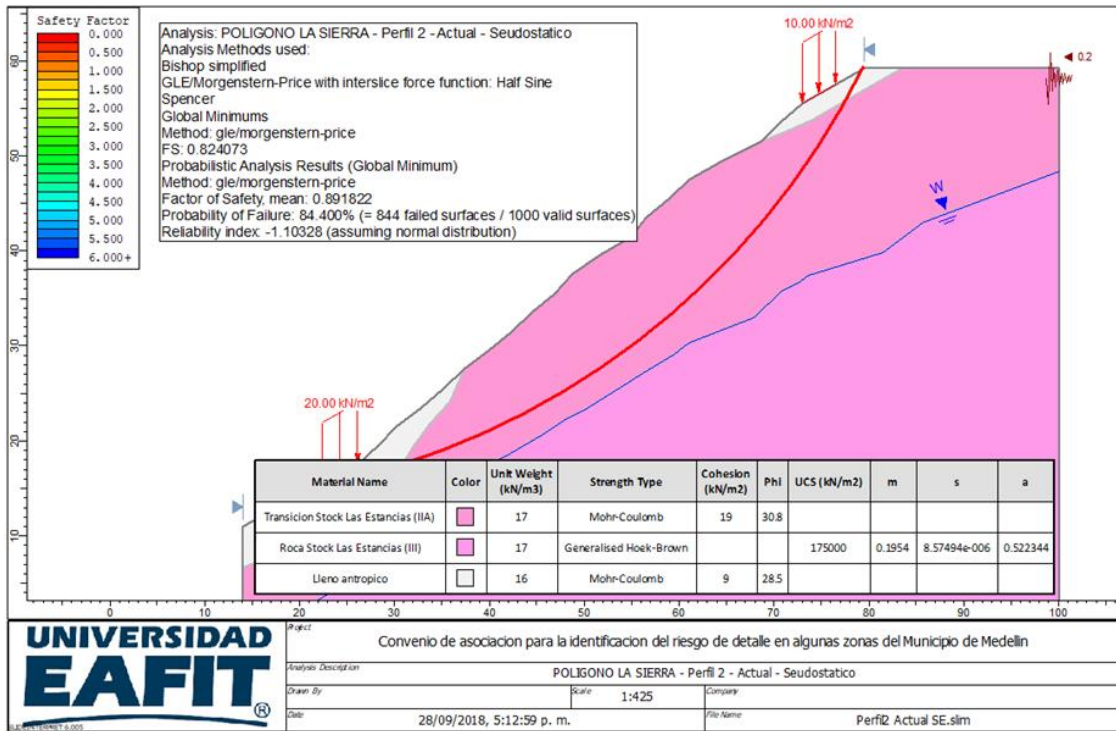


Figura 70. Análisis de estabilidad perfil 2 actual seudoestático.

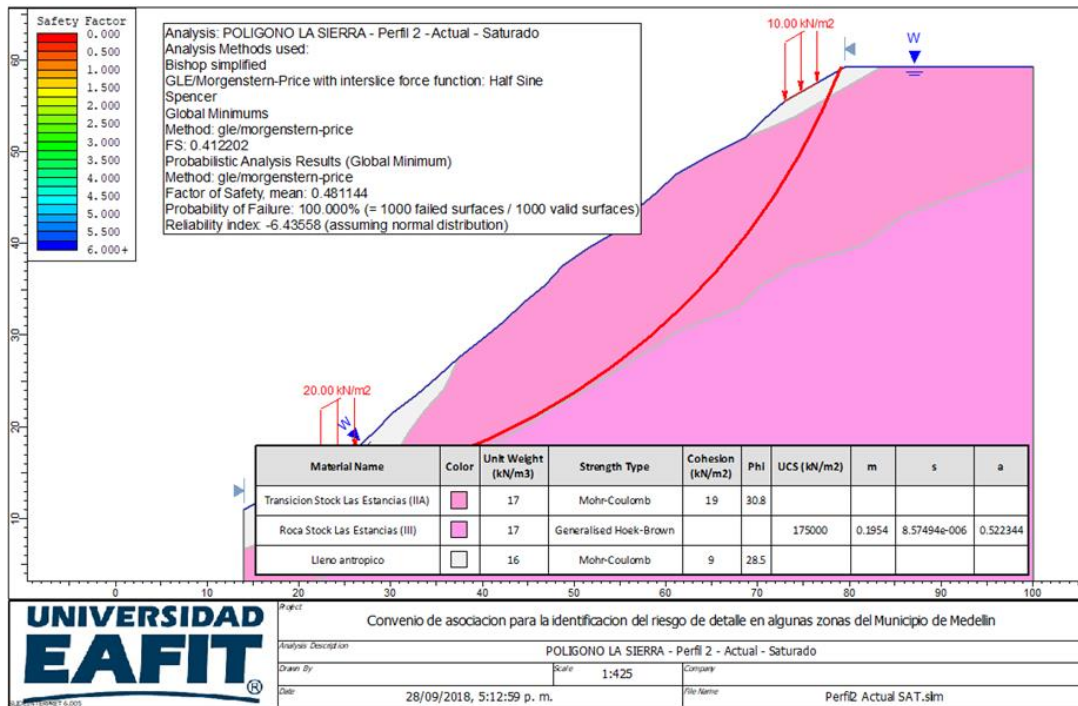


Figura 71. Análisis de estabilidad perfil 2 actual saturado.

Perfil 3

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.08 y el factor de seguridad medio es de 1.16 con una probabilidad de falla del 11% (Figura 72). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.79 y el factor de seguridad medio es de 0.86 con una probabilidad de falla de 89%. Finalmente, para el perfil No 3 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.39 y un factor de seguridad medio de 0.45, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 6.82 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que tiene un $PS=0.39$. En la Figura 73 y Figura 74 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

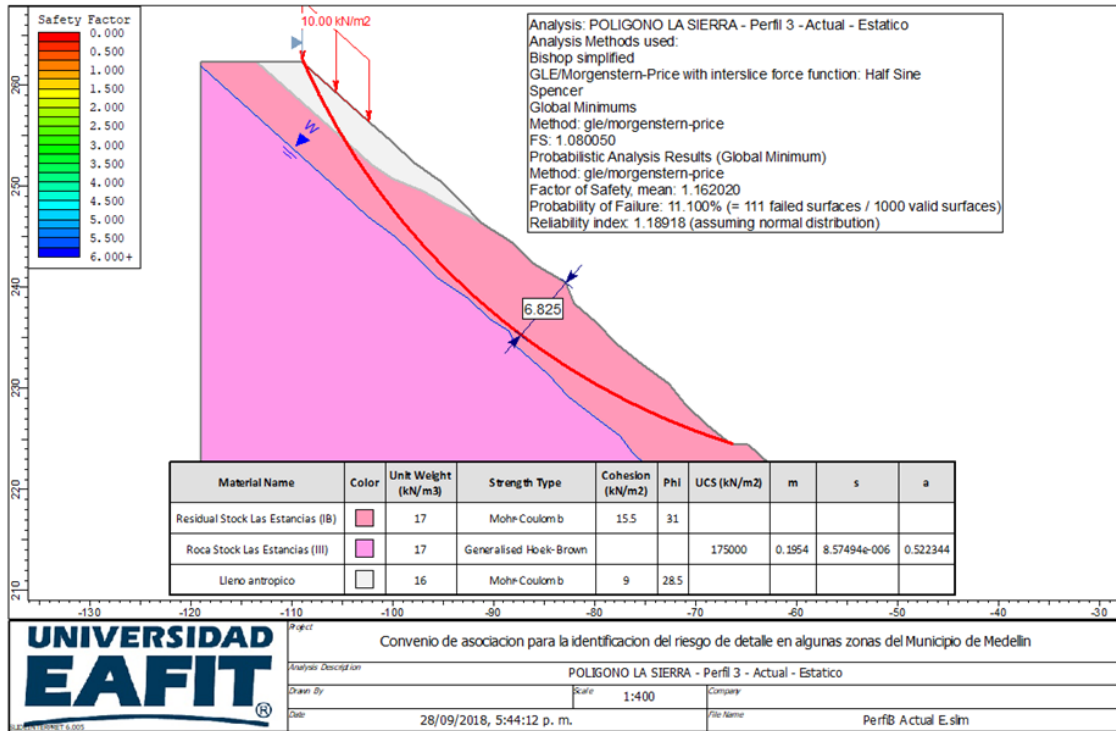


Figura 72. Análisis de estabilidad perfil 3 actual estático.

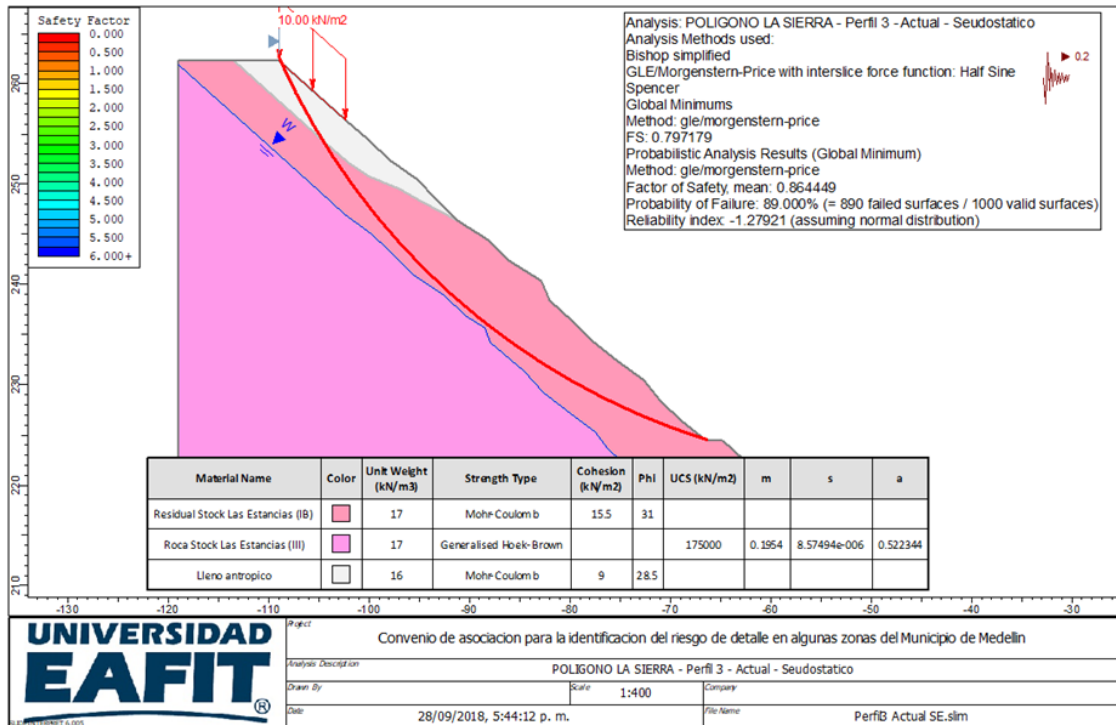


Figura 73. Análisis de estabilidad perfil 3 actual pseudoestático.

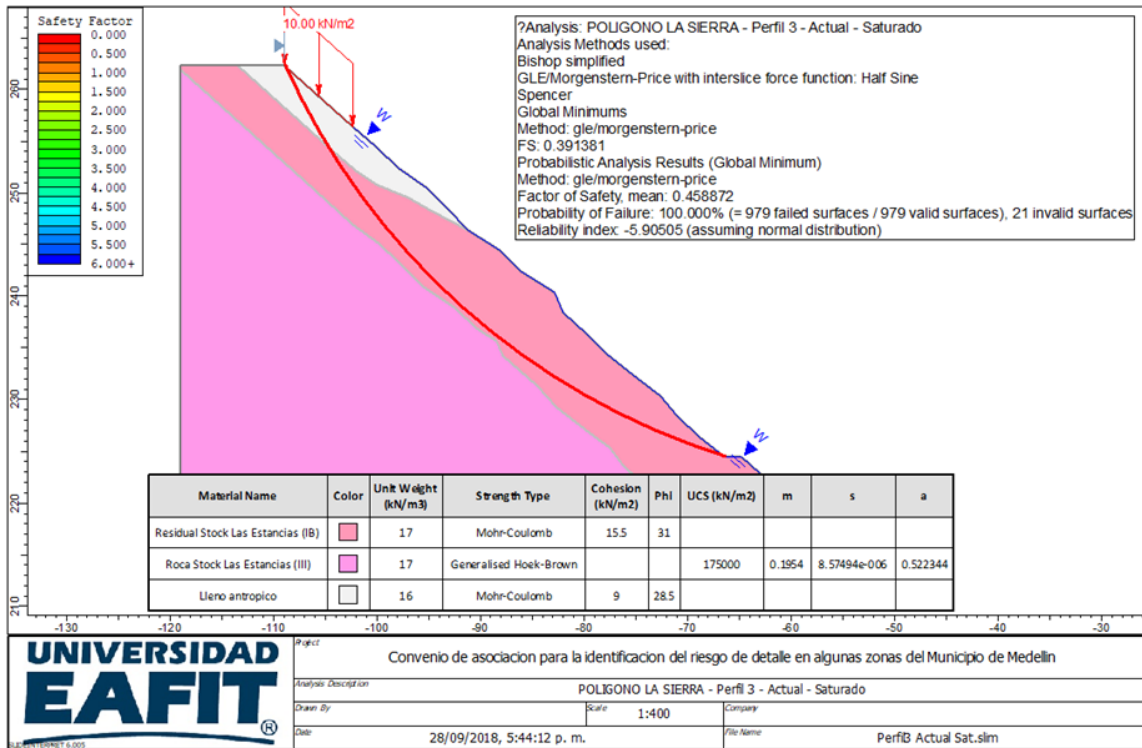


Figura 74. Análisis de estabilidad perfil 3 actual saturado.

Perfil 4

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.07 y el factor de seguridad medio es de 1.16 con una probabilidad de falla del 11% (Figura 75). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.78 y el factor de seguridad medio es de 0.84 con una probabilidad de falla de 90%. Finalmente, para el perfil No 4 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.12 y un factor de seguridad medio de 0.17, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad

de falla se estima en 5.49 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que presenta un $FS=0.12$. En la Figura 76 y Figura 77 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

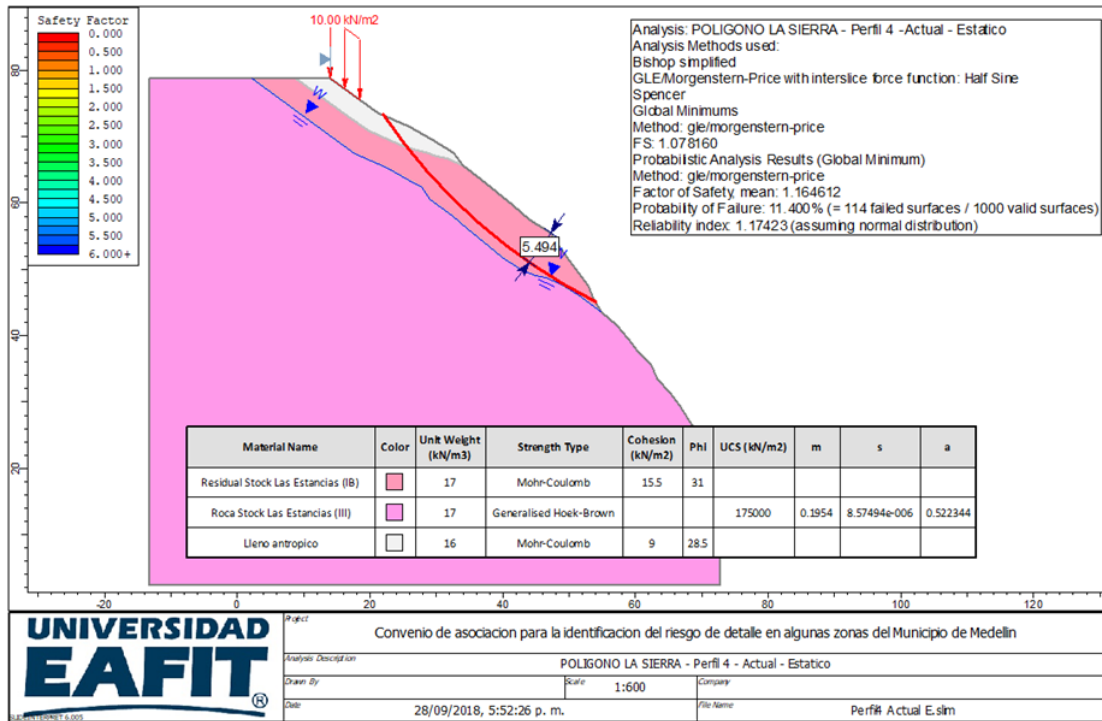


Figura 75. Análisis de estabilidad perfil 4 actual estático.

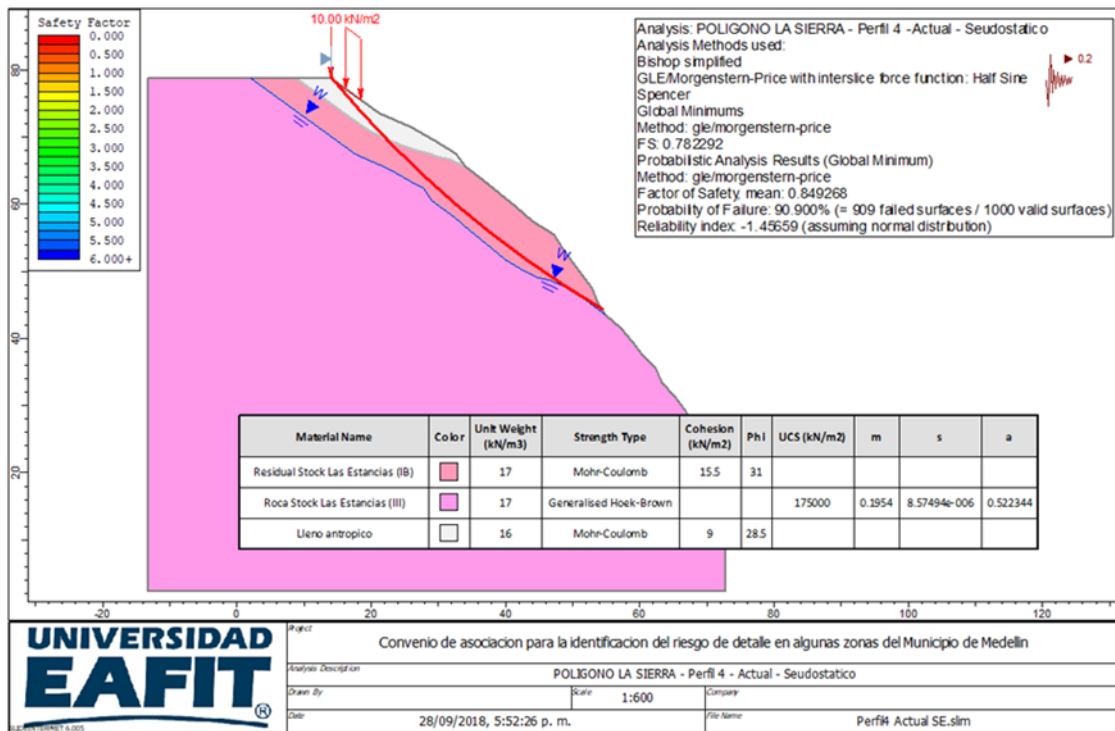


Figura 76. Análisis de estabilidad perfil 4 actual pseudoestático.

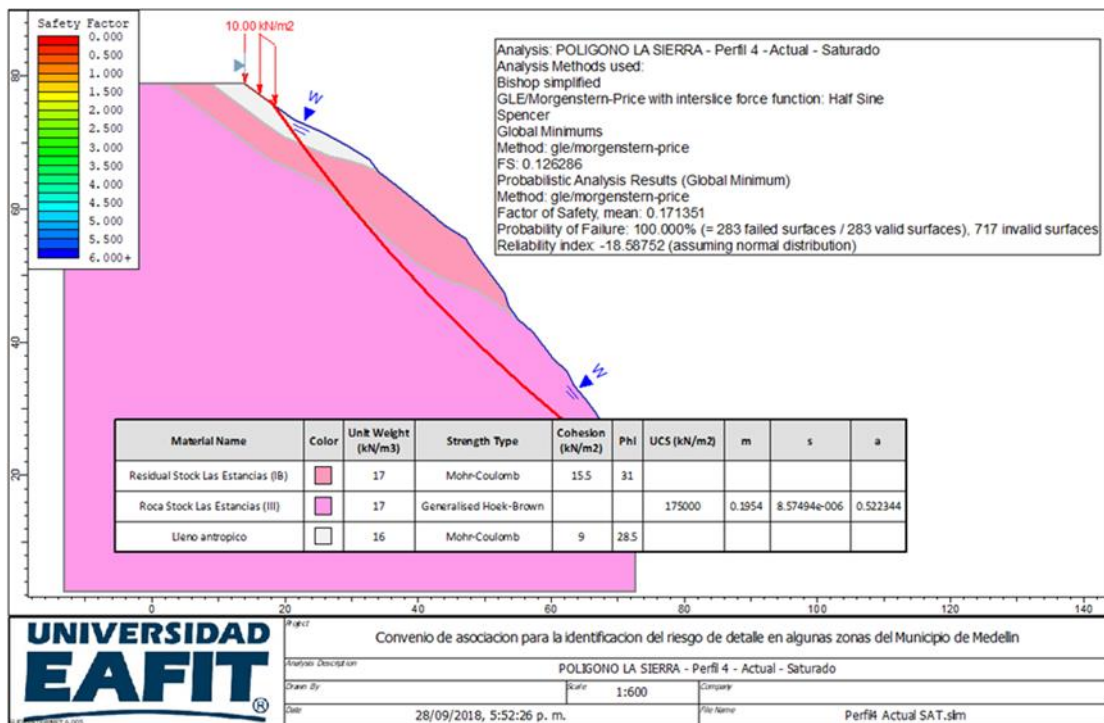


Figura 77. Análisis de estabilidad ´perfil 4 actual saturado.

Perfil 5

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.16 y el factor de seguridad medio es de 1.26 con una probabilidad de falla del 0.2% (Figura 78). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.82 y el factor de seguridad medio es de 0.88 con una probabilidad de falla de 93%. Finalmente, para el perfil No 5 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.41 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 10.6 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que tiene un $FS=0.41$. En la Figura 79 y Figura 80 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

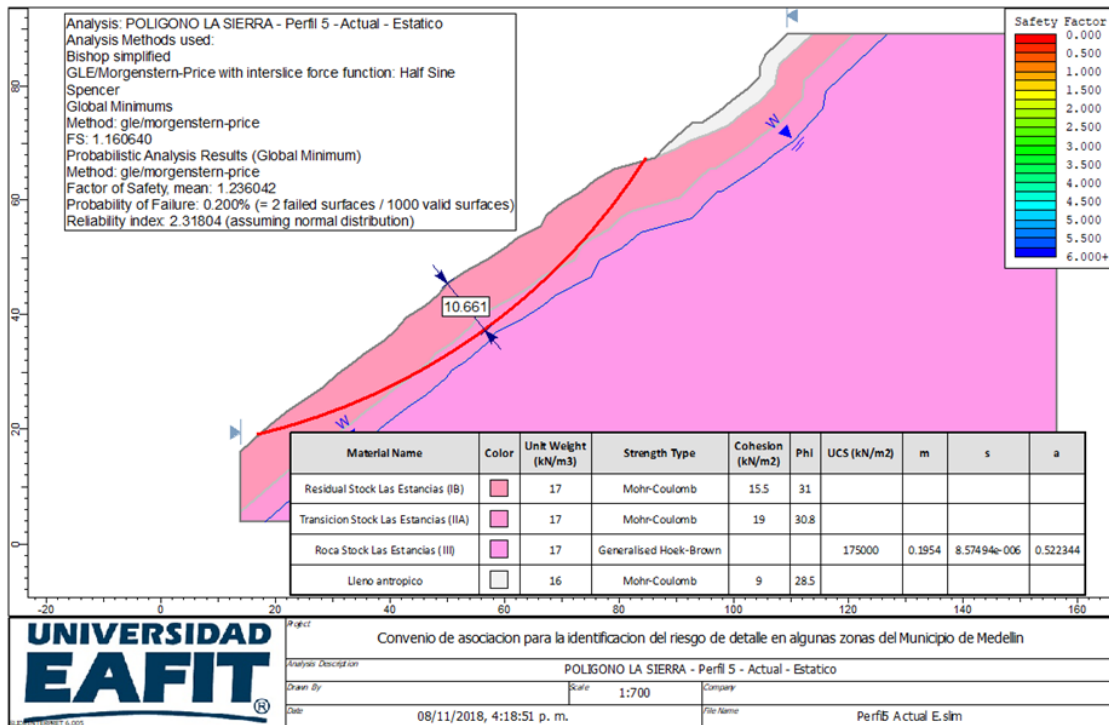


Figura 78. Análisis de estabilidad perfil 5 actual estático.

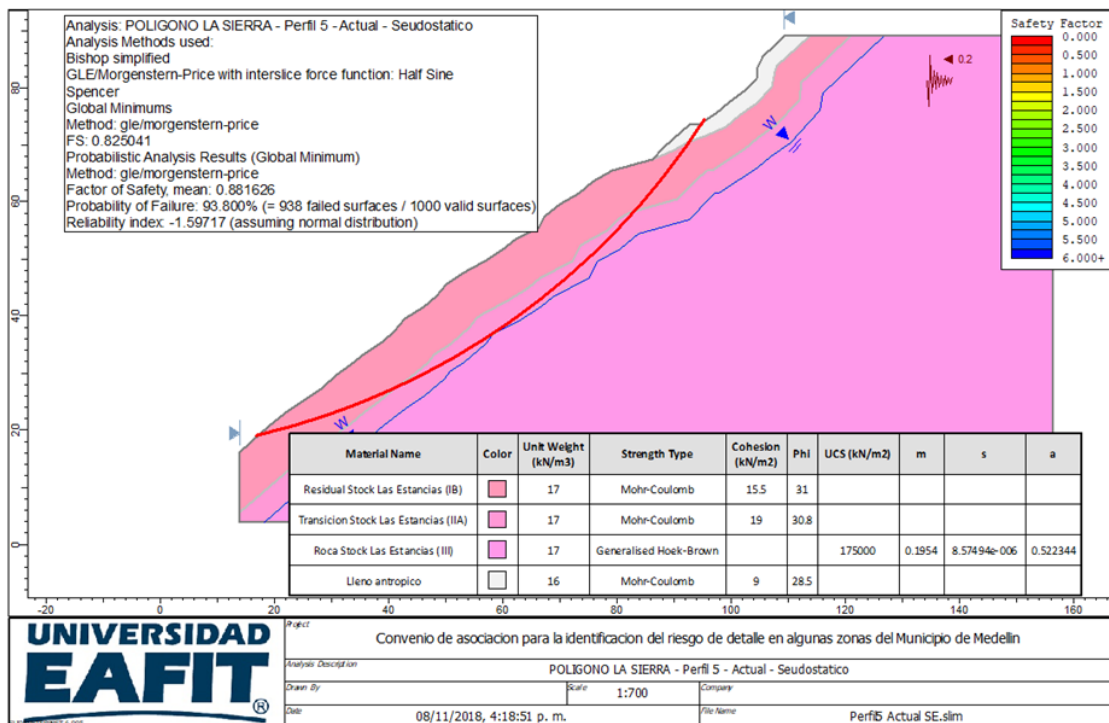


Figura 79. Análisis de estabilidad perfil 5 actual pseudoestático.

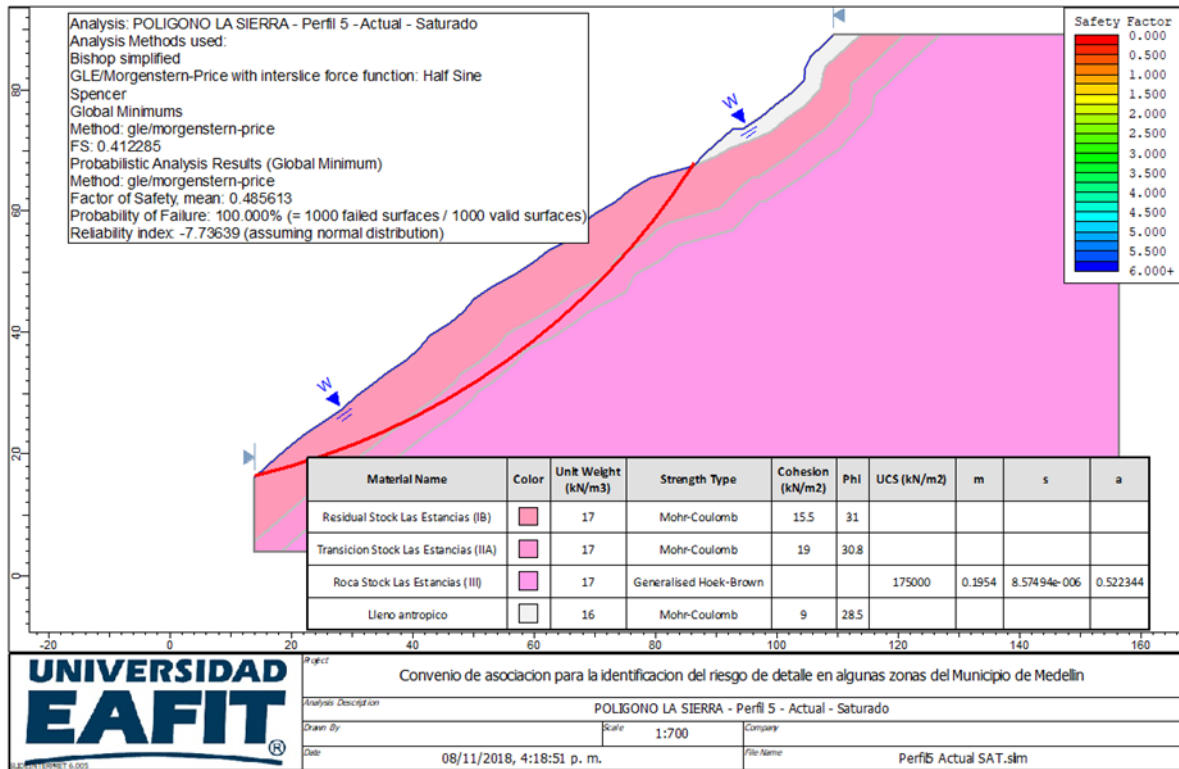


Figura 80. Análisis de estabilidad perfil 5 actual saturado.

Perfil 6

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.12 y el factor de seguridad medio es de 1.43 con una probabilidad de falla del 1.2% (Figura 81). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.91 y el factor de seguridad medio es de 1.05 con una probabilidad de falla de 38%. Finalmente, para el perfil No 6 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.7 y un factor de seguridad medio de 0.9, con una probabilidad de falla de 73%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad

de falla se estima en 6.96 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que $FS=0.7$. En la Figura 82 y Figura 83 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

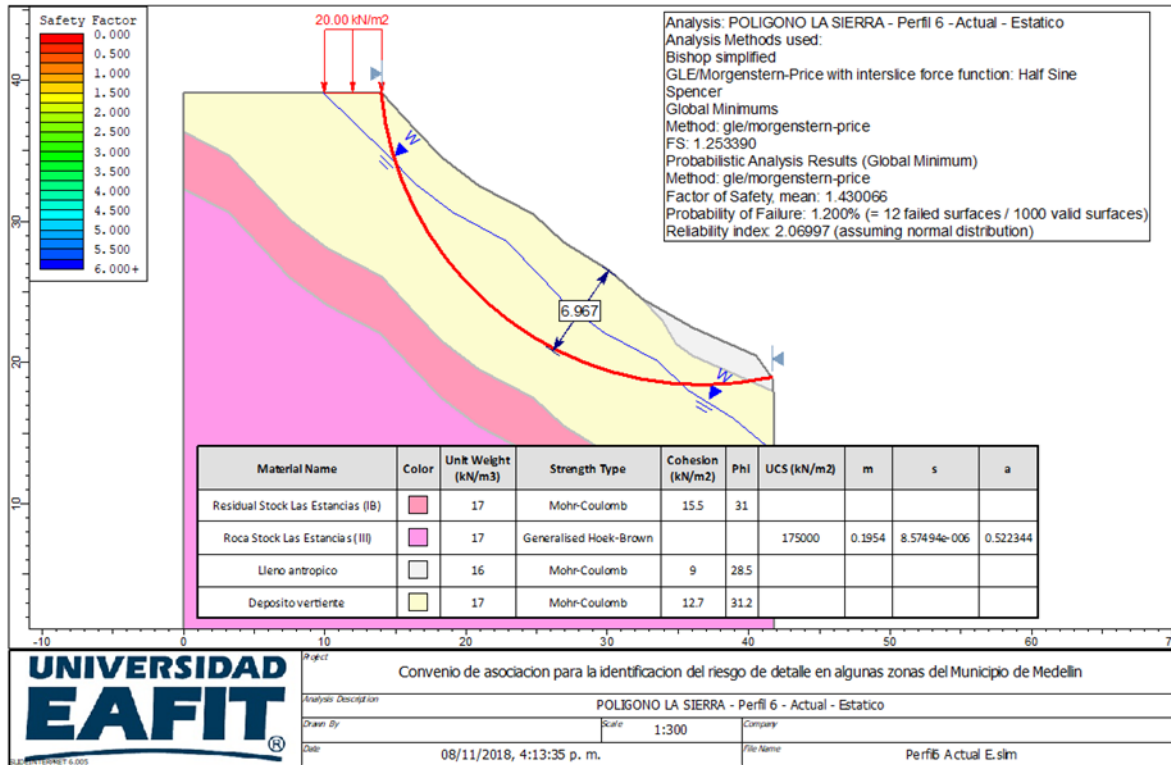


Figura 81. Análisis de estabilidad perfil 6 actual estático.

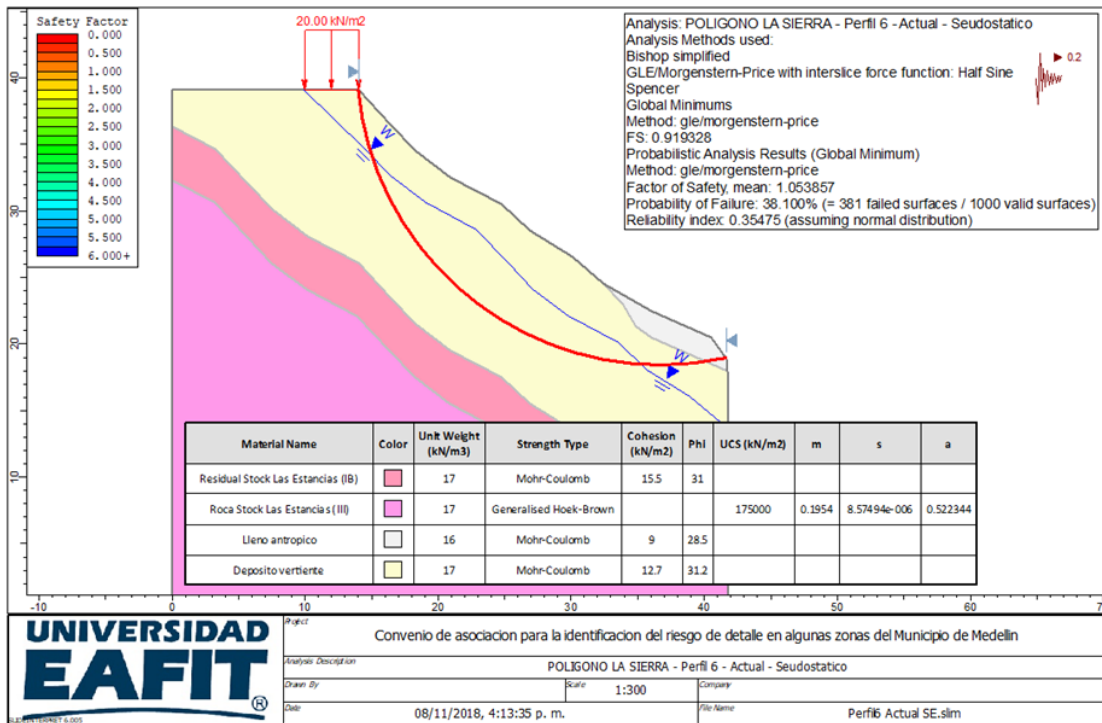


Figura 82. Análisis de estabilidad perfil 6 actual pseudoestático.

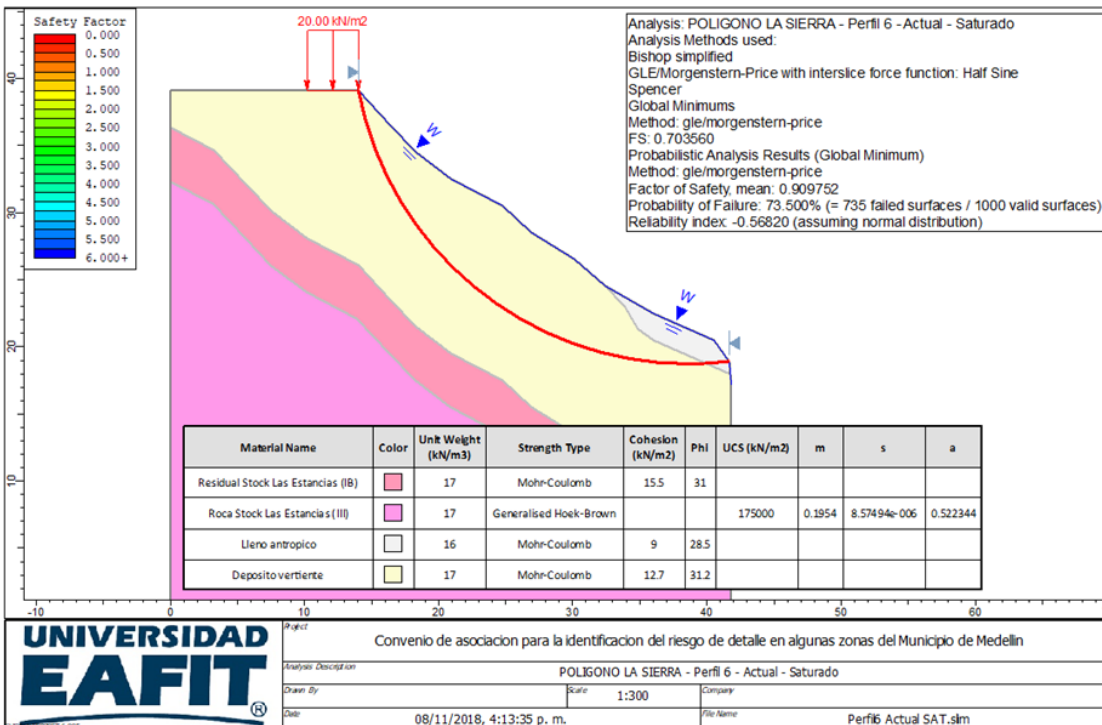


Figura 83. Análisis de estabilidad perfil 6 actual saturado.

Perfil 7

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.11 y el factor de seguridad medio es de 1.26 con una probabilidad de falla del 6% (Figura 84). De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.8 y el factor de seguridad medio es de 0.93 con una probabilidad de falla de 70%. Finalmente, para el perfil No 7 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.36 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 10.29 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición saturada la amenaza es alta ya que $FS=0.48$. En la Figura 85 y Figura 86 se muestran los análisis de estabilidad realizados.

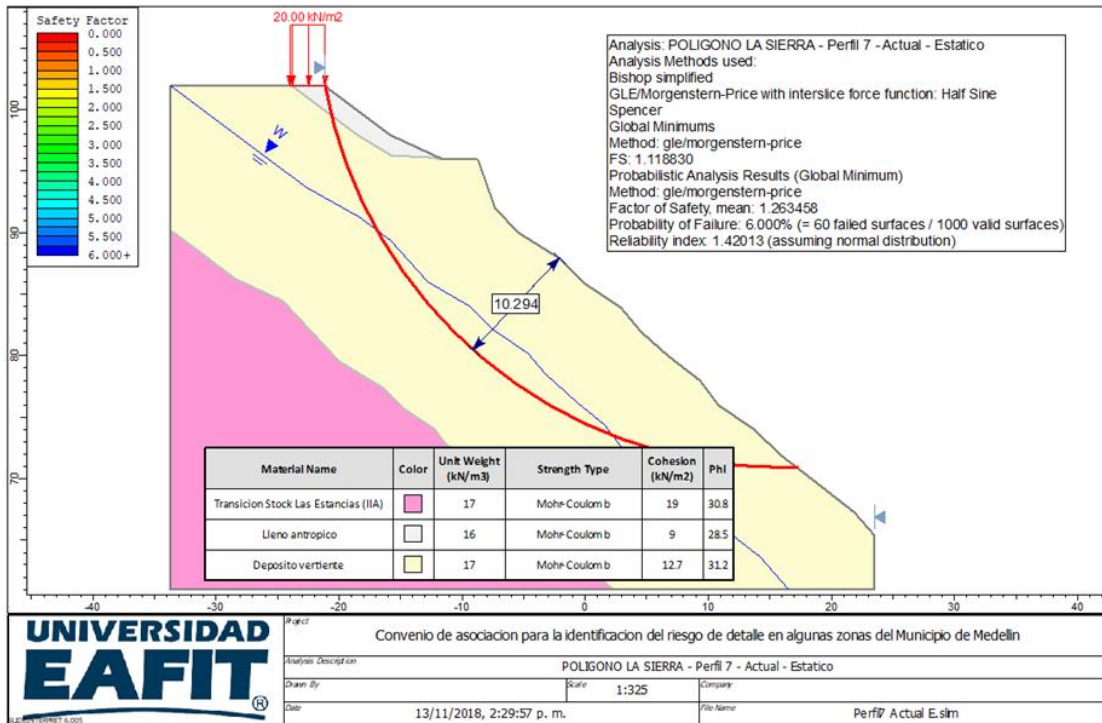


Figura 84. Análisis de estabilidad perfil 7 actual estático.

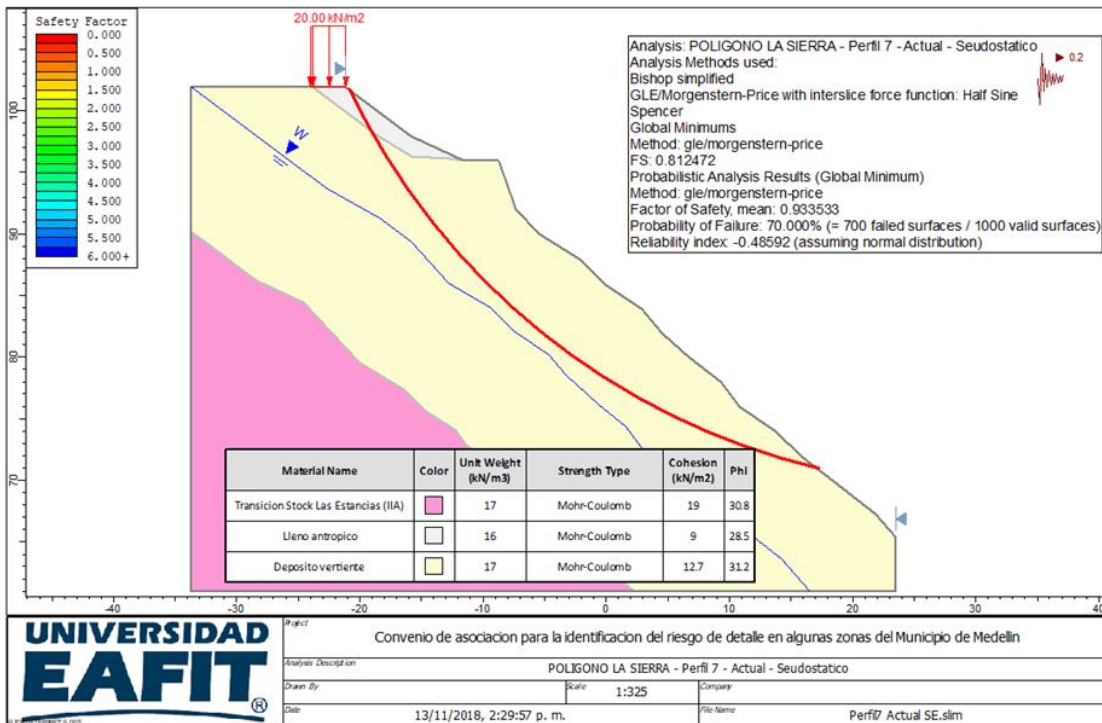


Figura 85. Análisis de estabilidad perfil 7 actual seudoestático.

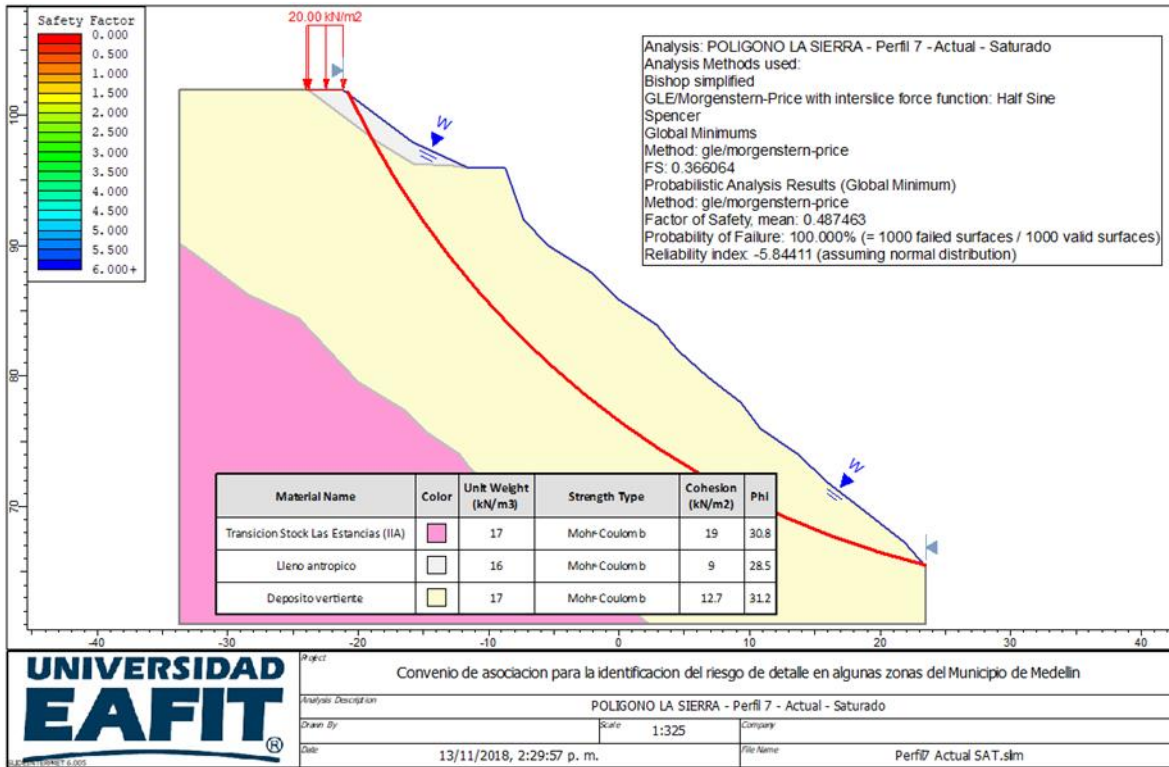


Figura 86. Análisis de estabilidad perfil 7 actual saturado.

8. HIDROLOGÍA

En este capítulo se presenta los criterios empleados y los resultados de los estudios e investigaciones realizadas para determinar las crecientes de diseño de la cuenca de la quebrada La Meditadora, específicamente para el tramo de la quebrada ubicado en la comuna 8 de Medellín y los límites con el corregimiento de Santa Elena, correspondiente al tramo de la quebrada La Meditadora entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra.

El tramo de estudio para la quebrada La Meditadora corresponde a una zona de 400 m aproximadamente, donde no se presenta descargas de afluentes importantes y por lo tanto, se realizó el análisis hidrológico a partir de un (1) punto de control ubicado en la zona final del tramo de interés, aguas abajo de la calle 54 A, el cual se describe en la Tabla 29 (Coordenadas en sistema Magna Colombia Bogotá).

Tabla 29. Ubicación del sitio de control para análisis hidrológico.

Punto	Ubicación	Este [m]	Norte [m]
Q. La Meditadora	Entre calle 56 B y 54 A y entre carrera 7 E y 8 E	839.605,4 2	1.181.336,3 0

El estudio hidrológico se llevó a cabo mediante la estimación de los parámetros morfométricos para así calcular las tormentas de diseño en la cuenca; a partir de esta información se hallaron las crecientes de diseño mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias sintéticas de Soil Conservation Service, Clark y Snyder, así como la aplicación del método racional probabilístico. En cuanto a las hidrógrafas unitarias sintéticas, se utilizó el software HEC – HMS para la transformación de la lluvia en escorrentía directa. Para este caso en particular, se pretende determinar el caudal máximo para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en la quebrada La Meditadora a lo largo del tramo de interés.

El objeto de este tipo de estudios es obtener las crecientes de diseño en las corrientes superficiales, teniendo en cuenta las características físicas o morfológicas de las hoya hidrográficas, la precipitación de la zona y la infiltración que se pueda presentar en el terreno. Debido a la falta de registros de caudales se pueden emplear métodos lluvia – escorrentía para determinar la escorrentía superficial o la crecienta de diseño, considerando entonces la intensidad, frecuencia

y duración de las lluvias. Se considera que una creciente es cualquier caudal que supere la media de los caudales históricos, y, por ende, puede llevar a que en algunos casos se presenten desbordamientos en canales artificiales o naturales a lo largo de la corriente.

La estimación de caudales máximos debe mirarse con mucho cuidado, ya que una mala interpretación o utilización de los mismos se refleja directamente en el dimensionamiento de las obras. En el análisis hidrológico se tuvo muy presente las limitaciones y condiciones de desarrollo de las metodologías utilizadas para no incurrir en problemas de sobre-dimensionamiento o sub-dimensionamiento. Este es un aspecto de gran importancia, ya que en nuestro medio es común utilizar formulaciones desarrolladas en otros países con condiciones hidrológicas y topográficas diferentes; sin embargo, son las herramientas disponibles ya que no existe la instrumentación adecuada para obtener datos confiables de la relación lluvia - escorrentía.

8.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

La información disponible para los análisis hidrológicos se describe a continuación:

8.1.1 Información Cartográfica

Con el fin de representar la conformación y caracterización de la superficie terrestre, se realizó la implementación de un modelo digital del terreno, el cual consiste en una representación de las alturas del suelo y que indican las zonas de drenaje en un área determinada. Para el estudio mostrado en el presente documento, particularmente en la cuenca de la quebrada La Meditadora, se utilizó la cartografía disponible en la Geodatabase del Acuerdo 048 de 2014, Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Medellín – POT, con escala 1:2000 en suelo urbano y 1:5000 en suelo rural, correspondiente a la cartografía SIGMA, lo cual permitió la construcción de un modelo con resolución de 1 m por 1 m para cada pixel, tamaño adecuado para representar las variaciones en la vertiente de estudio.

8.1.2 Información Hidroclimática

La cuenca de la quebrada La Meditadora, objeto del análisis hidrológico, no disponen de ningún tipo de información o registros de caudales a través de su cauce principal o afluentes, por lo cual se implementó la información de precipitación disponible en la zona. Dado que la cuenca se encuentra dentro de la red de estaciones hidrometeorológicas operada por Empresas Públicas de Medellín

E.S.P., se consultó la Revista Hidrometeorológica de dicha Entidad, 2005, generando polígonos de Thiessen con el fin de evaluar las estaciones que presentan influencia dentro del área de estudio. Revisada esta información, se pudo identificar que la cuenca se encuentra influenciada por las estaciones Planta Villa Hermosa (2701045) y Mazo (2701034).

En esta cartilla se presentan los parámetros para la construcción de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia y dada la cercanía de estas, se puede representar adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca de análisis. Las características de las estaciones se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Generalidades de la estación de precipitación utilizada.

Código	Tipo	Nombre	Entidad	Municipio	X	Y	Año Inicio	P media (mm/año)
2701045	PM	Planta Villa Hermosa	EPM	Medellín	837.340	1.183.990	8/07/1949	1552,3
2701034	PM	Mazo	EPM	Medellín	841.940	1.184.200	2/03/1948	1781,20

Las coordenadas de ubicación de las estaciones de precipitación, fueron tomadas de Revista Hidrometeorológica de dicha Entidad, 2005, y se encuentran en sistema Colombia Bogotá Zone. En la Figura 87, se presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas de la zona, y la influencia de cada una de ellas en la cuenca de análisis, lo cual fue determinado mediante la aplicación de una evaluación de proximidad por polígonos de Thiessen.

8.1.3 Usos del Suelo y Coberturas Vegetales

Finalmente, el uso del suelo y su cobertura fue tomado del estudio: Coberturas Vegetales, Uso Actual del Suelo y Determinación de Conflictos de Usos del Suelo con Base En el POT de la Zona Rural del Municipio de Medellín, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en el año 2009. Esta información fue complementada con las coberturas disponibles en el estudio Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Aburrá – POMCA, adelantado en el año 2006, por la comisión conjunta (Área Metropolitana del Valle de Aburrá- AMVA, La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA y La Corporación Autónoma Regional Rionegro – Nare, CORNARE), para la zona urbana y que presenta incidencia dentro de las cuencas de estudio.

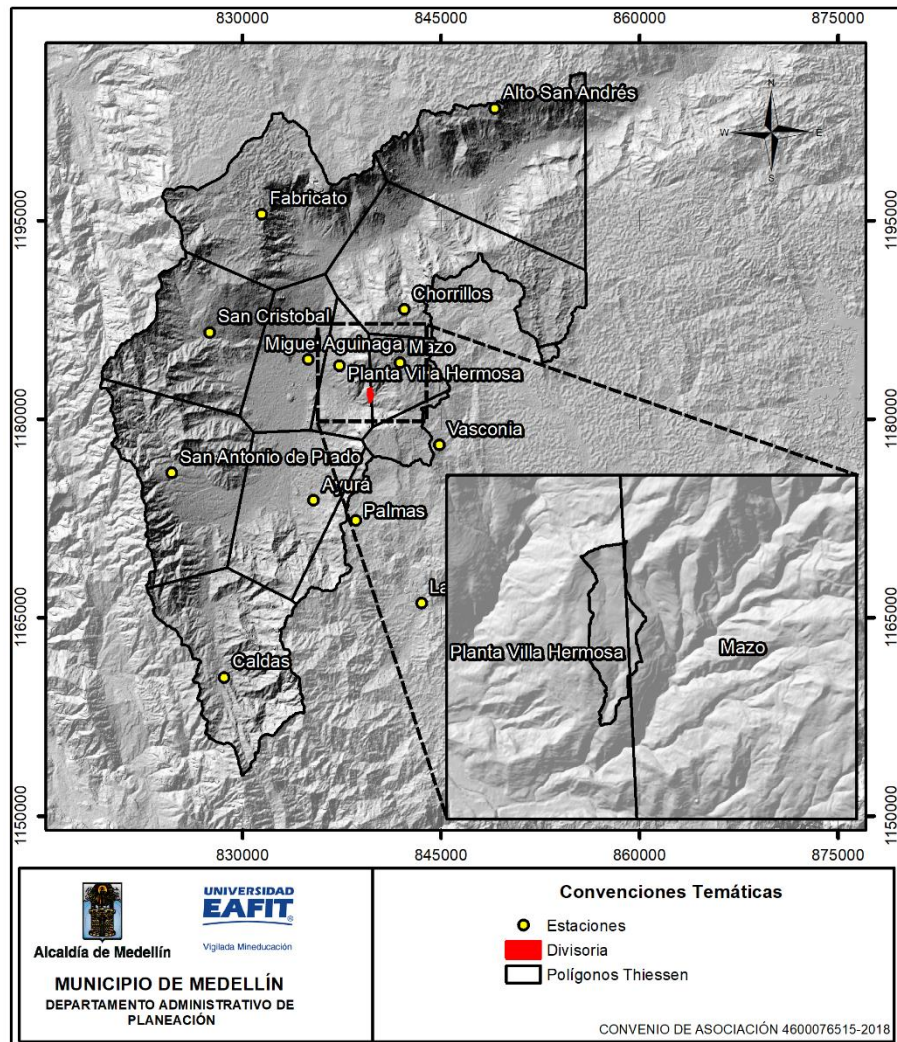


Figura 87. Estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

8.2 PROCESAMIENTO DEL MODELO DEL TERRENO Y MORFOMETRÍA

Existen nuevas herramientas que han agilizado el procesamiento y obtención de datos a partir de mapas digitales del terreno. Es el caso de la obtención de cuencas hidrográficas de una corriente a partir de modelos digitales de elevación. El software que aquí se usó (HidroSIG 4.0 potenciado por MapWindows), fue desarrollado por un grupo interdisciplinario de los posgrados en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación digital del terreno que permite su almacenamiento y procesamiento en sistemas de información geográfica. En particular, los modelos digitales de elevación que HidroSIG 4.0

maneja tienen la estructura que se conoce como ráster. Una descripción detallada de los procedimientos realizados, puede ser consultada en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

Para el estudio mostrado en el presente documento, particularmente en la cuenca de la quebrada La Meditadora, se utilizó la cartografía disponible en la Geodatabase del Acuerdo 048 de 2014, Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Medellín – POT, con escala 1:2000 en suelo urbano y 1:5000 en suelo rural, correspondiente a la cartografía SIGMA, lo cual permitió la construcción de un modelo con resolución de 1 m por 1 m para cada pixel, tamaño adecuado para representar las variaciones en la vertiente de estudio.

8.2.1 Trazado automático de cuencas a partir de modelos digitales de elevación (MDE)

Para que la metodología pueda usarse repetidas veces, sobre cuencas arbitrarias y con resultados reproducibles, se utiliza la estrategia de extracción automática de cuencas a partir de modelos digitales de terreno que se encuentra implementada en HydroSIG 4.0.

A partir del MDE y utilizando el software Tau DEM-Terrain Analysis Using Digital Elevation Models en la plataforma de MapWindow GIS 4.7 (<http://www.mapwindow.org/>) de libre distribución, se construyeron en formato raster los mapas de: pendientes máximas, direcciones de drenaje, áreas acumuladas y red de drenaje, los cuales son insumos necesarios para la estimación de caudales y el análisis morfométrico. En la Figura 88 se presenta el Modelo Digital del Terreno de la cuenca de la quebrada La Meditadora, objeto de interés para el presente documento.

8.2.2 Parámetros morfométricos de la cuenca estudiada

Con la información cartográfica se identificó y delimitó la cuenca de la quebrada La Meditadora teniendo como referencia el punto de control ubicado en la zona inferior del tramo de interés. La información se procesó y luego se estimaron los parámetros morfométricos necesarios para la evaluación hidrológica.

El tramo de estudio para la quebrada La Meditadora corresponde a una zona de 400 m aproximadamente, donde no se presenta descargas de afluentes importantes y, por lo tanto, se realizó el análisis hidrológico a partir de un (1) punto de control ubicado en la zona final del tramo de interés.

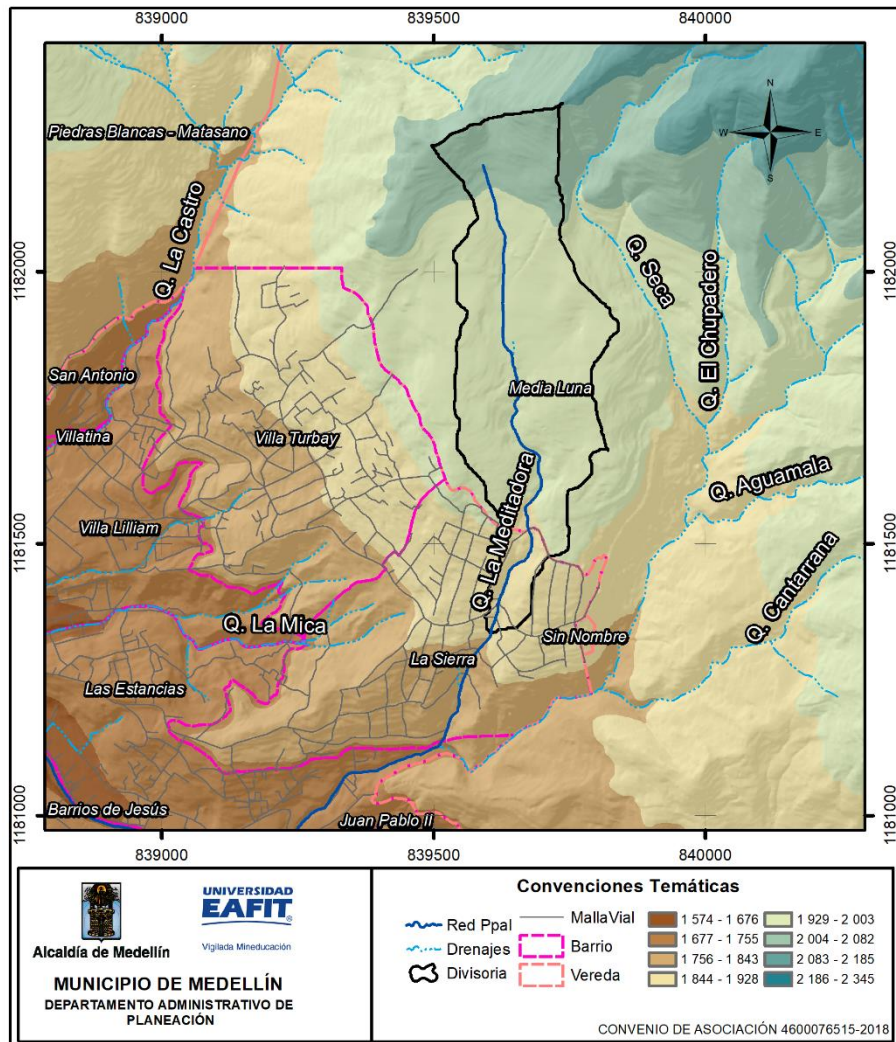


Figura 88. Modelo Digital del Terreno en la cuenca de interés.

En la Tabla 31 se presentan los parámetros morfométricos para la cuenca estudiada.

Tabla 31. Parámetros morfométricos de la cuenca de interés.

Parámetro	Q, Meditadora
Área de drenaje [km²]	0,181
Longitud Cauce principal [km]	0,99
Longitud río hasta la divisoria [km]	1,08
Pendiente cauce principal [%]	16,54
Pendiente cuenca [%]	27,53
Cota mayor cuenca [m]	2083,84

Parámetro	Q, Meditadora
Cota menor cuenca [m]	1846,53
Cota mayor río [m]	2011,72
Cota menor río [m]	1846,53
Longitud al punto más alejado [km]	0,95
Coordenada Este [m]	839605,42
Coordenada Norte [m]	1181336,30

8.3 CICLO DE LA PRECIPITACIÓN

La zona donde se encuentra la cuenca de análisis está influenciada por las estaciones Planta Villa Hermosa (2701045) y Mazo (2701034), y que son operadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. La caracterización hidroclimatológica se realizó a partir del registro medio mensual histórico y que se presenta en la Revista Hidrometeorológica de esta Entidad, 2005. En la Figura 89, se presenta el comportamiento de la precipitación media mensual de las estaciones de interés.

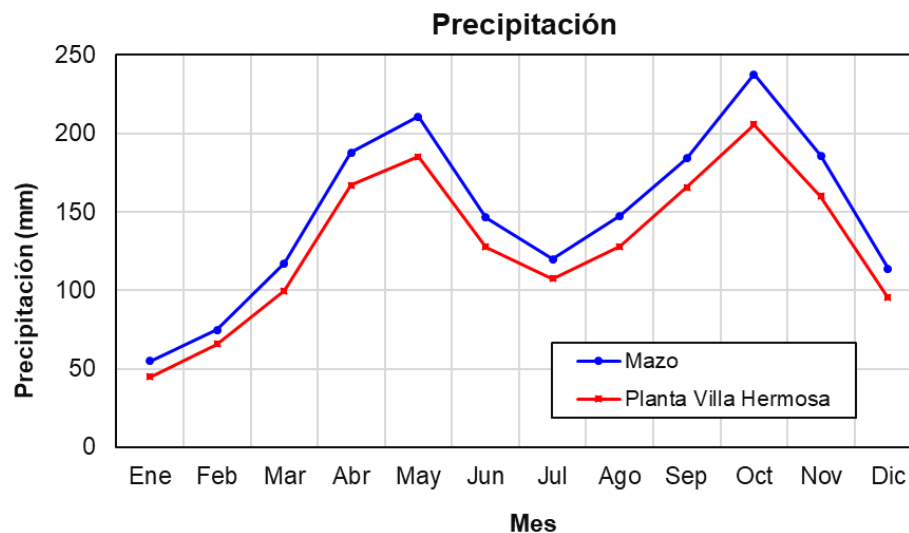


Figura 89. Variación mensual multianual de la precipitación de la estación de influencia.

Según los registros de la estación, se presenta un comportamiento bimodal en la zona de interés, con dos periodos de lluvias para los meses de abril - mayo - junio y septiembre - octubre - noviembre, y los periodos de sequía en los meses de enero, febrero y julio, con una precipitación media multianual es de 1552,30 mm/año, para la estación Planta Villa Hermosa y 1781,20 mm/año, para la estación Mazo.

8.4 PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL

Una vez se contó con el modelo digital de terreno – MDT y con el alineamiento de la red de drenaje principal de la quebrada La Meditadora, se extrajo las cotas en cada uno de los puntos de la corriente, y así se reprodujo dicha información en el perfil del canal principal. En la Figura 90, se presenta el perfil del cauce principal para la quebrada de estudio.

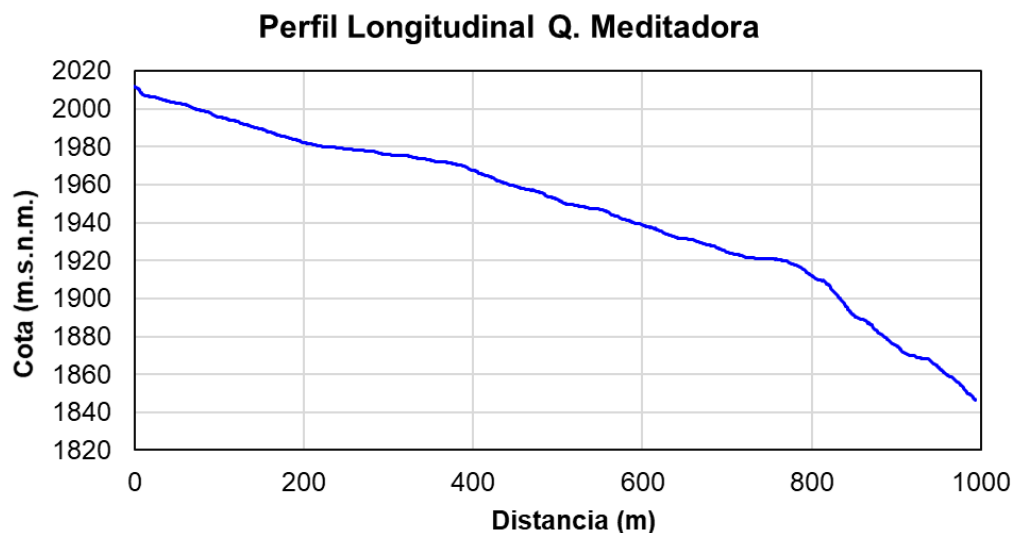


Figura 90. Perfil del cauce principal de la quebrada La Meditadora.

Según el perfil del cauce principal de la quebrada La Meditadora, se cuenta con un tramo de pendiente constante entre la zona de nacimiento y un recorrido de 800 m aproximadamente, para luego iniciar una zona de mayor pendiente hasta el sitio de control, recorriendo una longitud total de 0,99 km. La pendiente promedio del cauce principal es de 16,54%.

8.5 CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS

El estudio hidrológico comprende el cálculo de caudales máximos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en las cuencas de análisis. Debido a que la mayoría de las cuencas de nuestra región no dispone de información hidrológica que permita estimar caudales a partir de un análisis histórico (estadístico), se hace necesario utilizar modelos precipitación - escorrentía (hidrógrafas unitarias y método racional para el presente estudio).

Las metodologías a emplear serán del tipo de hidrógrafa sintética que calculan de manera indirecta los caudales pico para crecientes asociadas a diferentes períodos

de retorno. Debido a que estos modelos lluvia – escorrentía utilizan parámetros tanto morfológicos como climáticos, por lo que resulta necesario determinar la lluvia de diseño con el cálculo apropiado de la duración de la lluvia, que se considera igual al tiempo de concentración de la cuenca (T_c). Este modelo asume que la función de transformación de precipitación en escorrentía al interior de la cuenca, es lineal del tipo convolutiva (Chow et al., 1994).

La hidrógrafa unitaria (ó hidrograma unitario) se define como la respuesta de la cuenca en forma de escorrentía directa, que resulta de una precipitación efectiva de profundidad unitaria, uniformemente distribuida sobre la cuenca y de duración específica igualmente unitaria.

El estudio hidrológico se llevó a cabo mediante la estimación de los parámetros morfométricos para así calcular las tormentas de diseño para la cuenca; a partir de esta información se hallaron las crecientes de diseño mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias sintéticas de Clark, Soil Conservation Service y Snyder, así como la aplicación del método racional probabilístico. Una descripción detallada de los procedimientos realizados, puede ser consultada en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

8.5.1 Tiempo de Concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo. En la literatura para el caso de cuencas no instrumentadas, se cuenta básicamente con dos métodos del tipo empírico para estimar el tiempo de concentración, el primero trata de relacionar T_c con algunas de las características principales de la cuenca y su cauce principal. Existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración, entre otras las propuestas por: Temez, Kirpich, California Couverts Practice, Giandotti, S.C.S, y Ven Te Chow. Sus fundamentos teóricos pueden ser revisados en Campo y Múnera (1997) y Vélez y Botero (2010).

El segundo es el método de la velocidad, este considera que el flujo en la cuenca se desarrolla como una combinación de tres procesos: a) flujo laminar el cual ocurre a escala de ladera en longitudes del orden de los 100 m (aunque este valor depende estrictamente de la densidad de drenaje en la cuenca) y para alturas del agua del

orden de milímetros, b) un flujo concentrado superficial, y c) el flujo presente propiamente en los canales de la red hídrica.

Debido a las diferentes formas en las que fueron concebidas estas expresiones, la variabilidad en los resultados de una a otra puede ser bastante alta por lo cual se hace necesario escoger el tiempo de concentración de forma apropiada descartando aquellos métodos que presenten resultados extremos. Teniendo en consideración los aspectos metodológicos que se encuentran en el Anexo 1 “Documento metodológico”, cabe resaltar que el tiempo de concentración de Clark presentado por Vélez y Botero, 2010, hace referencia a Clark, C. O., Storage and the Unit Hydrograph. Proc. Amer. Soc. Eng. Vol 69. P 1333 – 1360. 1945. Este procedimiento para determinar el tiempo de concentración de la cuenca difiere al presentado en la descripción de la metodología del hidrograma de Clark, ya que los mismos fueron formulados bajo parámetros de cuencas distintas. En la Tabla 32 se presentan los resultados dados para cada uno de los métodos utilizados.

Tabla 32. Tiempos de concentración para la cuenca estudiada.

Método	Q. La Meditadora	
	Horas	Minutos
Kirpich	0,13	7,91
Kirpich (1990)	0,12	6,90
Témez	0,16	9,62
Giandioti	0,31	18,68
Williams	0,40	23,96
Johnstone y Cross	0,72	43,30
California Culvert Practice	0,11	6,87
Clark	0,21	12,44
Passini	0,15	8,99
Pilgrim y McDermott	0,40	23,82
SCS - Ranser	0,09	5,50
Valencia y Zuluaga	0,45	27,02
Ventura - Heras	0,17	10,03
Ventura - Heron	0,18	10,58
Bransby - Williams	0,41	24,66
Promedio	0,27	16,02
Desviación Estándar	0,18	10,63

En la Figura 91, se presenta la distribución grafica de los resultados dados para cada uno de los métodos usados y la quebrada La Meditadora, información que es utilizada para los análisis iniciales del tiempo de concentración de la cuenca.

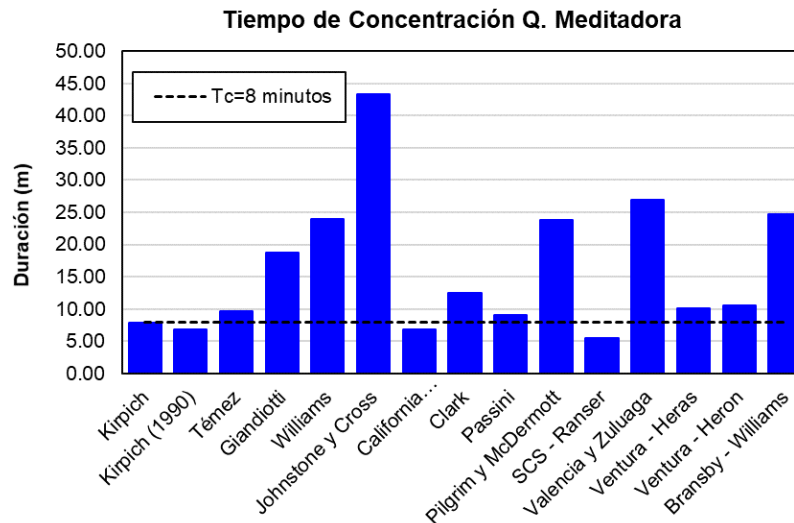


Figura 91. Variación de Tiempos de Concentración en la Cuenca.

Según los resultados obtenidos, se descartaron aquellos valores que se encontraron muy por encima del promedio de la muestra entre los que se encuentra los métodos de Giandioti, Williams, Johnstone y Cross, Pilgrim y McDermott, Valencia y Zuluaga y Bransby – Williams. Con base en los demás resultados se determinó nuevamente el promedio, como tiempo de concentración o duración de la lluvia de diseño definitiva cuyo valor fue de 8,76 min, por lo que se asume como valore definitivo a 8 minutos, equivalentes a 0,13 horas.

Si se determina nuevamente la desviación estándar con los resultados escogidos para el promedio final donde se estima un valor de 2,17 min, muy inferior a 10,63 min estimada a partir de todos los métodos, reduciendo la incertidumbre en el cálculo de la variable. Un análisis complementario se realiza al determinar la velocidad del tránsito de escorrentía por la cuenca, teniendo como base la duración correspondiente al tiempo de concentración y la distancia de recorrido del agua desde la zona alta de la cuenca, hasta el sitio de control. Para ello, se tiene tiempo de 8 min equivalentes a 480 segundos y una distancia de 1036 m entre el sitio de control y una zona intermedia a la divisoria, obteniendo una velocidad media de escurrimiento de 2,16 m/s, la cual es acorde con las características geomorfológicas, climatológicas y topográficas de la cuenca.

8.5.2 Intensidad de la Lluvia de Diseño

Para determinar la intensidad de lluvia asociada a diferentes períodos de retorno, se utilizan las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), que relacionan la duración de la lluvia con la intensidad de ésta para diferentes períodos de retorno.

Para el caso de la cuenca de la quebrada La Meditadora, se implementó la información de las estaciones Planta Villa Hermosa (2701045) y Mazo (2701034). Para ello se usan los parámetros estimados y dados en La Revista Hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín, 2005, los cuales se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33. Parámetros para la ecuación IDF de las estaciones utilizadas.

TR	Planta Villa Hermosa			Mazo		
	c	h	m	c	h	m
2.33	4722,3	24	-1,1075	37203	60	-1,4366
5	3898,9	19	-1,0392	11732	34	-1,2191
10	3483,1	16	-0,9946	8937,9	26	-1,1534
25	3433,2	14	-0,9656	8191,8	21	-1,1166
50	3487,6	13	-0,9511	8366,3	19	-1,1058
100	3491,6	12	-0,9353	9065,6	18	-1,1069

La intensidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I = C * (D + H)^m$$

Donde, I: Intensidad en (mm/h), D: La Duración de la Lluvia (min), C, h, m, son parámetros de la curva IDF para cada estación pluviométrica.

En la Figura 92 y Figura 93, se muestra las curvas IDF para las estaciones Planta Villa Hermosa (2701045) y Mazo (2701034), respectivamente. Teniendo en cuenta la influencia de las estaciones sobre la cuenca de interés, se determinó el porcentaje de incidencia de cada una de ellas en las vertientes, información que se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34. Influencia de las estaciones en la cuenca de interés.

Estación	Código	Q. La Meditadora	
		Área (km²)	%
Planta Villa Hermosa	2701045	0,16	86,63
Mazo	2701034	0,02	13,37

En este sentido se considera que los modelos lluvia-escorrentía utilizan parámetros tanto morfológicos como climáticos, por lo que resulta necesario determinar la lluvia de diseño con el cálculo apropiado de la duración de la lluvia, que en general, se toma igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Curva IDF - Planta Villa Hermosa

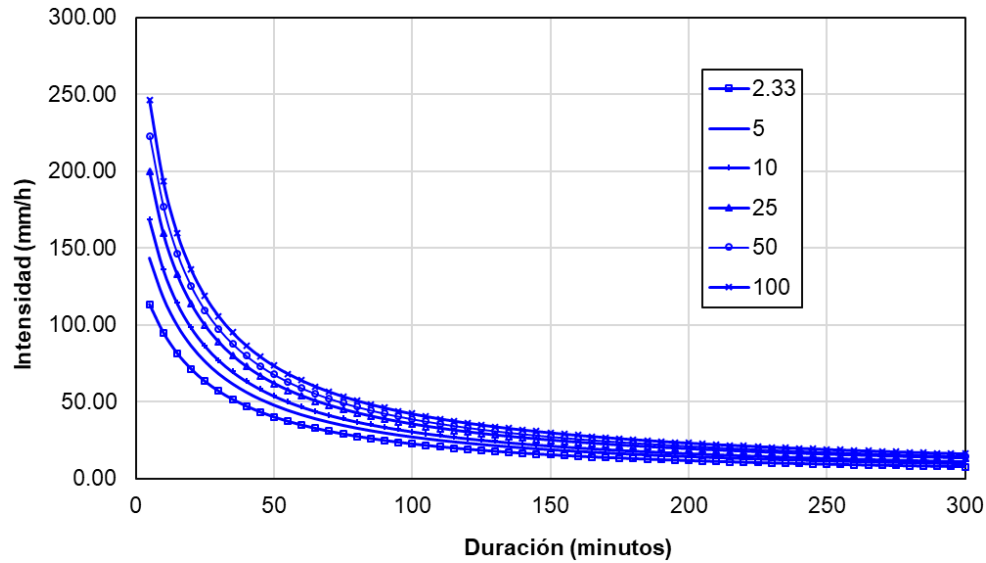


Figura 92. Curva IDF estación Planta Villa Hermosa (2701045).

En la Tabla 35, se presenta las intensidades (mm/h) correspondientes a cada periodo de retorno y la precipitación total de la lluvia, teniendo en cuenta que el tiempo de concentración asumido para la cuenca de la quebrada La Meditadora (8 minutos), calculada como el promedio ponderado entre la intensidad estimada para las estaciones Planta Villa Hermosa (2701045) y Mazo (2701034), según su porcentaje de influencia.

Tabla 35. Intensidad de diseño y precipitación total de la lluvia para la cuenca de análisis.

TR	Q. La Meditadora	
	I (mm/h)	P (mm)
2,3	99,67	13,29
5	126,40	16,85
10	148,36	19,78
25	175,86	23,45
50	196,20	26,16
100	216,49	28,87

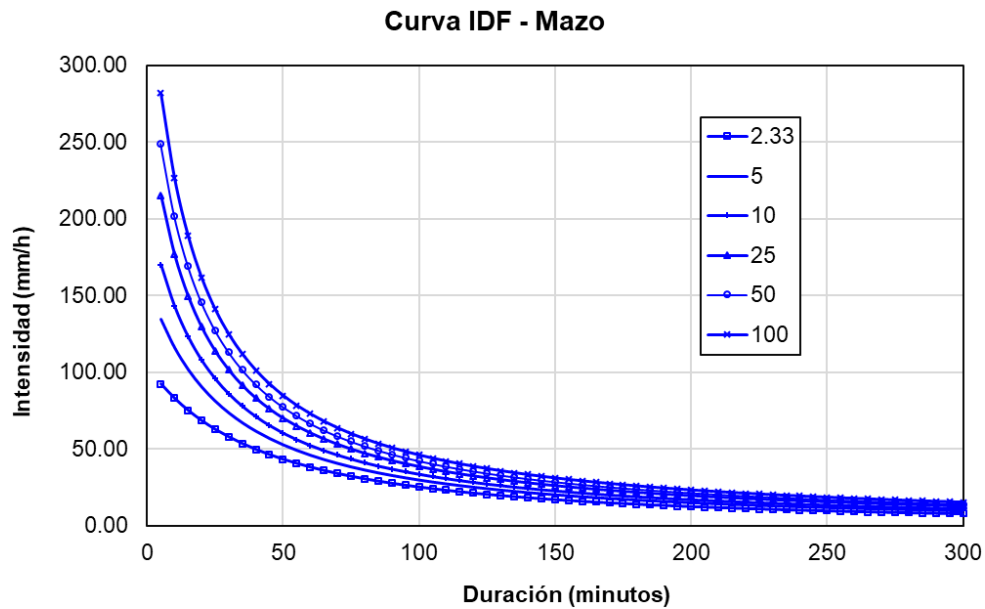


Figura 93. Curva IDF estación Mazo (2701034).

8.5.3 Método de las Hidrógrafas Unitarias

El modelo de hidrógrafa unitaria asume que la función de transformación de precipitación en escorrentía al interior de la cuenca, es lineal del tipo convolutiva (Chow et al., 1994). La hidrógrafa unitaria (ó hidrograma unitario) se define como la respuesta de la cuenca en forma de escorrentía directa, que resulta de una precipitación efectiva de profundidad unitaria, uniformemente distribuida sobre la cuenca y de duración específica igualmente unitaria.

En este estudio se determinaron los caudales máximos utilizando tres diferentes hidrógrafas unitarias sintéticas las cuales son: hidrógrafa unitaria de Snyder, Clark y la del SCS. La filosofía para la construcción de cada una de estas hidrógrafas, así como los parámetros necesarios, y en general la metodología de aplicación del método de las hidrógrafas unitarias puede ser consultado en Chow et al. (1994). Hay dos grandes parámetros involucrados en esta metodología; ellos son el histograma de precipitación efectiva y la distribución de la lluvia en el tiempo.

- **Precipitación efectiva**

La precipitación efectiva es la parte de la precipitación total que contribuye a la escorrentía directa. Para simular las pérdidas de la precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por intercepción en la vegetación, almacenamiento en

depósitos del suelo y por infiltración, se usa el método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service), cuyos detalles de la metodología pueden ser consultados en Chow et al., (1994).

$$P_e = \frac{(P_{acum} - I_a)^2}{P_{acm} - I_a + S} \quad S = \left(\frac{1.000}{CN} - 10 \right) * 25,4 \quad I_a = 0,2 * S$$

Donde P_e es la Precipitación efectiva, I_a : las abstracciones iniciales, CN el denominado Número de curva, y S la capacidad de almacenamiento.

- **Número de Curva**

El intervalo del número de curva es desde 0 a 100 y es función de la textura, la cobertura, tipo de tratamiento superficial que éste presente, de su condición hidrológica y los antecedentes de humedad del suelo que pueda relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores. Entre menor sea el número de curva, más bajo es el potencial de escorrentía.

Para ello, el uso del suelo y su cobertura fue tomado del estudio: Coberturas Vegetales, Uso Actual del Suelo y Determinación de Conflictos de Usos del Suelo con Base En el POT de la Zona Rural del Municipio de Medellín, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en el año 2009. Esta información fue complementada con las coberturas disponibles en el estudio Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Aburrá – POMCA, adelantado en el año 2006, por la comisión conjunta (Área Metropolitana del Valle de Aburrá- AMVA, La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA y La Corporación Autónoma Regional Rionegro – Nare, CORNARE), para la zona urbana y que presenta incidencia dentro de la cuenca de estudio.

La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos:

AMC-I: Para suelos secos.

AMC-II: Para suelo intermedios.

AMC-III: Para suelos húmedos.

Inicialmente se pensó en utilizar los números de curva (CN por su sigla en inglés) propuestos por la SCS para suelos tipo II, es decir para condiciones antecedentes

de humedad intermedia. Sin embargo, se decidió utilizar en su lugar el número de curva para suelos tipo III (condiciones antecedentes de humedad alta) con el objetivo de ser un poco más conservadores al momento de definir los caudales de diseño. La transformación de una humedad antecedente AMC II a AMCIII se realiza mediante la siguiente expresión:

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0,13 * (CNII)}$$

Además del número de curva, también se requiere ubicar la zona dentro de un grupo hidrológico del suelo, el cual está definido como el potencial de infiltración después de una lluvia prolongada. Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service (SCS) con base en el tipo y uso del suelo. Se definen cuatro grupos de suelos:

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 0/90 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 cuenca. En este grupo se encuentran las áreas urbanizadas con poca vegetación (10%).

En la Tabla 36, se presentan los diferentes tipos de coberturas vegetales con sus respectivos CN, discretizados por la clasificación hidrológica de cada tipo de suelo.

Tabla 36. Número de Curva para los diferentes tipos de cobertura.

Descripción uso del suelo		Grupo suelo hidrológico			
		A	B	C	D
Residencial					
Tamaño medio del lote	% promedio Impermeabilidad				
1/8 de acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 de acre	38	61	75	83	87
1/3 de acre	30	57	72	81	86
1/2 de acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueadero pavimentado, tejados, vías de acceso, etc		98	98	98	98
Calles y avenidas					
Pavimentos con cuneta y alcantarillado pluvial		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Áreas comerciales (85% impermeabilidad)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeabilidad)		81	88	91	93
Áreas libres, zonas verdes, parques, campos de golf					
Condiciones buenas: Zona verde en 75% o más de área		39	61	74	80
Condiciones aceptables: Zona verde de 50% a 75% del área		49	69	79	84
Baldío		77	86	91	94

El mapa de coberturas vegetales se muestra en la Figura 94. A partir de esta información, se definió el número de curva adecuado para cada una de las coberturas de la cuenca.

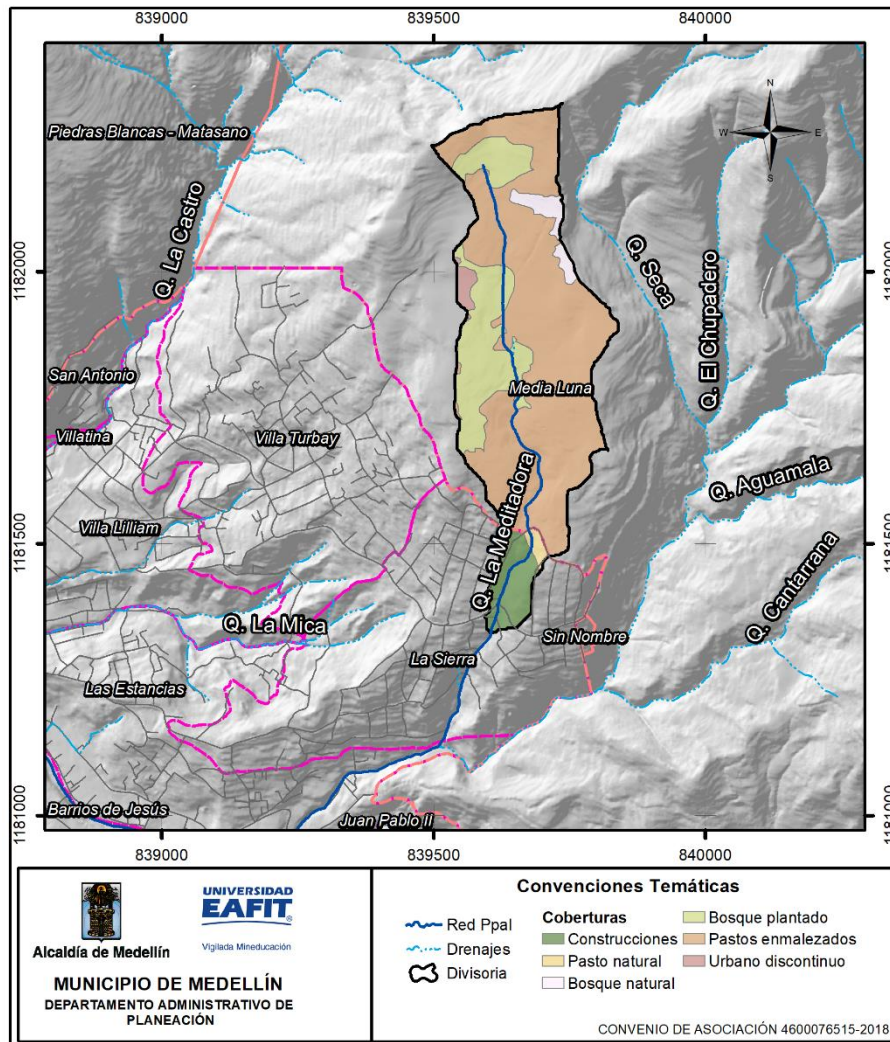


Figura 94. Coberturas vegetales en la cuenca de la corriente de estudio.

En la Tabla 37, se presentan los porcentajes del área total de la cuenca con relación a cada cobertura. Se determinaron los porcentajes de influencia de cada una de las coberturas disponibles sobre las vertientes de estudio, para luego determinar el número de curva mediante el cálculo del promedio ponderado.

Tabla 37. Usos del suelo en la cuenca de análisis.

Cobertura	CN	Q. La Meditadora	
		Área	%
		(km ²)	
Construcciones	95	0,012	6,807
Pasto Natural	67	0,002	0,979

Cobertura	CN	Q. La Meditadora	
		Área	%
		(km ²)	
Bosque Natural	63	0,005	2,884
Bosque Plantado	62	0,037	20,397
Pasto Enmalezado	65	0,122	67,557
Urbano Discontinuo	88	0,002	1,376

Para el análisis realizado, se utilizarán los números de curva en una condición AMCIII, correspondiente a un escenario más crítico en cuanto a la respuesta hidrológica de las cuencas, ya que considera mayor impermeabilización de la vertiente de interés. En la Tabla 38, se presentan el número de curva para la condición AMC II y AMC III en la cuenca analizada.

Tabla 38. Número de Curva estimado para la cuenca de estudio.

Cuenca	CN_II	CN_III
Q. La Meditadora	66,71	82,17

- **Modelo HEC – HMS**

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos. El HMS, incluye la mayor parte de las rutinas de HEC-1 (algunas parecen haber sido obviadas) e incorpora como elementos adicionales:

Un método de transformación lineal de la escorrentía (basado en una modificación del hidrograma unitario de Clark) que puede utilizarse en una representación de la cuenca a través de celdas, con datos distribuidos de precipitación obtenidos por ejemplo de registros de radar.

Una opción de pérdida distribuida de humedad en suelos que aplica el mismo principio de las celdas y puede utilizarse en simulaciones sobre períodos largos (de

días o meses) y una opción de optimización, un poco más versátil que la del HEC-1.

- *Funcionamiento*

El programa incluye una interfaz gráfica para el usuario (GUI) que le permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos: Subcuencas (subbasins), Tramos de tránsito (routing reach), Uniones (junctions), Embalses (reservoirs), Fuentes (Sources), Sumideros (sinks), Derivaciones (diversions).

Con estos siete componentes, se puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que está tratando y como permita la información de campo disponible. Si se cuenta con información digital de campo, el HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo. Los elementos anteriores se disponen en forma de redes dendríticas con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos desde las subcuencas que conforman las cabeceras aguas arriba hasta el punto de salida de todo el caudal aguas abajo. El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

Módulo de precipitación: permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.

Módulo de la cuenca: permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrógrafa total de salida.

Módulo de control: incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos.

El programa será utilizado para la conversión de la precipitación en escorrentía directa, teniendo como insumo las características morfométricas de la cuenca a

estudiar, las condiciones de pérdidas hidrológicas y la precipitación total calculada. Para el caso en estudio, se realizará el cálculo para las hidrógrafas unitarias sintéticas de SCS, Snyder y Clark, teniendo como base la conversión de la precipitación total a precipitación neta a partir del número de curva.

- ***Distribución temporal de la lluvia***

Para la distribución temporal de la lluvia se utilizó el diagrama elaborado por Huff (1967) que se presenta en la Figura 95, para lluvia con una probabilidad de excedencia del 50%. En los modelos lluvia-escorrentía, para determinar la tormenta de diseño, es necesario hallar la distribución de la lluvia en el tiempo. Para este propósito existen diferentes metodologías (Diagrama de Huff, Histograma triangular, Bloque alterno).

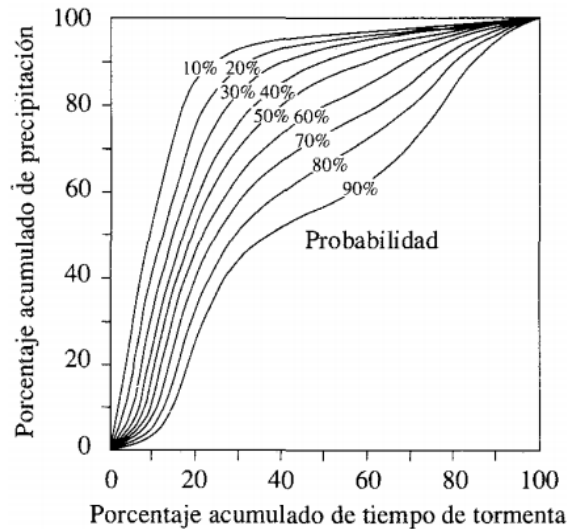


Figura 95. Diagrama distribución temporal de la lluvia, según Huff – 1967, Chow et al, 1994.

Como ya se mencionó para este estudio, los valores de distribución de la lluvia en el tiempo fueron tomados del Diagrama de Huff (ver Figura 95) para el primer cuartil (más severos) con una probabilidad de ocurrencia del 50% (Chow, et al., 1994), tal como se presenta en la Tabla 39.

Tabla 39. Distribución en porcentaje de la lluvia con relación a la duración de la tormenta (%).

T acm	P acm	T acm	P acm	T acm	P acm
0	0	40	80	80	94
10	16	50	85	90	98
20	52	60	87	100	100
30	69	70	91	-	-

Teniendo en cuenta que la transformación de lluvia en escorrentía se realizará utilizando el software HEC – HMS, y que el programa tiene intervalos de lluvia preestablecidos, se optó por discriminar la tormenta de diseño cada 1 min. Se estimó la distribución temporal de la lluvia para la cuenca de la quebrada La Meditadora, partiendo de la duración total de la lluvia, con intervalos subdivididos cada 12,50% de la lluvia total.

En la Tabla 40, se presenta el porcentaje de la lluvia total para cada intervalo de tiempo, y para la cuenca de la quebrada La Meditadora, objeto de estudio.

Tabla 40. Distribución de la lluvia en el tiempo según el método asumido.

Q. La Meditadora		
T (min)	%T	%P
1	12,50	25,00
2	25,00	60,50
3	37,50	77,25
4	50,00	85,00
5	62,50	88,00
6	75,00	92,50
7	87,50	97,00
8	100,00	100,00

- **Hietograma e Hidrógrafa de Crecientes**

Una vez tenida la información requerida por el modelo hidrológico utilizado, se puede determinar los hietogramas efectivos para las cuencas de interés, y que corresponde a la precipitación que realmente puede convertirse en escorrentía directa (ver Figura 96). Dentro de estas figuras, se puede apreciar la precipitación efectiva y las pérdidas hidrológicas para cada intervalo de tiempo asumido en la modelación hidrológica, donde la suma entre ambas variables representa la precipitación total disponible.

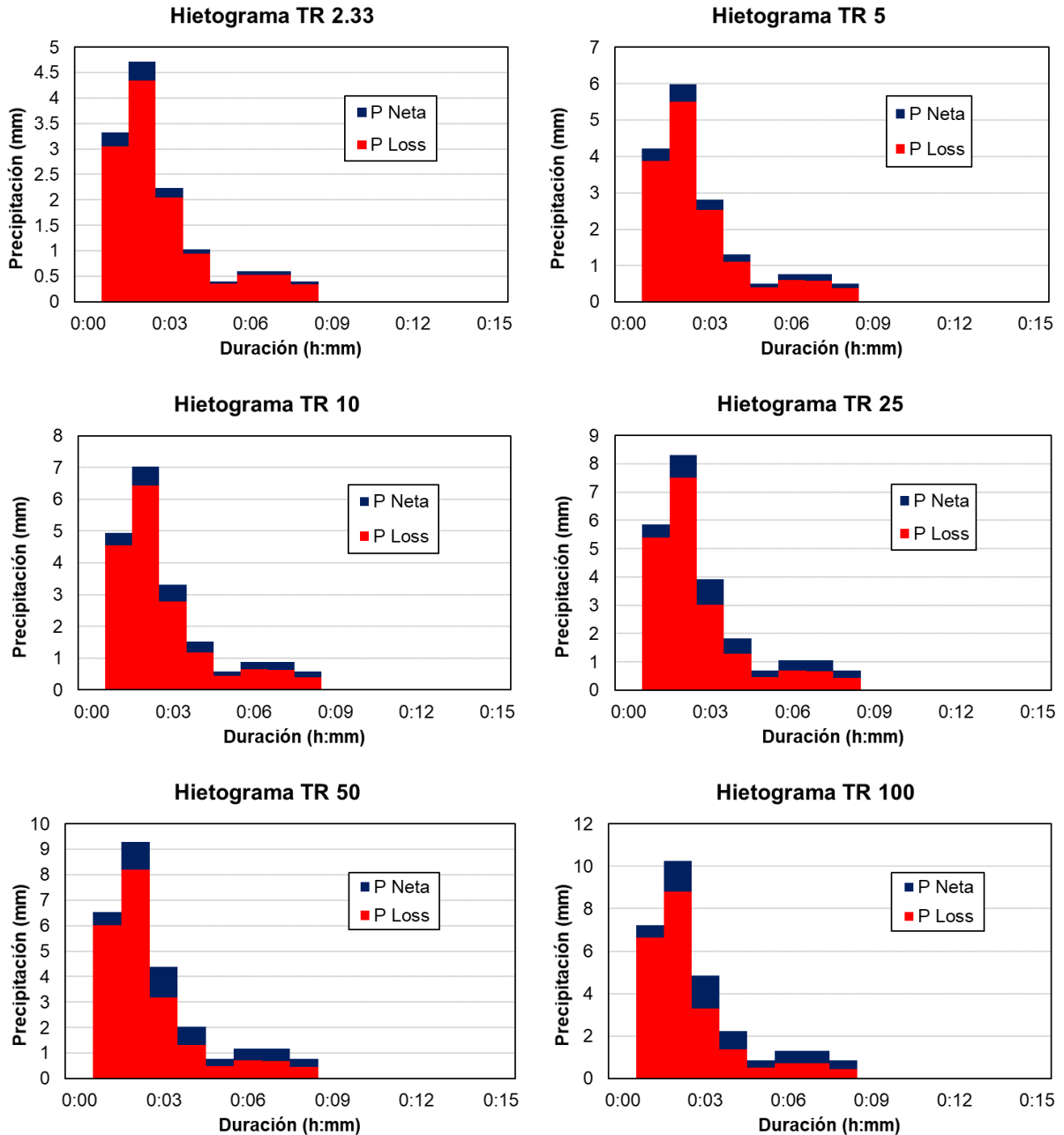


Figura 96. Hietogramas de precipitación efectiva, quebrada La Meditadora.

En la Figura 97, se presentan los hidrogramas de crecientes para los métodos de Snyder, SCS y Clark, que fueron implementados en la estimación de los caudales máximos en la quebrada La Meditadora, cuyo punto de interés se ubica en la zona final del tramo de estudio, cercano a un sitio ubicado entre calle 56 B y 54 A y entre carrera 7 E y 8 E.

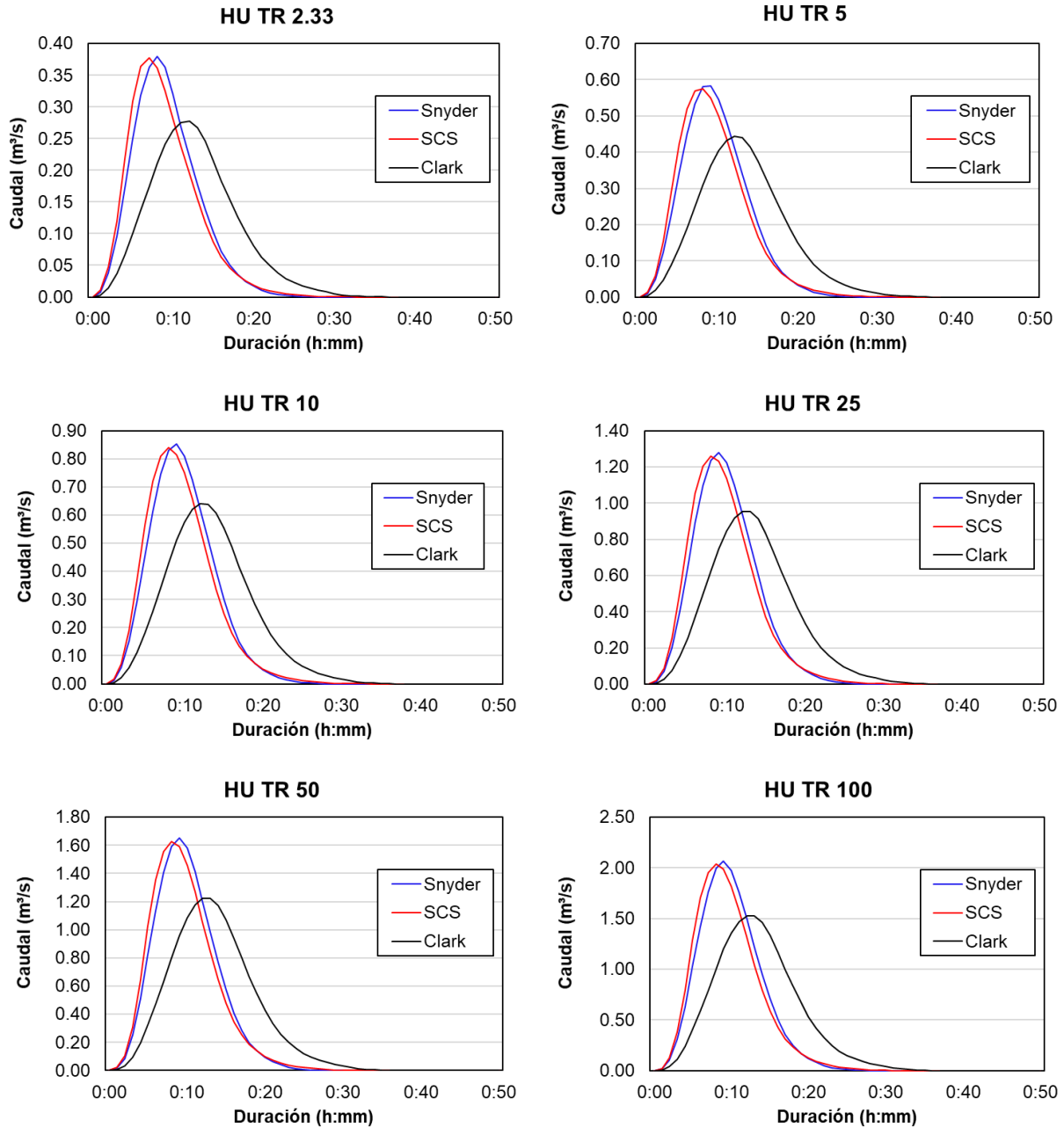


Figura 97. Hidrogramas de crecientes, quebrada La Meditadora.

Para el caso específico del método de Clark, se determinaron los parámetros de TC y R, requeridos en la modelación hidrológica del método y que fueron descritos en el Anexo 1: “Documento Metodológico” relacionado con el método de Clark, así como dentro del aparte donde se definen los procedimientos para estimar el tiempo de concentración.

La explicación para que el caudal estimado por el método de Clark, presente una diferencia tan marcada con los demás métodos, es que dicho método, utiliza un tiempo de concentración determinado por la expresión definida para dicho procedimiento, valor que se encuentra muy por encima del tiempo de concentración promedio de la cuenca, y, por lo tanto, representa una mayor retención de la precipitación en el área, mostrando así un menor caudal pico.

8.5.4 Método Racional Probabilístico

Con este método puede hallarse el caudal con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6}$$

Donde C: Coeficiente de escorrentía, I: Intensidad de la lluvia (mm/h) y A: Área de la cuenca (km²). Las tablas habituales para estimar el coeficiente de escorrentía hacen depender su valor únicamente del tipo de terreno y de su cobertura. En algunos casos también lo hacen depender de la pendiente y del periodo de retorno, pero casi todas se olvidan de la humedad antecedente del suelo. Una forma de tener en cuenta este factor es estableciendo una relación entre el número de curva y el coeficiente de escorrentía. Por definición el coeficiente de escorrentía es:

$$Es = \text{Escorrentía} \quad \text{y} \quad P = \text{precipitación}$$

La escorrentía superficial (Es) que genera cualquier evento de precipitación (P) se puede cuantificar mediante el método del número de curva. Admitiendo la relación habitual $I_a = 0,2 \times S$ (Infiltración inicial), se tiene que:

$$Es = \frac{(P - I_a)^2}{P + 4 * I_a} \rightarrow C = \frac{Es}{P} = \frac{(P - I_a)^2}{P^2 + 4 * P * I_a}$$

Otra forma de estimar el coeficiente de escorrentía, es el procedimiento tabular planteado por Ven Te Chow (1994), el cual consiste en asignar un valor de coeficiente de escorrentía a una cobertura vegetal específica y para un periodo de retorno dado. En la Tabla 41, se presentan los valores para los coeficientes de escorrentía, según Chow, 1994.

Tabla 41. Coeficientes de escorrentía según Chow, 1994.

Tipo de Superficie	Periodo de Retorno					
	2	5	10	25	50	100
Zonas Urbanas						
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95
Cemento, Tejados	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97
Zonas Verdes						
Condición Pobre (Cobertura inferior al 50%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47
Pendiente Media (2-7%)	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53
Pendiente Alta (>7%)	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55
Condición Media (Cobertura entre 50 y 75%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
Pendiente Media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
Pendiente Alta (>7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53
Condición Alta (Cobertura superior al 75%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36
Pendiente Media (2-7%)	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46
Pendiente Alta (>7%)	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51
Zonas Rurales						
Campos de Cultivos						
Pendiente Baja (0-2%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47
Pendiente Media (2-7%)	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
Pendiente Alta (>7%)	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
Pastizales, Prados						
Pendiente Baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
Pendiente Media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
Pendiente Alta (>7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53
Bosques, Montes Arbolados						
Pendiente Baja (0-2%)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39
Pendiente Media (2-7%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47
Pendiente Alta (>7%)	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52

Partiendo de las coberturas vegetales disponibles en la cuenca, se realizó el cálculo ponderado del coeficiente de escorrentía en la cuenca de la quebrada La Meditadora en el sitio de control. En la Tabla 42, se presentan los coeficientes de escorrentía escogidos para cada una de las coberturas vegetales, usos del suelo y pendientes disponibles en la cuenca de estudio, que luego y a través del porcentaje

disponible de cada cobertura para la cuenca, se determinó el coeficiente promedio para esta.

Tabla 42. Coberturas y Coeficiente de Escorrentía (Ven Te Chow, 1994) en la zona de estudio.

Cobertura	2,33	5	10	25	50	100
Construcciones	0,77	0,82	0,85	0,90	0,94	0,99
Pasto Natural	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53
Bosque Natural	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52
Bosque Plantado	0,53	0,57	0,59	0,63	0,66	0,70
Pasto Enmalezado	0,60	0,63	0,65	0,69	0,72	0,76
Urbano Discontinuo	0,77	0,82	0,85	0,90	0,94	0,99

Los porcentajes de influencia de cada una de las coberturas sobre la cuenca de estudio, fueron mostrados en la Tabla 37. El procedimiento para determinar el coeficiente de escorrentía que presenta Chow (1994) fue desarrollado con los estándares de la ciudad de Austin Texas. La experiencia en algunos estudios en Antioquia indica que el coeficiente calculado de esta manera sobrestima las crecientes. Una forma de ajustar los coeficientes tomados de Ven Te Chow, a unas condiciones regionales en Antioquia consiste en dividir cada valor en cada periodo de retorno por el coeficiente tomado para el periodo de retorno de 100 años, y este resultado multiplicarlo por el coeficiente del periodo de retorno de 2,33 años.

Tabla 43. Corrección de Coeficiente de Escorrentía – Ven Te Chow, 1994.

TR	Q. La Meditadora	
	Tabla	Correc.
2.33	0,59	0,46
5	0,62	0,49
10	0,64	0,50
25	0,69	0,53
50	0,72	0,56
100	0,76	0,59

Finalmente, se hace un análisis comparativo entre los valores estimados para el coeficiente de escorrentía calculado a partir del número de curva y la precipitación de la cuenca, y el valor determinado según el procedimiento tabular propuesto por Chow, 1994, valores que se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44. Comparación coeficiente de escorrentía por diferentes procedimientos.

TR	Q. La Meditadora	
	F (CN)	Chow
2.33	0,01	0,46
5	0,03	0,49
10	0,06	0,50
25	0,10	0,53
50	0,12	0,56
100	0,15	0,59

Según los resultados obtenidos en el cálculo del coeficiente de escorrentía por los diferentes métodos aplicados, se puede establecer que el máximo valor para este parámetro es arrojado por el procedimiento tabular (Chow, 1994), y con el fin de asumir la postura más conservadora, se escogen estos como los coeficientes de escorrentía, cuyo valor para el periodo de retorno de 100 años es de 0,59.

8.6 RESULTADOS

En el capítulo 8.5.3, se presentó cada uno de los hidrogramas de crecientes para la cuenca de estudio y para los diferentes periodos de retorno. En la Tabla 45, se presenta el resumen de los caudales estimados, y en la Figura 98, se muestran estos valores de forma gráfica para la quebrada La Meditadora, objeto de estudio.

Tabla 45. Caudales máximos estimados por diferentes métodos (m³/s).

TR	Q. La Meditadora			
	Snyder	SCS	Clark	Racional
2,33	0,38	0,38	0,28	2,30
5	0,58	0,58	0,44	3,09
10	0,85	0,84	0,64	3,75
25	1,28	1,26	0,95	4,72
50	1,65	1,63	1,23	5,51
100	2,07	2,04	1,53	6,42

Se puede observar que para la quebrada La Meditadora, se tiene un caudal máximo alcanzado por el método Racional y un caudal más bajo dado por el método de Clark. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se asume como caudales de diseño, los estimados por el método racional, con el fin de asumir la condición más desfavorable al momento de realizar la evaluación hidráulica, con un valor para el caudal con periodo de retorno de 100 años de 6,42 m³/s.

Adicionalmente, Smith y Vélez, 1997, indican que para cuencas con áreas inferiores a 1 km², es el método racional el que mejor representa la respuesta hidrológica de caudales máximos de las vertientes.

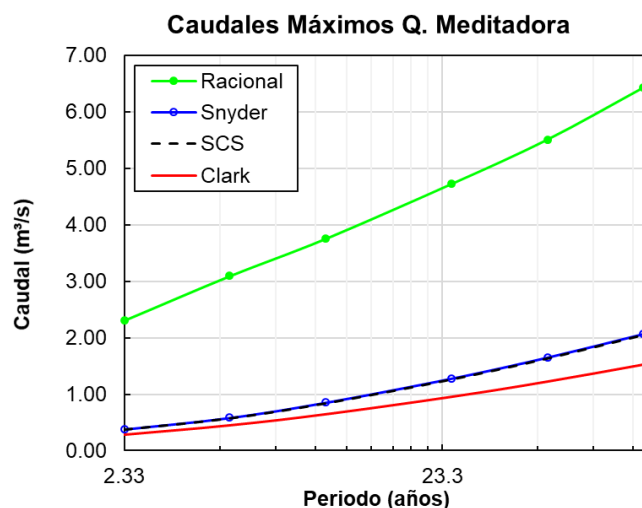


Figura 98. Caudales máximos diferentes métodos, quebrada La Meditadora.

Los caudales de diseño asumidos, son presentados en la Tabla 15, para cada periodo de retorno y cuenca analizada. En capítulos posteriores, se realizará la validación de los caudales máximos determinados, teniendo como base la modelación hidráulica, especialmente evaluando el nivel alcanzado por las crecientes extraordinarias sobre el terreno natural y las obras existentes

Tabla 46. Caudales (m³/s) corrientes de estudio, quebrada La Meditadora.

TR	Q. La Meditadora
2,33	2,30
5	3,09
10	3,75
25	4,72
50	5,51
100	6,42
A (km ²)	0,18

Dentro del Anexos 6, se presentan los archivos digitales del modelo HEC HMS construido para la cuenca de la quebrada La Meditadora y los resultados tabulares para la construcción de las hidrógrafas unitarias sintéticas.

8.7 COMPARACIÓN RESULTADOS – ESTUDIOS PREVIOS

Como análisis complementario, se evaluarán los resultados obtenidos dentro del presente estudio, con caudales máximos estimados en estudios previos. Para ello, se retoman los resultados dados dentro del documento: PLAN DE ORDENACION Y MANEJO DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA MUNICIPIO DE MEDELLÍN, desarrollado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y ejecutado por el Consorcio EPAM – CPT, 2007.

Dentro del mencionado documento, se realizó un análisis hidrológico de la cuenca de la quebrada Santa Elena para diferentes puntos de control sobre su cauce principal y afluentes ubicados sobre la vertiente norte y sur de dicha quebrada, para así realizar una evaluación hidrológica a partir de diversas áreas de drenaje sobre la zona de estudio, información mostrada dentro del capítulo 5. Dentro del sub capítulo 2, se presentan ecuaciones de regresión para los caudales máximos y diferentes periodos de retorno, las cuales fueron formuladas a partir de los caudales máximos en cada sitio de estudio y su respectiva área de drenaje. Estas ecuaciones son retomadas en Tabla 47.

Tabla 47. Ecuación de Regresión de Caudales Máximos (PIOM, 2007).

TR	Ecuación	R ²
1,4	$Q_{1,4} = 3,30A^{0,7695}$	0,9165
2,33	$Q_{2,33} = 5,157A^{0,913}$	0,835
5	$Q_5 = 9,24A^{0,779}$	0,835
10	$Q_{10} = 12,65A^{0,745}$	0,887
25	$Q_{25} = 17,19A^{0,714}$	0,917
50	$Q_{50} = 20,72A^{0,693}$	0,924
100	$Q_{100} = 24,20A^{0,680}$	0,935

Con el fin de validar los caudales máximos estimados en el presente documento, se utilizó la ecuación definida para el periodo de retorno de 100 años. Teniendo en cuenta que el área de drenaje para la quebrada La Meditadora en el presente documento es de 0,18 km², se obtiene un caudal para el periodo de retorno de 100 años de 7,56 m³/s, valor que es levemente superior al valor estimado en este estudio, cuyo caudal corresponde a un valor de 6,42 m³/s.

Es importante considerar que el caudal estimado a partir de la ecuación de regresión formulada en el PIOM, 2007, es mayor debido a que más del 80% de las cuencas analizadas en dicho estudio, superan el área de drenaje de 0,50 km², y teniendo en cuenta la escala de estudio, dicha ecuación puede sobre estimar el caudal máximo para la cuenca de la quebrada La Meditadora.

Dentro del estudio PIOM, 2007, se analizan los caudales máximos de una quebrada Sin Nombre sobre la vertiente sur de la quebrada Santa Elena, con área de drenaje de 0,17 km², similar al área de drenaje de la quebrada La Meditadora analizada en este documento, así como la cuenca de la quebrada La Salada con área de 0,15 km², donde se obtienen caudales para el periodo de retorno de 100 años de 6,13 m³/s y 6,16 m³/s, respectivamente. Al comparar dichos caudales con los resultados obtenidos en el presente documento, se puede apreciar que se conserva el mismo orden de magnitud que los análisis mostrados en el PIOM, 2007, de la quebrada Santa Elena.

Según este análisis, se considera que los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos para estimar los caudales máximos en la quebrada La Meditadora, son adecuados y acordes a las características climatológicas y geomorfológicas de la cuenca.

9. ESTUDIO HIDRÁULICO

En este capítulo se presenta el análisis hidráulico de la quebrada La Meditadora en una longitud de 370 m, entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra, con el fin de elaborar la mancha de inundación para la creciente máxima o caudal de diseño, que para este análisis, se han acogido las recomendaciones dadas en el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Código de Laderas y el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, 2006, los cuales sugieren que para corrientes con características torrenciales, implementar como caudal de diseño para la elaboración de manchas de inundación, el caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en un 40%.

Este análisis permite determinar la amenaza por avenida torrencial e inundación asociada a la quebrada La Meditadora en toda la longitud de análisis, información que es complementaria con el respectivo análisis geomorfológica.

Para realizar un adecuado análisis hidráulico, se tendrán en cuenta las diferentes condiciones evidenciadas en el recorrido de campo, con el fin de que el modelo permita representar las condiciones reales de las crecientes de la quebrada La Meditadora, y así, estimar con certeza el nivel de creciente del flujo para el caudal de diseño y para el tramo de interés en el presente documento. Estos análisis, permitirán contar con elementos en el planteamiento y propuestas de obras o diferentes alternativas de solución, las cuales se enfoquen en minimizar el riesgo asociado a dicho fenómeno. En especial, se evaluará el paso de las crecientes a través de las zonas aferentes a las calles 56 B y 54 B, donde se han presentado afectaciones por el desbordamiento del flujo. Este análisis será realizado mediante la implementación del software HEC RAS v 4.1, el cual será explicado más adelante, dentro del presente documento.

9.1 DESCRIPCIÓN DE CAMPO

Dentro del análisis del tránsito de crecientes a través del cauce de la quebrada La Meditadora, se realizó un recorrido a través de toda la longitud de estudio, específicamente para el tramo de la quebrada ubicado en la comuna 8 de Medellín y los límites con el corregimiento de Santa Elena, correspondiente al tramo de la quebrada La Meditadora entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra.

El recorrido inició en la zona alta de la vertiente, aguas arriba de la calle 56 B con carrera 7 Este, lugar que corresponde a la zona baja de la vertiente donde se encuentran ubicadas las instalaciones de la Institución Educativa La Sierra, lugar donde se observa una depresión topográfica sin la existencia de un cauce principal o sección de canal asociada a un drenaje permanente. Al recorrer el sitio, se puede constatar que este sector corresponde a la cabecera de la cuenca de la quebrada La Meditadora, lugar donde inicia la conformación geomorfológica del canal del drenaje y teniendo en cuenta las características topográficas, se presenta un área de drenaje aferente que permite la contribución de un volumen de agua importante al momento de fuertes lluvias (ver Figura 99).



Figura 99. Vertiente quebrada La Meditadora, aguas arriba de la Carrera 7 Este.

Esta condición es corroborada a partir de la información suministrada por los residentes de la zona, quienes manifiestan múltiples afectaciones por inundaciones en las zonas aferentes a la calle 56 B con carrera 7 Este. En para el tramo aguas arriba de la calle 56 B, no se presenta flujo permanente de agua, sin embargo, la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos extremos, conlleva a la afectación del sector por el desbordamiento del agua (ver Figura 100).



(a)



(b)

Figura 100. Cauce poco definido en zona alta de la vertiente, sin canal principal.

Los procesos de desbordamiento, se presentan debido a que sobre el centro de la vertiente fue desarrollado una zona de juegos infantiles, así como un coliseo, y por lo cual, la quebrada La Meditadora en dicho tramo, no cuenta con un cauce principal o vertiente definida y al momento de fuertes tormentas, ocupa una zona importante del sector (ver Figura 101).



(a)



(b)

Figura 101. Juegos infantiles y coliseo ubicado en el centro de la vertiente de la quebrada La Meditadora.

Aguas abajo del coliseo mencionado, justo en la calle 56 B, el flujo de esorrentía al momento de fuertes tormentas, toma dos caminos, el primero hacia el centro de la vertiente y donde se cuenta con una mayor conformación geomorfológica del canal de la quebrada La Meditadora, así como por una vía peatonal paralela al

cauce, la cual ha sido fuertemente deteriorada por el paso del flujo de escorrentía asociado a dicha quebrada.

En la actualidad, no se presenta ningún tipo de obra de conducción superficial o sub superficial que permita la comunicación del flujo desde la vertiente superior de la cuenca, previo a la zona de juegos infantiles, con el cauce natural de la quebrada La Meditadora, aguas abajo de la calle 56 B. En dicho punto, solo se cuenta con una zanja y un canal que recibe el flujo proveniente de un sumidero ubicado en un borde de la calle 56 B, a modo de descarga de aguas lluvias, el cual entrega sobre el cauce principal de la corriente (ver Figura 102 y Figura 103).



Figura 102. Canal piedra pegada descole aguas lluvias proveniente de la vía Carrera 7 Este.



Figura 103. Vertiente principal quebrada La Meditadora entre calle 59 B y 54 B.

Aguas abajo de la calle 56 B, la quebrada La Meditadora cuenta con un cauce natural definido, conformado por un canal de alta montaña donde la pendiente del lecho alcanza valores superiores al 20%, con arrastre de material tipo guijarros y cantos rodados, así como la presencia de gravas. Aguas abajo de la descarga del canal existente proveniente de la vía calle 56 B, se observa un tramo con procesos erosivos, los cuales pueden ser generados por la pendiente del canal natural. En esta zona, se observan varias viviendas ubicadas sobre la margen derecha del canal, las cuales se encuentran aproximadamente a 3,0 m del borde de la quebrada, y que pueden ser afectadas por el paso de las crecientes.

El recorrido continuo por la zona baja de la vertiente, lugar donde la quebrada La Meditadora cruza la calle 54 B. En dicha zona, se cuenta con una tubería en concreto de 0,70 m que se ubica bajo una serie de viviendas y bajo la mencionada vía, para descargar sobre un canal rectangular en concreto ubicado entre unas viviendas del sector. Al momento del recorrido, puede observarse la existencia de flujo base asociado a la corriente, el cual puede deberse también a las descargas de aguas residuales domésticas desde la zona alta de la cuenca (ver Figura 104).



Figura 104. Zona de cruce quebrada La Meditadora a través de la calle 54 B. Tubería de 0,70 m de diámetro, descarga en canal.

Es de mencionar que una de las viviendas ubicadas sobre la tubería de 0,70 m de diámetro bajo la vía calle 54 B, cuenta con afectaciones en el piso de la misma, situación que puede corresponder a fallas en la conducción por posibles procesos de presurización. Una vez finaliza el canal en concreto actual, aguas abajo de la calle 54 B, la corriente descarga sobre un MH que hace parte de la red de alcantarillado de la zona, obra que cuenta con una perforación en la zona de cono, con el fin de permitir la recepción del flujo base de la corriente (ver Figura 105).

Es de indicar que si bien, el flujo base y el escurrimiento de pequeñas tormentas, puede ser conducidas a través del canal en concreto y descargadas sobre el mencionado MH, para tormentas extraordinarias, el flujo de creciente dentro de la quebrada no ingresa en su totalidad al MH, generando afectaciones por el desbordamiento del agua, considerando además que, sobre la vertiente de la quebrada, se ha realizado la construcción de redes de alcantarillado, viviendas, cruces peatonales, entre otros, que han modificado la pendiente del terreno y el ancho disponible para el paso natural de la corriente (ver Figura 106).



(a)



(b)

Figura 105. Entrega de flujo sobre MH existente, final de canal rectangular.



(a)



(b)

Figura 106. Ruptura MH para recepción de aguas en la quebrada La Meditadora y ocupación de retiros y zonas aledañas al cauce, aguas abajo de calle 54 B.

Es de indicar que varias viviendas de la zona, colindantes a la vía calle 54 B, sufren afectaciones por procesos de inundación, los cuales son generados por el

escurrimiento del agua lluvia desde la zona alta de la vía, y considerando la capacidad de las obras de aguas lluvias (cunetas, sumideros, redes de alcantarillado), no son capturadas por estas obras y por lo tanto, ingresan a las diferentes viviendas.

En síntesis, se tiene dos puntos de interés sobre la quebrada La Meditadora, el primero en la calle 56 B, donde se ha realizado la construcción de un coliseo y una zona de juegos infantiles sobre el centro de la vertiente de la corriente, lo que genera que el flujo de escorrentía se presente de forma difusa y sin una sección que lo concentre. Esto ha causado afectaciones por el desbordamiento del agua, debido a la falta de una obra de conducción entre la zona alta de la ladera y el tramo aguas abajo de la calle 56 B. El segundo punto corresponde al cruce de la corriente con la calle 54 B, donde se ha intervenido a la corriente con obras de conducción y viviendas, conllevando a la insuficiencia hidráulica de la sección de las obras en la corriente, condición que genera el desbordamiento del agua al momento de fuertes tormentas. Una vez se cuente con los resultados hidráulicos en condición actual, se plantearán las obras de captura, conducción y descarga de la corriente, que permitan el paso a través de las zonas afectadas.

9.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

9.2.1 Topografía

Se contó con un levantamiento topográfico de márgenes y lecho de la quebrada La Meditadora en el tramo de estudio, el cual se encuentra limitado entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra. En la Figura 107, se presenta el esquema del sitio de análisis con la ubicación de cada una de las secciones transversales.

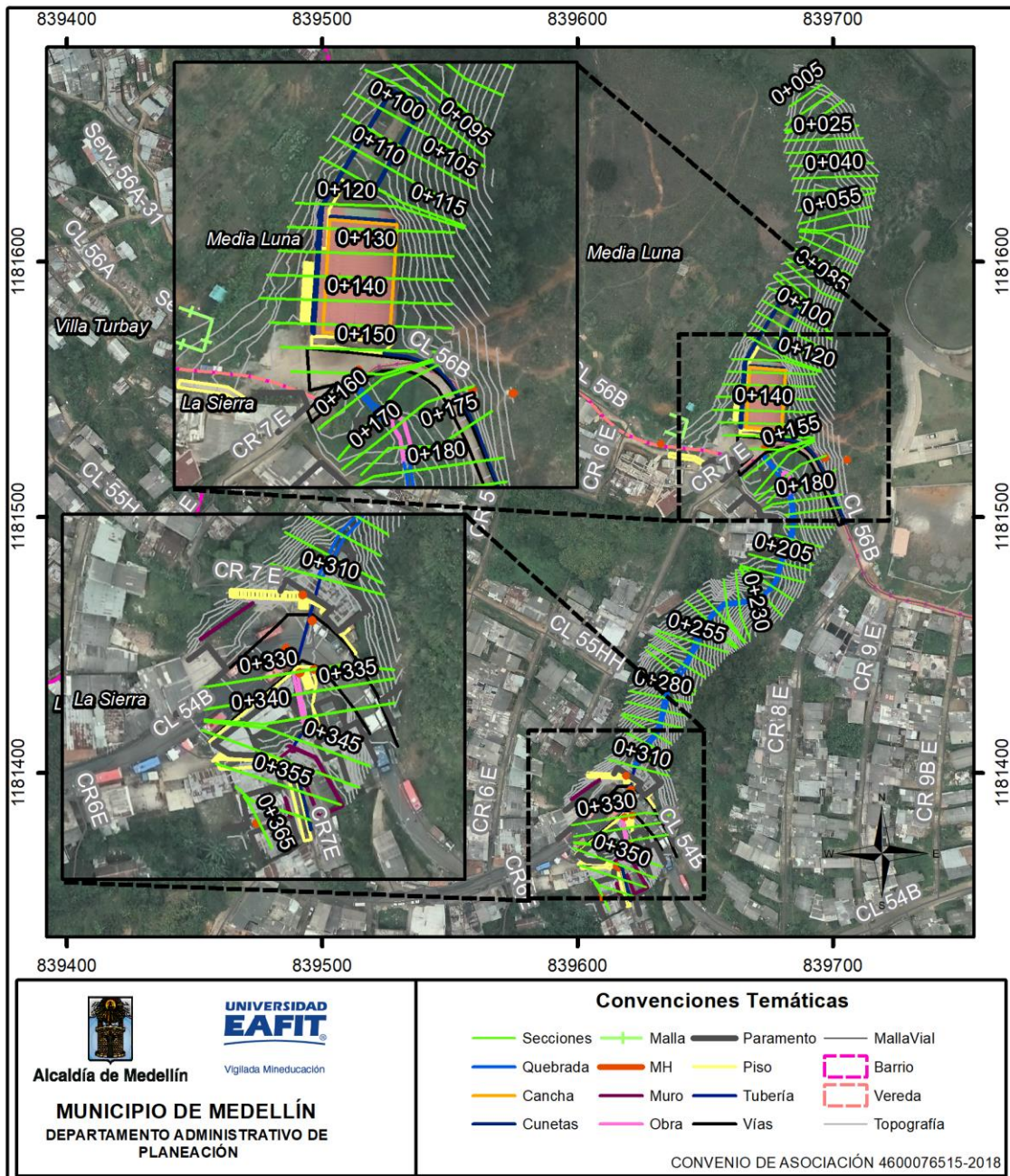


Figura 107. Esquema del tramo analizado y las secciones transversales usadas.

El levantamiento topográfico contó con información en una longitud de 370 m, recorriendo toda el área colindante al tramo entre calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, municipio de Medellín. Las secciones transversales se elaboraron cada 5 m, con el fin de detallar adecuadamente los cambios en el fondo del canal.

Las secciones implementadas para la modelación hidráulica, difieren en numeración con las presentadas en el plano mostrado en la Figura 107, debido a las características para el ingreso de información para el modelo usado (HEC-RAS). La metodología de ingreso de secciones en el modelo hidráulico utilizado, se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo como numeración decreciente, y la numeración indicada en la figura corresponde a las abscisas mostradas en el plano, sentido creciente. En la Tabla 48, se presenta la numeración para el plano y para el modelo hidráulico, para la quebrada La Meditadora en el tramo objeto de estudio.

Tabla 48. Secciones usadas en la modelación hidráulica.

Abscisa	Modelo	Abscisa	Modelo	Abscisa	Modelo	Abscisa	Modelo
0+000	370	0+090	280	0+175	195	0+265	105
0+005	365	0+092	278	0+180	190	0+270	100
0+010	360	0+095	275	0+185	185	0+275	95
0+015	355	0+100	270	0+190	180	0+280	90
0+020	350	0+105	265	0+195	175	0+285	85
0+025	345	0+110	260	0+200	170	0+290	80
0+030	340	0+115	255	0+205	165	0+295	75
0+035	335	0+120	250	0+210	160	0+300	70
0+040	330	0+125	245	0+215	155	0+305	65
0+045	325	0+130	240	0+220	150	0+310	60
0+050	320	0+135	235	0+225	145	0+330	40
0+055	315	0+140	230	0+230	140	0+335	35
0+060	310	0+145	225	0+235	135	0+340	30
0+065	305	0+150	220	0+240	130	0+345	25
0+070	300	0+155	215	0+245	125	0+350	20
0+075	295	0+160	210	0+250	120	0+355	15
0+080	290	0+165	205	0+255	115	0+360	10
0+085	285	0+170	200	0+260	110	0+365	5

Como verificación en el espaciamiento de las secciones transversales, se utiliza los conceptos dados por Samuels, 1989. En dicha referencia, se recomienda estimar el espaciamiento entre secciones transversales a partir de la siguiente ecuación:

$$Dx = 0.15 * \left(\frac{D}{S} \right)$$

Donde,

D_x , es el espaciamiento promedio entre secciones transversales.

D , es la profundidad media del flujo (profundidad de la banca, en m).

S , es la pendiente promedio del tramo de estudio en m/m.

En hecrasmodel.blogspot.com, se presentan algunos apuntes técnicos en cuanto a la aplicación de la ecuación propuesta por Samuels, 1989. En dicho aparte, se indica que es normalmente creíble que, para menor distancia entre secciones transversales, se presentan mejores resultados en la simulación hidráulica, sin embargo, distancias muy cortas entre secciones puede sobre estimar la pérdida de energía y conllevar a errores mayores, así como la inestabilidad numérica del modelo. Partiendo de estos análisis, en dicha referencia se plantea utilizar un coeficiente hasta de 0,70 para la ecuación de Samuels, 1989, reemplazando el valor original de 0,15.

Teniendo en cuenta la información antes referenciada, se determina una profundidad de banca llena aproximada a 0,60 m, que fue detectada en el recorrido de campo, y una pendiente promedio para el tramo de estudio de 0,12 m/m (12%) por lo que se obtiene un valor de separación de 3,50 m, valor que es superior a la distancia asumida de 5,0 m. A partir de estos resultados, se considera que la separación entre secciones que se asume para el estudio es correcta.

9.2.2 Obras Hidráulicas Existentes

Adicional a la topografía de la quebrada La Meditadora, se contó con las especificaciones geométricas de las diferentes obras existentes, tales como obras de cruce las cuales fueron ingresadas dentro del modelo hidráulico.

Para el caso de estudio, se contó con una obra existente de cruce ubicada a través de la calle 54 B, correspondiente a una tubería en concreto de 0,70 m de diámetro, la cual inicia en la abscisa 0+310 y finaliza en la abscisa 0+330, secciones del modelo 60 y 40, respectivamente, por lo cual se ingresó la sección 50. La longitud de la obra es de 20 m, iniciando en la cota 1866.12 m.s.n.m. y finaliza en la cota 1864.14 m.s.n.m.

9.2.3 Caudal de Diseño

También se contó con los caudales de diseño para la quebrada La Meditadora, los cuales fueron estimados en el capítulo de Hidrología. En dicho aparte, se muestran los resultados obtenidos luego de implementar metodologías de hidrógrafas unitarias sintéticas y el método racional, escogiendo como caudales de diseño los resultados obtenidos por el método Racional. Los caudales fueron calculados para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, resultados que son presentados en la Tabla 49.

Tabla 49. Caudales usados en la modelación hidráulica en la corriente de estudio.

TR	2.33	5	10	25	50	100	POMCA
Q	2,30	3,09	3,75	4,72	5,51	6,42	8,99

Se incluye como caudal de diseño, el caudal denominado POMCA y que consiste en la recomendación dada en el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Código de Ladera, en cuanto a la mayoración del caudal con periodo de retorno de 100 años en 40%, para considerar el posible transporte de sedimento cuando las corrientes cuentan con características torrenciales, recomendación que también es realizada por el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburrá – POMCA, 2006.

9.3 DIAGNÓSTICO - EVALUACIÓN CONDICIONES EXISTENTES

La modelación del tránsito hidráulico de caudales máximos de la quebrada La Meditadora fue realizada utilizando el programa HEC-RAS versión 4.1 (U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2002 a), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Este análisis se adelantó en el tramo enmarcado entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra, municipio de Medellín. El software requiere como datos de entrada el régimen de flujo, las condiciones de borde, y el valor de rugosidad de Manning n, solucionando la ecuación para flujo gradualmente variado en canales naturales y artificiales en régimen permanente. Las profundidades de flujo se calculan a partir del método estándar por pasos y como resultado del modelo se obtiene la superficie libre del agua asociada a una condición de caudal impuesta que puede variar a lo largo del cauce.

En primer lugar, se deberá realizar la calibración del modelo hidráulico, la cual consiste en ajustar los diferentes parámetros de entrada al modelo y así poder realizar la evaluación de las condiciones reales de la quebrada La Meditadora en el

tramo de interés, es decir, que la situación modelada mediante el uso del HEC-RAS, represente las condiciones y evidencias del tránsito del flujo a través del canal de la corriente. Para ello se realiza la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning y se evaluará el comportamiento de los caudales de diseño calculados en el estudio hidrológico y que los mismos representen el flujo de crecientes al interior del canal de la quebrada.

El estudio busca analizar el comportamiento de los caudales máximos de la quebrada La Meditadora, generando la mancha de inundación para el escenario actual y evaluar la incidencia de la corriente en toda la zona de interés. Estos análisis, tienen como finalidad la estimación de la amenaza por avenida torrencial e inundación en las zonas de cruce de la corriente con las calles 56 B y 54 B, zonas donde actualmente se presenta el desbordamiento del flujo por problemas de capacidad hidráulica en obras existentes y la ocupación del cauce con diferentes asentamientos urbanos. A partir de estos resultados, se plantearán las obras de manejo requeridas que permitan controlar los procesos de inundación y así, permitir la conducción adecuada de las crecientes en la corriente de estudio.

9.3.1 Descripción del Modelo Hidráulico

HEC-RAS (Hidrológica Engineering Center's River Analysis System), es un programa de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), y surge como evolución del conocido HEC-2, con varias mejoras respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con los Sistemas de Información Geográfica.

El principal objetivo del programa HEC-RAS, es el de calcular la elevación de la superficie de la lámina de agua para un caudal y condiciones de flujo dadas, (flujo permanente o estacionario), aunque HEC-RAS también puede ser empleado para movimientos transitorios, (no permanentes) unidimensionales, y recientemente para el cálculo del transporte de sedimentos. El modelo HEC - RAS es capaz de simular condiciones hidráulicas para flujos gradualmente variados en régimen permanente y no permanente y en redes de drenajes naturales y artificiales, estima tasas de transporte de sedimentos para lecho móvil y permite realizar modelación de variables de calidad de agua.

El procedimiento básico computacional del software está basado en la solución numérica de la ecuación de energía unidimensional, las pérdidas de energía son

evaluadas a partir de ecuaciones de coeficientes de rugosidad del lecho (número de Manning) y a partir de coeficientes de contracción y expansión del flujo (coeficientes que se multiplican al cambio en la cabeza de velocidad). La ecuación de momentum es empleada en situaciones donde el perfil de la lámina de agua está relacionado a un flujo rápidamente variable. Esas situaciones incluyen: régimen de flujo mixto (resaltos hidráulicos), flujo a través de puentes y comportamiento hidráulico del flujo en confluencias.

El módulo de transporte de sedimentos del HEC - RAS, realiza simulaciones de este transporte en lecho móvil, siendo capaz de reproducir procesos morfodinámicos como erosión del lecho y depositación de material en el mismo. El transporte de sedimentos potencial es estimado por tamaño del sedimento, permitiendo establecer procesos de gradación del material del lecho (sorting) y de acorazamiento (armoring).

El modelo es capaz de simular procesos de transporte en redes de canales, en canales con procesos de dragado, entre otros, utilizando para ello distintas ecuaciones para el cálculo del transporte de sedimentos. Una descripción detallada de los procedimientos realizados, puede ser consultada en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

9.3.2 Coeficiente de Rugosidad

A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, Chow (Chow et. al, 1994) desarrolló un procedimiento para estimar el valor de n . Mediante este procedimiento, el valor de n puede calcularse por la expresión de Cowan (mencionado en Chow et. al, 1994):

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales, n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerar las obstrucciones, n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo, y m es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal. Una descripción detallada de los procedimientos realizados, puede ser consultada en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

El parámetro del coeficiente de rugosidad de Manning, corresponde a un valor dentro de la ecuación que representa el comportamiento hidráulico de una masa de agua a través de un canal natural o artificial, y donde la superficie de dicho canal genera una resistencia al tránsito del flujo. Algunos autores (Jarrett, 1984) han indicado que el coeficiente de Manning puede variar de acuerdo al volumen de agua que transita por la superficie del canal, por lo que, para un mismo tramo de río, el coeficiente de Manning puede variar entre los caudales máximos y caudales medios (o mínimos).

Esta explicación se debe a que para caudales menores (medios y mínimos), las geoformas tales como dunas, risos, saltos y pozos, así como la misma vegetación, pueden generar una alta resistencia al flujo ya que el mismo no cuenta con profundidades importantes ni velocidad de desplazamiento representativa y por ello, la rugosidad relativa del fondo del canal representa valores mayores en el coeficiente de Manning. Para el caso de una creciente, donde la profundidad del flujo es mayor al igual que la velocidad, la rugosidad relativa se disminuye reduciendo así el valor del coeficiente de rugosidad de Manning. Estos aspectos pueden ser consultados en Jarrett, 1984, o en hecmodel.blogspot.com. Dentro del presente capítulo se determinará el coeficiente de rugosidad de Manning para la evaluación hidráulica de las crecientes, información que será validada en la calibración del modelo hidráulico HEC – RAS.

El valor de n_0 corresponde a las características del material de arrastre, el cual es conformado por arenas y gravas, junto con algunos guijarros y cantos rodados. De acuerdo a las diferentes características de los tramos de interés, se escogieron los valores para los parámetros que conforman el método propuesto por Cowan, mencionado en Chow, 1994. El resumen de los parámetros y el cálculo del coeficiente de rugosidad, se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50. Coeficiente de rugosidad de manning en cada tramo de interés (Cowan).

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
n_0	0,026	0,031	0,026
n_1	0,010	0,020	0,010
n_2	0,005	0,010	0,005
n_3	0,000	0,000	0,000
n_4	0,020	0,010	0,020
m	1,000	1,000	1,000
n	0,061	0,071	0,061
Abscisa Inicial	0+000	0+190	0+350

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Abscisa Final	0+120	0+305	0+365

Teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la quebrada La Meditadora en la zona de estudio, se identificaron tres tramos en los cuales se presenta la variación del coeficiente de rugosidad de manning. El primer tramo corresponde a la zona aguas arriba, donde la corriente no cuenta con un canal definido y transita a través del terreno cubierto por pastos y rastrojos, zona que finaliza justo donde inicia el coliseo existente. El segundo tramo, se ubica aguas abajo de la calle 56 B, zona donde inicia la conformación geomorfológica del canal, con presencia de material aluvial grueso, finalizando en al inicio de la obra de cruce bajo la calle 54 B. El tramo final, ubicado entre abscisas 0+350 y 0+365, presenta condiciones similares detectadas en el tramo 1. Para la zona comprendida entre el inicio del coliseo y la vía calle 56 B, así como la zona colindante a la calle 54 B, corresponden a superficies rígidas tipo concreto, por lo que se asume un coeficiente de rugosidad que varía entre 0,017 y 0,035.

Para las márgenes, las cuales son cubiertas por vegetación tipo arbustos y rastrojos, se ha asumido un valor de 0,075 en promedio.

9.3.3 Condiciones de Frontera

Por otra parte, y como requisito para implementar la modelación hidráulica, se introducen las condiciones de frontera en el software HEC - RAS (puede ser la curva de calibración de una sección transversal, la pendiente normal del perfil de flujo o los niveles impuestos aguas abajo de las secciones en estudio por un control de flujo).

En condiciones de flujo sub crítico sólo es necesario la condición de frontera en el tramo final del río, por el contrario, si se realiza la simulación para flujo supercrítico la condición de frontera debe definirse en el tramo inicial de la corriente. Finalmente, cuando se considera que el flujo es mixto, ambas condiciones de frontera (aguas arriba y abajo) deben ser definidas. Una descripción detallada de los procedimientos realizados, puede ser consultada en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

Para el caso en particular de la quebrada La Meditadora en la zona colindante en el tramo de estudio (enmarcado entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra, municipio de Medellín), el flujo transita a través de un canal predominantemente recto y de alta pendiente en el fondo del lecho, representando así un comportamiento súper crítico (altas velocidades). Para este análisis, se

escogió como condición de borde la profundidad normal del flujo correspondiente a la pendiente de la línea de energía, la cual se consideró equivalente a la pendiente del fondo del canal. Para esta corriente, se tiene una pendiente del fondo del canal en el tramo de modelación aguas arriba de 0,1582 m/m equivalente a 15,82%.

Si bien la pendiente del tramo de estudio se encuentra por encima del 10%, se realiza una adecuada verificación de los resultados dados por el modelo mediante un proceso de calibración, analizando los niveles arrojados para los caudales de diseño, y que estos representen las condiciones reales en las quebradas.

Se conservan los coeficientes de contracción y expansión de 0,1 y 0,3 que se encuentran por defecto dentro del modelo HEC-RAS (U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2002 a), toda vez que no se presentan variaciones entre secciones transversales que puedan ocasionar un incremento considerable en las pérdidas de energía. Estos valores se pueden modificar de acuerdo a las condiciones particulares de análisis, lo cuales corresponden como se muestra en la Tabla 51.

Tabla 51. Coeficientes de contracción y expansión.

Tipo de Cambio	Contracción	Expansión
Sin pérdidas por transición	0	0
Transiciones graduales	0,1	0,3
Secciones típicas de puentes	0,3	0,5
Transiciones Abruptas	0,6	0,8

En resumen, los parámetros de entrada al modelo hidráulico HEC-RAS para las condiciones existentes son los siguientes:

- Coeficiente de rugosidad n de manning de 0,061 para el cauce principal de la quebrada La Meditadora en la zona comprendida entre la abscisa 0+000 y 0+120, 0,071 entre abscisas 0+190 y 0+305, y 0,061 entre abscisas 0+350 y 0+365, y 0,075 en las márgenes como valor promedio, valores estimados a partir del método de Cowan. Para las zonas con presencia de concreto, se utilizó un valor entre 0,017 y 0,035.
- Simulación hidráulica bajo el tipo de flujo súper crítico, con condiciones de borde tipo profundidad normal, igual a la pendiente del fondo del canal en el tramo aguas arriba, con valor de 0,1582 m/m.
- Caudales de simulación para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, indicados en la Tabla 49, incluyendo además el caudal para el

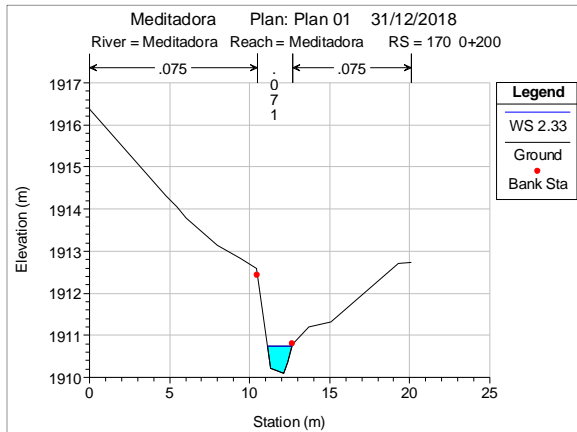
periodo de retorno de 100 años mayorado en 40%, según las recomendaciones del Acuerdo 009 de 2012 – Código de Laderas, y el POMCA, 2006, con el fin de contemplar el arrastre de sedimentos dentro de corrientes con características torrenciales. El caudal para el periodo de retorno de 100 años mayorado en 40% es de 8,99 m³/s.

- Coeficientes de contracción y expansión de 0,1 y 0,3.

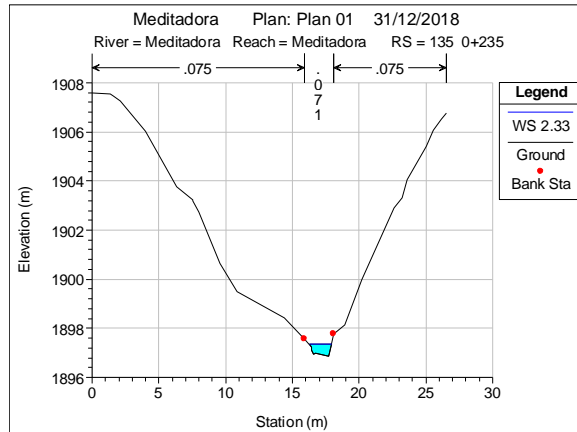
9.3.4 Calibración del Modelo Hidráulico

Finalmente, es importante al momento de realizar una modelación hidráulica de un río en particular, calibrar el modelo implementado y así evaluar la capacidad del software para representar las condiciones reales de la corriente analizada. Bajo las condiciones de caudal de diseño, rugosidad del canal y condiciones de entrada al modelo hidráulico, se verificó las alturas alcanzadas de la lámina de agua y así evaluar el concepto de banca llena (Posada, 1994).

Posada, 1994, indica que el caudal que representa la banca llena, es decir, aquel que ocupa el canal principal de la corriente corresponde a un caudal con periodo de retorno que oscila entre 1,5 años y 2,33 años, por lo cual se evaluó la altura de la lámina de agua alcanzada para el caudal con periodo de retorno de 2.33 años a través del canal de la corriente y que fue presentado en el capítulo anterior.



Sección 170 – 0+200



Sección 135 – 0+235

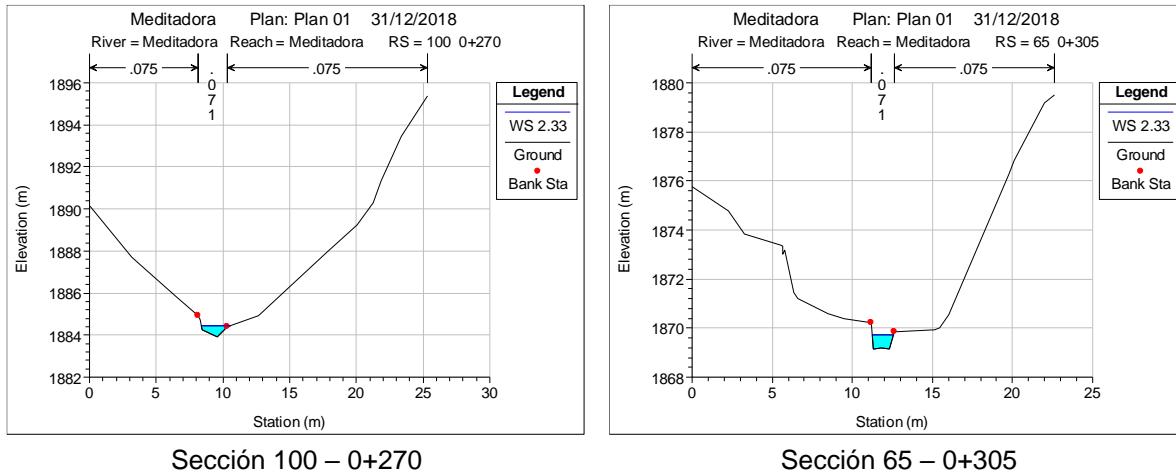


Figura 108. TR233 años para quebrada La Meditadora.

Para este análisis, se evaluaron secciones transversales que cuentan con una geometría de canal principal bien definida y que permitieran analizar adecuadamente el concepto de la banca llena a lo largo de la fuente de estudio. En la Figura 108, se presenta la lámina de agua para los caudales con periodo de retorno de 2.33 años en la quebrada La Meditadora.

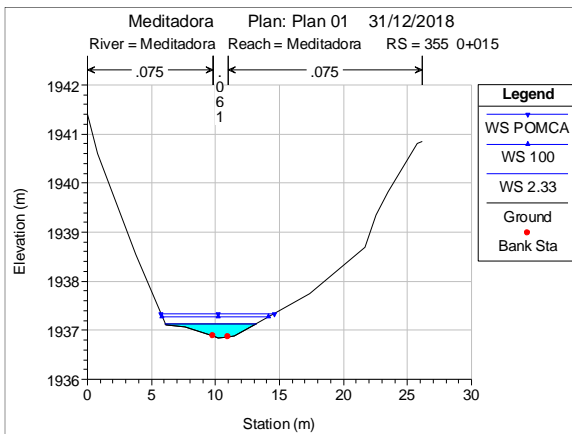
Una vez obtenidos los primeros resultados del modelo hidráulico, se considera que los niveles alcanzados por la lámina de agua para el sitio de interés son coherentes con las características geomorfológicas del cauce y márgenes de la corriente, situación que fue validada a partir de los niveles de banca llena (Posada, 1994). Esta situación, además permite validar los caudales estimados en el Capítulo anterior, los cuales representan adecuadamente los niveles de creciete en las corrientes.

9.3.5 Resultados

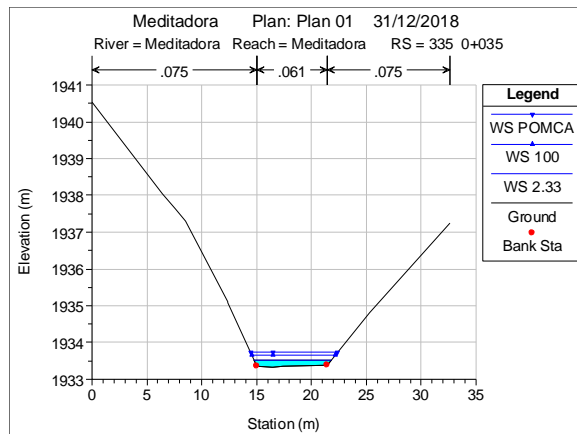
Luego de tener los datos e información relacionada para la simulación hidráulica en el HEC-RAS (rugosidad, caudal de diseño, condiciones de frontera y geometría), se analizó el comportamiento hidráulico de la quebrada La Meditadora, y así determinar los principales cambios entre las variables hidráulicas para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, incluyendo el caudal POMCA correspondiente al caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en un 40%. Los resultados presentados en este documento corresponden a los valores para los caudales con periodos de retorno de 2.33 y 100 años, y el caudal POMCA, los resultados completos se muestran en los Anexos relacionados con el componente Hidráulico.

Para el escenario actual de la quebrada La Meditadora, se cuentan con valores máximos de velocidad de 6,63 m/s, 9,0 m/s y 12,6 m/s, y para los caudales con periodos de retorno de 2.33, 100 años y POMCA, cuyos valores promedios son de 3,11 m/s, 4,29 m/s y 4,82 m/s. Los valores son consecuentes con el caudal de diseño y con la pendiente del lecho, donde los máximos valores se generan en el tramo entre la calle 56 B y 54 B, donde el fondo del canal presenta pendientes de hasta 30%.

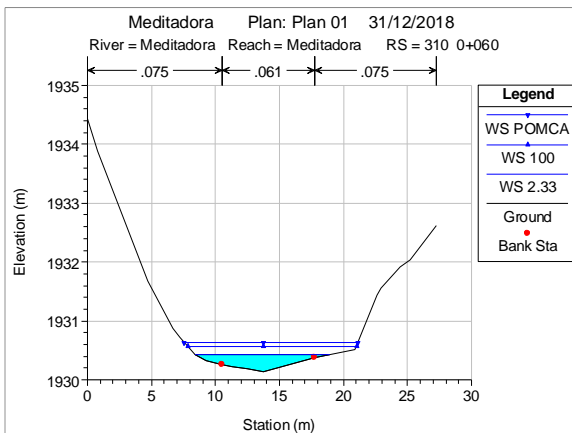
En la Figura 109, se presentan algunas secciones transversales ubicadas el tramo aguas arriba de análisis, zona previa a la calle 56 B, tramo en el cual la quebrada La Meditadora no cuenta con un canal definido por la presencia de una zona de juegos infantiles y un coliseo.



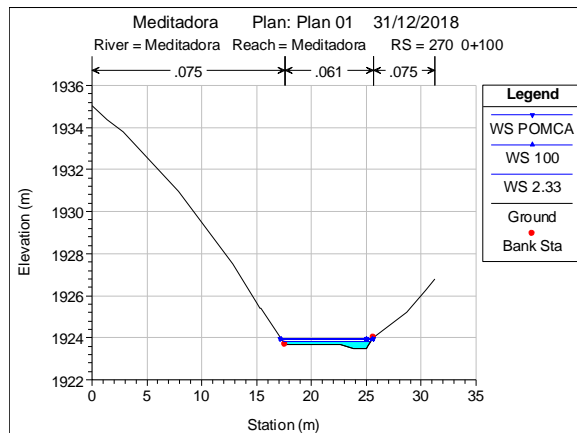
Sección 355 – 0+015



Sección 335 – 0+035



Sección 310 – 0+060



Sección 270 – 0+100

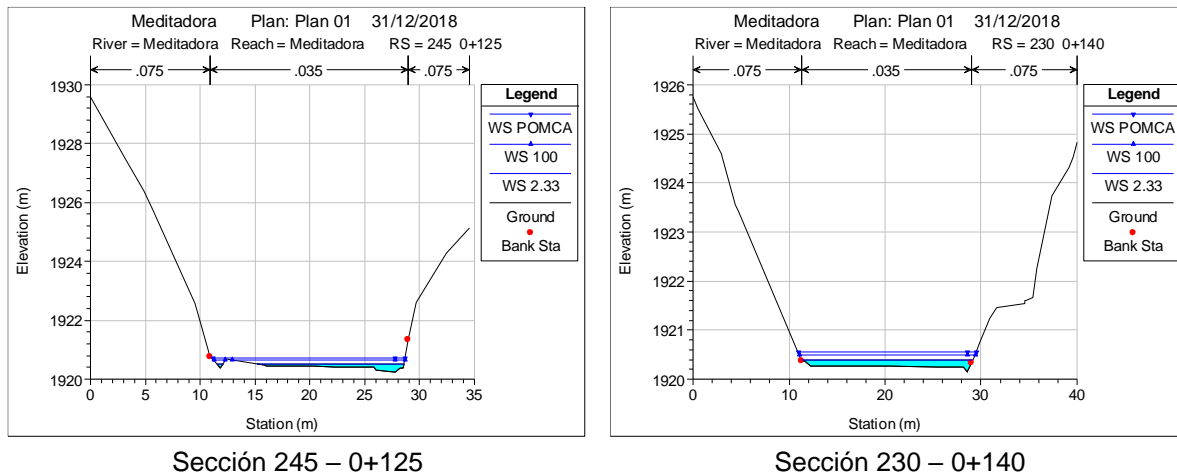


Figura 109. Secciones zona 0+000 a 0+150, escenario actual.

Según la información mostrada en la Figura 109, se puede observar que el nivel de creciente para la zona entre abscisa 0+000 y 0+150, alcanza un ancho superficial importante debido a la falta de una sección definida, situación que representa la inundación de toda la zona, especialmente donde se ubican unos juegos infantiles y el coliseo, ya que los mismos se encuentran sobre el centro de la vertiente de la quebrada La Meditadora.

En cuanto a la profundidad del agua, se obtienen valores máximos de 0,92 m, 1,24 m y 1,45 m para los caudales con periodos de retorno de 2.33 y 100 años, así como el caudal POMCA, con valores medios de 0,44 m, 0,66 m y 0,76 m, respectivamente. Teniendo en cuenta la construcción de viviendas y diferente infraestructura sobre la zona de tránsito del agua, se presentan varias afectaciones por el paso de las crecientes en la quebrada La Meditadora, situación que se agrava por la presencia de obras de paso insuficientes.

Para el tramo entre las calles 54 B y 56 B, se cuenta con una sección definida, la cual alcanza a confinar el flujo de creciente entre las laderas, con algunas zonas de desbordamiento para la margen derecha, en una zona cercana a la calle 56 B. Es de indicar que la zona donde se presenta el desbordamiento del flujo, inicia en la calle 56 B debido a la falta de obra de paso entre la zona superior y el tramo aguas abajo, por lo que el flujo transita desde el coliseo de forma difusa y parte del agua toma una vía peatonal paralela, así como el canal principal de la corriente, causando afectaciones por el desbordamiento del agua.

En la Figura 110, se presentan algunas secciones transversales para el tramo entre la calle 56 B y 54 B, zona donde la corriente presenta la conformación geomorfológica de un canal de alta pendiente.

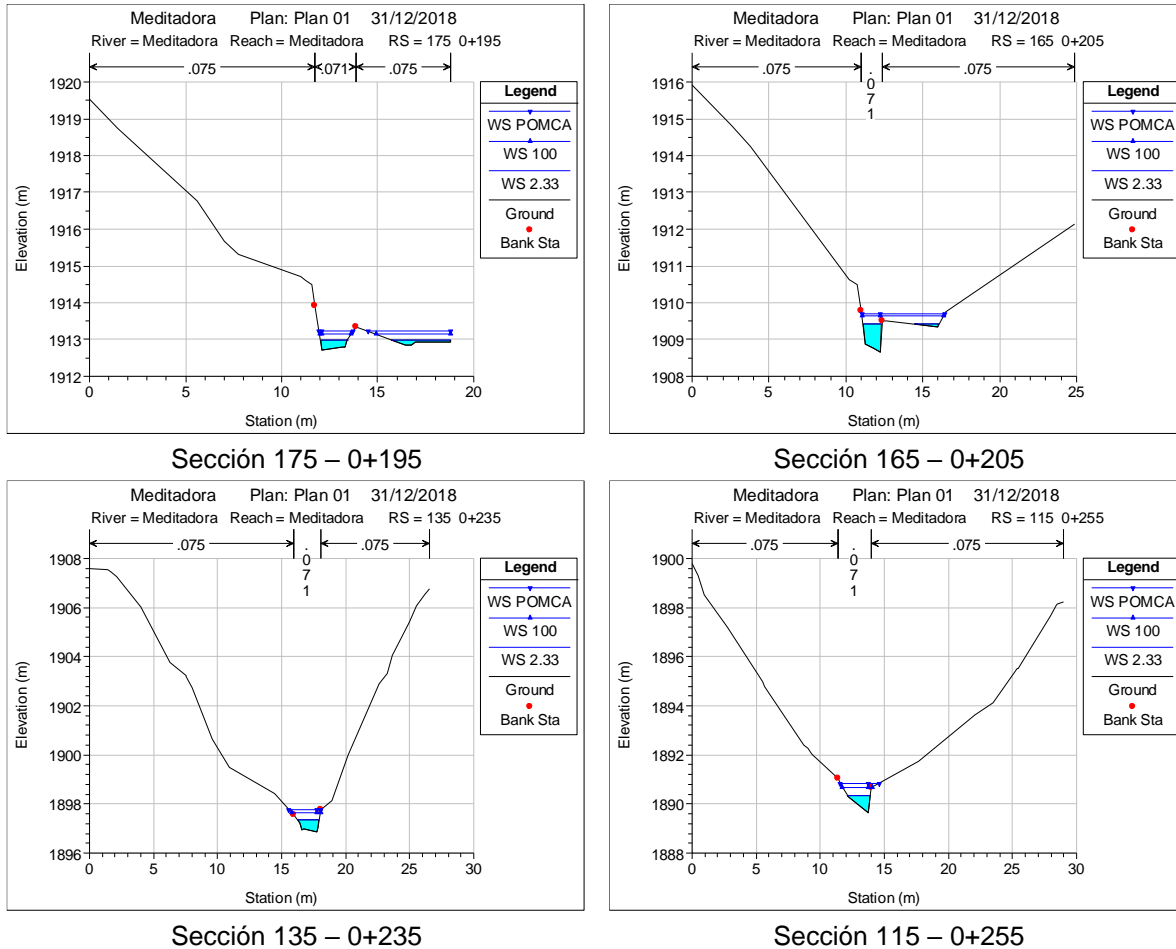
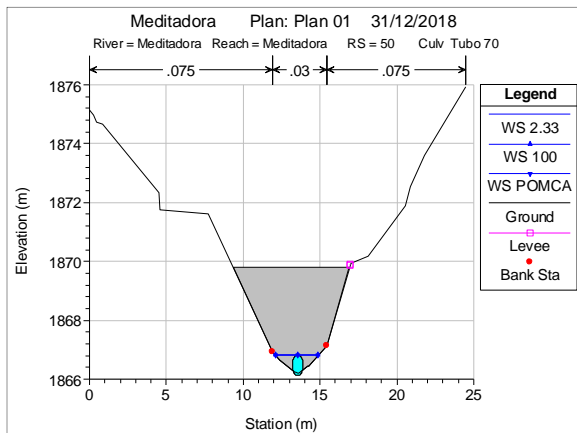
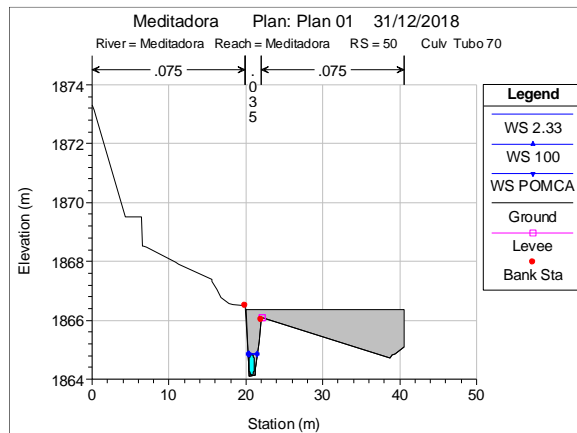


Figura 110. Secciones zona entre calle 56 B y 54 B.

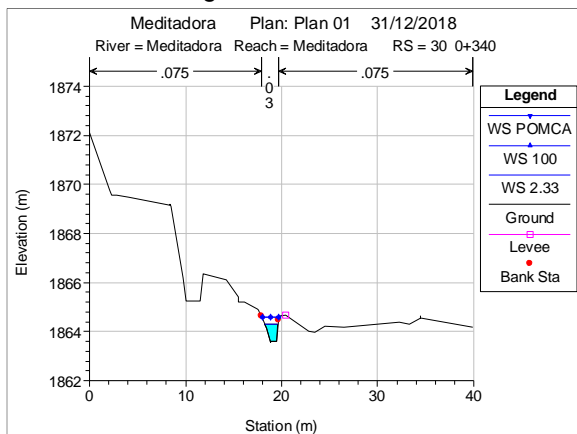
Posteriormente, el flujo de la quebrada La Meditadora, ingresa a través de una obra de paso bajo la calle 54 B. En la Figura 111, se presentan las secciones transversales para la obra de paso, influyendo el tramo aguas abajo de la misma.



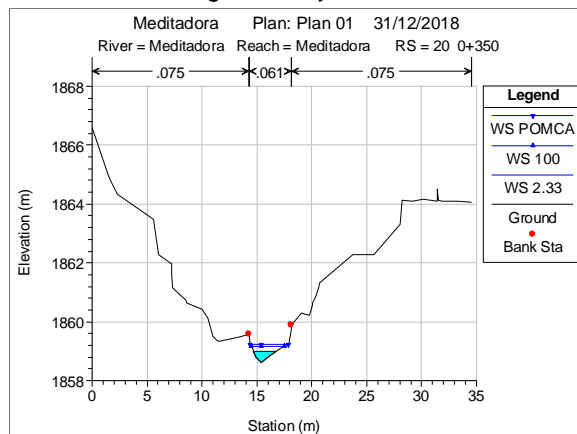
Sección 50 – Aguas Arriba – Cruce Calle 54 B



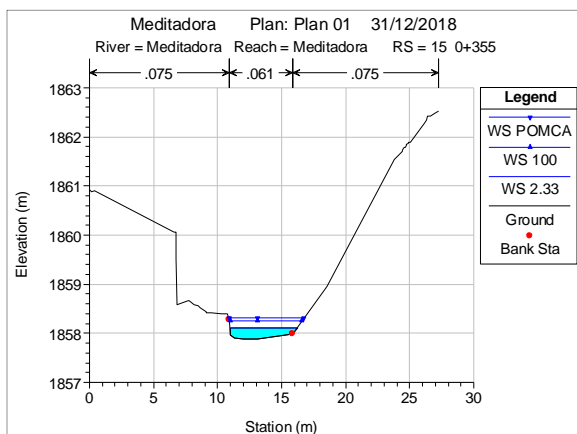
Sección 50 – Aguas Abajo – Cruce Calle 54 B



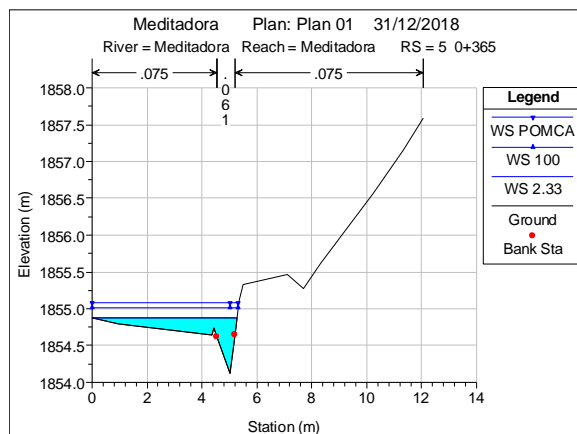
Sección 30 – 0+340



Sección 20 – 0+350



Sección 15 – 0+355



Sección 5 – 0+365

Figura 111. Secciones zona aguas abajo de la calle 54 B

En la Tabla 52, se presentan los resultados numéricos arrojados por el modelo hidráulico para el caudal POMCA, en la obra de cruce a través de la calle 54 B, correspondiente a una tubería en concreto de 0,70 m de diámetro.

Tabla 52. Resultados numéricos, obra de cruce calle 54 B, caudal POMCA.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Energía Arriba (m)	1869,77	Agua Inlet (m)	1866,82
Agua Arriba (m)	1866,9	Agua Outlet (m)	1864,84
Energía Abajo (m)	1872,93	H Normal (m)	0,7
Agua Abajo (m)	1864,84	V Arriba (m/s)	23,35
Delta Energía (m)	3,17	V Abajo (m/s)	23,35
Delta Agua (m)	2,06	Fondo Inlet (m)	1866,12
Culvert Control	Outlet	Fondo Outlet (m)	1864,14

Según la información mostrada en la Figura 111, la obra de cruce a través de la calle 54 B presenta insuficiencia hidráulica para el caudal de diseño, situación que puede conllevar a la presurización de la obra. Esta condición, ha sido evidenciada debido a las afectaciones en el piso de una vivienda ubicada sobre dicha obra. Adicionalmente, aguas abajo del cruce, se presenta el tránsito del flujo de forma errática, teniendo en cuenta la construcción de un canal en concreto y la descarga de este sobre un MH, descarga que se presenta por medio de la ruptura del cono de dicha cámara de inspección. Esto genera que, para caudales de creciente, el flujo continúe a través de la vertiente y no ingrese al MH, causando afectaciones sobre los pasos peatonales existentes y las viviendas ubicadas en zonas colindantes al canal natural de la quebrada.

En la Figura 112, se presenta el perfil del flujo para el tramo estudiado en la quebrada La Meditadora y en el escenario actual.

En el perfil del flujo, se puede observar un comportamiento estable y sin variaciones o controles hidráulicos que modifiquen las profundidades del agua. Para el caso aguas arriba de la calle 56 B, se aprecian bajas profundidades del agua, debido a la falta de un canal principal, situación que conlleva a los máximos anchos superficiales y por lo tanto, baja profundidad del flujo. En cuanto a la zona aferente a la calle 54 B, se observa la obra de cruce con insuficiencia hidráulica, donde la línea de creciente alcanza la cota superior de la obra.

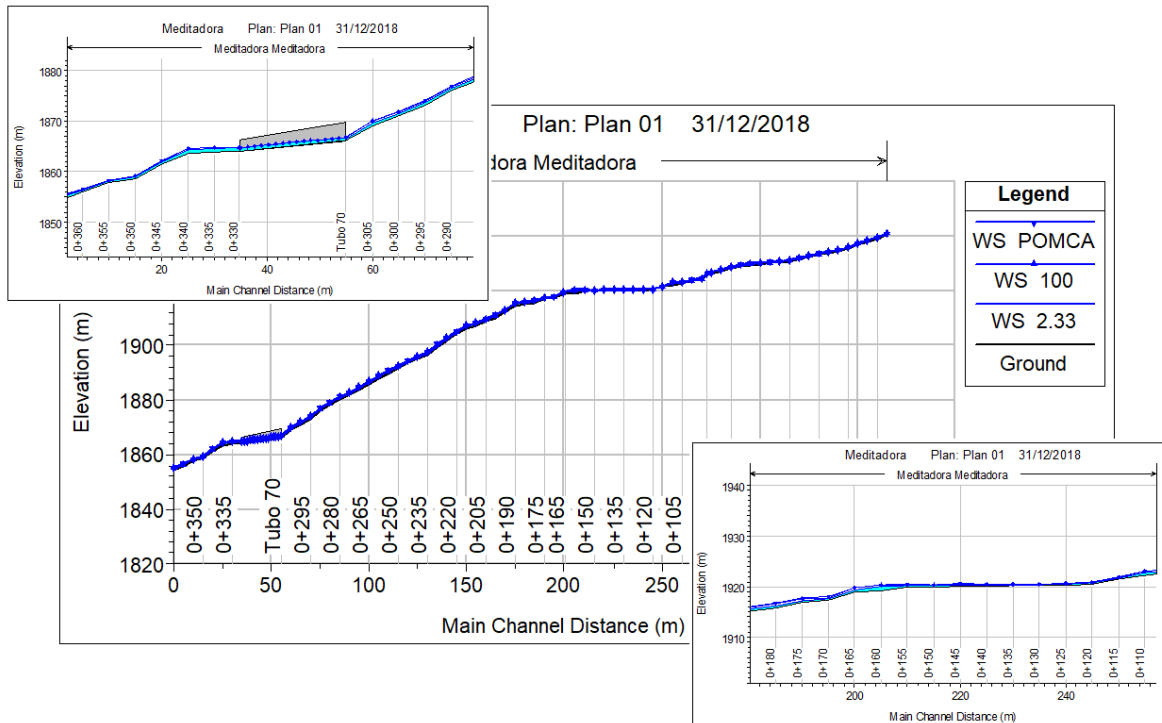


Figura 112. Perfil del flujo escenario actual.

En la Tabla 53, se presentan los resultados del modelo para el caudal POMCA en la quebrada La Meditadora y para el escenario en condiciones actuales.

Tabla 53. Resultados numéricos, caudal POMCA escenario actual.

Modelo	Abscisa	TR	Q	Cotas (m)		Sf	V	A	T	F	H
			(m3/s)	Fondo	Agua	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)		(m)
370	0+000	POMCA	8.99	1940.37	1941.06	0.1584	4.76	2.42	5.01	1.92	0.69
365	0+005	POMCA	8.99	1939.27	1939.76	0.3460	5.03	2.26	8.42	2.61	0.49
360	0+010	POMCA	8.99	1938.11	1938.51	0.2472	3.94	2.47	8.76	2.17	0.4
355	0+015	POMCA	8.99	1936.85	1937.34	0.2426	4.93	2.76	8.9	2.28	0.49
350	0+020	POMCA	8.99	1935.35	1936.1	0.1595	4.86	2.47	5.83	1.93	0.75
345	0+025	POMCA	8.99	1934.54	1935.18	0.2109	4.94	2.47	7.16	2.16	0.64
340	0+030	POMCA	8.99	1933.93	1934.54	0.1442	4.09	2.93	7.61	1.79	0.61
335	0+035	POMCA	8.99	1933.34	1933.74	0.1720	3.55	2.69	7.93	1.84	0.4
330	0+040	POMCA	8.99	1932.47	1932.94	0.1671	3.34	2.85	8.79	1.8	0.47
325	0+045	POMCA	8.99	1931.72	1932.19	0.1600	3.06	3.1	10.43	1.73	0.46
320	0+050	POMCA	8.99	1931.03	1931.41	0.1568	2.91	3.19	11.41	1.69	0.38
315	0+055	POMCA	8.99	1930.55	1931.02	0.0731	2.21	4.16	12.62	1.19	0.47
310	0+060	POMCA	8.99	1930.14	1930.63	0.0744	2.45	4.31	13.57	1.23	0.49
305	0+065	POMCA	8.99	1929.75	1930.46	0.0377	2.42	5.16	13.39	0.95	0.71
300	0+070	POMCA	8.99	1929.35	1930.11	0.0566	2.67	3.91	9.78	1.13	0.76

Modelo	Abscisa	TR	Q	Cotas (m)		Sf	V	A	T	F	H
			(m ³ /s)	Fondo	Agua	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		(m)
295	0+075	POMCA	8.99	1928.84	1929.66	0.0752	3.53	3.57	8.27	1.34	0.82
290	0+080	POMCA	8.99	1928.07	1928.74	0.1592	4.33	2.55	6.76	1.87	0.67
285	0+085	POMCA	8.99	1927.2	1927.85	0.1774	4.6	2.49	6.8	1.98	0.65
280	0+090	POMCA	8.99	1926.27	1926.8	0.2337	4.41	2.31	7.17	2.18	0.53
278	0+092	POMCA	8.99	1925.88	1926.41	0.2177	4.09	2.43	7.68	2.08	0.53
275	0+095	POMCA	8.99	1924.06	1924.52	0.6132	5.66	1.63	5.78	3.32	0.46
270	0+100	POMCA	8.99	1923.47	1923.99	0.1456	3.1	2.94	8.48	1.66	0.52
265	0+105	POMCA	8.99	1922.9	1923.41	0.1159	2.75	3.27	9.19	1.47	0.51
260	0+110	POMCA	8.99	1922.27	1923.14	0.0537	2.12	4.24	9.89	1.03	0.87
255	0+115	POMCA	8.99	1921.47	1921.93	0.4077	4.02	2.29	9.88	2.62	0.46
250	0+120	POMCA	8.99	1920.53	1920.87	0.1931	2.73	3.29	13.88	1.79	0.34
245	0+125	POMCA	8.99	1920.23	1920.71	0.0277	1.93	4.65	17.54	1.2	0.48
240	0+130	POMCA	8.99	1920.21	1920.53	0.0357	2.05	4.38	18.64	1.35	0.31
235	0+135	POMCA	8.99	1920.25	1920.57	0.0186	1.74	5.21	17.61	1.01	0.32
230	0+140	POMCA	8.99	1920.14	1920.56	0.0184	1.72	5.31	18.5	1.01	0.42
225	0+145	POMCA	8.99	1920.04	1920.58	0.0185	1.69	5.33	18.97	1	0.54
220	0+150	POMCA	8.99	1919.94	1920.36	0.0361	2.14	4.37	19.27	1.37	0.42
215	0+155	POMCA	8.99	1920	1920.44	0.0167	1.79	6.45	25.24	0.98	0.44
210	0+160	POMCA	8.99	1919.21	1920.42	0.0147	2.52	8.43	23.49	0.81	1.2
205	0+165	POMCA	8.99	1918.99	1919.85	0.0541	3.8	3.78	10.69	1.66	0.86
200	0+170	POMCA	8.99	1917.37	1918.01	0.0875	6.15	1.54	2.58	2.47	0.64
195	0+175	POMCA	8.99	1916.91	1917.82	0.0510	5.98	2.03	4.45	2	0.91
190	0+180	POMCA	8.99	1915.78	1916.78	0.0663	7.26	1.88	4.95	2.34	1
185	0+185	POMCA	8.99	1915.16	1916.06	0.1154	7.56	1.51	2.61	2.79	0.9
180	0+190	POMCA	8.99	1914.49	1915.6	0.4371	7.47	1.87	4.62	2.36	1.11
175	0+195	POMCA	8.99	1912.72	1913.23	0.8484	5.63	1.77	6.07	2.93	0.51
170	0+200	POMCA	8.99	1910.09	1911.32	0.2569	4.94	2.06	4.1	1.63	1.23
165	0+205	POMCA	8.99	1908.66	1909.71	0.4404	5.03	2.11	5.42	1.8	1.04
160	0+210	POMCA	8.99	1907.44	1908.62	0.1726	4.02	2.84	8.44	1.41	1.18
155	0+215	POMCA	8.99	1906.59	1907.61	0.2865	4.21	2.53	6.57	1.58	1.02
150	0+220	POMCA	8.99	1904.18	1905.12	0.4246	5.57	1.79	4.43	2.28	0.94
145	0+225	POMCA	8.99	1901.75	1902.84	0.4285	5.66	1.59	1.87	1.96	1.09
140	0+230	POMCA	8.99	1899.29	1900.49	0.4715	5.83	1.56	1.93	1.94	1.2
135	0+235	POMCA	8.99	1896.86	1897.78	0.5260	6.18	1.48	2.53	2.4	0.92
130	0+240	POMCA	8.99	1895.18	1896.21	0.3092	5.52	1.84	3.64	2	1.03
125	0+245	POMCA	8.99	1893.38	1894.4	0.3810	5.72	1.76	3.7	2.19	1.02
120	0+250	POMCA	8.99	1891.39	1892.69	0.3716	5.51	1.88	3.83	1.94	1.3
115	0+255	POMCA	8.99	1889.63	1890.84	0.3620	5.18	1.77	3.02	1.96	1.21
110	0+260	POMCA	8.99	1888.06	1889.23	0.3125	5.1	1.89	3.52	1.78	1.17
105	0+265	POMCA	8.99	1885.97	1886.8	0.6809	5.92	1.82	6.33	2.75	0.83
100	0+270	POMCA	8.99	1883.93	1884.86	0.3045	5.14	1.97	4.15	1.97	0.93
95	0+275	POMCA	8.99	1881.91	1882.98	0.2907	5.72	1.75	2.95	2.09	1.07
90	0+280	POMCA	8.99	1880.08	1881.53	0.3451	5.19	1.78	2.15	1.54	1.45
85	0+285	POMCA	8.99	1878.09	1879.17	0.4268	5.92	1.56	2.11	2.07	1.08
80	0+290	POMCA	8.99	1876.07	1876.97	0.3841	6.44	1.58	2.97	2.31	0.9
75	0+295	POMCA	8.99	1873.15	1874.15	0.6551	6.62	1.36	2.21	2.65	1

Modelo	Abscisa	TR	Q	Cotas (m)		Sf	V	A	T	F	H
			(m ³ /s)	Fondo	Agua	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		(m)
70	0+300	POMCA	8.99	1871.14	1872.01	0.4120	5.66	1.6	2.67	2.21	0.87
65	0+305	POMCA	8.99	1869.14	1870.15	0.4379	5.39	1.94	4.41	1.84	1.01
60	0+310	POMCA	8.99	1866.2	1866.9	0.2015	7.51	1.2	3.05	3.82	0.7
50			Culvert								
40	0+330	POMCA	8.99	1864.11	1864.84	0.9320	12.6	0.71	1.24	5.31	0.73
35	0+335	POMCA	8.99	1863.86	1864.76	0.3508	9.65	1.04	2.7	3.82	0.9
30	0+340	POMCA	8.99	1863.58	1864.6	0.1835	7.79	1.16	1.73	3	1.02
25	0+345	POMCA	8.99	1861.54	1862.16	0.3938	9	1	3.17	5.12	0.62
20	0+350	POMCA	8.99	1858.6	1859.24	1.3747	8.32	1.08	3.46	4.75	0.64
15	0+355	POMCA	8.99	1857.88	1858.31	0.2848	4.53	2.07	5.86	2.31	0.43
10	0+360	POMCA	8.99	1856.01	1856.62	0.2633	5.8	2.06	5.34	2.44	0.61
5	0+365	POMCA	8.99	1854.13	1855.08	0.4346	5.54	2.04	5.33	2.11	0.95

Mediante la implementación de la herramienta RasMapper disponible en el software HEC RAS, se realizó la generación de los campos de profundidad para el caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en 40%. Esta información es presentada en la Figura 113, la cual se elaboró a partir de la superficie obtenida del levantamiento topográfico y que cuenta con un área suficiente para abarcar toda la extensión de la mancha de inundación.

La mancha de inundación permite evidenciar las afectaciones por desbordamiento del agua en la zona aguas arriba de la calle 56 B, ocupando el área colindante a los juegos infantiles y coliseo, debido a que los mismos se encuentran en la zona central de la vertiente de la quebrada La Meditadora.

Para el tramo final de estudio, aguas abajo de la calle 54 B, se presentan también afectaciones debido a que varias viviendas han sido construidas colindantes al cauce principal de la corriente, situación que se agrava debido al inadecuado manejo de la corriente a través de obras de alcantarillado y canales.

Estos resultados, permiten inferir la necesidad de implementar obras de conducción y cruce a través de las zonas colindantes a las calles 56 B y 54 B, con el fin de captar, conducir y descargar adecuadamente el flujo de creciente en la quebrada La Meditadora, minimizando las afectaciones por el desbordamiento del agua.

En el anexo 6 se presentan la tabla de resultados completa con la modelación hidráulica en condiciones actuales para cada una de las secciones transversales en el tramo de análisis y cada uno de los periodos de retorno analizados.

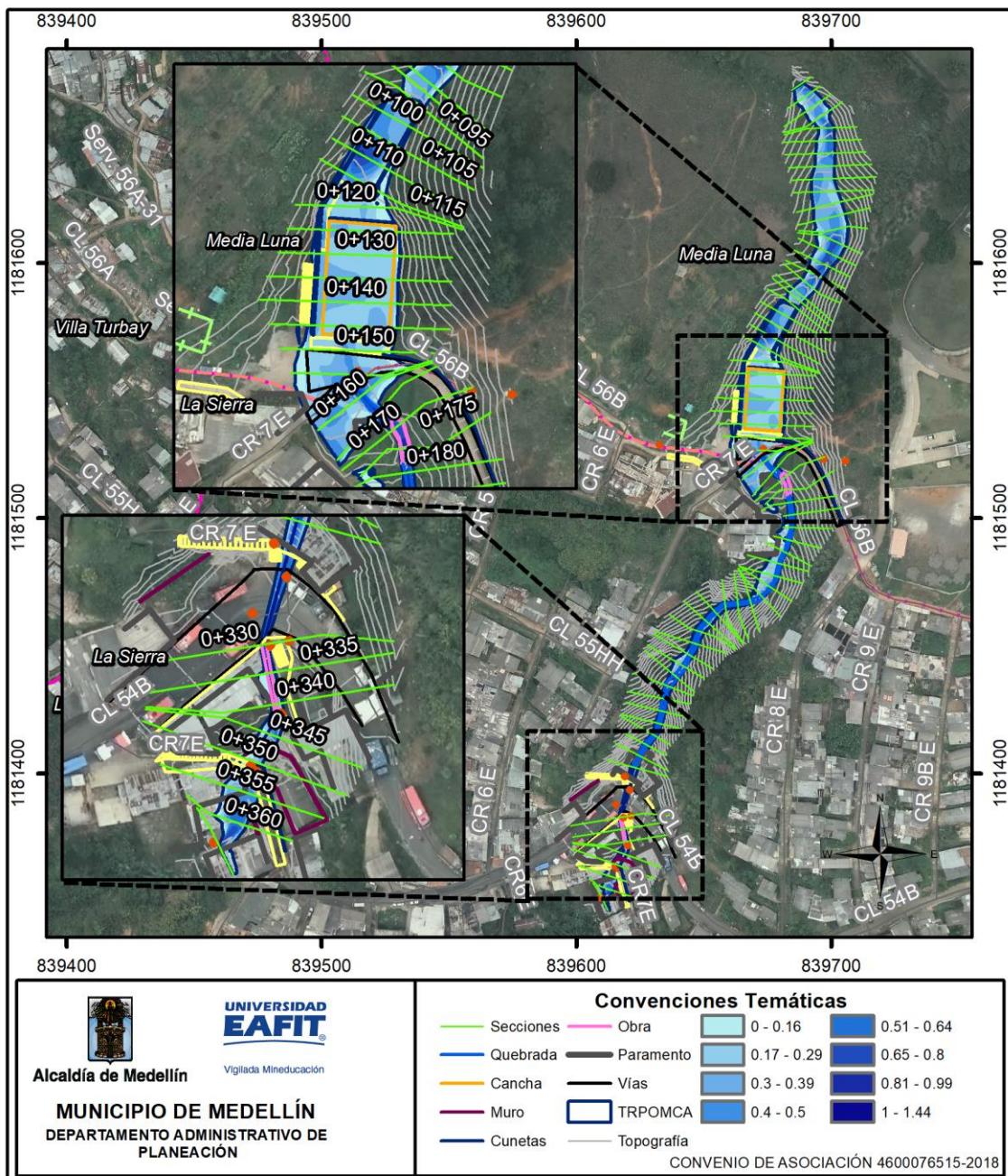


Figura 113. Campo de profundidad escenario actual.

En el Anexo 6, se presentan las secciones transversales evaluadas con su respectiva lámina de agua en condiciones actuales. En el Anexo 6, se presenta de forma digital los archivos que hacen parte del modelo hidráulico en condiciones actuales realizado en el software HEC-RAS.

9.4 CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN

La socavación es un fenómeno natural, asociado principalmente a corrientes aluviales. El término socavación del lecho significa la disminución en el nivel del lecho, por debajo del nivel natural o de un nivel de referencia asumido y se refiere a la profundidad del lecho donde se ha removido material por debajo del nivel establecido (Posada, 1994).

La socavación comprende el levantamiento y transporte de los materiales del lecho del río en el momento de una avenida o creciente, o por la construcción de una obra dentro del cauce. Debe diferenciarse la socavación de la erosión no recuperable en el sentido de que después de que pase la avenida o se elimine la causa de la socavación en procesos posteriores, comúnmente se vuelven a depositar sedimentos en un proceso cíclico, y se puede recuperar el nivel del fondo del cauce. La socavación está controlada por las características hidráulicas del cauce, las propiedades de los sedimentos del fondo y la forma y localización de los elementos que la inducen.

En este estudio se ha empleado el método propuesto por Campo Ordoñez, para determinar la profundidad de socavación general, y que ha sido ampliamente utilizado y validado. Este análisis se realiza con el fin de validar la profundidad de las llaves propuestas.

9.4.1 Socavación general método campo – Ordoñez

La socavación general se puede producir por varias causas:

- a. Aumento del caudal durante las avenidas,
- b. Incremento de la pendiente del cauce por alteración del canal, o corte de meandros,
- c. Remoción de sedimentos del flujo por la construcción de una presa o por extracción de materiales del fondo del cauce,
- d. Transferencia de agua de una cuenca a otra, la cual altera la capacidad de transporte de sedimentos de ambas corrientes,
- e. Disminución de la rugosidad del cauce por obras de regulación del canal,

Para conocer los factores que inducen la profundización de la sección transversal al influjo de un caudal dado, los investigadores Germán Del Campo, Jaime A, Vargas y María del Rosario Gutiérrez, bajo la dirección de J,I, Ordóñez, investigaron

más de 3,000 aforos líquidos y sólidos en estaciones de primer orden de cuencas hidrográficas en Colombia.

Un aforo líquido en una estación hidrométrica de primer orden consiste de un grupo de 15 a 20 valores de profundidad (p_i) y caudal (q_i), y el registro completo de aforos en cada estación genera un conjunto más amplio de parejas p_i , q_i , que se puede interpretar independientemente de los valores absolutos de Q y P .

El caudal por unidad de ancho en un sector cualquiera de una sección se expresa por:

$$q_i = Q_i / B_i$$

Donde, Q_i es el caudal y B_i es el ancho del sector. Después de analizar estadísticamente los aforos, los investigadores encuentran una relación relativamente buena entre F_{\max} y el valor promedio del número de Froude para toda la sección F_{prom} , así:

$$F_{\max} = 0,85 * F_{\text{prom}} + 0,01, \text{ para } (0,10 < F < 0,4)$$

$$F_{\max} = 0,71 * F_{\text{prom}} + 0,1, \text{ para } (F > 0,4)$$

Igualmente obtuvieron una relación aceptable para q_{\max} en función de $q_{\text{prom}} = Q/T$ así:

$$q_{\max} = 1,551 * (Q/T)^{0,984}, \text{ para } (F < 0,4)$$

$$q_{\max} = 1,271 * (Q/T)^{1,271}, \text{ para } (F > 0,4)$$

Mientras que la mejor correlación obtenida para P_{\max} es:

$$P_{\max} = 0,4671 * q_{\max}^{0,667} * F_{\max}^{-0,667}, \text{ para } (F > 0,4)$$

9.4.2 Resultados

Una vez indicada la metodología a utilizar para determinar la socavación general se partió de los resultados hidráulicos obtenidos anteriormente. En la Tabla 54, se presenta los resultados de las principales variables para la aplicación del método de Campo y Ordoñez en la corriente.

Tabla 54. Socavación general para las quebradas de estudio.

Modelo	Abscisa	q	F max	q max	Pmax (m)	ds (m)
		(m ² /s)				
370	0+000	1,79	1,46	2,67	0,78	0,30
365	0+005	1,07	1,95	1,38	0,42	0,15
360	0+010	1,03	1,64	1,31	0,45	0,16
355	0+015	1,01	1,72	1,29	0,43	0,12
350	0+020	1,54	1,47	2,20	0,68	0,25
345	0+025	1,26	1,63	1,70	0,53	0,19
340	0+030	1,18	1,37	1,57	0,55	0,17
335	0+035	1,13	1,41	1,49	0,53	0,19
330	0+040	1,02	1,38	1,31	0,49	0,16
325	0+045	0,86	1,33	1,05	0,42	0,13
320	0+050	0,79	1,30	0,94	0,40	0,12
315	0+055	0,71	0,94	0,83	0,43	0,10
310	0+060	0,66	0,97	0,75	0,39	0,07
305	0+065	0,67	0,77	0,77	0,45	0,06
300	0+070	0,92	0,90	1,14	0,55	0,15
295	0+075	1,09	1,05	1,41	0,59	0,16
290	0+080	1,33	1,43	1,83	0,60	0,23
285	0+085	2,90	1,81	4,92	1,07	0,55
284,9*		2,93	2,31	4,98	0,96	0,51
283,*		5,99	0,97	12,38	2,84	1,49
282,9*		5,99	1,42	12,38	2,33	1,31
281,*		5,99	1,42	12,38	2,33	1,31
280,9*		6,12	1,97	12,70	2,01	1,19
280	0+090	5,99	1,99	12,38	1,96	1,16
279,047*		5,99	1,96	12,38	1,98	1,17
278,952*		5,99	2,45	12,38	1,77	1,07
278	0+092	5,99	2,41	12,38	1,78	1,08
277,1*		5,99	2,38	12,38	1,79	1,09
277,*		5,99	2,60	12,38	1,71	1,05
275	0+095	5,99	2,51	12,38	1,74	1,06
274,9*		5,99	2,73	12,38	1,67	1,03
270	0+100	5,99	2,51	12,38	1,75	1,07
269,9*		5,99	2,72	12,38	1,67	1,03
265	0+105	5,99	2,50	12,38	1,75	1,06
264,9*		5,99	2,71	12,38	1,68	1,03
260	0+110	5,99	2,49	12,38	1,75	1,06
259,9*		5,99	2,93	12,38	1,61	1,00
255	0+115	5,99	2,66	12,38	1,69	1,04
254,9*		5,99	2,88	12,38	1,63	1,01
250	0+120	5,99	2,62	12,38	1,71	1,05
249,9*		5,99	2,83	12,38	1,64	1,01
245	0+125	5,99	2,59	12,38	1,72	1,05

Modelo	Abscisa	q (m ² /s)	F max	q max	Pmax (m)	ds (m)
240	0+130	5,99	2,38	12,38	1,79	1,09
235	0+135	5,99	2,21	12,38	1,86	1,12
230	0+140	5,99	2,06	12,38	1,93	1,14
225	0+145	5,99	1,94	12,38	1,99	1,17
224,9*		5,99	2,53	12,38	1,74	1,06
220	0+150	5,99	2,33	12,38	1,81	1,09
215						
210	0+160	5,99	1,82	12,38	2,06	1,20
205	0+165	5,99	1,73	12,38	2,11	1,22
200	0+170	5,99	1,67	12,38	2,15	1,24
195	0+175	5,99	1,61	12,38	2,19	1,25
194,9*		5,99	2,00	12,38	1,96	1,16
190	0+180	5,99	1,90	12,38	2,01	1,19
185	0+185	2,57	3,06	4,22	0,74	0,40
180	0+190	1,88	0,75	2,84	1,15	0,72
175	0+195	1,29	0,80	1,76	0,79	0,24
170	0+200	3,32	1,58	5,84	1,30	0,70
165	0+205	1,64	1,29	2,39	0,77	0,36
160	0+210	1,07	1,12	1,38	0,56	0,23
155	0+215	1,37	1,21	1,89	0,67	0,29
150	0+220	2,03	1,72	3,12	0,80	0,40
145	0+225	4,81	1,49	9,35	1,87	1,02
140	0+230	4,66	1,48	8,98	1,82	1,02
135	0+235	3,55	1,80	6,37	1,29	0,71
130	0+240	2,47	1,52	4,01	1,02	0,51
125	0+245	2,43	1,65	3,93	0,96	0,48
120	0+250	2,35	1,48	3,76	0,99	0,50
115	0+255	2,98	1,49	5,08	1,22	0,63
110	0+260	2,55	1,36	4,19	1,11	0,57
105	0+265	1,42	2,05	1,99	0,53	0,24
100	0+270	2,17	1,50	3,39	0,91	0,44
95	0+275	3,05	1,58	5,24	1,20	0,61
90	0+280	4,18	1,19	7,83	1,85	1,02
85	0+285	4,26	1,57	8,02	1,63	0,89
80	0+290	3,03	1,74	5,19	1,14	0,61
75	0+295	4,07	1,98	7,56	1,39	0,77
70	0+300	3,37	1,67	5,95	1,28	0,68
65	0+305	2,04	1,41	3,14	0,89	0,45
64,*		3,21	2,18	5,60	1,07	0,57
63,9*		3,28	3,20	5,75	0,90	0,51
63,*		3,86	2,85	7,07	1,10	0,64
62,9*		4,16	3,50	7,79	1,06	0,63
62,*		4,97	3,11	9,75	1,32	0,80
61,9*		5,38	3,47	10,80	1,34	0,83

Modelo	Abscisa	q	F max	q max	Pmax (m)	ds (m)
		(m ² /s)				
60,5*		5,38	3,41	10,80	1,35	0,84
60	0+310	5,17	3,45	10,25	1,30	0,80
58						
38,9583		4,97	1,97	9,75	1,67	0,96

Según los resultados obtenidos para el cálculo de la socavación general, se determina un valor máximo en las zonas de encole y descole de las obras de 1,49 m como valor máximo, lo que indica que las llaves anti socavación y la estructura viga de piso, contarán con profundidad que permiten cumplir con dicho parámetro, evitando que las obras se vean afectadas por el descenso natural y local del fondo de la quebrada La Meditadora.

10. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

10.1 MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

Considerando las características geológicas de una región, el primer elemento a analizar, en la búsqueda de potenciales unidades almacenadoras de agua subterránea, son las condiciones texturales y estructurales de las unidades litológicas de la zona de estudio. Se plantean aquí unas premisas en términos de la expectativa que, a nivel descriptivo, generarían las condiciones de porosidad y permeabilidad primaria (textura) o secundaria (estructuras y meteorización) (AMVA, 2013)

De lo expuesto en el capítulo correspondiente a Geología se retoma aquí las condiciones que, además de la composición y origen, determinan características texturales de los materiales de la corteza terrestre, dentro del dominio espacial del Valle de Aburrá; aquí radica el sentido de incluir dentro de la descripción geológica un minucioso nivel de detalle en términos de mineralogía, afectación estructural y meteorización de saprolitos. De acuerdo con esto, en la Tabla 55 se sintetiza una interpretación que da lugar a una primera aproximación acerca de las potenciales bondades hidrogeológicas de las unidades litológicas descritas; dentro de las rocas ígneas se considera que las características adquiridas a través de procesos de fracturamiento y meteorización en la Dunita de Medellín, Stock de Las Estancias y Stock de Media Luna, hacen de estas unidades objeto de un análisis más detallado para evaluar la probabilidad de constituir posibles acuíferos o zonas de recarga. Respecto a los depósitos del Cuaternario, todos son considerados en principio como posibles reservorios de agua subterránea (AMVA, 2013).

Tabla 55. Unidades hidrogeológicas del centro y sur del Valle de Aburrá (Modificado de AMVA, 2013)

TIPO DE ROCA	UNIDAD GEOLÓGICA	ASIGNATURA	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	DIAGNOSTICO HIDROGEOLÓGICO
ÍGNEAS	Stock de Media Luna	KcdML	Roca compacta, Saprolito varía de limo arcilloso a limo arenoso	Se encuentra diaclasado	Probable potencial hidrogeológico
	Stock de Las Estancias	KcdE	Roca compacta, Saprolito varía de limo arcilloso a limo arenoso	Se encuentra diaclasado	Probable potencial hidrogeológico

TIPO DE ROCA	UNIDAD GEOLÓGICA	ASIGNATURA	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	DIAGNOSTICO HIDROGEOLÓGICO
	Dunitas de Medellín	(JKuM)	Roca compacta, Saprolito limo arcilloso	Diaclasada y karstificada	Buen potencial hidrogeológico
DEPÓSITOS	Depósitos Aluviales	(Qal)	Matriz areno limosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos Aluviotorrenciales	(Qat)	Matriz areno gravosa	No reportadas	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	(QFa)	Bloques en matriz que varía de arena fina a arcillosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(QFIII)			
		(QFIV)			
		(NQFII)			
		(NFI)			

Según el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2013, en el Valle de Aburrá existen tres unidades hidrogeológicas de interés acuífero (Figura 114), y se designan como:

- Acuífero Libre del Valle de Aburrá:** Conformado por los depósitos aluviales del río Aburrá - Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades del Neógeno o el Cuaternario. Texturalmente estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y cantos en matriz areno-arcillosa gradando a arcillosa hacia la base, con presencia de lentes de grava y arcilla.
- Acuífero semiconfinado del Valle de Aburrá:** Conformado por depósitos de origen aluvial, separados del acuífero libre por una capa sellante de carácter arcilloso. El acuífero semiconfinado estaría localizado en la parte central y sur del valle, está conformado por gravas, arenas y cantos en matriz arcillo-arenosa con pequeños lentes de arena o arcilla; aún no se tiene suficiente información para modelar con certeza la geometría de esta unidad.
- Acuífero de la Dunita de Medellín.** El grado de fracturamiento de esta unidad de roca, sumado a la aparente condición de pseudokarst que se registra en algunos sectores (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia, 2012) y algunos datos de caudal reportados en afloramientos y obras de control geotécnico, indican que en la Dunita de Medellín se podría estar almacenando un importante volumen de agua subterránea, que podría llegar a ser utilizable con fines de abastecimiento en algunos sectores del área urbana o rural de los municipios de Bello,

Medellín o Envigado. Las bondades de la Dunita de Medellín, como formación acuífera, no han sido exploradas.

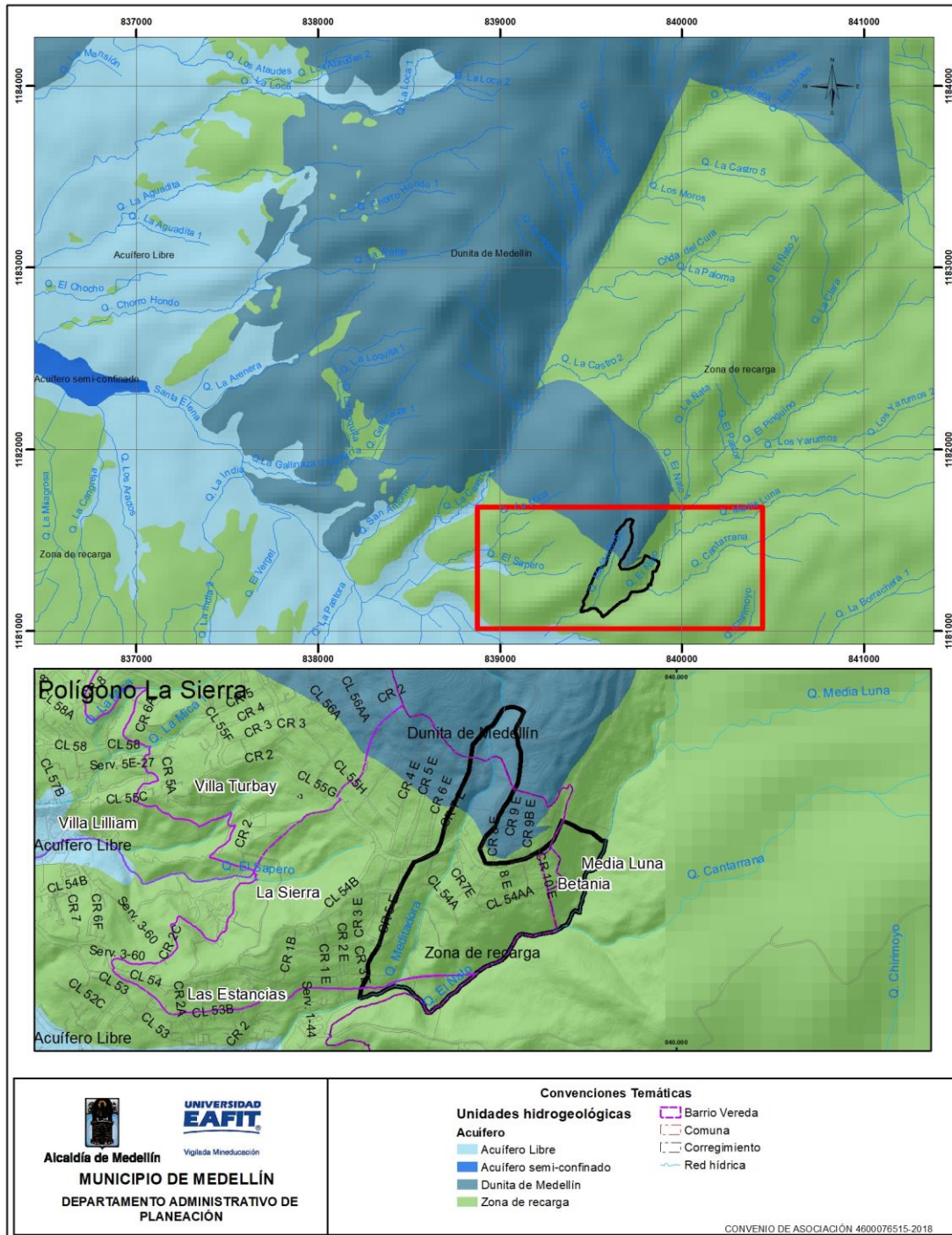


Figura 114. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.

Los factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero son la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, las características geomorfológicas que posee el paisaje, los rasgos estructurales de las rocas que rodean a los acuíferos, el tipo de cobertura, la hidrografía, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas (AMVA, 2013).

De acuerdo con la conceptualización general al respecto, algunos factores antrópicos pueden constituir también fuentes de recarga, estos son: los retornos por riego, las fugas en redes de acueducto y alcantarillado, y la recarga artificial (AMVA, 2013).

Para la determinación de las potenciales áreas de recarga en el valle de Aburrá se tiene como hipótesis la existencia de tres posibles fuentes de recarga: I) una recarga distribuida en las superficies libres donde afloran las unidades acuíferas, II) la interacción hidráulica que existe con los principales cuerpos de agua superficial, como lo son el río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, y III) la recarga proveniente de los aportes de flujos regionales, a partir de las rocas encajantes que presentan permeabilidad secundaria (AMVA, 2013).

La dirección del flujo subterráneo proviene desde las zonas de recarga hacia el río, siguiendo en términos generales el sentido de la pendiente; es evidente el papel del río Aburrá-Medellín como frontera hidráulica que capta el flujo base. Llama la atención el sector ubicado en inmediaciones de La Aguacatala hasta el Cerro Nutibara, el cual coincide con un tramo en el que el río cambia su curso y describe una curva cóncava hacia el oeste, allí las líneas de flujo subterráneo que tienen su origen en la vertiente oriental del valle, trascienden el cauce superficial para luego confluir con las líneas de flujo que provienen del occidente, en un sector alineado subparalelamente al río. Esta situación podría ser un indicio de la existencia de paleocauces o de intervenciones antrópicas (AMVA 2013).

10.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS LOCALES

Para el complemento y ajuste de la caracterización de los terrenos que conforman el polígono de La Sierra, se utilizaron las técnicas de exploración indirecta para el entendimiento de las características del subsuelo, implementando las líneas de geoelectrónica (Tomografías Eléctricas Resistivas) que mediante la medición de las resistividades se pueden obtener los parámetros estratigráficos, hidrológicos y geológicos del sector.

La geofísica es una de las principales disciplinas que apoyan las actividades de exploración geológica, ella utiliza los métodos de la física para poder estudiar las propiedades de los materiales que conforman el subsuelo.

Mediante la adquisición de datos de resistividades aparentes de las capas del subsuelo es posible hacer un perfil geoelectrico donde se observen las variaciones laterales de resistividad y, así, inferir información relevante de las propiedades del medio tales como: porosidad, discontinuidades, saturación, profundidad del basamento, condiciones del suelo, entre otras de las unidades geológicas de estudio (Kearey et al, 2002).

La prueba utilizada en el presente estudio se conoce como Tomografía Eléctrica Resistiva (TER), utiliza un tendido y equipo multielectrónico para el registro de resistividades aparentes de terreno con el fin de obtener una imagen de un perfil a través de una pseudosección en 2-D, ilustrando las variaciones en el subsuelo de las resistividades de los materiales, estos valores son obtenidos empleando las técnicas numéricas y algoritmos de inversión (elementos finitos, mínimos cuadrados y diferencias finitas) para realizar el cálculo de las resistividades reales de las propiedades del subsuelo permitiendo una interpretación de estas.

10.2.1 Exploración de campo

La línea sísmica TER_LS_01 se realizó en la parte norte del polígono sobre el costado oriental de la quebrada la meditadora, se encuentra cerca de la planta potabilizadora La Cascada operada por epm. La segunda línea sísmica TER_LS_02 se realizó en el costado occidental de la quebrada la meditadora, está ubicada al lado del colegio educativo La Sierra y la tercera línea TER_LS_03 se encuentra en la parte más Oriental del polígono, sobre el costado occidental de la quebrada Media Luna. Las coordenadas planas de la ubicación de los puntos iniciales y finales de cada una de las TER están consignadas en la Tabla 56:

Tabla 56. Configuración geométrica de la línea geoelectrica.

Línea	Inicio		Final		Espaciamiento (m)	Longitud (m)	Orientación de la línea (°)	No° de Electrodos
	E	N	E	N				
TER_LS_01	881392	1875405	881383	1875338	2.5	72.5	190	30
TER_LS_02	881323	1875367	881394	1875373	2.5	35	026	15
TER_LS_03	881516	1875204	881507	1875180	2,5	35	021	15

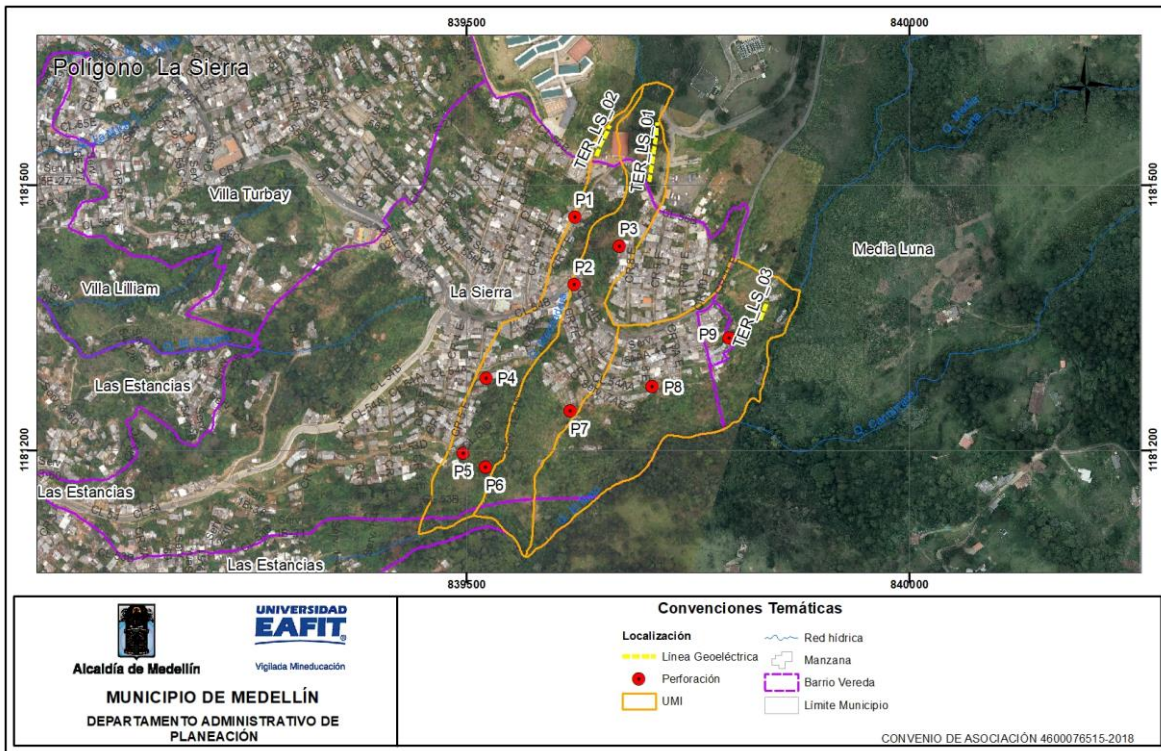


Figura 115. Localización Geográfica para las tomografías eléctricas para el polígono de La Sierra.

- *Resultados línea TER_LS_01*

Se elaboró en sentido general 190° con una longitud total de 72,5 metros y con elevaciones que oscilan entre los 1936 y los 1952 m.s.n.m (Figura 116; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El tope de penetración máxima de esta tomografía en profundidad es de 17 metros, con alturas de penetración que oscilan entre 1952 a 1930 m.s.n.m. Se utilizaron 30 electrodos espaciados 2.5 metros entre sí. El trazo de la línea permite tener información de la aparente zona del nivel freático y geología local.



Figura 116. Zona de ejecución línea TER_LS_01.

La distribución de resistividades y la litología se correlacionan de la siguiente manera (Figura 117 y Tabla 57):

La primera franja, más cercana hacia el NE de la tomografía, con resistividades entre 380 y 1460 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 0 y 17 m de profundidad, se interpreta como saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s) seco con matriz arenosa y presencia de fragmentos de roca fracturada y meteorizadas, seguido de esta unidad, con resistividades entre 64 y 200 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de profundidad entre 6.3 y 17 m aproximadamente se interpreta un saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s), saturado con agua subterránea con cambios de granulometría, fracturado, alterado y con matriz arcillosa, sectorizado en dos partes, en el centro y SW de la tomografía.

Tabla 57. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_01.

ESTRATIGRAFÍA					
Edad	Rango de Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Unidad Geológica para Ingeniería (UGI)
Jurásico	380 a 1460	17	0 a 17	Saprolito de la Dunita de Medellín seco, con matriz limosa, con fragmentos de roca de la Dunita, fracturada, meteorizados.	JKuM-s
	64 a 200	10.7	6.3 a 17	Saprolito de la Dunita de Medellín saturado con agua subterránea, con matriz arcillosa.	JKuM-s

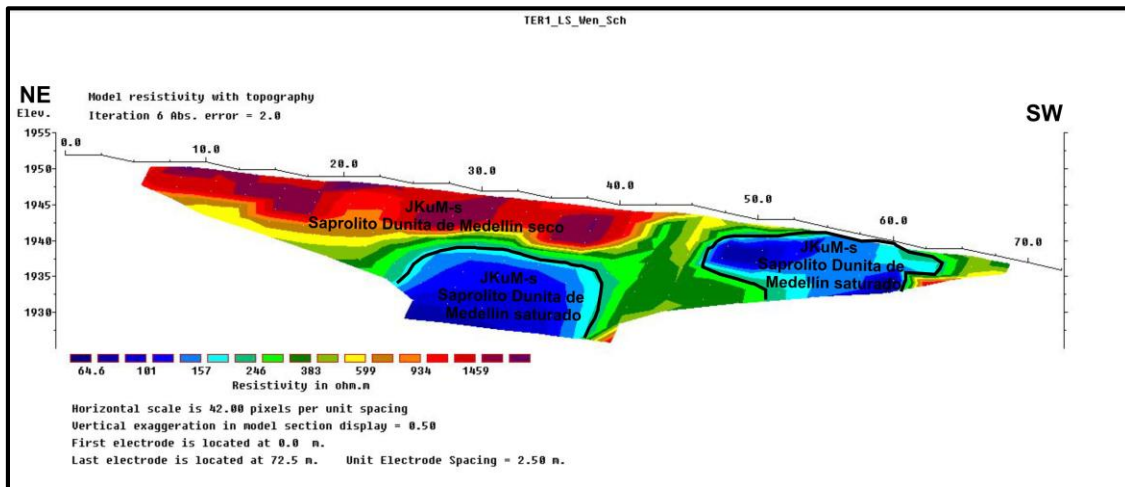


Figura 117. Interpretación de la tomografía TER_LS_01.

- *Resultados línea TER_LS_02*

Se elaboró en sentido general 026° con una longitud total de 35 metros y con elevaciones que oscilan entre los 1945 y los 1948 m.s.n.m (Figura 118). El tope de penetración máxima de esta tomografía en profundidad es de 6.2 metros, con alturas de penetración que oscilan entre 1948 a 1940 m.s.n.m. Se utilizaron 15

electrodos espaciados 2.5 metros entre sí. El trazo de la línea permite tener información de la aparente zona del nivel freático y geología local.



Figura 118. Zona de ejecución línea TER_LS_02.

La distribución de resistividades y la litología se correlacionan de la siguiente manera (Figura 119 y Tabla 58):

La primera franja, más cercana a la superficie, con resistividades entre 140 y 580 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 0 y 4.6 m de profundidad, se interpreta como saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s) seco con matriz limosa, seguido a esta unidad, con resistividades entre 20 y 100 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de profundidad entre 4.6 y 6.2 m aproximadamente, se interpreta como el nivel freático (1941-1943 m.s.n.m) y la zona saturada ubicada por debajo del mismo compuesto por el saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s), saturado con agua subterránea con matriz arcillosa.

Tabla 58. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_02.

ESTRATIGRAFÍA					
Edad	Rango de Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Unidad Geológica para Ingeniería (UGI)
Jurásico	140 a 580	4.6	0 a 4.6	Saprolito de la Dunita de Medellín seco, con matriz limosa.	JKuM-s
	Nivel Freático: 4.6 metros				
	20 a 100	1.6	4.6 a 6.2	Saprolito de la Dunita de Medellín saturado con agua subterránea, con matriz arcillosa.	JKuM-s

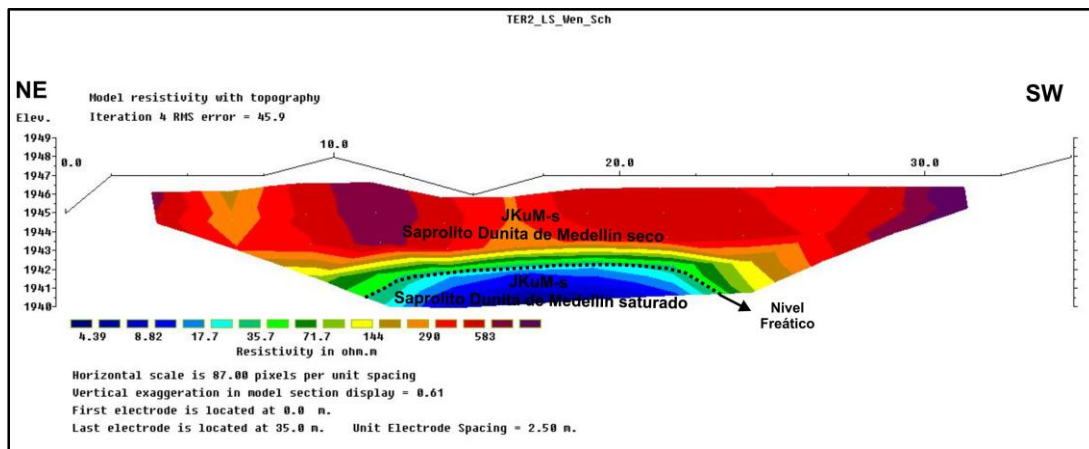


Figura 119. Interpretación de la tomografía TER_LS_02.

- *Resultados línea TER_LS_03*

Se elaboró en sentido general 021° con una longitud total de 35 metros y con elevaciones que oscilan entre los 1862 y los 1879 m.s.n.m (Figura 120). El tope de penetración máxima de esta tomografía en profundidad es de 5.25 metros, con alturas de penetración que oscilan entre 1870 a 1862 m.s.n.m. Se utilizaron 15 electrodos espaciados 2.5 metros entre sí. El trazo de la línea permite tener información de la aparente zona del nivel freático y geología local.



Figura 120. Zona de ejecución línea TER_LS_03.

La distribución de resistividades y la litología se correlacionan de la siguiente manera (Figura 121 y Tabla 59):

La primera franja, más cercana a la superficie hacia el NE y SW de la tomografía, con resistividades entre 140 y 200 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 0 y 3 m de profundidad, se interpreta como depósito de vertiente (Qfle) caracterizado por un flujo de lodos y escombros, de materiales limo arenosos a limo arcilloso, y al centro del perfil en relación con la primera franja, se interpreta un saprolito del Stock de las Estancias (KcdE-s) con materiales de tamaño arena fina, con cambios de granulometría y grado de meteorización, con resistividades entre 200 y 420 ohm-m, y un intervalo de profundidad entre 0 y 5.25 m.

Tabla 59. Estratigrafía para la tomografía TER_LS_03.

ESTRATIGRAFÍA					
Edad	Rango de Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Unidad Geológica para Ingeniería (UGI)
Cuaternario	140 a 200	3	0 a 3	Depósito de vertiente. Flujo de lodos y escombros. Limo arenoso a limo arcilloso.	Qfle
Cretácico	200 a 420	5.25	0 a 5.25	Saprolito del Stock de Las Estancias. Material de tamaño arena fina con cambios en la granulometría y grado de meteorización.	KcdE-s

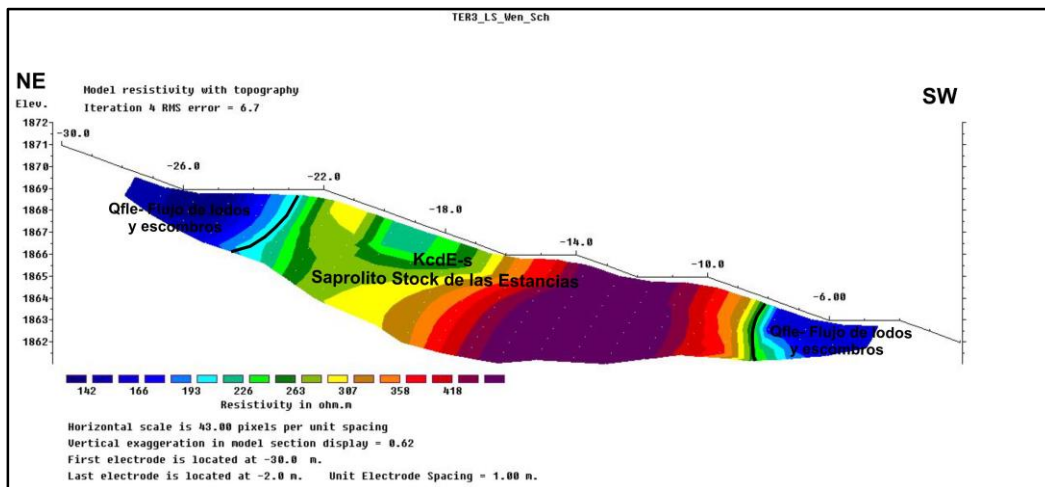


Figura 121. Interpretación de la tomografía TER_LS_03.

10.3 PERMEABILIDAD

Entendiendo la permeabilidad como la capacidad de un suelo para permitir el paso de un fluido (en términos particulares, el agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del suelo, se valoró de manera general la permeabilidad de los suelos superficiales que conforman el polígono La Sierra. Para lo anterior, se tuvo

en cuenta las clasificaciones granulométricas de los materiales obtenidos en los ensayos de laboratorio y se compararon con valores de la literatura establecidos por diferentes autores, en este caso específico se utilizó como referencia la información que se muestra en la Tabla 60 extractada de Mecánica de suelos en la ingeniería práctica de Terzaghi y Peck (1980).

Tabla 60. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 * 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1}$ a $1 * 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3}$ a $1 * 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5}$ a $1 * 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 * 10^{-7}$	Arcilla

Revisado el mapa de formaciones superficiales, se observa que existe un predominio de materiales residuales derivados de la dunita caracterizado por suelos limos arcillosos de color café amarillento con zonas grises verdosas, de consistencia blanda y plásticos, clasificados como MH (limos inorgánicos de alta plasticidad), los cuales según la tabla anterior tendrían valores de permeabilidad (K) menores a 1×10^{-5} clasificándolos como suelos muy poco permeables a impermeables, por lo que es de esperarse que exista un predominio de la escorrentía sobre la infiltración.

Los materiales residuales derivados de rocas ígneas plutónicas del Stock de de Las Estancias (saprolito IC) caracterizados por presentar arenas arcillosas SC, arenas limosas SM y arcillas de baja plasticidad CL con predominio de arenas. Según la tabla anterior tendrían valores de permeabilidad (K) entre 1×10^{-3} y 1×10^{-5} clasificándolos como suelos poco permeables, por lo que es de esperarse que exista un predominio de la infiltración.

La otra unidad superficial que aflora corresponde a materiales flujos de lodos y escombros, los cuales poseen granulometrías heterogéneas con materiales clasificados desde MH hasta GM (limos de alta plasticidad hasta gravas limosas), donde se pueden esperar valores de permeabilidad que oscilen entre 1×10^{-1} hasta 1×10^{-5} , es decir materiales moderadamente permeables a poco permeables para el caso de los materiales clasificados como gravas limosas (GM) y como se dijo anteriormente valores menores a 1×10^{-5} para el caso de los limos arcillosos (MH).

11. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

Para el polígono La Sierra la zonificación de amenazas incluye la relacionada como movimientos en masa, debido a que en el acuerdo con el Acuerdo 48 de 2014 la zona analizada se clasifica únicamente como de condición de riesgo por movimientos en masa.

11.1 AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA

A continuación se presentan la zonificación de amenazas por movimientos en masa llevada a cabo a partir de la combinación de los análisis de estabilidad y los contornos obtenidos por el runout.

Una vez se obtienen los resultados de los análisis de estabilidad, estos se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

11.1.1 Amenaza por estabilidad

Para la zonificación de amenazas por movimientos en masa se utilizó el método determinístico, el cual corresponde a un análisis cuantitativo en el que se calcula el factor de seguridad de cada ladera. Para la aplicación específica del método se elaboran modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información de detalle obtenida a partir de la información de campo y de la exploración del subsuelo, y se calculan los factores de seguridad al deslizamiento. Estos modelos requieren de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

Para el análisis de amenaza por estabilidad, el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se toma de acuerdo a lo planteado en el Decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se

Los análisis de estabilidad resultantes del análisis de los perfiles del polígono La Sierra, arrojaron los siguientes factores de seguridad en condición estática (Tabla 61):

Tabla 61. Factores de seguridad condición estática

Perfil	Perforación	FS	SF	Velocidad	Amenaza
1	P-1 y P-3	1.25	3.5	alta	alta
2	P2 y P3	1.13	8.89	alta	alta
3	P-4	1.08	6,82	alta	alta
4	P-5	1.07	5.49	alta	alta
5	P-6	1.16	10.6	alta	alta
6	P8 y P9	1.12	6.96	alta	alta
7	P7	1.11	10.29	alta	alta

De acuerdo con estos resultados y a partir de la tabla de decisión propuesta por el Decreto 1626 de 2015, las zonas con factores de seguridad en los rangos inferiores a 1.2, se deben clasificar como zonas de amenaza alta.

Es importante anotar que el perfil 1, presenta un FS de 1.25 sin embargo, fue necesario evaluar otros factores que influyen en la definición y caracterización de la amenaza por movimientos en masa en este perfil, tales como la presencia de procesos morfodinámicos, las condiciones topográficas y acciones antrópicas que modifican los terrenos.

Para este caso específico se reportan procesos de remoción en masa, la mayoría de poco espesor y que comprometen áreas poco extensas, así mismo, las condiciones de alta pendiente que caracterizan este sector constituye un factor importante a la hora de definir la susceptibilidad de este terreno a la formación de inestabilidades. Si a lo anterior, se agrega que existen depósitos de vertiente y depósitos antrópicos, estos últimos de poco espesor y extensión (no cartografiados), compuestos de materiales de pobres condiciones geotécnicas, depositados sobre esta ladera, es necesario replantear la zonificación de la amenaza por movimientos en masa para este perfil, que bajo los análisis de estabilidad tendría parámetros de categoría media, para clasificarla como alta, por los aspectos antes mencionados.

En función de los parámetros anteriores esta clasificación se localiza en dos sectores, el primero se ubica al norte del polígono, sobre ambas márgenes de la quebrada La Meditadora entre las calles 54B y 56B; el segundo sector corresponde

a las laderas ubicadas entre la calle 54A y su prolongación y las quebradas La Meditadora y El Nato. Esta categoría está caracterizada geológicamente por suelo residual y la transición suelo roca de la dunita de Medellín y el Stock de Las Estancias.

Asociado a esta zona de amenaza alta y los factores de seguridad mencionados anteriormente, los movimientos en esta zona se caracterizan como de velocidad altas con superficies de falla que oscilan entre los 3.5m en el perfil 1 y los 10.29m en el perfil 7. Se destaca que estos factores de seguridad indican una alta probabilidad de formación de inestabilidades asociadas al tipo de material detectado y a las altas pendientes del sector y no satisface los valores de factor de seguridad estipulados en los códigos para garantizar la estabilidad de la zona, por lo que se determina un nivel de amenaza alto.

Amenaza Media: corresponde a una zona con una moderada probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa; estas zonas presentan procesos geológicos, generalmente inactivos los cuales podrían reactivarse si no se toman correctivos. Aunque los procesos morfodinámicos en estas zonas no son abundantes, su composición geológica y las altas pendientes hacen que esta zona sea más susceptible a este tipo de amenaza, por eso requieren un especial cuidado, ya que la amenaza media puede convertirse fácilmente en amenaza alta, si los usos del suelo no son adecuados.

Esta clasificación se ubica en tres sectores, el primero y de mayor extensión ubica hacia la zona central del polígono, delimitado aproximadamente entre las calles 54AD y 54B y carreras 5E y 11E, el segundo se identifica al norte, sobre la margen derecha de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 7E y el tercer sector corresponde a un pequeño polígono ubicado sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 8E. Esta categoría está geológicamente relacionada a flujos de lodos y escombros y a suelo residual de la Dunita. En esta zona se encuentran rangos de pendientes variables, que oscilan entre muy inclinada y muy abrupta.

Amenaza Baja: corresponde a una zona con baja probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa; en esta clasificación se encuentra en el sector donde se ubica la placa polideportiva, al norte del polígono La Sierra, esta área se caracteriza por presentar una pendiente inferior al 10% y geológicamente asociado a la dunita de Medellín; esta zona se encuentra poco intervenida sin evidencias de morfodinámicos importantes.

11.1.1.2 Amenaza en condiciones saturadas

El cálculo de la amenaza en condiciones saturadas se realizó a partir de los factores de seguridad obtenidos en los perfiles 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 bajo una condición de saturación de los materiales que componen el perfil de suelos, para los cuales se obtuvieron valores de 0.83, 0.41, 0.39, 0.12, 0.41, 0.70 y 0.48 respectivamente, por lo que la amenaza se calcula como alta para la totalidad del polígono en estudio (Figura 123).

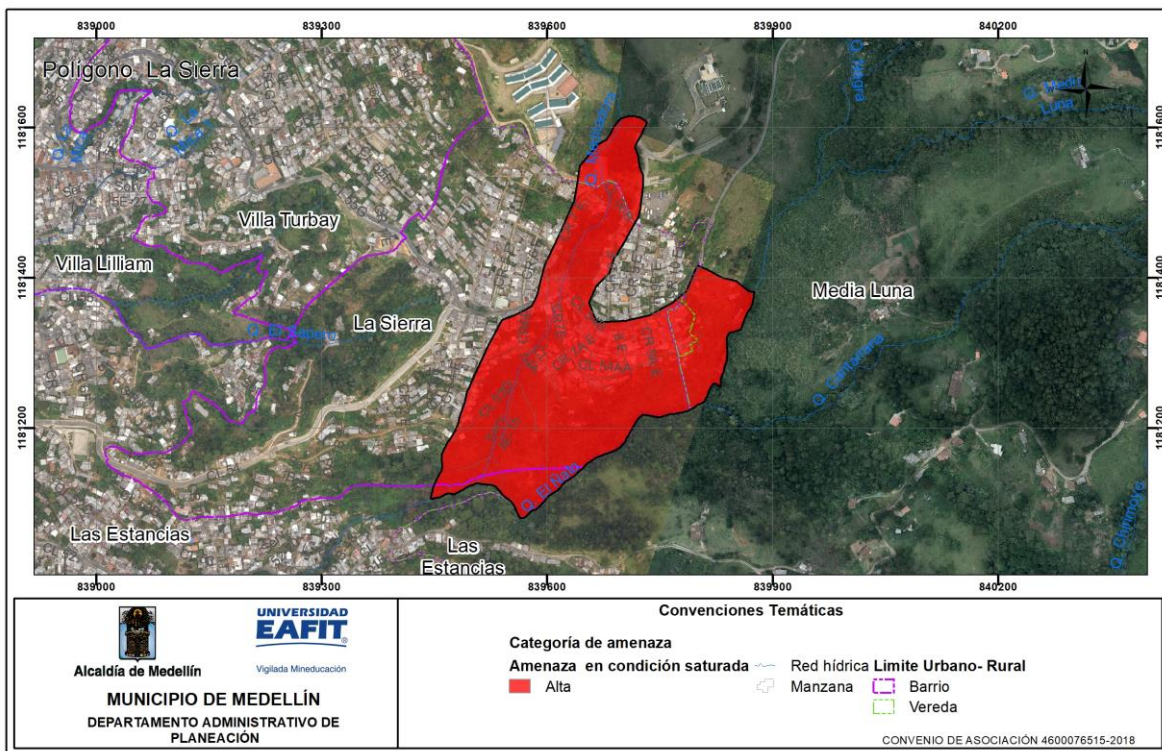


Figura 123. Zonificación de amenazas por estabilidad en condiciones de saturación para el polígono La Sierra

11.1.2 Amenaza por Run-Out

Una vez calificada y analizada la amenaza por estabilidad, se ubicaron puntos a lo largo de la parte alta de la zona de falla, para poder conocer la altura desde la cual podría desprenderse el movimiento en masa, y por medio del modelo de elevación digital se obtuvieron los parámetros para poder conocer cuáles serían las distancias y el recorrido que podría tomar dicho deslizamiento. Con estas dos informaciones se realizó el modelamiento del RUNOUT (distancia de viaje) y se clasificó de manera

conjunta con la amenaza por estabilidad. De acuerdo con la metodología aplicada (Guimarães, 2015), el contorno 0.4 representa una probabilidad del 90% de que hasta esta zona pueda desplazarse los materiales asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa (Figura 124).

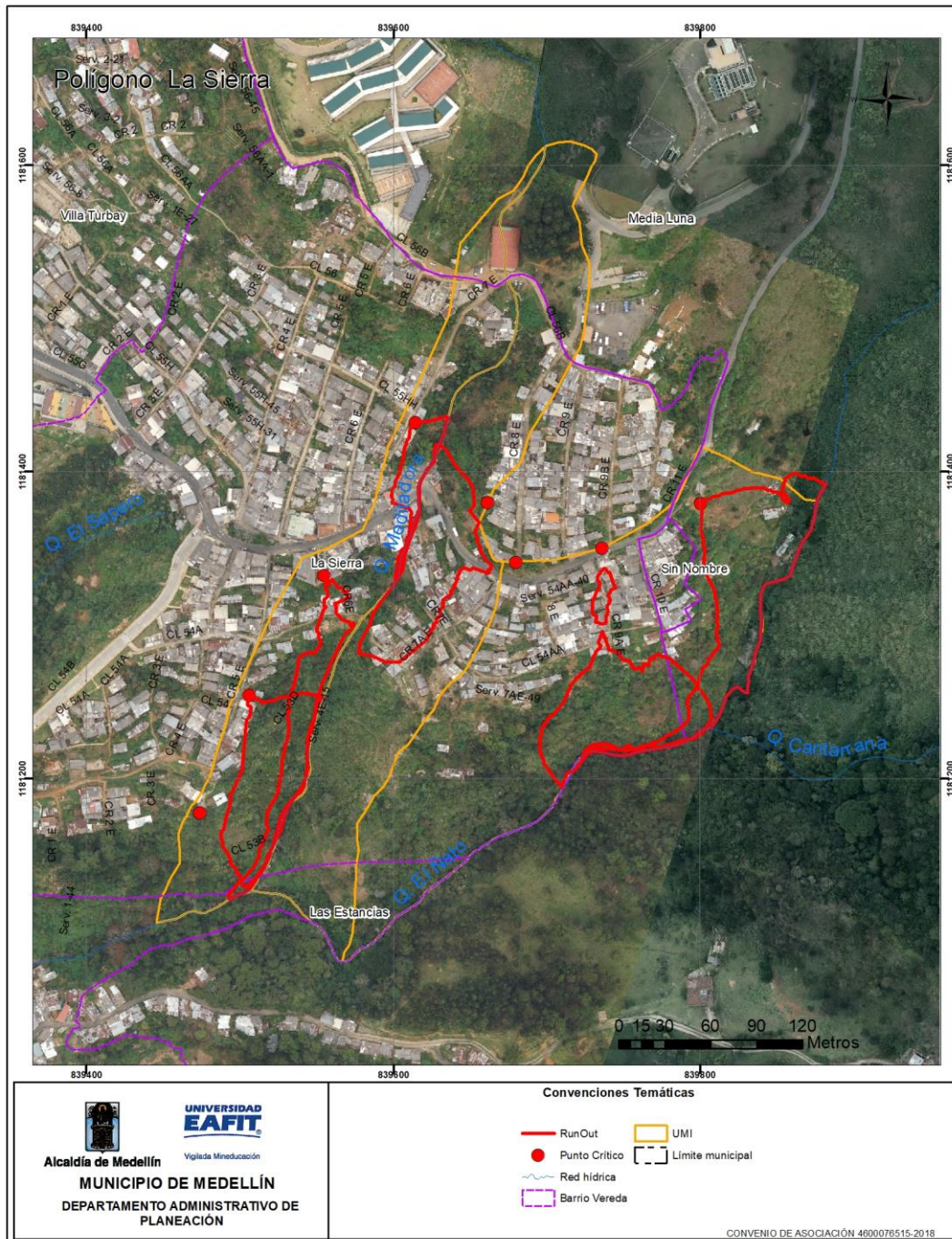


Figura 124. Mapa amenaza Runout del polígono La Sierra.

Para el Polígono La Sierra los análisis del runout muestran que los deslizamientos que se generan en las vertientes altas de la quebrada La Meditadora, tienen la probabilidad de descender hacia la zona central del polígono por dicha corriente hacia la zona central entre las calles 54AA y 54B, donde se presenta un cambio de pendiente que favorece los procesos de depositación y acumulación de materiales. Al igual ocurre en los deslizamientos que se en la parte central del polígono, en las laderas de las quebradas La Meditadora y El Ñato donde la masa desplazada se dirige hacia la zona de los cauces activos de estas corrientes.

Se destaca que la probabilidad de acumulación de materiales resultantes de dichos procesos fue uno de los condicionantes que determinaron la necesidad de establecer la UMI hasta este sector.

11.1.3 Amenaza total

La definición de la amenaza final resulta de la combinación de la amenaza obtenida mediante el método determinístico (análisis de estabilidad) y la distancia de viaje (runout), debido a que es necesario establecer tanto la zona donde hay probabilidad de que se generen los movimientos en masa, como su zona de influencia y depositación. Teniendo en cuenta lo anterior, el nivel de amenaza para una zona está condicionado tanto a la estabilidad propia del terreno en condiciones estáticas como a la probabilidad de que se vea afectada por la depositación de materiales asociados a movimientos en masa que se generen en la zona circundante. Se destaca que la valoración de la amenaza de las zonas afectadas por runout depende directamente del nivel de amenaza obtenido en la zona con probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Teniendo en cuenta que para el polígono de La Sierra, se determinaron zonas de amenaza por runout, la amenaza está condicionada a las características propias de estabilidad del terreno asociado a las condiciones topográficas y geomecánicas de los materiales que conforman el perfil de suelos, la cual a partir de los análisis de estabilidad obtenidos se determinan las siguientes categorías.

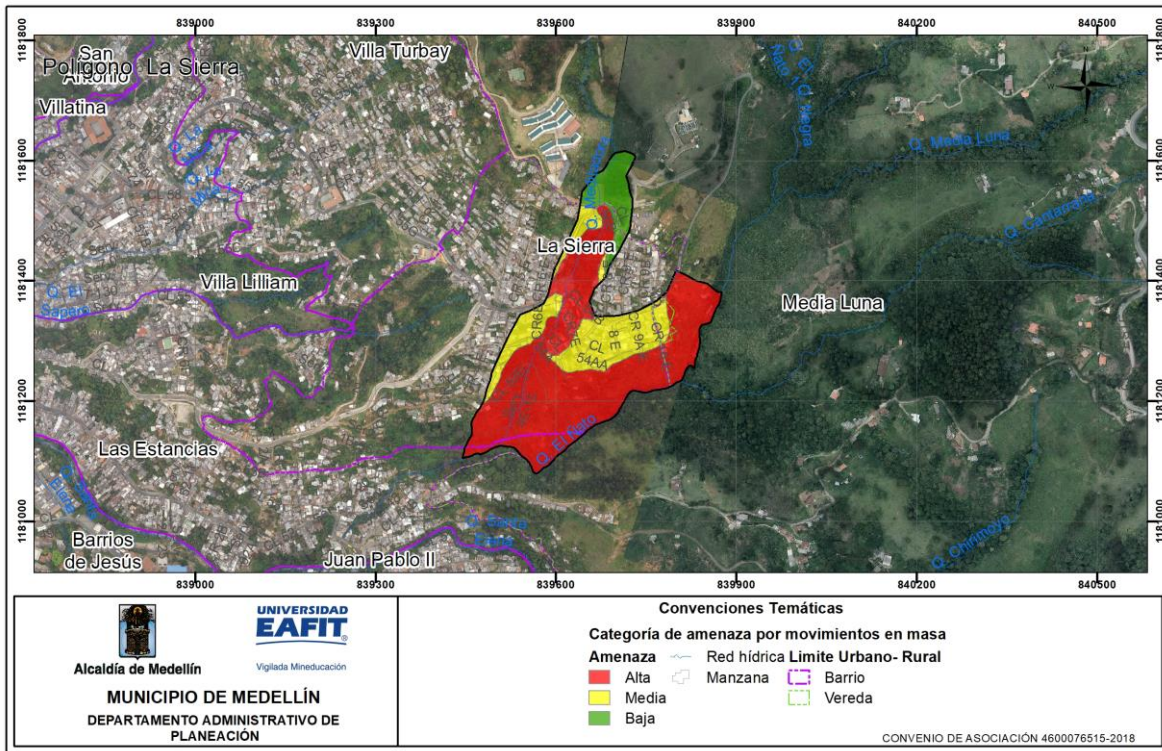


Figura 125. Mapa amenaza final del polígono La Sierra.

Amenaza Alta: Corresponden a áreas con inestabilidad manifiesta o con alta probabilidad de presentar movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la geología, la geomorfología y factores antrópicos. El factor de seguridad de las laderas naturales en esta categoría es $FS < 1.2$ o alternatively probabilidad de falla $PF > 0,05/\text{año}$.

En esta clasificación se ubica sobre sobre ambas márgenes de la quebrada La Meditadora entre las calles 54B y 56B; el segundo sector corresponde a las laderas ubicadas entre la calle 54A y su prolongación y las quebradas La Meditadora y El Nato. Esta categoría está caracterizada geológicamente por suelo residual y la transición suelo roca de la de la dunita de Medellín y el Stock de Las Estancias.

Esta área se caracteriza por unidades geomorfológicas de laderas de forma recta e irregulares, con longitudes que oscilan entre 20 y 80 m y pendientes en los rangos de 40-60% y mayores $> 60\%$, con una alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, presentando factores de seguridad que oscilan entre 1.07 y 1.25 en los siete perfiles analizados en condiciones estáticas actuales; la masa

desprendida desde las vertientes de la quebrada La Meditadora pueden llegar a depositarse hacia la zona media en donde se presenta un cambio de pendiente, generando una ampliación por runout en la zona inicialmente analizada.

Amenaza media: Son áreas con un nivel medio de probabilidad que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la pendiente y en alguna medida a factores antrópicos. El factor de seguridad de las laderas naturales en esta categoría puede estar entre 1.2 y 1.5; o alternatively con probabilidades de falla o ruptura entre 0,0002/año – 0,05/año).

Esta clasificación se ubica en cuatro sectores, el primero y de mayor extensión ubica hacia la zona central del polígono, delimitado aproximadamente entre las calles 54AD y 54B y carreras 8E y 11E, el segundo se identifica al norte, sobre la margen derecha de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 7E, el tercer sector corresponde al polígono ubicado sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 8E y el cuarto se ubica entre las calles 53D y 54B y calles 5E y 6E. Esta categoría está geológicamente relacionada a flujos de lodos y escombros y suelo residual de la Dunita. En esta zona se encuentran rangos de pendientes variables, que oscilan entre muy inclinada y muy abrupta.

Esta zona se caracteriza unidades geomorfológicas de laderas convexas y rectas de longitud corta a moderada y pendientes que oscilan entre muy inclinadas a muy abrupta, con una mediana probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. La estabilidad de esta zona está condicionada al uso adecuado del suelo y del manejo de aguas de escorrentía provenientes de las partes altas de las vertientes.

Amenaza baja: Corresponden a áreas con aceptables condiciones de estabilidad, sin evidencias físicas o históricas de procesos morfodinámicos, o si existen, su densidad es baja, con baja probabilidad de que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada y las pendientes. El factor de seguridad de las laderas naturales dentro de esta categoría es $FS > 1.5$; o alternatively probabilidades de falla o ruptura $PF < 0,0002/\text{año}$.

Esta categoría de amenaza se ubica al norte de la calle 56B, en inmediaciones de la placa polideportiva, área con predominio de pendientes bajas inferiores al 10%, y geológicamente esta sobre suelo residual de la dunita de Medellín.

11.1.4 Amenaza por inundación

La condición de amenaza por inundación está basada en el análisis hidráulico que arroja la mancha de inundación TR POMCA y la condición geomorfológica, que ha sido ajustada de acuerdo con las condiciones propias del polígono, es decir, la zona de amenaza combina los resultados arrojados por los dos métodos de análisis, primando en algunos casos el análisis hidráulico y en otros el análisis geomorfológico (Figura 131).

Amenaza alta: Corresponde a las áreas cubiertas por la mancha de inundación del periodo de retorno de 100 años determinada por los análisis hidrológicos e hidráulicos. Geomorfológicamente donde la mancha es más amplia corresponde a las llanuras de inundación de las corrientes de agua y donde el canal es estrecho, corresponde a la zona de tránsito. Estas áreas presentan una probabilidad de ocurrencia anual mayor a 0,01.

Esta categoría de amenaza por inundaciones de la quebrada La Meditadora se localiza en franjas paralelas, estrechas e irregulares en ambos márgenes de la quebrada.

Estas zonas son las que ocuparía la fuente hídrica en los eventos de mayor intensidad y mayor frecuencia, que ocurren en las temporadas de lluvia del país, dejando evidencias geomorfológicas e hidrología de estos eventos. La quebrada La Meditadora en su paso por el barrio La Sierra, se caracteriza por pasar por un canal estrecho; si bien la dinámica de esta corriente no es de carácter torrencial, su afectación durante una creciente es inminente en esta zona especialmente en la zona de la placa polideportiva y el sector donde la quebrada cruza la calle 54B.

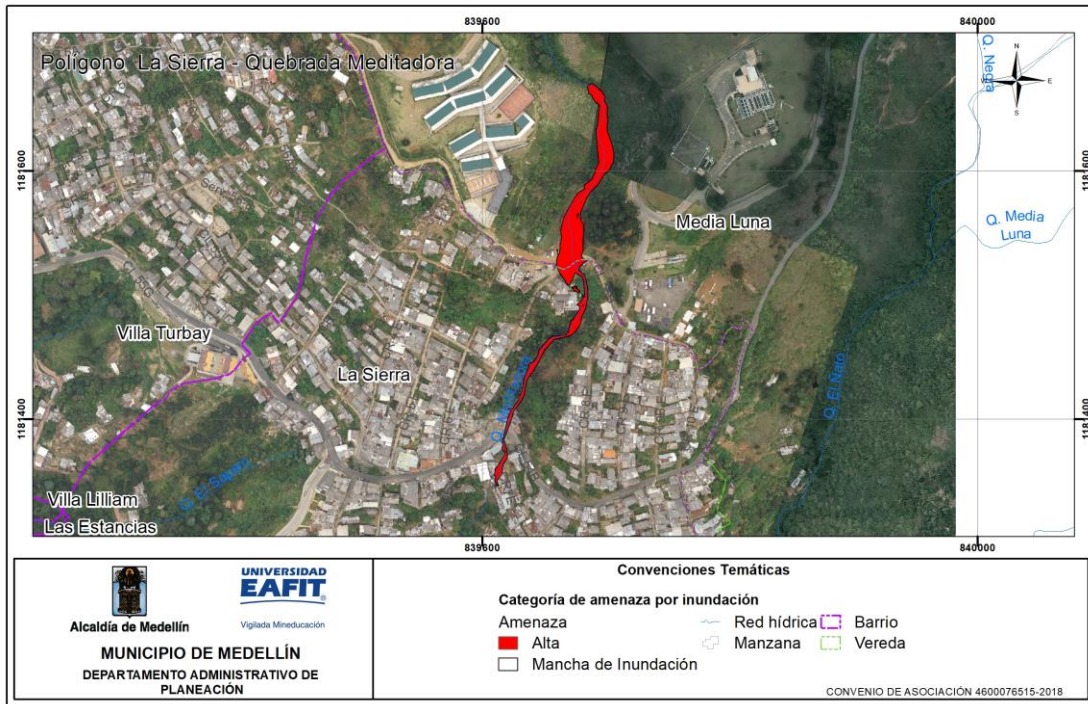


Figura 126. Mapa amenaza por inundación

12. VULNERABILIDAD

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad por movimientos en masa para el polígono de La Sierra. Inicialmente se analizará el análisis para las construcciones y posteriormente para las líneas vitales. Al final del capítulo se presentará la estimación para personas, la cual se basa en datos de información secundaria y en aproximaciones a partir de la vulnerabilidad de las construcciones. La descripción de esta metodología se encuentra en detalle en el Anexo 1 y en capítulo 3 del presente informe.

De manera general, en el polígono La Sierra se analizaron 474 construcciones, de las cuales son afectadas por la zona delimitada por el movimiento en masa 241 edificaciones, 131 postes de energía, de los cuales 87 son afectados por la zona delimitada por el movimiento en masa y 51 vías, de las cuales 45 son afectadas por la zona delimitada por el movimiento en masa; esta información proviene de la evaluación realizada en campo, de su estructuración y almacenamiento en una base de datos y su procesamiento posterior (Anexo 5).

12.1 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA

La vulnerabilidad de las construcciones consta de dos factores: la fragilidad y la intensidad. El primero de ellos corresponde a la respuesta del elemento expuesto ante determinada amenaza y depende de las características propias, mientras que la intensidad depende de las características del fenómeno amenazante (velocidad, volumen de la masa deslizante, profundidad, entre otras).

12.1.1 Cálculo de la fragilidad de las construcciones

Para la identificación de la fragilidad de las construcciones, se tuvo en cuenta la evaluación o análisis de los parámetros predominantes de las estructuras expuestas, los cuales son: tipología estructural, edad de la construcción, cantidad de niveles de la edificación y estado de conservación de la misma, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico con la siguiente expresión (anexo 1.)

$$S_e = 1 - \pi(1 - S_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Donde se consideran seis parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones:

S_{tip} : tipo de la edificación.

S_{alt} : altura de la edificación.

S_{con} : conservación de la edificación.

S_{ed} : edad de la edificación.

$S_{Acueducto}$: caracterización del sistema de acueducto de la edificación.

$S_{Alcantarillado}$: caracterización del sistema del alcantarillado de la edificación.

De acuerdo con Figura 127, se puede concluir que la mayoría de las construcciones analizadas en el polígono denominado La Sierra, presentan fragilidades altas, referenciadas en un rango entre 0.7 y 1, con un valor representativo de 239 edificaciones, las cuales se encuentran ubicadas espacialmente a lo largo del polígono (Figura 128, Figura 129 y Figura 130).

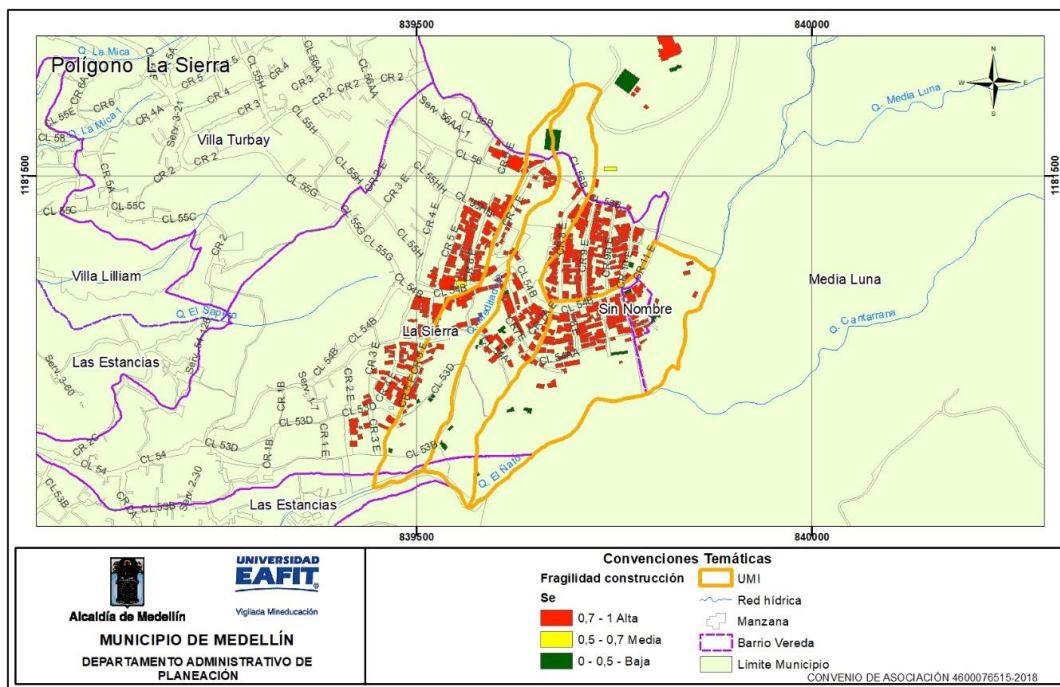


Figura 127. Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificadas en el polígono de La Sierra.

La Figura 128 corresponde a una construcción que se puede clasificar como mampostería no reforzada dentro de la tipología E, la cual se caracteriza por poseer un sistema estructural de muros cargueros. Esta tipología representa el 58% de las construcciones del polígono.



Figura 128. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono La Sierra.

En la Figura 129, se visualiza una estructura que se clasifica como construcción improvisada dentro de la tipología F, la cual se caracteriza por no poseer una estructura definida y suele ser construida con materiales precarios o de recuperación, paneles de madera desgastados, metal, entre otros, estas estructuras no tienen un sistema de cimentación definido y usualmente se encuentran ubicadas en los puntos más altos o donde se visualizan grandes cambios de pendiente. Esta tipología representa el 14% de las construcciones del polígono.



Figura 129. Tipología construcciones simples (F). Estructura ubicada en el polígono La Sierra.

En la Figura 130 se puede visualizar una estructura que tiene un valor de fragilidad intermedio asociado; la misma se puede clasificar como tipología D o estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, ya que, si bien no cuentan con un confinamiento adecuado, tienen elementos estructurales que hacen que la edificación sea menos vulnerable, como columnas de sección menor y cimentaciones de zapatas. Esta tipología se encuentra representada en el 28% de las construcciones del polígono.

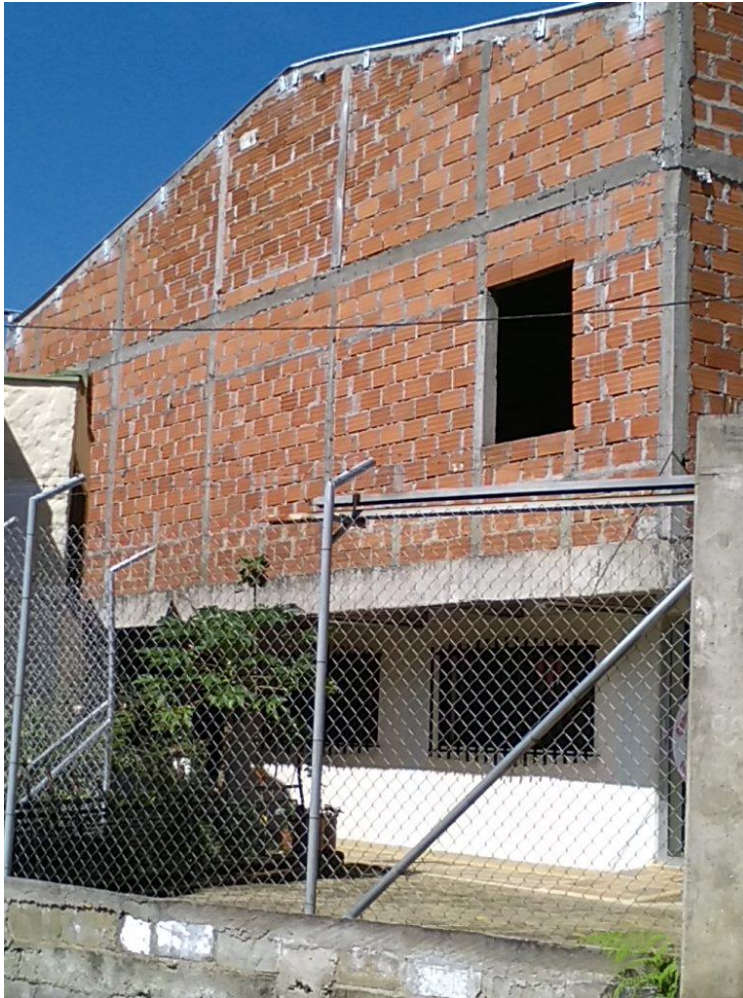


Figura 130. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono La Sierra.

12.1.2 Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.

En la valoración de la intensidad de los eventos amenazantes se tienen en cuenta dos tipos de movimientos que producen deformación en el terreno, el movimiento lento y el movimiento rápido.

En el polígono de estudio se presentan los movimientos rápidos, definidos en un escenario de desplazamiento en etapa de falla, donde se calcula la intensidad, en función de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la edificación, además se debe tener en cuenta la relación

existente entre la profundidad de la falla del deslizamiento y la altura de la edificación, descritos en el capítulo de Análisis Geotécnico. En el polígono La Sierra se identifica una intensidad alta para el 100% construcciones evaluadas; como se mencionó anteriormente dicha intensidad está en función de la profundidad y la presión de impacto (Figura 131).

Para estructuras de tipología ligeras (E), las cuales son el 68% del total de las construcciones evaluadas, la presión límite de la estructura es 5 kPa, del mismo modo para una presión límite se presenta una velocidad límite, la cual indica que los movimientos de masa a esas velocidades provocarían el colapso total de las estructuras (Figura 131).

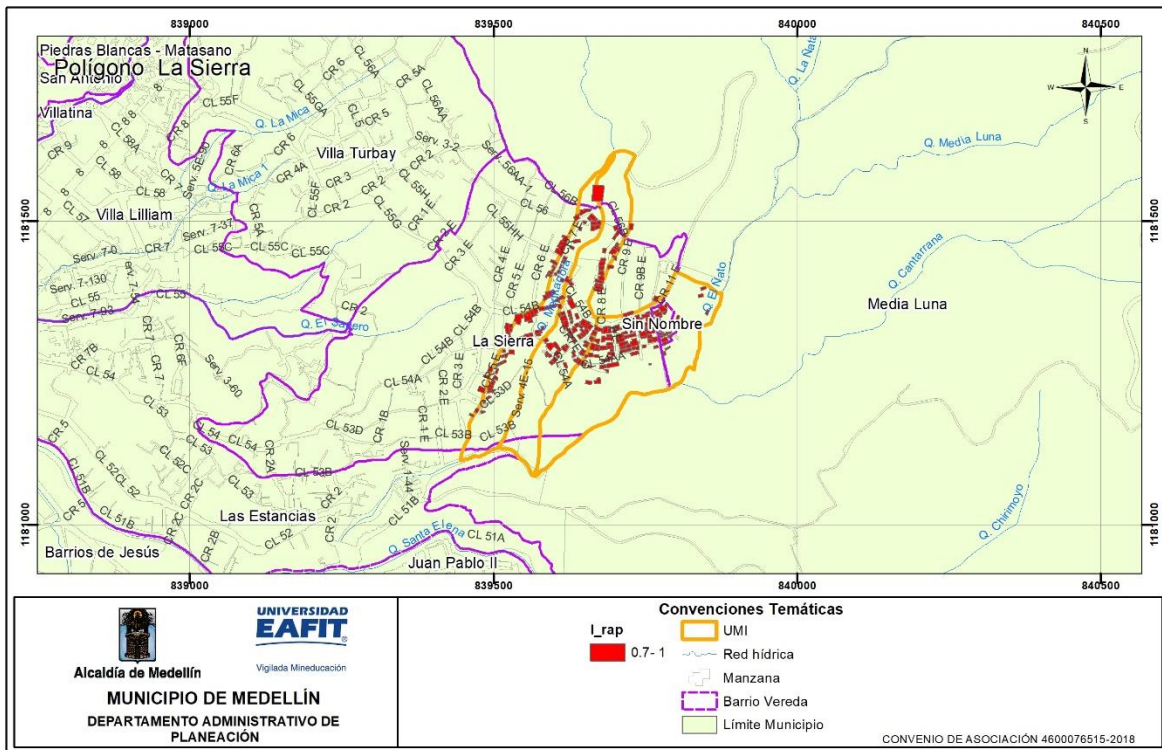


Figura 131. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.1.3 Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones

El grado de vulnerabilidad de una edificación se define como el factor de exposición de la misma a percibir daños a causa de amenazas naturales, conforme a esta premisa la vulnerabilidad se calcula teniendo presente los resultados obtenidos de

la fragilidad y de la intensidad a partir de los parámetros representados en los ítems analizados anteriormente.

Los valores de la vulnerabilidad se determinan en los siguientes rangos: vulnerabilidad baja, cuando se obtienen resultados menores o iguales a 0,1, vulnerabilidad media cuando se obtienen resultados entre 0,1 y 0,5, y vulnerabilidad alta, cuando los resultados sobrepasan de 0,5 todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.4. (Anexo 1).

La vulnerabilidad alta corresponde al 100% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos a altos de fragilidad y altos de intensidad, las construcciones con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 132).

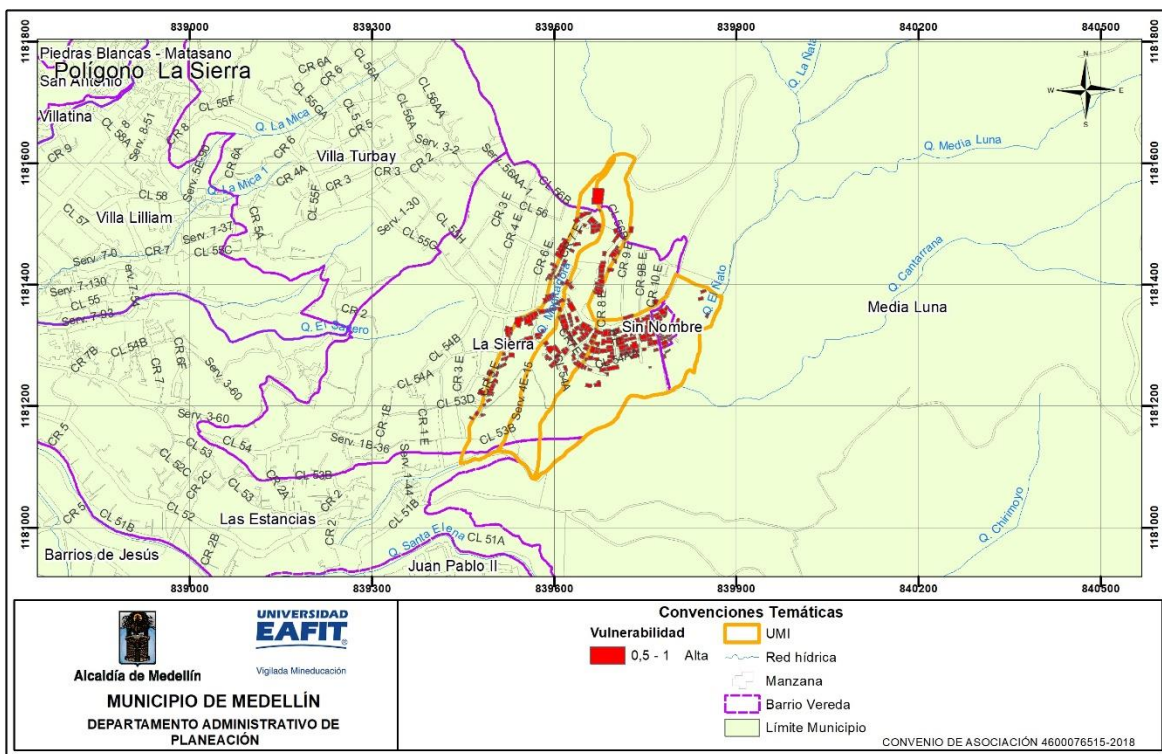


Figura 132. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA

Similar al procedimiento, los parámetros y características que se utilizan para determinar la vulnerabilidad en construcciones, se deberá calcular la fragilidad conforme la información obtenida de campo y los criterios de medición en cada una de las denominadas líneas vitales (vías, energía, acueducto y alcantarillado, estos últimos dos cuando se identifican daños visibles en puntos específicos de la red) y luego se procede a realizar la evaluación de la intensidad.

Para el polígono La Sierra se analizaron 131 postes de energía, de los cuales 87 se encuentran dentro de la zona delimitada por el movimiento en masa, y 51 vías, de las cuales 45 se encuentran dentro de la zona delimitada por el movimiento en masa. Estas forman parte del componente de líneas vitales (Anexo 5).

12.2.1 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía

La fragilidad de la línea vital energía se mide teniendo en cuenta los parámetros de carga y estado de las redes localizadas en la zona de estudio del polígono denominado La Sierra.

En el polígono La Sierra se encontraron 87 postes, de los cuales 30 de ellos están en mal estado, es decir, agrietados y/o fisurados, éstos se encuentran en diferentes tipos de materiales como: concreto (1 unidad) y una gran mayoría de ellos de madera (29 unidades), por ende su carga mínima de rotura es 0 (KgF), lo que hace que tengan una fragilidad de 1; con respecto a su localización, podemos decir que los mismos están ubicados de manera homogénea en el polígono (Figura 133).

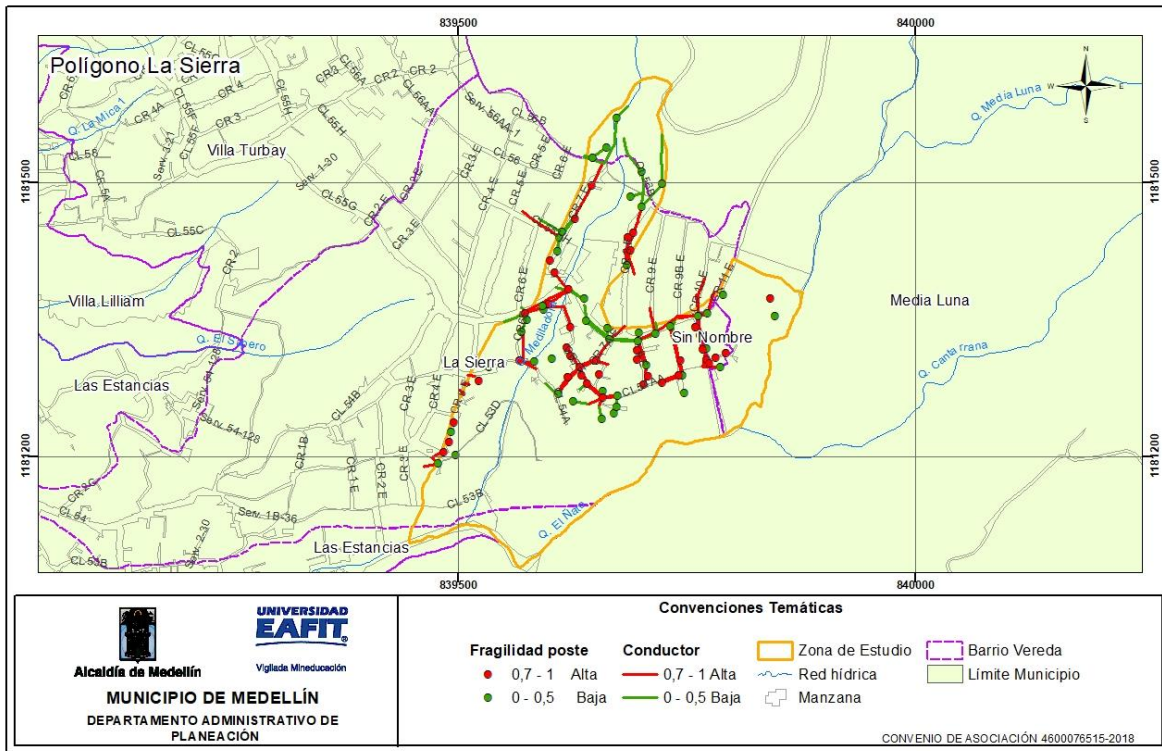


Figura 133. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.2 Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía

Para la determinación de la intensidad en movimientos rápidos, como es el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, se expresa como la relación entre la altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (Anexo 1).

Con base en el criterio mencionado anteriormente y teniendo presente el valor de la tolerancia que tiene el material de los postes de energía se realiza el cálculo de la intensidad, para esto, se evalúa la mitad de la deflexión máxima permitida en el diseño de los postes, correspondiente al 3 % de la altura nominal de estos.

Cuando se presenta el fenómeno de movimientos rápidos, como es el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, se expresa como la relación entre la altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (Anexo 1).

La intensidad de las líneas vitales energía en el polígono La Sierra es alta para todos los postes que se encuentran en el polígono, los cuales se localizan distribuidos de manera homogénea, en la zona de estudio. Dicho resultado se debe a la relación que hay entre la altura del deslizamiento y la altura nominal de los postes, lo que indica que para los elementos que se encuentran dentro de la zona de viaje del deslizamiento, el mecanismo de impacto puede ser enterramiento e impacto (Figura 134).

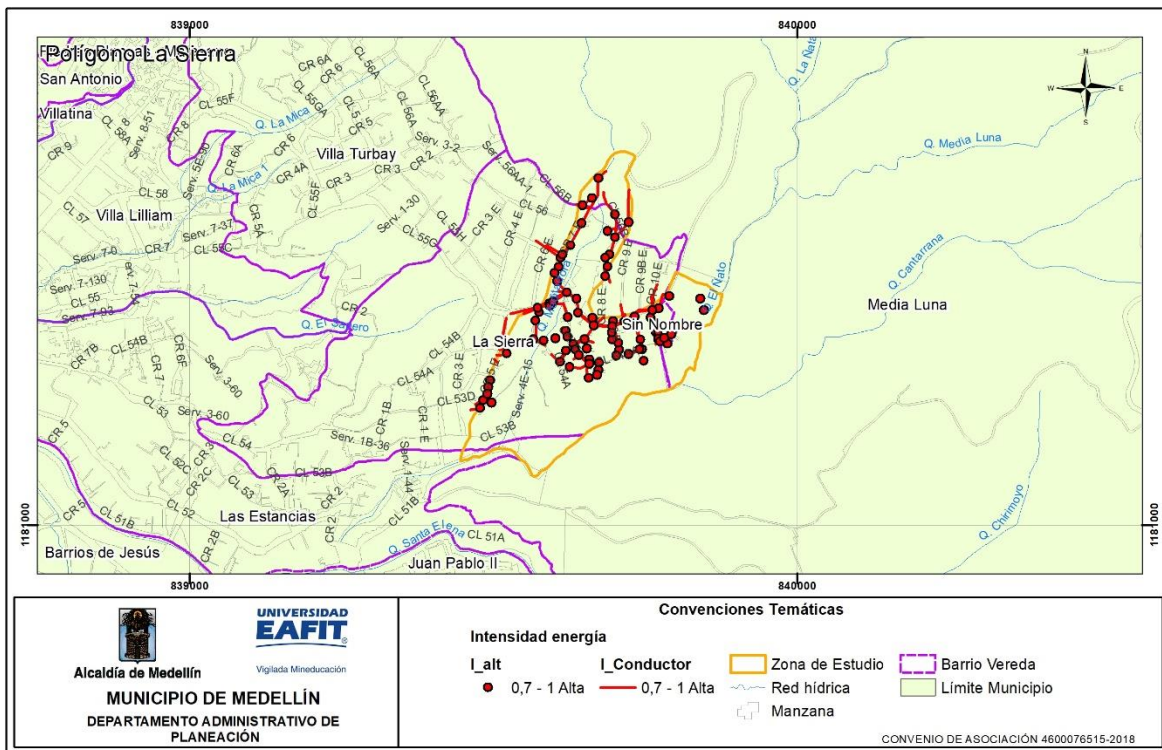


Figura 134. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.3 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía

La vulnerabilidad alta corresponde al 47% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y altos de intensidad, los postes con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 135).

La vulnerabilidad media corresponde al 53% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y altos de

intensidad, los postes con esta vulnerabilidad se ubican de manera uniforme sobre el polígono.

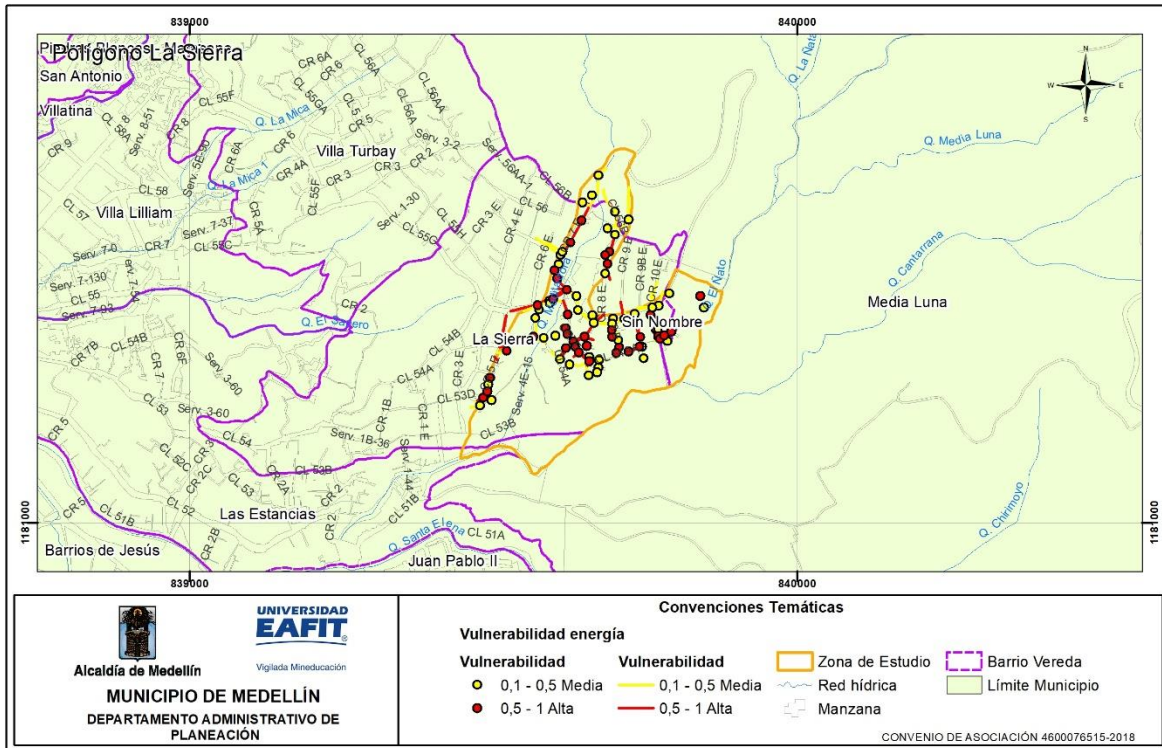


Figura 135. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.4 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías

Para la valoración de la fragilidad de las vías, se consideran los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y presencia de daños. La tipología de estas vías puede ser: vehicular, puente vehicular o peatonal, sendero peatonal a nivel y a desnivel (con escaleras).

Las vías de acceso del polígono que están representadas con color verde son vías con fragilidad baja, que no presentan daños de rotura ni asentamientos, tienen valores de fragilidad inferiores a 0,5 y están representadas por el 44% de las vías ubicadas en la zona de estudio, al mismo tiempo, se evidencian vías con fragilidad entre 0,5 y 0,7 debido a la presencia de daños como baches, fisuras entre otras que comprometen el ancho útil de la misma, correspondientes al 18%. Adicionalmente la falta de obras de drenaje hace que aumente la fragilidad de los accesos viales ya

que la gran mayoría de las vías internas del polígono corresponden a vías locales como andenes de circulación, conformados por pavimento rígido a nivel y desnivel; en el polígono de estudio se identificaron tramos de vías con valoración entre 0,7 – 1 que representa una fragilidad alta, con un valor porcentual del 38% y se encuentran ubicadas de manera uniforme en el polígono (Figura 136).

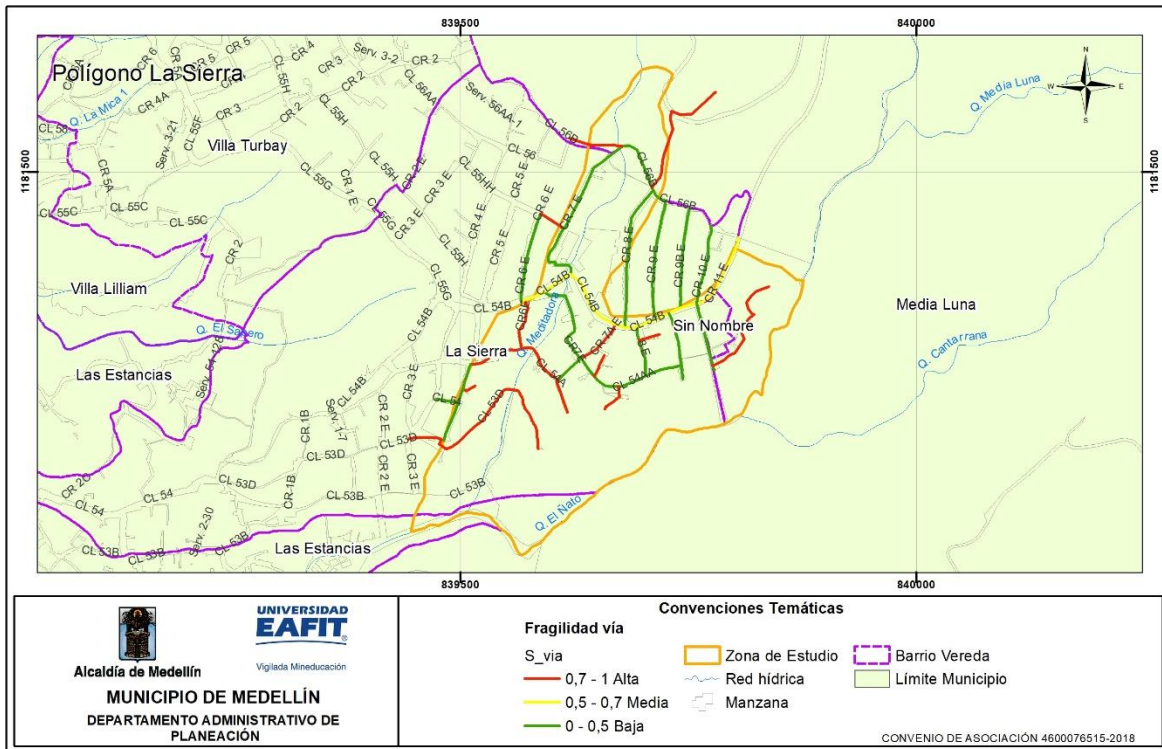


Figura 136. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono de La Sierra.

12.2.5 Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías

La determinación del parámetro de intensidad en movimientos rápidos para redes viales se define a partir de la ocupación por la masa deslizada o el ancho de vía invadido (determinado a partir de la distancia de viaje calculada de acuerdo con los métodos presentados en el capítulo de amenaza de la Metodología General).

La intensidad alta corresponde al 31% de las vías evaluadas, la cual se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse un movimiento, las vías con esta intensidad se localizan en el costado occidental y oriental del polígono (Figura 137).

La intensidad baja corresponde al 69% de las vías evaluadas, las cuales se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse un movimiento, las vías con esta intensidad se identifican principalmente al centro y al norte del polígono.

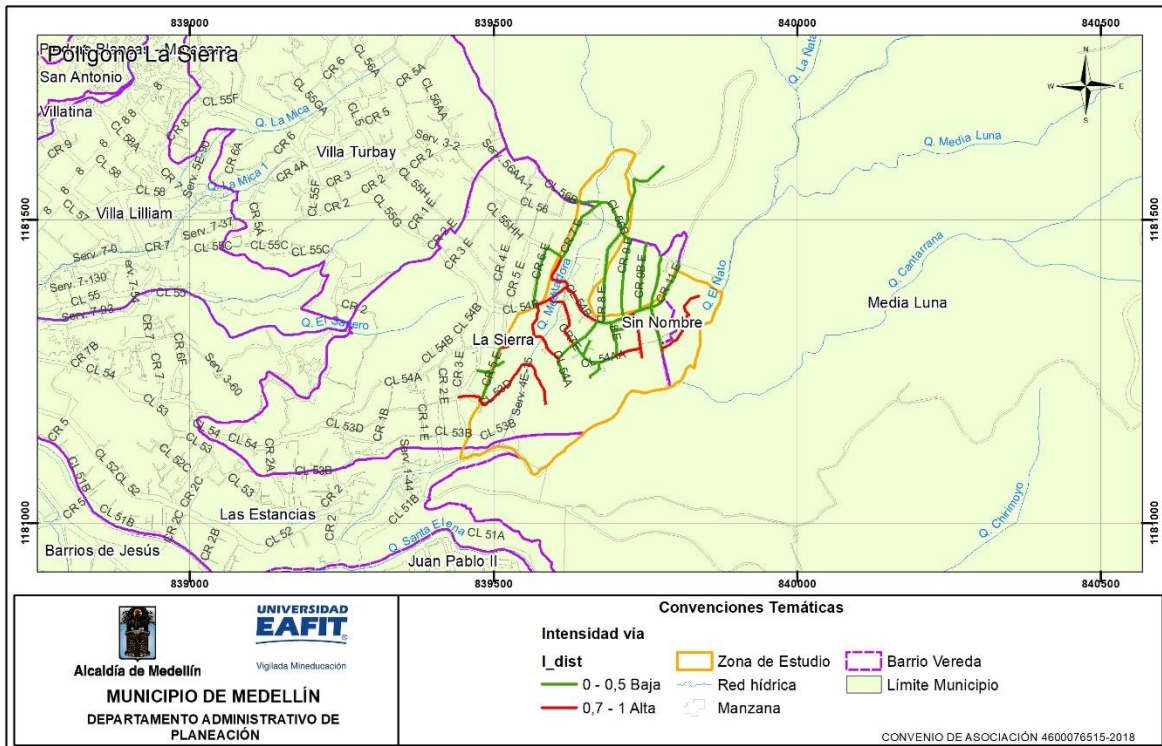


Figura 137. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono La Sierra.

12.2.6 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías

La vulnerabilidad alta corresponde al 47% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios a altos de fragilidad y medios a altos de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 138).

La vulnerabilidad media corresponde al 2% de las vías evaluadas, la cual se caracteriza por presentar valores altos de fragilidad y bajos de intensidad, la vía con esta vulnerabilidad se localiza en el sur del polígono y corresponde a la carrera 7A.

La vulnerabilidad baja corresponde al 51% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios a altos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono con mayor concentración al norte del mismo.

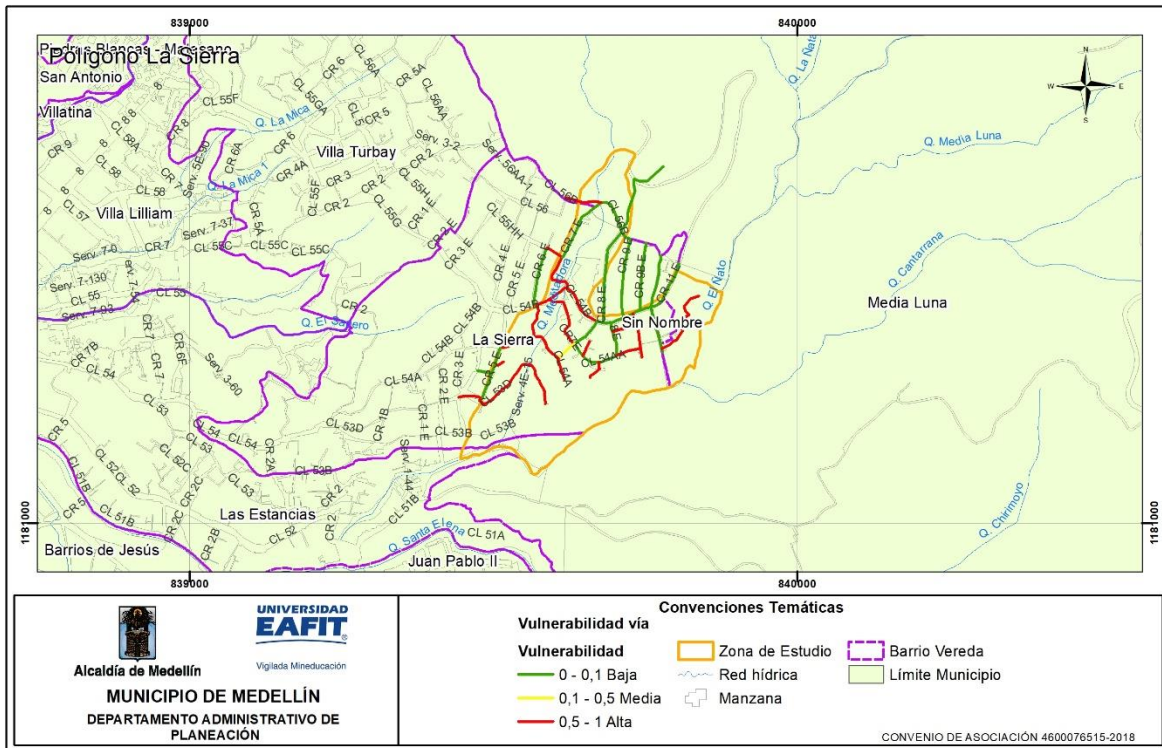


Figura 138. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono La Sierra.

12.2.7 Cálculo de la fragilidad del acueducto

La fragilidad representa la respuesta de los elementos expuestos frente a las cargas generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos, para determinar el cálculo de la fragilidad en el caso puntual de la línea vital de acueducto, es necesario contemplar los siguientes parámetros: operador de red, estado de la red, diámetro, si la tubería presenta deflexión y el tipo de material de la tubería, como, PVC, hierro dúctil, polietileno, etc.

La fragilidad en la red del acueducto en el polígono La Sierra, arroja valores bajos debido a las características propias de la red y a que no se hallaron daños en esta línea vital, donde se transporta agua potable, abastecida por EPM (Figura 139).

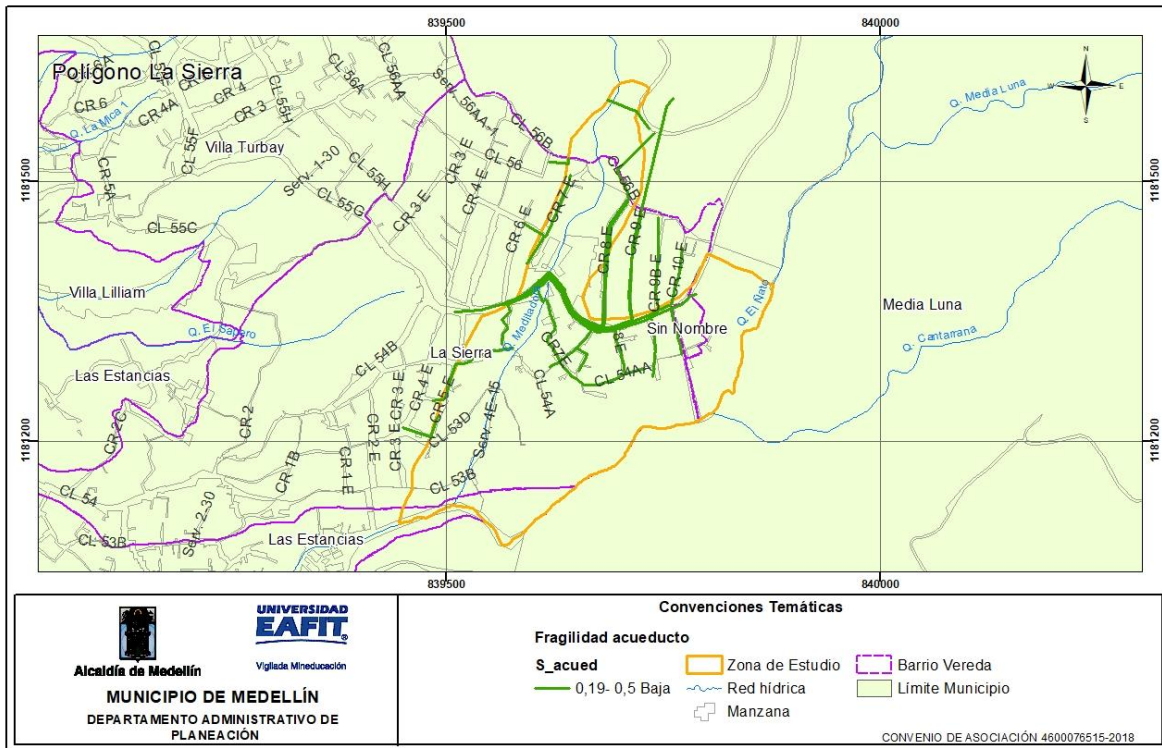


Figura 139. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono de La Sierra.

12.2.8 Cálculo de la intensidad del acueducto

Teniendo en cuenta que el fenómeno de movimiento en masa impone una carga uniforme a lo largo de la red del acueducto, la determinación de los umbrales tolerables está dada en función del diámetro de la tubería.

La intensidad del acueducto del polígono La Sierra es baja, en toda el área de estudio. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de acuerdo al diámetro de la tubería (Figura 140).

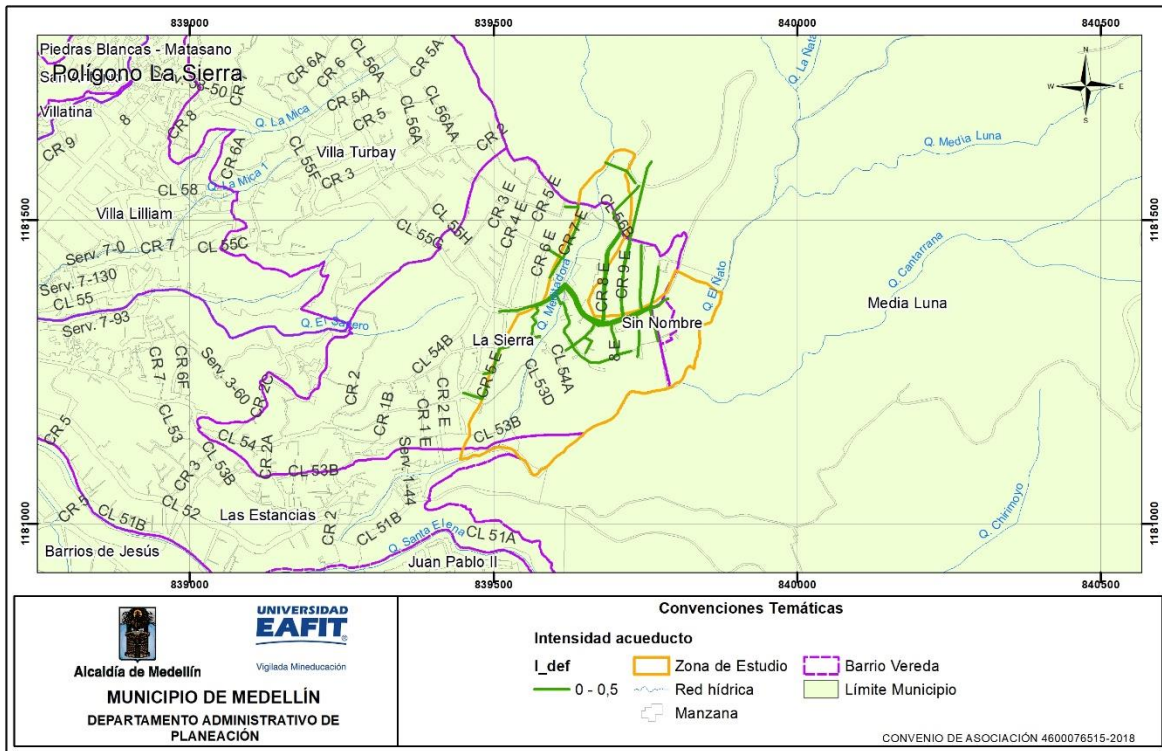


Figura 140. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.9 Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto

Para el polígono La Sierra, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos del acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 141).

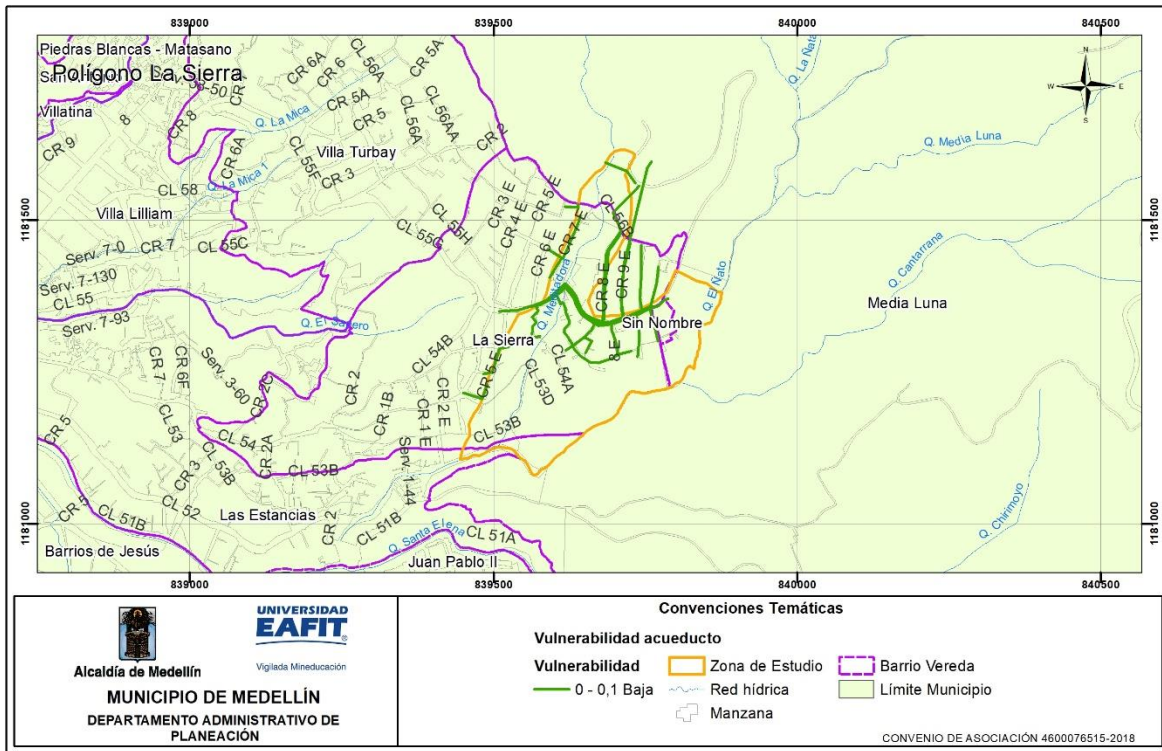


Figura 141. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.10 Cálculo de la fragilidad del alcantarillado

El sistema de alcantarillado también tiene elementos expuestos, el parámetro de fragilidad depende de las características del bien que sufre afectación, es decir, que la fragilidad estará en función, en este caso, del operador de red, el estado de conservación y del material de fabricación de la tubería, como concreto, PVC, polietileno, etc.

La fragilidad en la red del alcantarillado en el polígono La Sierra, arroja casi en su totalidad valores bajos debido a las características propias de la red y a que se hallaron pocos daños en esta línea vital, donde se transportan aguas residuales, recolectadas por EPM. En el polígono solo se presentan un alcantarillado con valor alto de fragilidad ($S > 0.7$), que corresponden a menos del 1% del sistema dentro de la zona delimitada por el movimiento en masa (Figura 142).

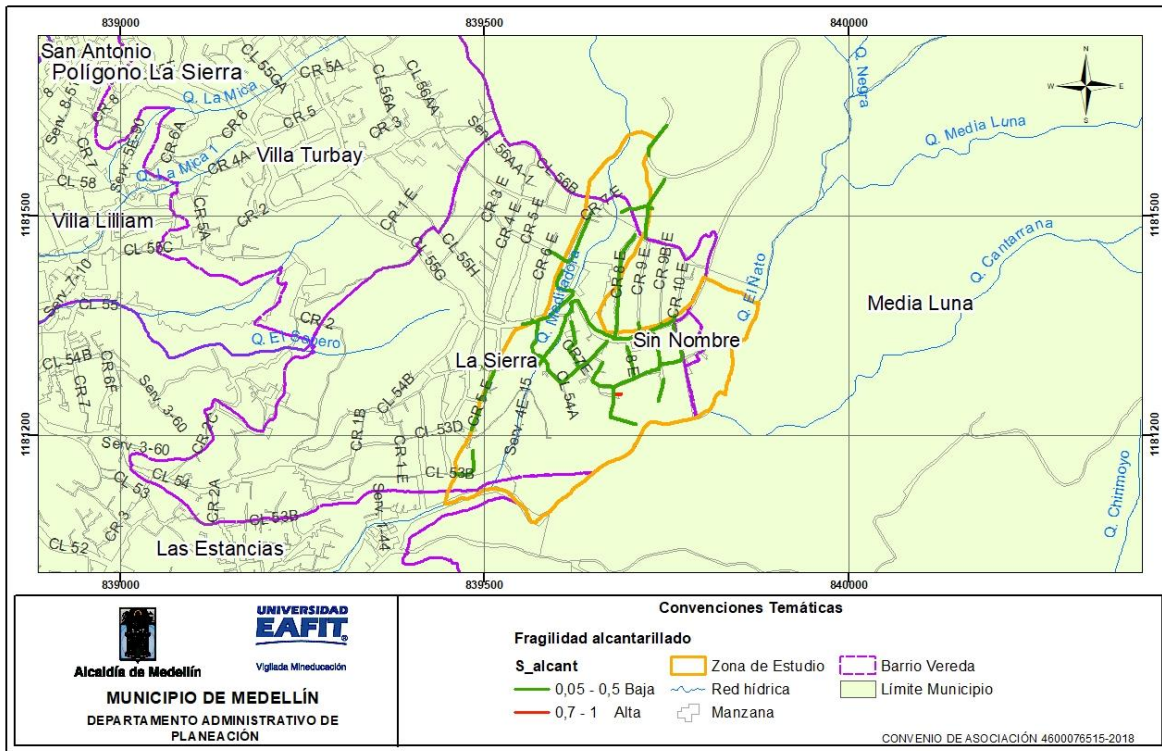


Figura 142. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.11 Cálculo de la intensidad del alcantarillado

El cálculo de la intensidad de la red de alcantarillado se evalúa en función de la tolerancia que tiene el material del mismo. Conforme a las características de los elementos que hacen parte de la red, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm.

La intensidad del alcantarillado del polígono La Sierra es baja, en toda el área de estudio. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm (Figura 143).

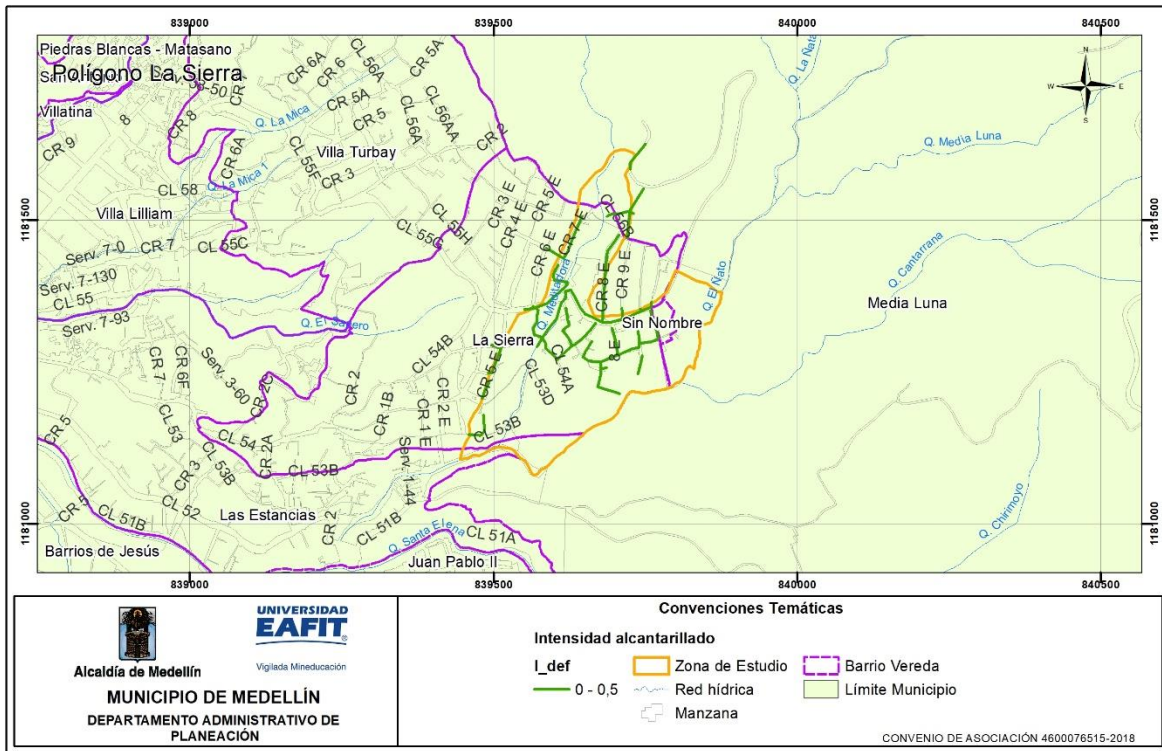


Figura 143. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.2.12 Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado

Para el polígono La Sierra, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente casi al 100% de los tramos del alcantarillado evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del alcantarillado con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 144). Solo se presenta un alcantarillado con vulnerabilidad alta debido a valores altos de fragilidad que derivan de daños puntuales en la red.

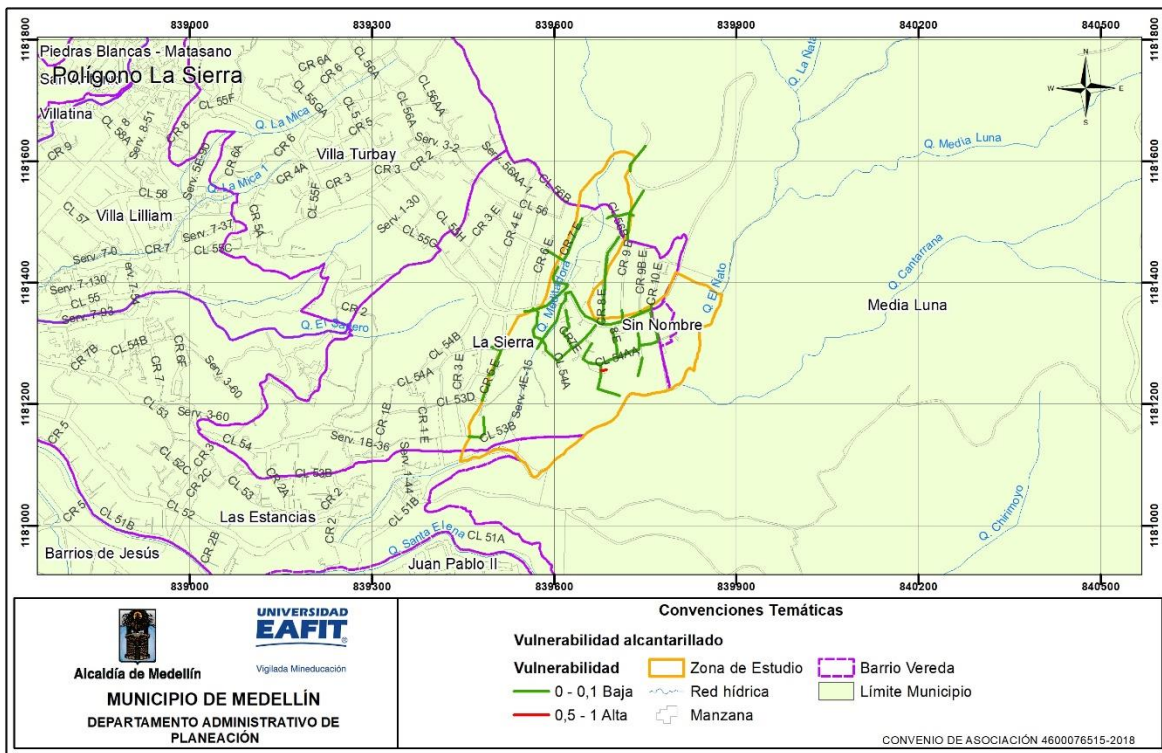


Figura 144. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

12.3 VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTO EN MASA

12.3.1 Análisis de vulnerabilidad de personas.

Para hallar el número de personas en vulnerabilidad, se parte de la vulnerabilidad calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo al análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT). Para la clasificación de los valores se toma como una vulnerabilidad alta el rango entre 0,5-1, media el rango de 0,2-0,5 y por último baja entre 0-0,2.

El anterior análisis arroja que para el polígono La Sierra hay un número estimado de 1201 personas en vulnerabilidad alta por movimientos en masa.

12.4 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR INUNDACIÓN

La vulnerabilidad de las construcciones consta de dos factores: la fragilidad y la intensidad. El primero de ellos corresponde a la respuesta del elemento expuesto ante determinada amenaza y depende de las características propias, mientras que la intensidad depende de las características del fenómeno amenazante (velocidad y profundidad de la mancha de inundación).

12.4.1 Cálculo de la fragilidad de las construcciones

Para la identificación de la fragilidad de las construcciones, se tuvo en cuenta la evaluación o análisis de los parámetros predominantes de las estructuras expuestas, los cuales son: tipología estructural, edad de la construcción, cantidad de niveles de la edificación y estado de conservación de la misma, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico con la siguiente expresión (Anexo 1).

$$S_e = 1 - \pi(1 - S_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt_inun})(1 - S_{con})(1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Donde se consideran seis parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones:

S_{tip} : Tipo de la edificación.

S_{alt_inun} : Altura de la edificación.

S_{con} : Conservación de la edificación.

S_{ed} : Edad de la edificación.

$S_{Acueducto}$: Caracterización del sistema de acueducto de la edificación.

$S_{Alcantarillado}$: Caracterización del sistema del alcantarillado de la edificación.

De acuerdo con la (Figura 145) , se puede concluir que las construcciones analizadas en el polígono denominado la Sierra Quebrada La Meditadora presentan fragilidades altas referenciadas en un rango entre 0.7 y 1, con un valor

representativo de 6 edificaciones, las cuales se encuentran localizadas entre la Cr 7E y Cl 55H.

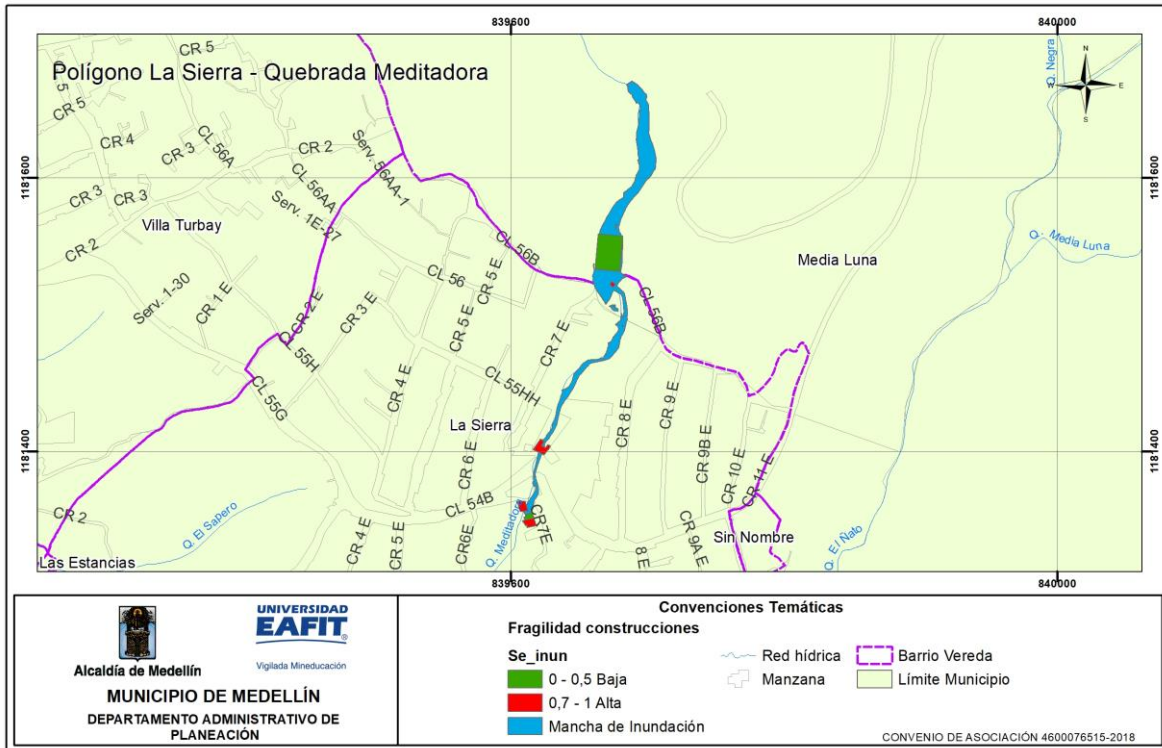


Figura 145 Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la La Meditadora.

La (Figura 146) corresponde a una construcción que se clasifica como mampostería no reforzada dentro de la tipología E, la cual se caracteriza por poseer un sistema estructural de muros cargueros. Esta tipología representa el 33% de las construcciones del polígono.



Figura 146. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

En la (Figura 147), se puede visualizar una estructura que tiene un valor de fragilidad alto asociado; la misma se puede clasificar como tipología D o estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, ya que, si bien no cuentan con un confinamiento adecuado, tienen elementos estructurales que hacen que la edificación sea menos vulnerable, como columnas de sección menor y cimentaciones de zapatas. Esta tipología se encuentra representada por el 33% de las construcciones del polígono.



Figura 147. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D).
Estructura ubicada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.4.2 Cálculo de la intensidad de las construcciones

En el polígono de estudio se presenta el evento amenazante de inundación, definidos en un escenario de desplazamiento de la lámina de agua, donde se calcula la intensidad, en función de la relación entre la presión de impacto del fluido y la presión límite soportada por la edificación, además se debe tener en cuenta la relación existente entre la profundidad de la lámina de agua y la altura de la edificación, descritos en el capítulo de Análisis Geotécnico.

En el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora se identifica una intensidad alta para todas las construcciones evaluadas; como se mencionó anteriormente dicha intensidad está en función de la profundidad de la lámina de agua y la presión de impacto (Figura 148).

Para estructuras de tipología ligeras (E), las cuales son el 33% del total de las construcciones evaluadas, la presión límite de la estructura es 5 Kpa, del mismo modo para una presión límite se presenta una velocidad límite.

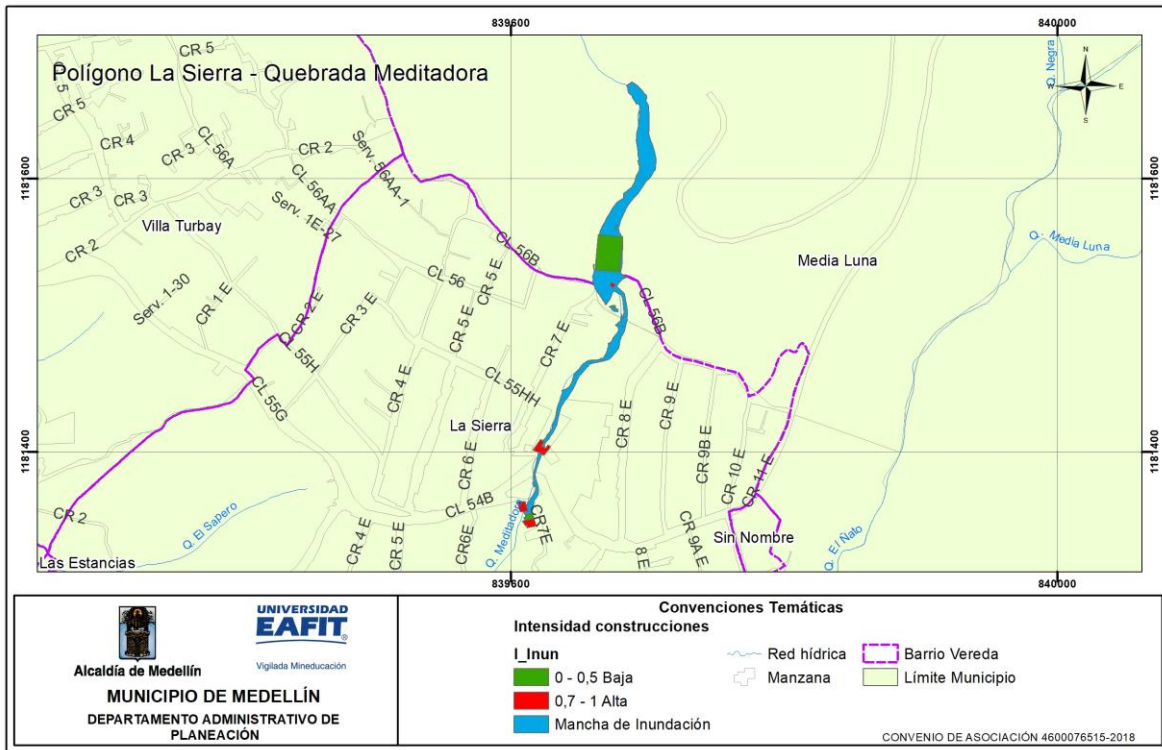


Figura 148. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.4.3 Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones

El grado de vulnerabilidad de una edificación se define como el factor de exposición de la misma a percibir daños a causa de amenazas naturales, conforme a esta premisa la vulnerabilidad se calcula teniendo presente los resultados obtenidos de la fragilidad y de la intensidad a partir de los parámetros representados en los ítems analizados anteriormente.

Los valores de la vulnerabilidad se determinan en los siguientes rangos: vulnerabilidad baja, cuando se obtienen resultados menores o iguales a 0.1, vulnerabilidad media cuando se obtienen resultados entre 0.1 y 0.5, y vulnerabilidad alta, cuando los resultados sobrepasan de 0.5 todo esto de acuerdo a los

parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.4 (Anexo 1)

La vulnerabilidad alta corresponde al 57% de las edificaciones evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y medios a altos de intensidad, las construcciones con esta vulnerabilidad se localizan entre la Cr 7E y Cl 55HH (Figura 149).

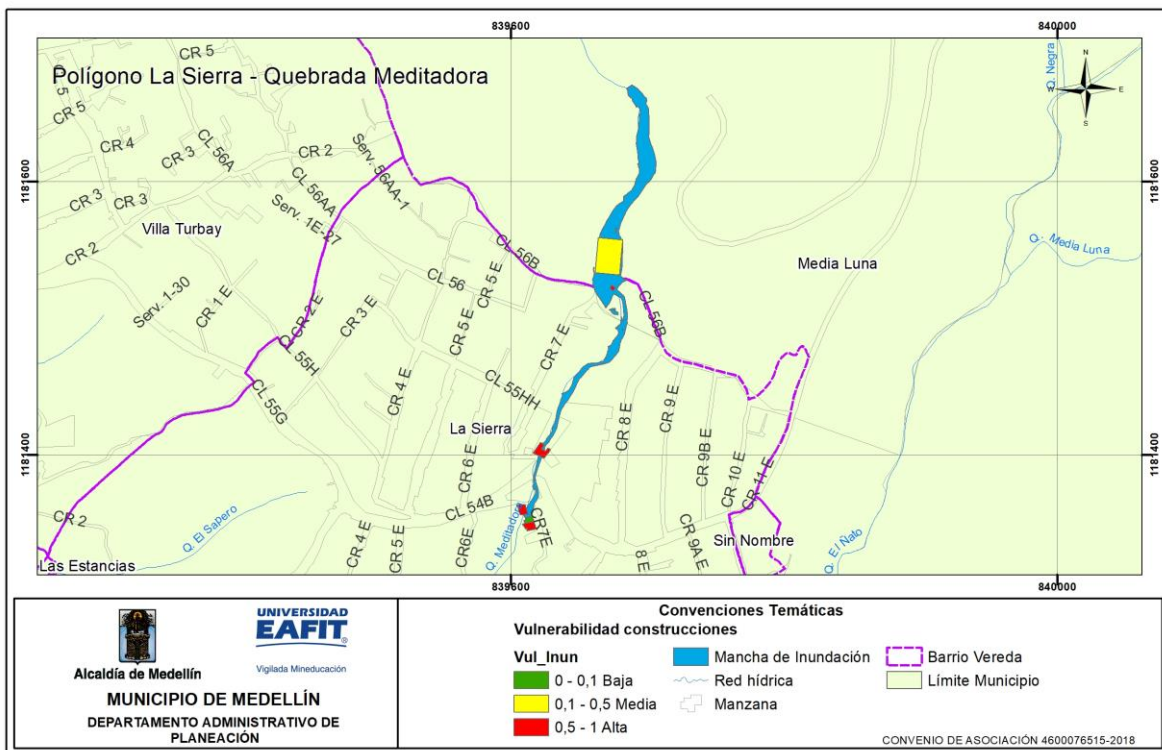


Figura 149. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR INUNDACIÓN

Similar al procedimiento, los parámetros y características que se utilizan para determinar la vulnerabilidad en construcciones, se deberá calcular la fragilidad conforme la información obtenida de campo y los criterios de medición en cada una de las denominadas líneas vitales (vías, energía, acueducto y alcantarillado, estos últimos dos cuando se identifican daños visibles en puntos específicos de la red) y luego se procede a realizar la evaluación de la intensidad.

12.5.1 Cálculo de la fragilidad de las líneas vitales – energía

La fragilidad de la línea vital energía se mide teniendo en cuenta los parámetros de carga y estado de las redes localizadas en la zona de estudio del polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, en el actual polígono se encontró 1 poste el cual presenta una fragilidad baja con valores entre 0 y 0.5; este poste se encuentra localizado entre la CI 54B y Cr 7E (Figura 150).

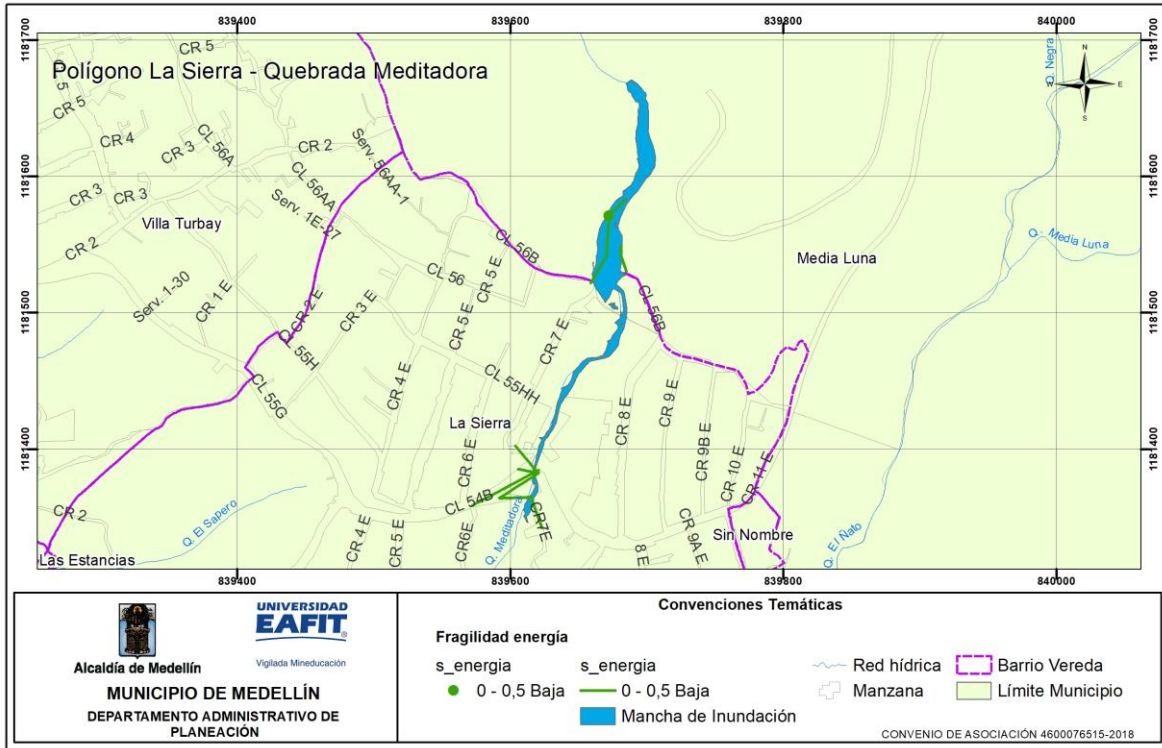


Figura 150. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.2 Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía

Para la determinación de la intensidad en el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la velocidad y la altura de la lámina de agua (Anexo 1).

La intensidad baja de las líneas vitales energía en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora está representada con el 100% de las redes evaluadas, este se localiza entre la CI54B y la Cr 7E. Dicho resultado se debe a la relación que hay entre la mancha de inundación y la altura nominal de los postes, lo que indica

que para los elementos que se encuentran dentro de la zona de viaje de la inundación, el mecanismo de impacto puede ser enterramiento e impacto (Figura 151).

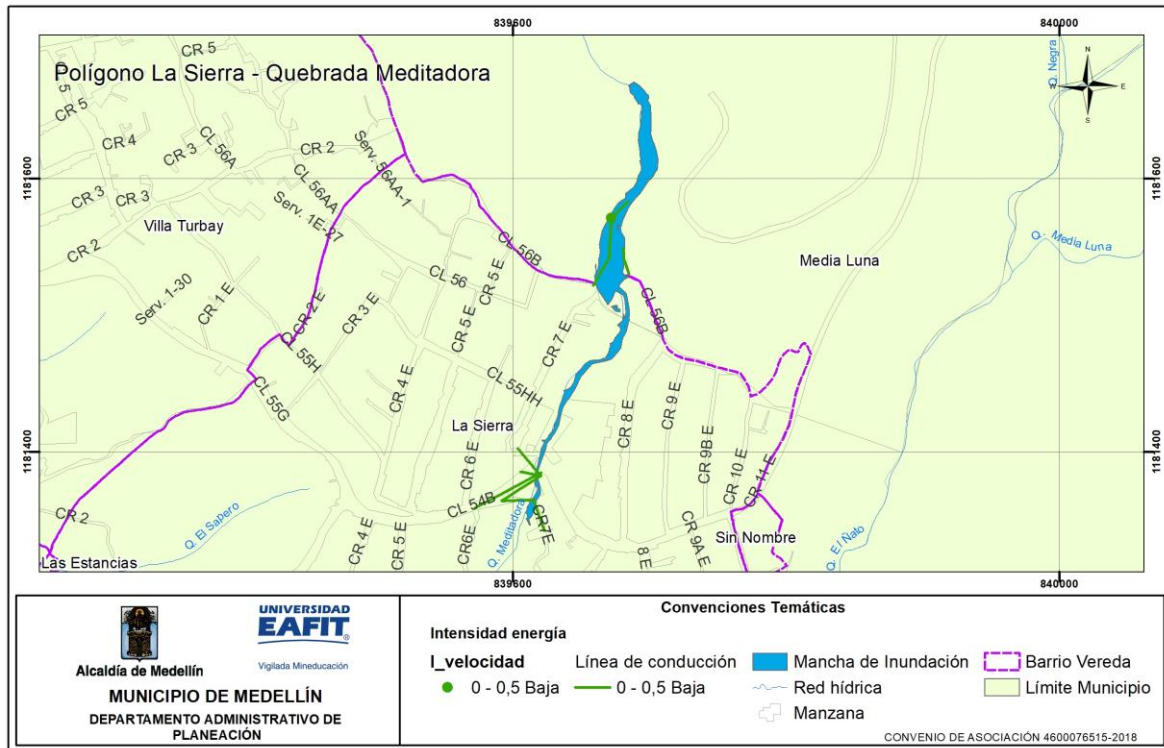


Figura 151. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.3 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía

La vulnerabilidad baja de las líneas vitales energía en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora está representada con el 100% de las redes evaluadas, este se localiza (Figura 152).

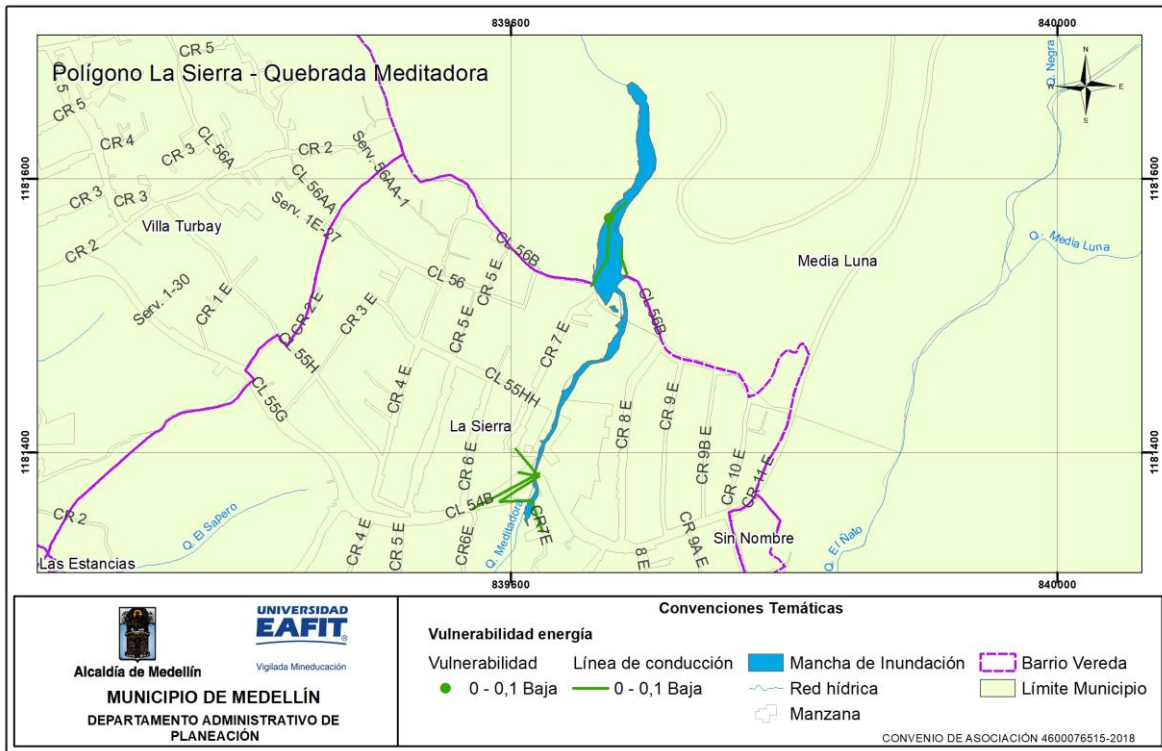


Figura 152. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.4 Cálculo de la fragilidad de las líneas vitales – vías

Para la valoración de la fragilidad de las vías, se consideran los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y presencia de daños. La tipología de estas vías puede ser: vehicular, puente vehicular o peatonal, sendero peatonal a nivel y a desnivel (con escaleras).

Las vías de acceso del polígono que están representadas con color rojo son vías con fragilidad alta, que presentan daños de rotura y asentamientos, tienen valores de fragilidad entre 0.7 – 1 y están representadas por el 17% de las vías ubicadas en el norte y centro de la quebrada, las vías representadas con color amarillo tienen valores de fragilidad media referenciados en un rango entre 0.5 y 0.7, estas representan el 16% de las vías evaluadas y las vías representadas con color verde representan tramos con fragilidad baja referenciados en un rango entre 0 y 0.5, representando el 67% de las vías evaluadas. (Figura 153).

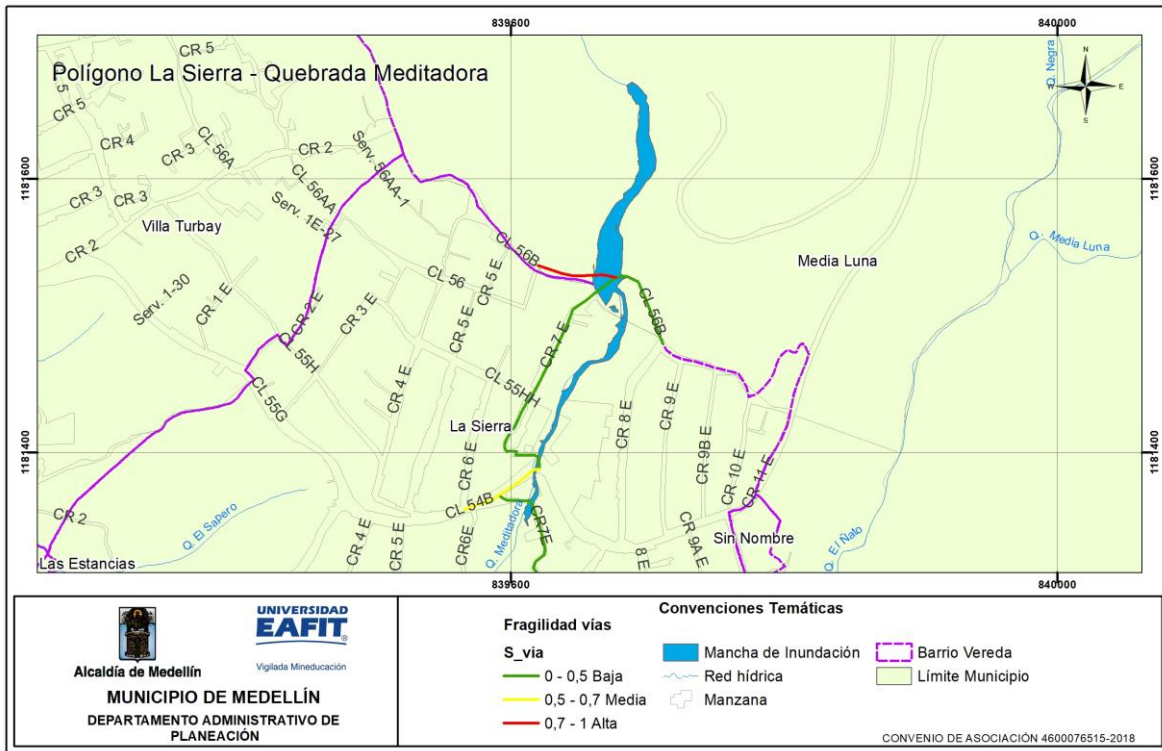


Figura 153. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por inundación, identificadas en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.5 Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías

La determinación del parámetro de intensidad para redes viales se define a partir de la ocupación por la mancha de inundación que afecta el ancho de vía invadido (determinado a partir de la distancia de viaje calculada de acuerdo con los métodos presentados en el capítulo de amenaza de la Metodología General).

La intensidad alta corresponde al 50% de las vías evaluadas, las cuales se definen a partir del ancho invadido u ocupado por la mancha de inundación, en el caso de registrarse este evento, la vía con esta intensidad se localiza en el centro y el sur del polígono (Figura 154). La intensidad baja corresponde al 50% de las vías evaluadas, las cuales se definen a partir del ancho invadido u ocupado por la mancha de inundación, en el caso de registrarse este evento, la vía con esta intensidad se localiza en el norte del polígono.

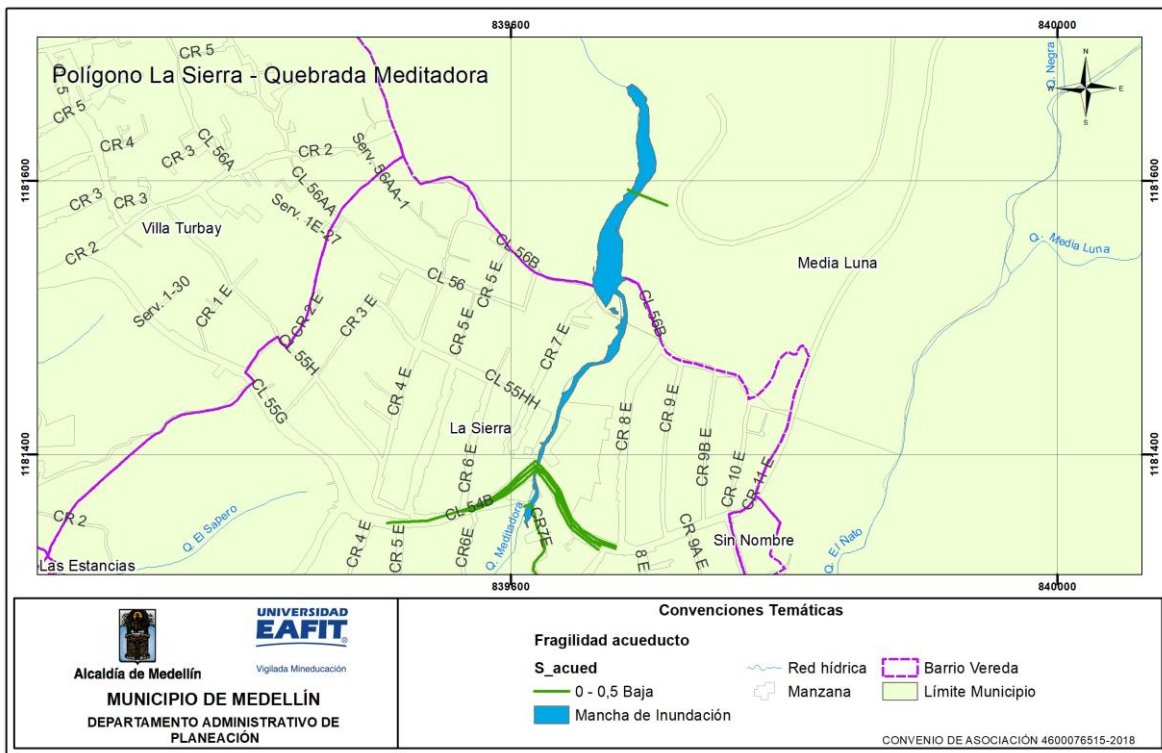


Figura 156. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.8 Cálculo de la intensidad de la línea vital – acueducto.

Teniendo en cuenta que el fenómeno de inundación impone una carga uniforme a lo largo de la red del acueducto, la determinación de los umbrales tolerables está dada en función del diámetro de la tubería.

La intensidad de la red de acueducto del polígono La Sierra la Quebrada La Meditadora es baja en toda el área de estudio. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de acuerdo al diámetro de la tubería (Figura 157).

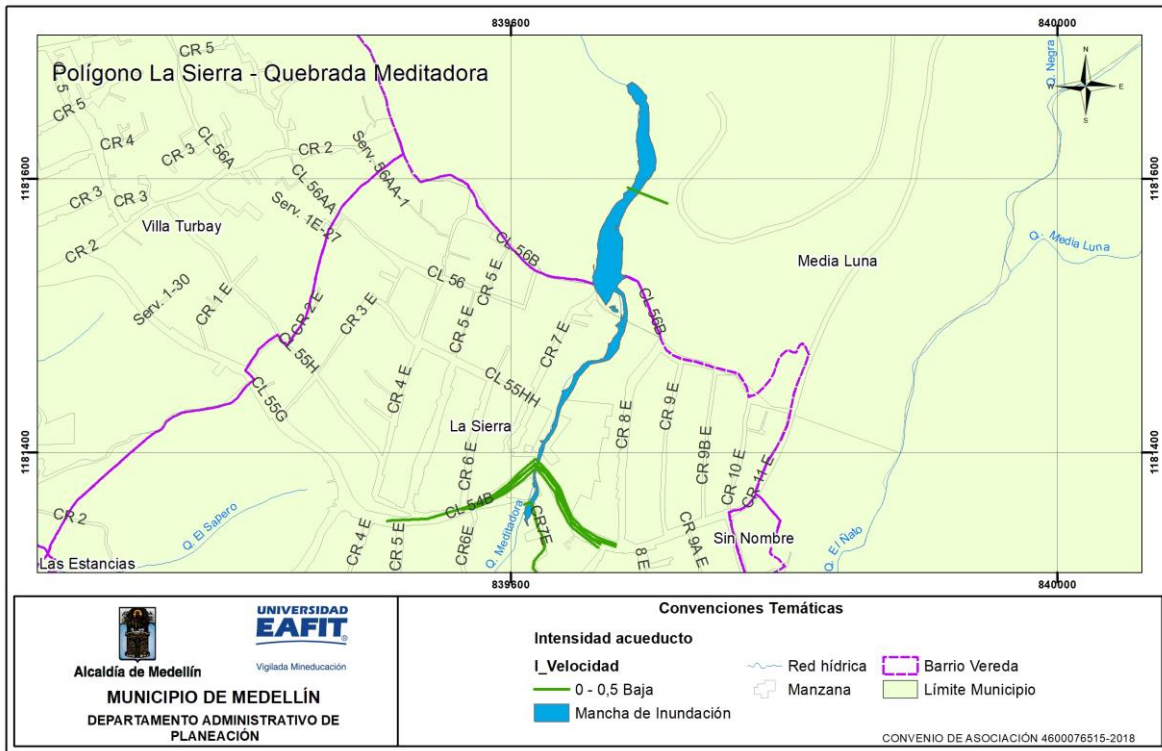


Figura 157. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.9 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – acueducto.

Para el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos del acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y bajos a medios de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se localizan en el sector central, correspondiente a la carrera 33D.(Figura 158).

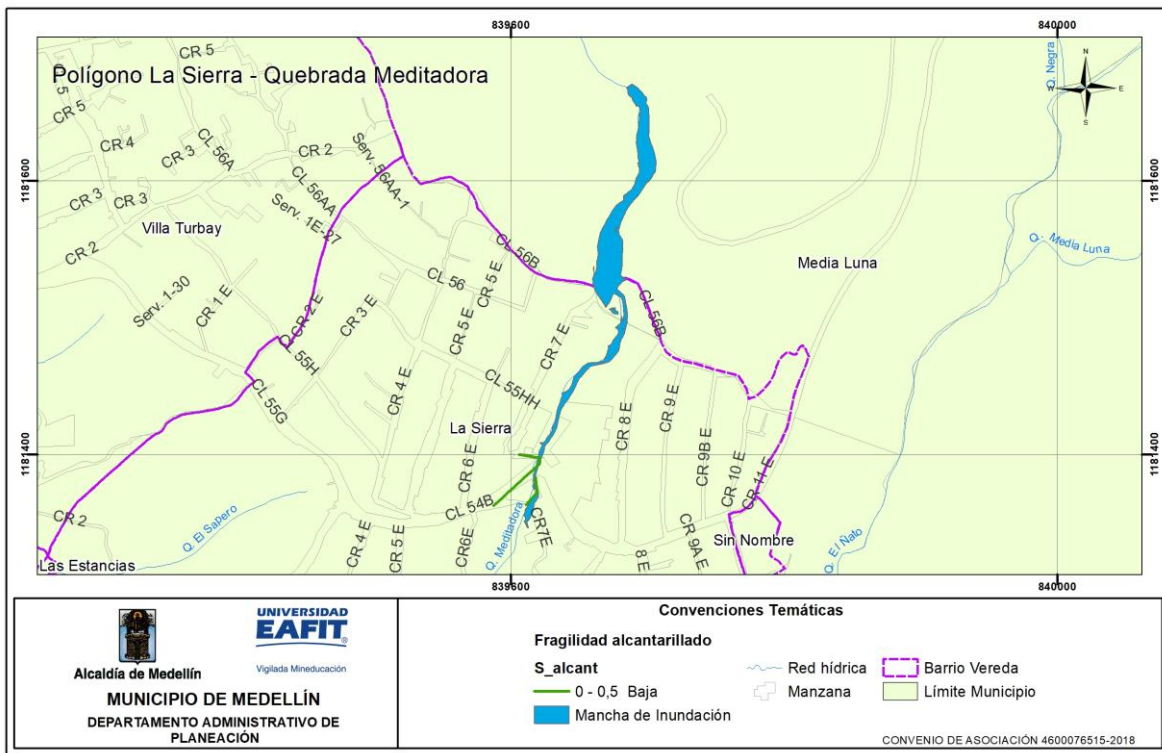


Figura 159. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.5.11 Cálculo de la intensidad de la línea vital – alcantarillado.

El cálculo de la intensidad de la red de alcantarillado se evalúa en función de la tolerancia que tiene el material del mismo. Conforme a las características de los elementos que hacen parte de la red, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm.

La intensidad del alcantarillado del polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, es baja en la totalidad del polígono. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de la tubería (Figura 160).

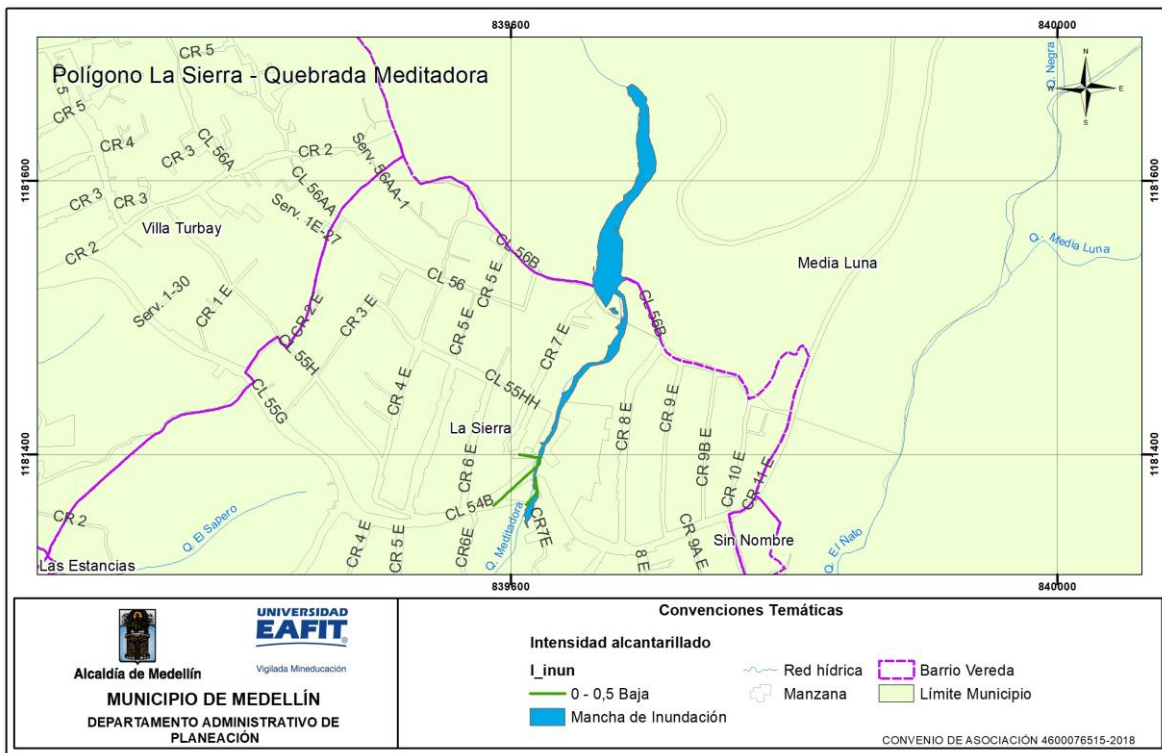


Figura 160. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La meditadora.

12.5.12 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – alcantarillado.

Para el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos de la red de alcantarillado evaluado, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y bajos a medios de intensidad. (Figura 161).

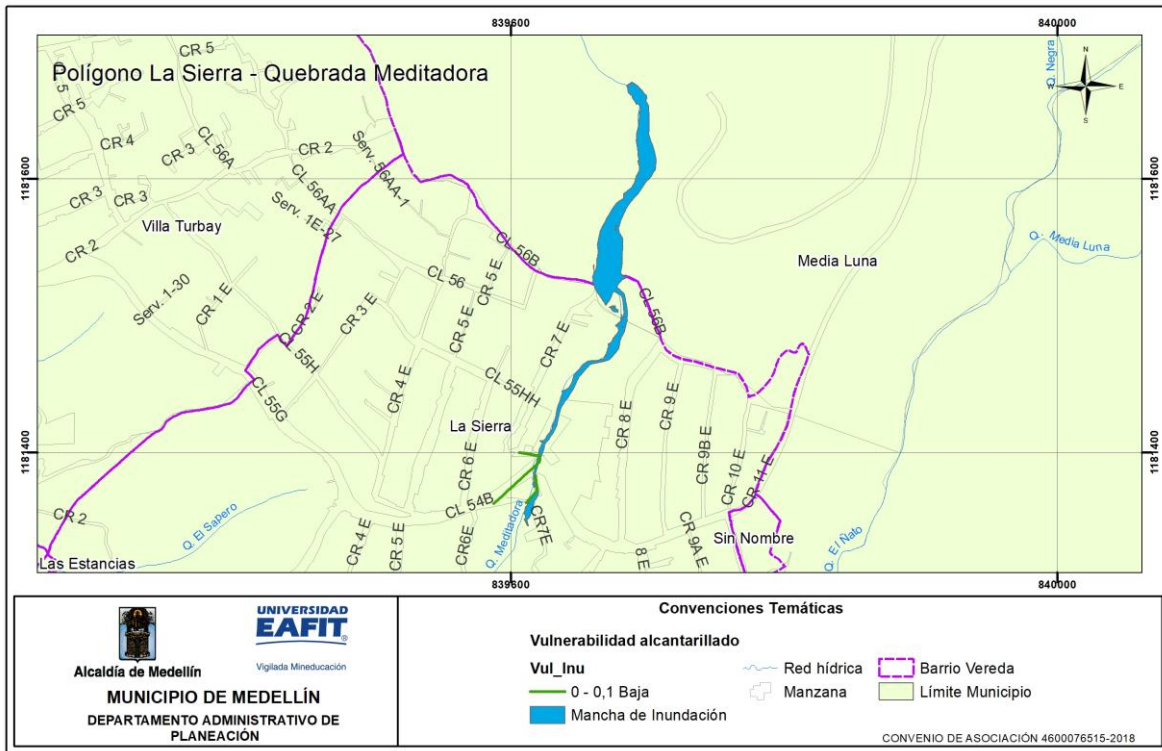


Figura 161. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

12.6 VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR INUNDACIÓN

12.6.1 Análisis de vulnerabilidad de personas

Para hallar el número de personas en vulnerabilidad, se parte de la vulnerabilidad calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo al análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT). Para la clasificación de los valores se toma como una vulnerabilidad alta el rango entre 0.5-1, media el rango de 0.2-0.5 y por último baja entre 0-0.2.

El anterior análisis arroja que para el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora hay un número estimado de 24 personas en vulnerabilidad alta por inundación.

12.7 DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.

- Las tipologías de las construcciones encontradas en un alto porcentaje, son estructuras ligeras con una fragilidad alta. Por lo tanto, son edificaciones que no cumplen con la Norma Sismo Resistente de 2010 NSR-10.
- Las cimentaciones de las estructuras, en su gran mayoría son poco profundas y en algunos casos, no existen (anexo 5).
- En las construcciones evaluadas se presentan fallas en los morteros de pega, se podría decir que en su mayoría corresponden a morteros con permeabilidad entre media y alta, lo que genera como consecuencia humedades interiores, sobre todo en zonas donde el viento golpea en momentos de lluvia.
- Las fachadas en ladrillo no se encuentran protegidas (hidrofugadas) o con algún recubrimiento, brindando la posibilidad de generar eflorescencias, manchas y ensuciamiento.
- En general la mampostería de las viviendas presenta procesos degradatorios incipientes y se identifica, presencia de cripto eflorescencias aisladas.
- Se observan grietas sin tratamiento, muchas de ellas asociadas a uniones entre distintos materiales de cerramiento (ladrillo, ventanas, puertas).
- Los tipos de cubiertas en losa de concreto, presentan permeabilidad, lo cual generan humedades al interior de las construcciones, lo anterior aplica para edificaciones de un solo nivel con dicho tipo de cubierta.
- Se observaron humedades en general en sobre cimientos, ocasionado por aguas de escorrentía.
- Se evidencio deterioro y desgaste propio del material en cubiertas en fibrocemento, zinc y barro, por malos procesos constructivos y falta de mantenimiento de los sistemas de cubiertas de las estructuras.
- En algunas edificaciones se realiza la recolección de las aguas lluvias de techos mediante bajantes, pero estos son descargados al terreno natural por falta de una red de alcantarillado en la cercanía o desconocimiento del habitante, humedeciendo el suelo y por ende afectando las fundaciones y favoreciendo la amenaza.

13. ZONIFICACIÓN DE RIESGO

De acuerdo a lo planteado en la metodología, se realiza el cálculo del riesgo de dos maneras. La primera, para las construcciones y líneas vitales de manera individual, a partir de la información recolectada en campo por cada uno de los elementos y que se encuentra en una base de datos con los debidos registros fotográficos. Este cálculo se enfoca hacia las acciones particulares en los elementos expuestos.

Por otro lado, se tiene el cálculo del riesgo por polígono a partir de la información de la magnitud de los movimientos (velocidad y profundidad) y de la probabilidad (factor de seguridad). Este último cálculo se enfoca hacia la planificación integral del sector y para la definición de acciones en congruencia con lo definido en el POT del municipio.

13.1 RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

En el análisis del riesgo por movimientos en masa se presenta tanto en análisis individual de los elementos expuestos como el análisis de riesgos por polígono.

13.1.1 Riesgo de elementos expuestos

Una vez realizados los análisis de campo y laboratorio para todas las variables involucradas en los modelos de riesgo, se obtiene la zonificación de riesgo por movimientos en masa, para las construcciones y líneas vitales del polígono La Sierra, de acuerdo con la tabla de decisión (Tabla 62) como que se presenta a continuación.

Tabla 62. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

13.1.1.1 *Análisis de riesgo de las construcciones*

En el polígono La Sierra, se evidencia un nivel de riesgo alto para las construcciones, que corresponde al 89% de las edificaciones, las cuales se

caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza. Por otro lado, el 11% restante presenta un valor de riesgo bajo, caracterizadas por valores bajos a medios de amenaza, estas construcciones se ubican al norte del polígono de estudio (Figura 162).

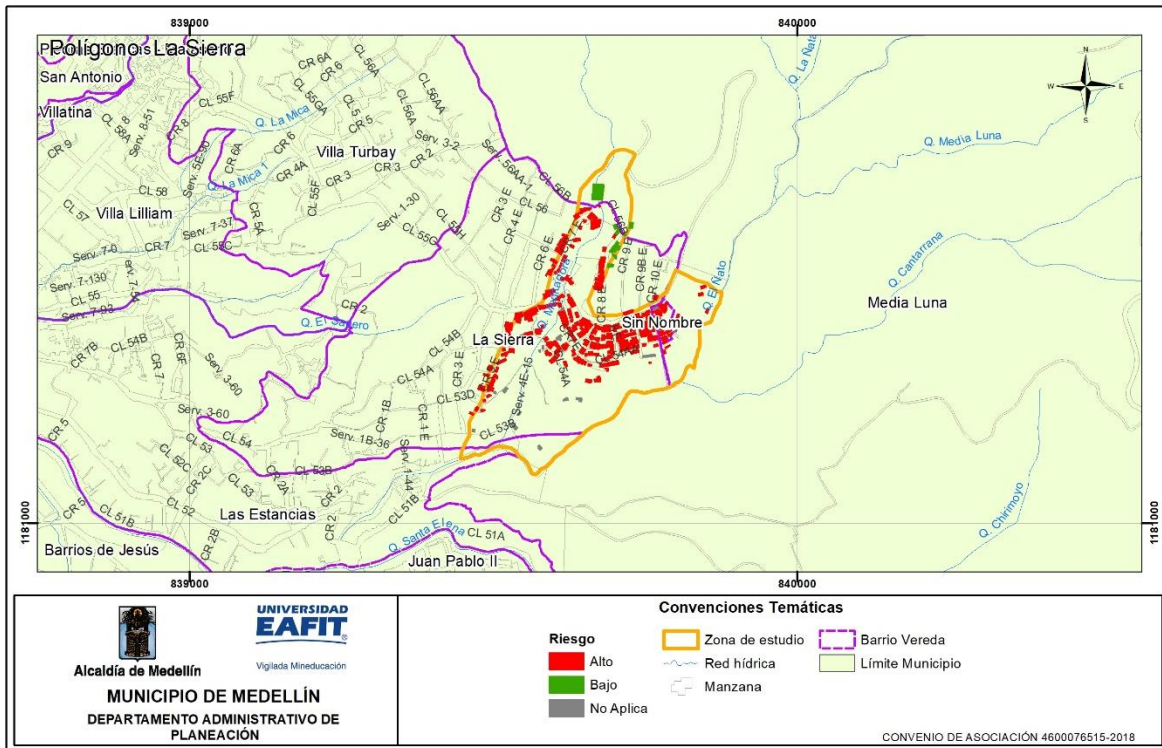


Figura 162. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

13.1.1.2 Análisis de riesgo de línea vital - energía

En el polígono La Sierra, se evidencia un nivel de riesgo alto para las redes de energía, que corresponde al 61% de los postes evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, los postes con este riesgo se localizan en el centro y sur del polígono (Figura 163).

El riesgo medio corresponde al 28% de los postes evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, los postes con este riesgo se localizan en el centro del polígono.

El riesgo bajo corresponde al 11% de los postes evaluados, estos se caracterizan por poseer valores bajos a medios de vulnerabilidad o de amenaza, estos se ubican principalmente al norte del polígono.

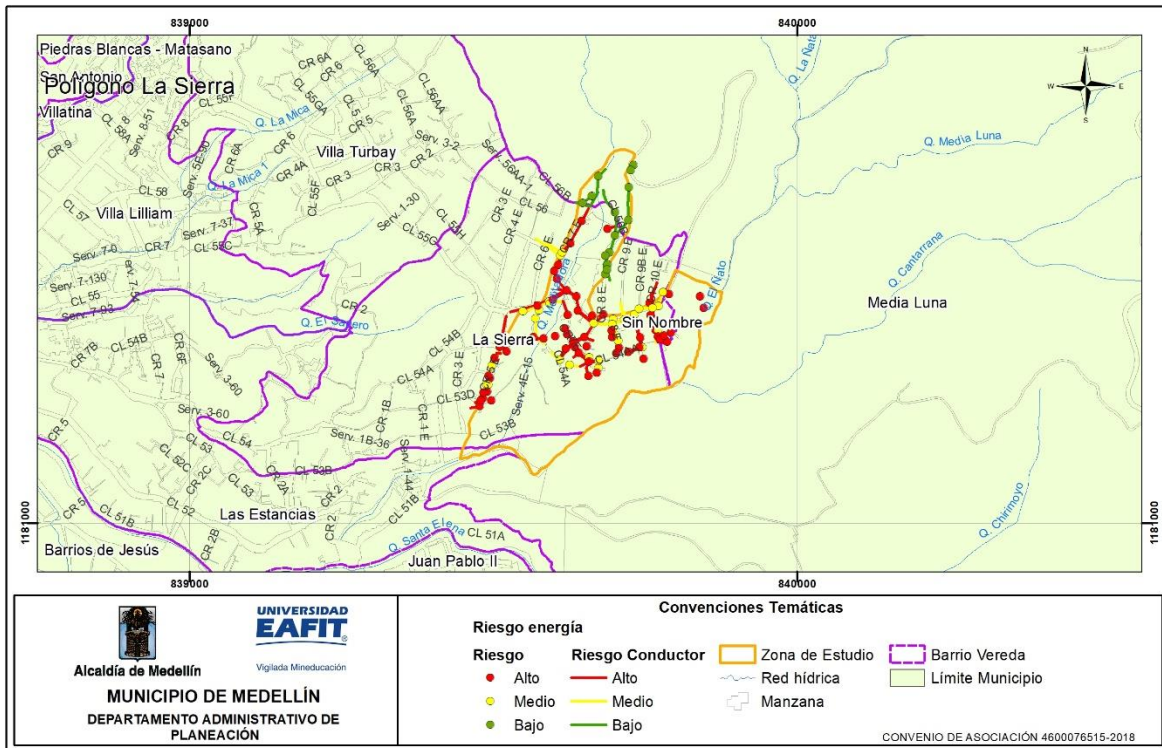


Figura 163. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

13.1.1.3 Análisis de riesgo de línea vital - vías

En el polígono La Sierra, se evidencia un nivel de riesgo alto para la red vial, que corresponde al 45% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y altos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en la totalidad del polígono (Figura 164).

El riesgo medio corresponde al 10% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en diferentes puntos de todo el polígono.

El riesgo bajo corresponde al 45% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios a altos de vulnerabilidad y bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan centro y el norte del polígono.

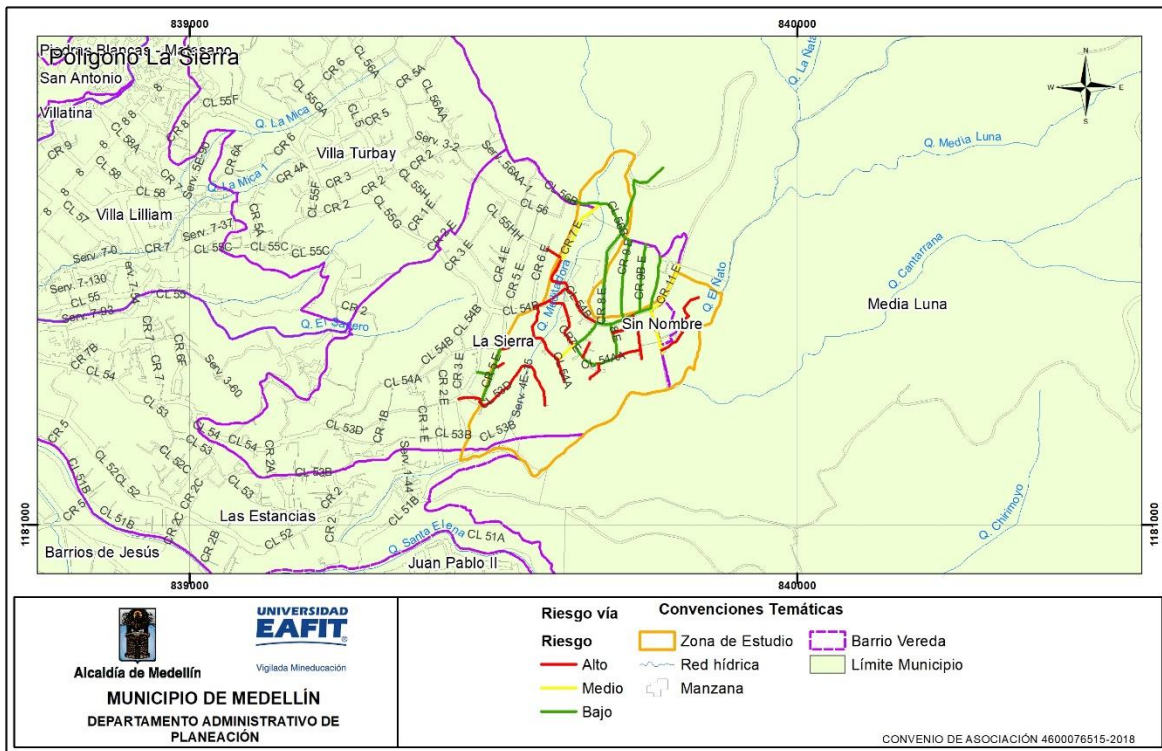


Figura 164. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vías por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

13.1.1.4 Análisis de riesgo de línea vital - acueducto

El riesgo medio para la red acueducto, corresponde al 14%, las cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, los tramos de acueducto con este riesgo se localizan en el centro y oeste del polígono (Figura 165).

El riesgo bajo corresponde al 86% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en la totalidad del polígono.

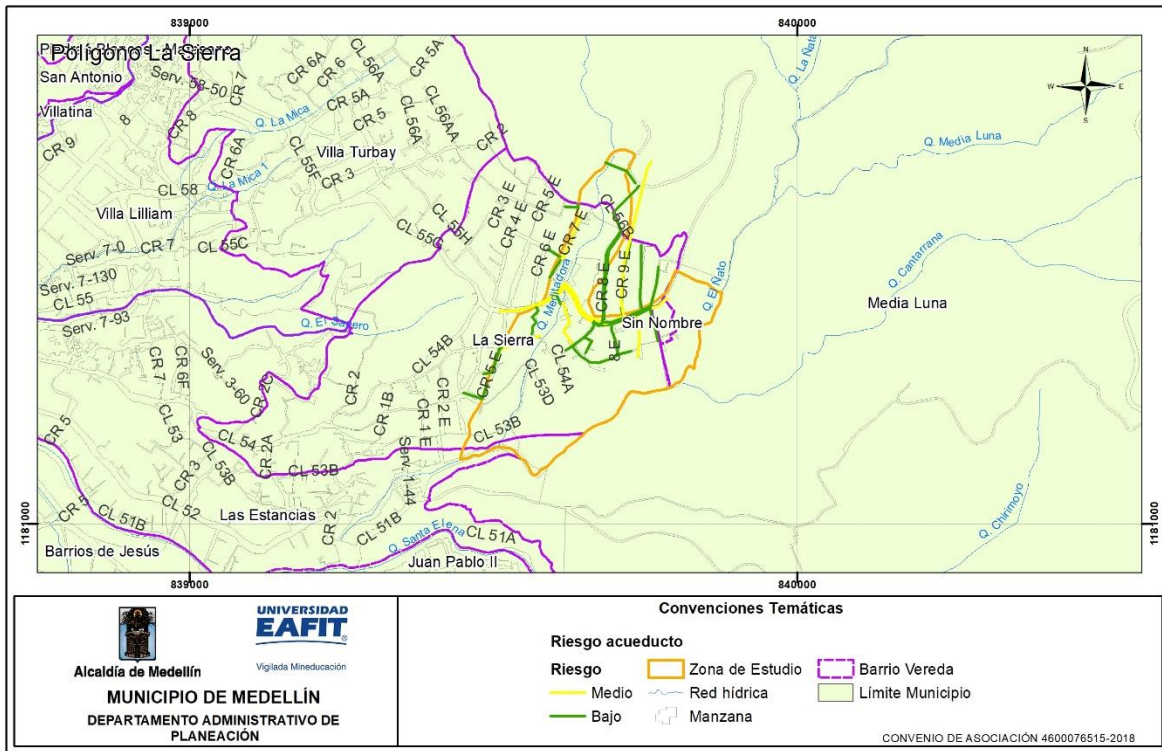


Figura 165. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

13.1.1.5 Análisis de riesgo de línea vital - alcantarillado

En el polígono La Sierra, se evidencia un nivel de riesgo en un solo tramo que corresponde a menos del 1% de las líneas evaluadas, la cual se caracteriza por presentar un valor alto de vulnerabilidad y medio para la amenaza, esta se localiza debajo de la CL 54AA.

El riesgo medio para la red acueducto, que corresponde al 38%, las cuales se caracterizan por presentar valores medios de vulnerabilidad y medios para la amenaza, los tramos de alcantarillado con este riesgo se localizan en toda la extensión del polígono (Figura 148).

El riesgo bajo corresponde al 61% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en la totalidad del polígono.

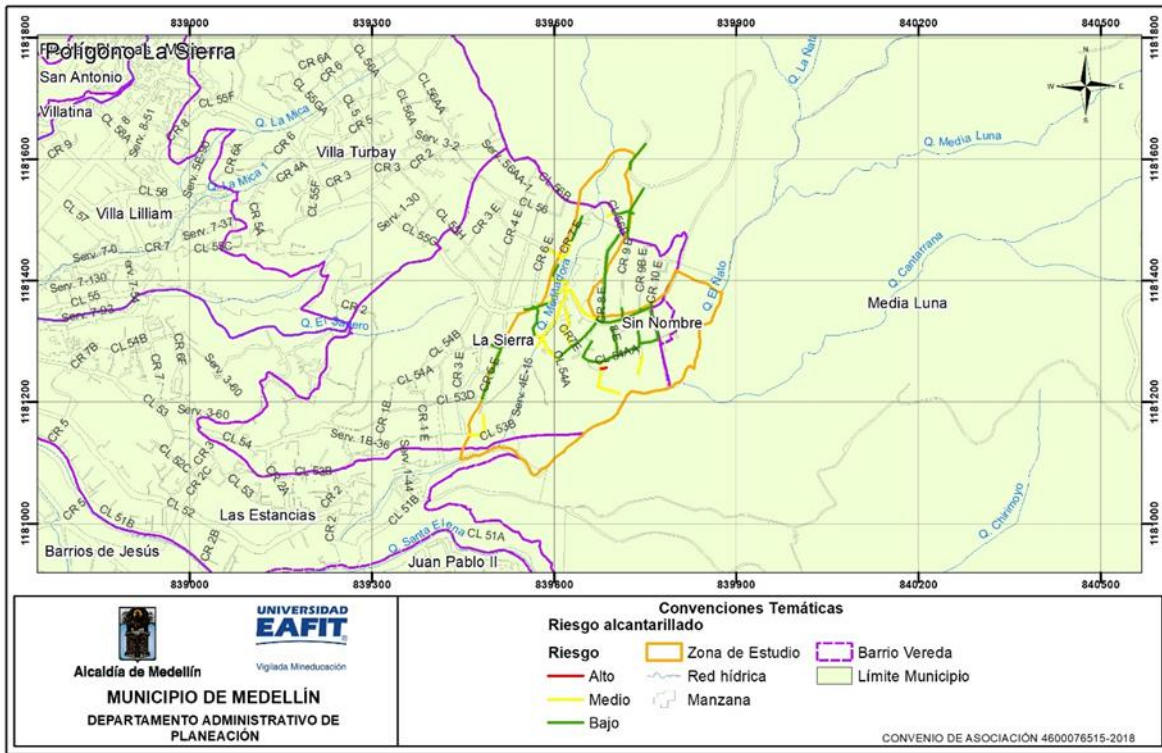


Figura 166. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono La Sierra.

13.1.2 Análisis de riesgo de personas.

Para hallar el número de personas en riesgo, se parte del nivel de riesgo calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.3.1. (Anexo 1.), del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo al análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT.

El anterior análisis arroja que para el polígono La Sierra hay un número estimado de 1201 personas en riesgo alto.

13.1.3 Riesgo por polígono

Teniendo en cuenta la zonificación de amenazas obtenidas, al igual que la profundidad y velocidad de los procesos morfodinámicos probables a generarse, se establece que para el polígono La Sierra se obtienen zonas de riesgo alto, medio y bajo, como se describen teniendo en cuenta la siguiente tabla de decisión (Tabla 63 y Figura 167).

Tabla 63. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Alta	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Media	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Baja	0.7	Bajo
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Alta	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Media	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Baja	0.4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0.1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0.1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0.1	Bajo

Riesgo alto no mitigable: Corresponden a aquellas áreas de alto riesgo por movimientos en masa, donde la implementación de medidas de mitigación estructural resultan de mayor complejidad y costo técnico-económico, que llevar a cabo el reasentamiento de la población y equipamiento urbano respectivo.

Dentro de esta categoría se ubica en tres sectores especializados en la categoría de amenaza alta asociada a la vertiente derecha de la quebrada El Ñato, el patrón de vivienda característico de esta zona es disperso. A partir de los análisis de estabilidad se establece que los movimientos en masa exhiben una probabilidad alta de ocurrencia, caracterizados por ser rápidos y de profundidades moderadas a altas, por lo que se clasifican como de riesgo alto. Se destaca que debido al análisis costo – beneficio en relación a las obras propuestas en el presente estudio para garantizar la estabilidad para la permanencia de los elementos expuestos allí localizados, se define como de alto riesgo no mitigable.

Riesgo alto mitigable: Son aquellas áreas de alto riesgo por movimientos en masa en las cuales el fenómeno es controlable a través de la implementación de obras de mitigación y/o protección (medidas estructurales), cuyas consecuencias de tipo económico, ambiental, financiero y social traen consigo un costo razonable y no se hace necesario el reasentamiento de la población.

Dentro de esta categoría se ubica el sector localizado entre la prolongación de la calle 53D y la calle 54B y entre carreras 6E y 7AE, sobre ambas márgenes de la quebrada La Meditadora. A partir de los análisis de estabilidad se establece que los movimientos en masa tienen una probabilidad alta de ocurrencia, y exhiben profundidades de moderadas a altas y velocidad alta, por lo que se clasifican como de riesgo alto. Se destaca que debido a que las obras propuestas en el presente estudio garantizan la estabilidad y la permanencia de los elementos expuestos allí localizados se define como de alto riesgo mitigable.

Riesgo Medio: Áreas las cuales los procesos de inestabilidad o cualquier otro fenómeno pueden ser controlados con medidas de mitigación menores, que garanticen la seguridad de las edificaciones ubicadas en el área de influencia de los fenómenos.

Como zona de riesgo medio se ubica en cuatro sectores el primero y de mayor extensión ubica hacia la zona central del polígono, delimitado aproximadamente entre las calles 54AD y 54B y carreras 8E y 11E, el segundo se identifica entre las calles 53D y 54B y calles 5E y 6E, el tercero se ubica al norte, sobre la margen derecha de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 7E y el cuarto sector corresponde al polígono ubicado sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 8E. A partir de los análisis de estabilidad se establece que los movimientos en masa tienen una probabilidad media de ocurrencia, exhibiendo profundidades de moderadas a altas y velocidad alta, Igualmente, las obras propuestas mejoran la estabilidad de la zona, disminuyendo los niveles de riesgo.

Riesgo Bajo: Corresponde a aquellas áreas donde sólo se requieren medidas mínimas de prevención y/o de control de la amenaza y vulnerabilidad.

Las zonas de riesgo bajo, coinciden con las identificadas como de amenaza baja y ocupadas por infraestructura. En el área del polígono se ubica al norte correspondiente a la placa polideportiva y al sector ubicado sobre calle 56b con carrera 8E. Se destaca que debido a que la probabilidad de ocurrencia de

movimientos en masa es baja, la vulnerabilidad es poco representativa por lo que el nivel de riesgo se determina en este nivel.

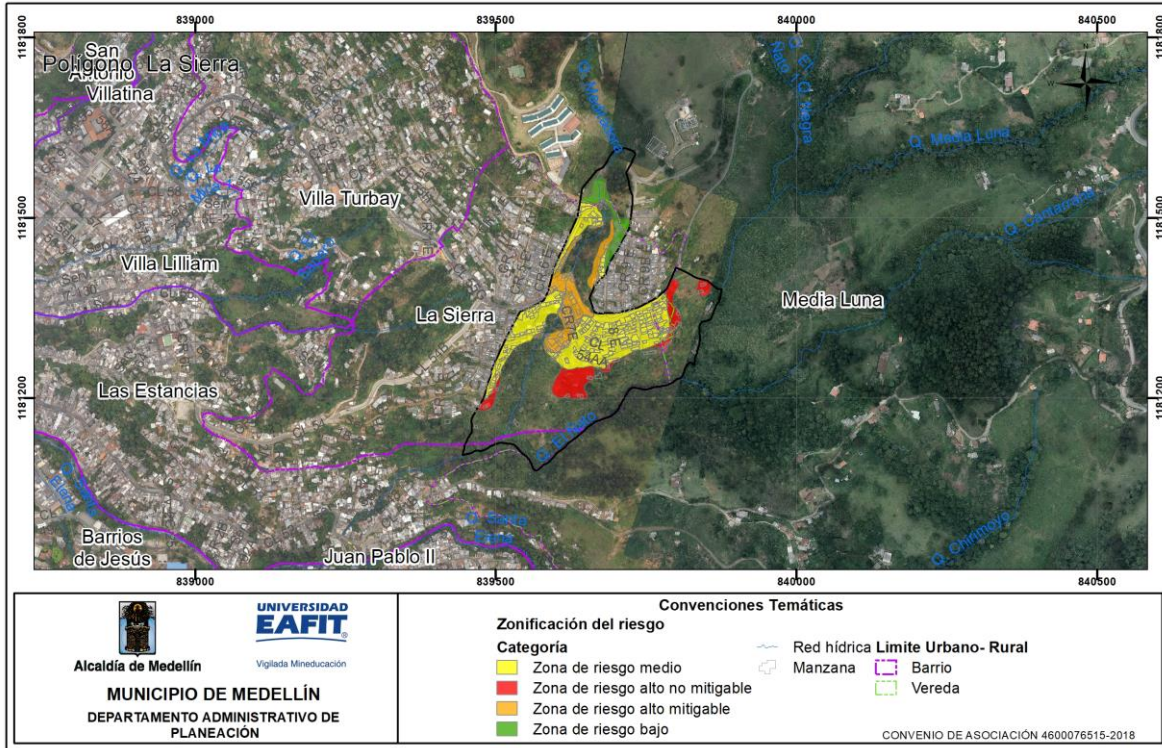


Figura 167. Mapa de riesgo por polígono del polígono La Sierra

Adicionalmente, las categorías del riesgo definidas en este informe, pueden variar en función de la amenaza, la cual es un proceso dinámico en el tiempo, y cuya condición puede cambiar de acuerdo con la recurrencia de movimientos en masa ocasionados por prácticas inadecuadas para la construcción y mal manejo de aguas lluvias y residuales.

Así mismo, una vez se ejecuten las obras propuestas, el grado de riesgo en categorías alto y medio, disminuyen a riesgo bajo, es por esto que se deben atender las recomendaciones que se presentan en el siguiente capítulo.

13.2 RIESGO POR INUNDACIONES

En el análisis del riesgo por inundación se presenta tanto en análisis individual de los elementos expuestos como el análisis de riesgos por polígono.

13.2.1 Riesgo de elementos expuestos.

Una vez realizados los análisis de campo y laboratorio para todas las variables involucradas en los modelos de riesgo, se obtiene la zonificación de riesgo por inundación, para las construcciones y líneas vitales del polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, como que se presenta a continuación.

13.2.1.1 Análisis de riesgo de las construcciones

En el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, se evidencia un nivel de riesgo alto para las construcciones, que corresponde al 100% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, las construcciones con este riesgo se localizan a lo largo del polígono (Figura 168).

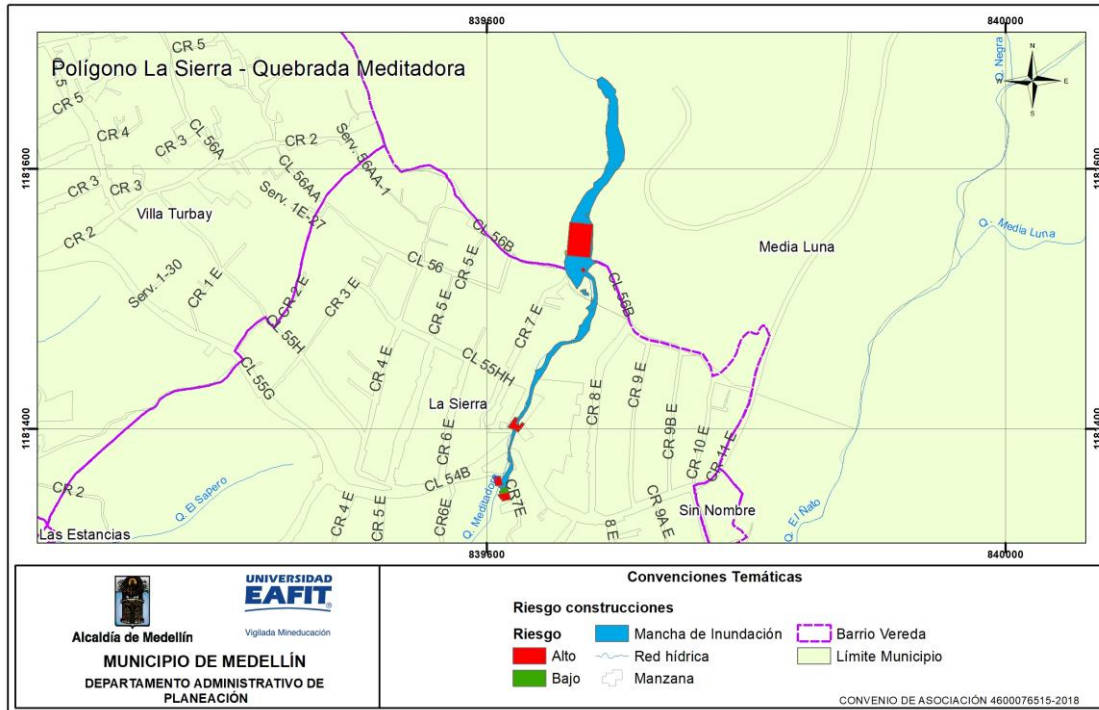


Figura 168. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

13.2.1.2 Análisis de riesgo de línea vital - energía

En el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, se evidencia un nivel de riesgo medio que corresponde al 100% de los postes evaluados, el cual se caracteriza por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, el poste con este riesgo se localiza a lo largo del polígono (Figura 169).

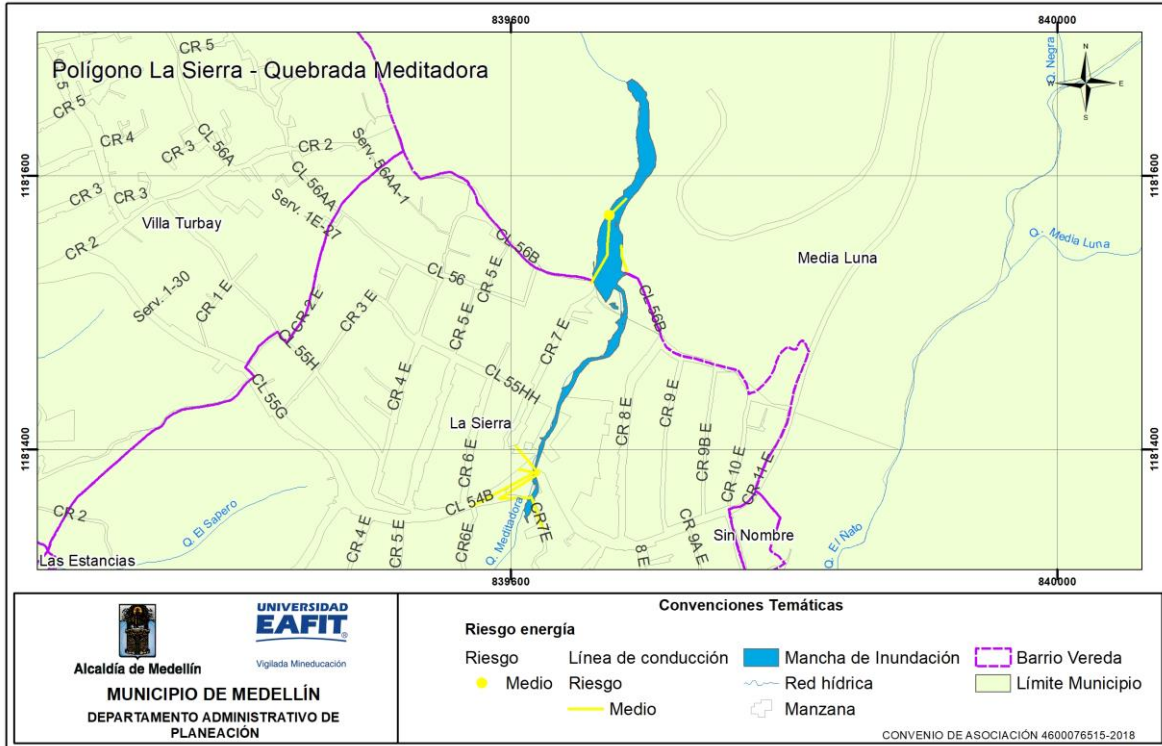


Figura 169. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

13.2.1.3 Análisis de riesgo de línea vital - vías

En el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora, se evidencia un nivel de riesgo alto que corresponde al 67% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y altos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan a lo largo del polígono. El riesgo medio corresponde al 33% de las vías evaluadas localizadas al norte del polígono (Figura 170).

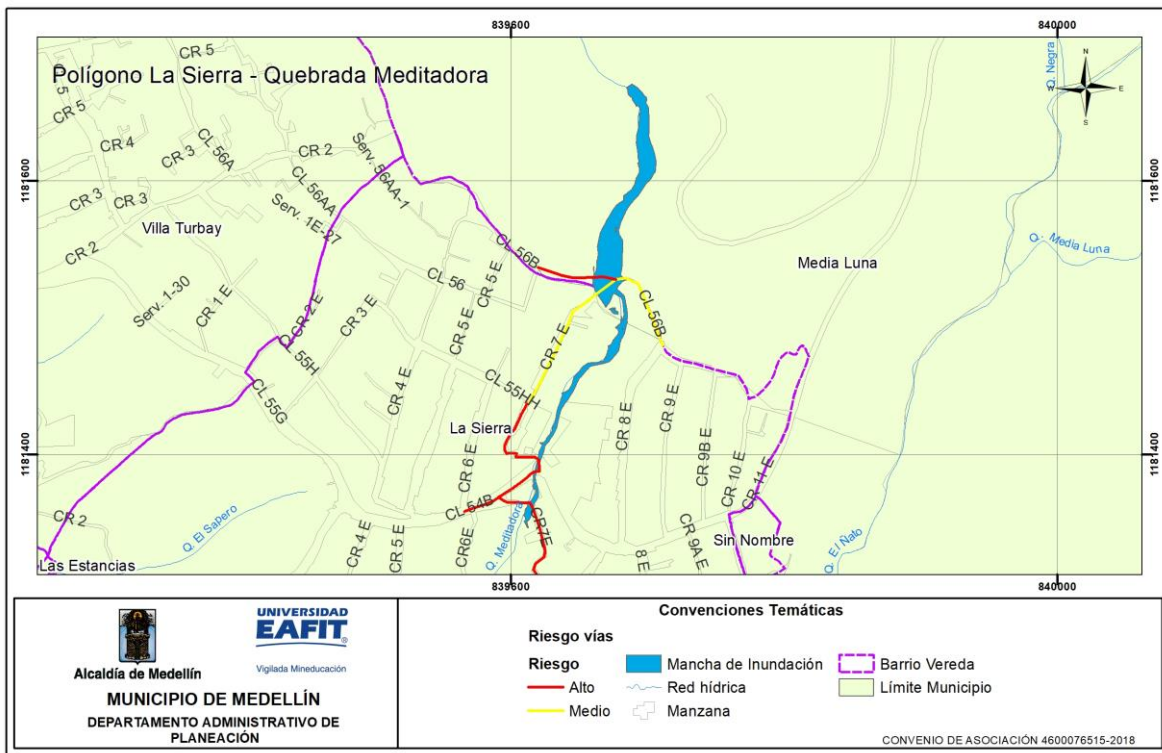


Figura 170. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vía por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

13.2.1.4 Análisis de riesgo de línea vital - acueducto

El riesgo del acueducto para todo el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora es medio, caracterizado por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, los tramos de acueducto con este riesgo se localizan a lo largo del polígono (Figura 171).

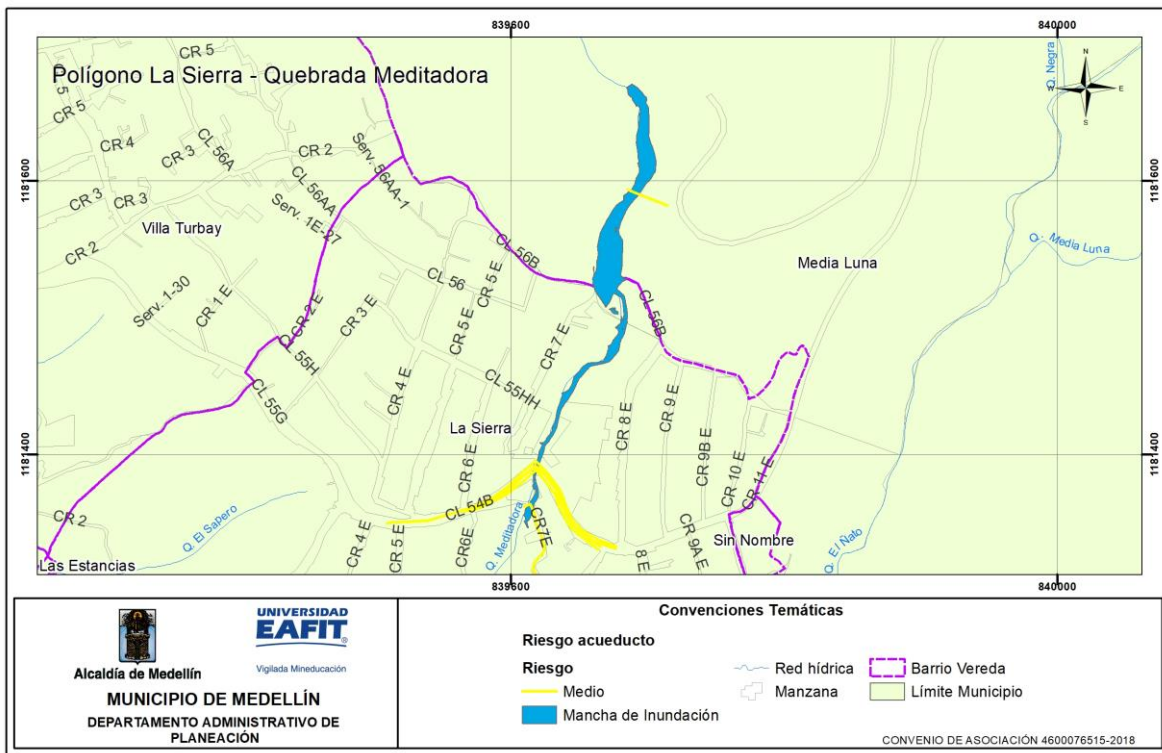


Figura 171. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

13.2.1.5 Análisis de riesgo de línea vital - alcantarillado

El riesgo del alcantarillado en todo el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora es medio, caracterizado por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, los tramos de alcantarillado con este riesgo se localizan a lo largo del polígono (Figura 172).

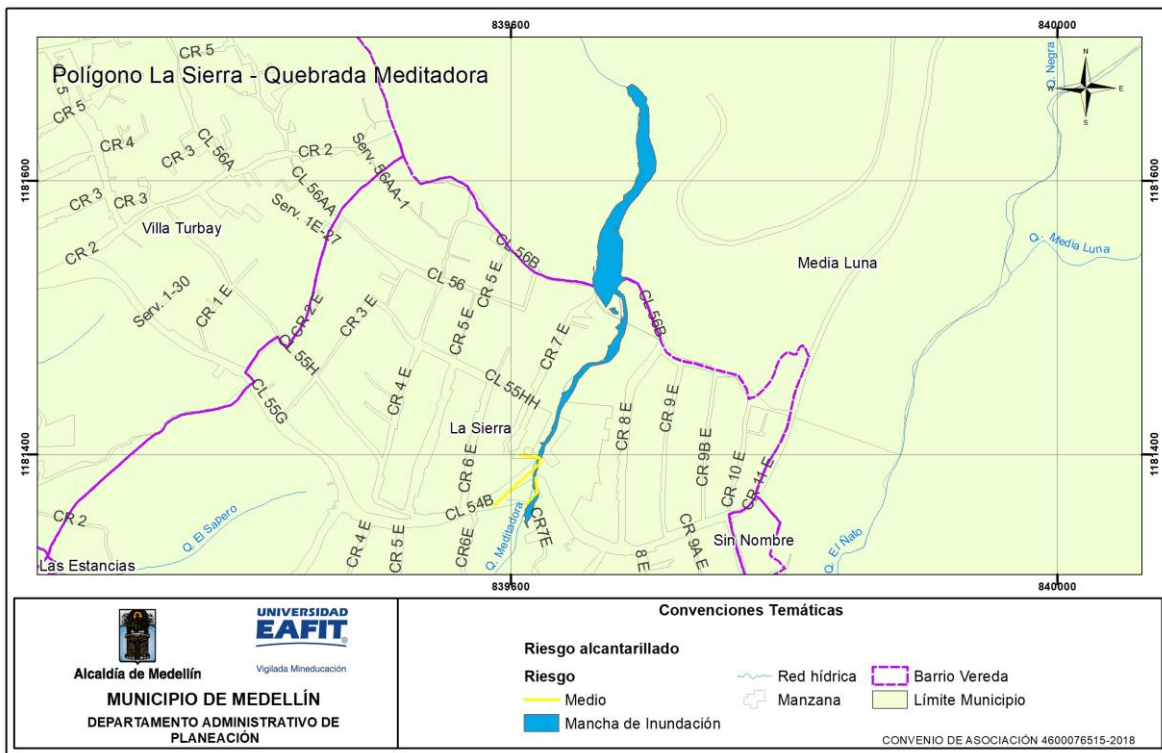


Figura 172. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por inundación, identificada en el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora.

13.2.1.6 Análisis de riesgo de personas.

Para hallar el número de personas en riesgo, se parte del nivel de riesgo calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.3.1. (Anexo 1.), del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,46 de acuerdo al análisis demográfico realizado por la EDU y suministrado a la universidad EAFIT.

El anterior análisis arroja que para el polígono La Sierra en la Quebrada La Meditadora hay un número estimado de 26 personas en riesgo alto correspondiente al 100% de habitantes.

13.2.2 Riesgo por polígono

El análisis de riesgo identificado por inundaciones de la quebrada La Meditadora está definido como alto no mitigable, si bien el riesgo no es por fenómenos torrenciales, la infraestructura está ubicada dentro del retiro estipulado por ley para las corrientes en el municipio de Medellín. En el caso de la quebrada La Meditadora el retiro definido es de 15 metros en el trayecto entre la carrera 56B y su desembocadura en la quebrada El Nato y de 30 metros de la carrera 56B hasta su nacimiento.

Los sectores identificados en riesgo corresponden a la placa polideportiva ubicada sobre la calle 56B y a la infraestructura ubicada el sector donde la quebrada cruza la calle 54B.



Figura 173. Riesgo por inundación de la quebrada La Meditadora

14. APTITUD GEOLÓGICA

Esta zonificación se realiza partiendo de los aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de procesos morfodinámicos identificados durante el trabajo de campo y los cuales condicionan en forma directa el grado de estabilidad de las laderas.

A estos aspectos se agregó la evaluación de la estabilidad de las laderas y las condiciones hidráulicas considerando las obras necesarias para alcanzar factores de seguridad ajustados a los requerimientos existentes en este aspecto. La zonificación referente a la aptitud geológica para el uso y ocupación del suelo se presenta de acuerdo con la clasificación utilizada por las “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”.

Se consideran cuatro tipos de zona de acuerdo a las características geológicas y geomorfológicas y a la complejidad de los procesos morfodinámicos identificados, las cuales se describen a continuación (Figura 174):

- **Zonas Aptas:** Corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad, 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 (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría se incluye la zona definida como de amenaza baja por movimientos en masa, en condiciones estáticas, y que en el análisis de runout no se obtiene probabilidad de verse afectada por la acumulación de materiales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la zona aledaña. En esta categoría se identifica en una pequeña zona al norte del polígono, en inmediaciones de la calle 54B con carrera 8E, caracterizada por ser una zona de pendientes muy suaves y sin evidencia de procesos morfodinámicos.

Estas zonas se caracterizan por presentar inclinadas a muy inclinadas en una zona urbanizada, conformadas por materiales asociados a depósitos de flujo de lodos y escombros.

- **Zonas Aptas con Restricciones Moderadas:** Corresponden a zonas estables dentro del polígono de interés; sin embargo, 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 (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría de incluyen las zonas catalogadas en la zonificación de amenaza total, como de amenaza media por movimientos en masa. Se ubica en cuatro sectores, el primero está delimitado entre las calles 54AD y 54B y carreras 8E y 11E, el segundo se identifica entre las calles 53D y 54B y calles 5E y 6E, el tercero se ubica al norte, a la altura de la carrera 7E y el cuarto sector corresponde al polígono ubicado sobre la margen izquierda de la quebrada La Meditadora, a la altura de la carrera 8E. Estos sectores se ubican sobre materiales relacionados directamente a la dunita de Medellín y se encuentra con alta intervención por la actividad urbanística.

- **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 polígono 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 (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría de incluyen las zonas catalogadas en la zonificación de amenaza total, como de amenaza alta por movimientos en masa. Esta unidad corresponde a las vertientes de las quebradas La Meditadora y El Nato. La zona se caracteriza por pendientes en el rango de abrupta y muy abrupta, en materiales relacionados directamente a la dunita de Medellín y medianamente intervenida por la actividad antrópica

- **Zonas No Aptas:** 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 (Acuerdo 09 de 2012).

Esta categoría corresponde a las áreas definidas como suelo de protección en el acuerdo 48 de 2015. Se encuentra distribuida por todo el polígono, la mayor representación corresponde a la ladera occidental del polígono donde confluyen varias áreas de protección y conservación ambiental entre las que se identifican: áreas de riesgo no mitigables, áreas de protección para la producción, red de conectividad ecológica, y los retiros de las quebradas La Meditadora y El Ñato, estos últimos tienen una dirección preferencial NE-SW.

Se caracterizan geológicamente por el suelo residual de la Dunita de Medellín, pendientes en los rangos de abrupta a muy abrupta, la zona presenta poca intervención antrópica relacionada a infraestructura de vivienda.

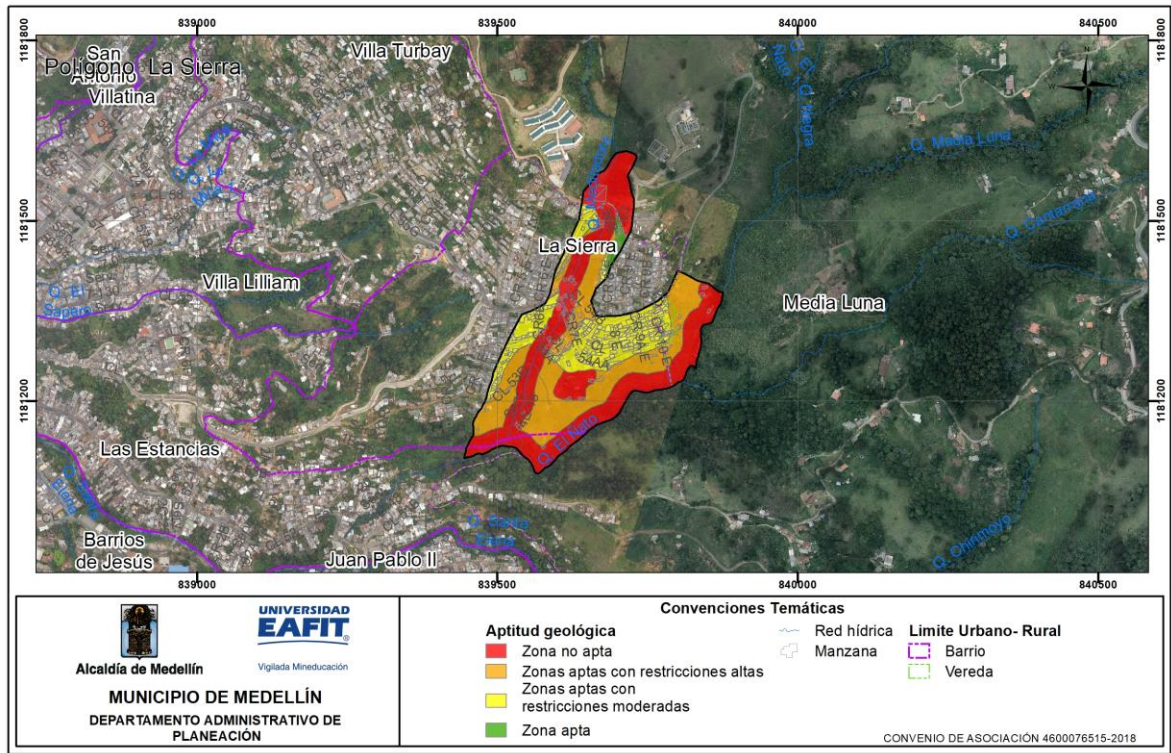


Figura 174. Mapa de Aptitud geológica para el polígono La Sierra

15. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se presentan a continuación, como se dijo anteriormente, tienen como objetivo disminuir los niveles de riesgo identificados en el polígono en estudio, las cuales corresponden a medidas principalmente de tipo estructural que incluyen obras de ingeniería que buscan la estabilización de las laderas comprometidas, así como obras complementarias que se deben adelantar en todo el polígono de interés, por lo que para garantizar la estabilidad de la zona y el cambio en las restricciones establecidas se requiere de una intervención de tipo integral en donde se ejecuten de forma conjunta los planteamientos aquí establecidos.

15.1 RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas y topográficas que caracterizan el polígono La Sierra y los resultados de los análisis de estabilidad de cada uno de los perfiles evaluados, se propone la implementación de las siguientes obras:

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas y topográficas que caracterizan el polígono La Sierra y los resultados de los análisis de estabilidad de cada uno de los perfiles evaluados, se propone la implementación de las siguientes obras:

Perfil 1. Para el perfil 1 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 30 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes en las cuatro hileras inferiores.

Perfil 2. Teniendo en cuenta las características geotécnicas y topográficas del perfil 2, se proponen como obras para el mejoramiento de la estabilidad, la implementación de un sistema de subdrenes compuestos por 4 líneas de subdrenes de 20 metros de longitud y diámetro 2". Un arreglo en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical.

Perfil 3. Para el perfil 3 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2

metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes en las cuatro hileras inferiores.

Perfil 4. Para el perfil 4 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 3 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud ubicados entre las tres hileras inferiores de los anclajes.

Perfil 5. Para el perfil 5 se recomienda la construcción de dos sistemas de anclajes, el primer sistema de anclajes ubicado en la parte superior del perfil compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 20 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 3 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre las 3 líneas inferiores de anclajes.

El segundo sistema ubicado en la parte inferior del perfil compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 30 metros de longitud los cuales se deben ubicarse entre las 4 hileras inferiores de anclajes.

Perfil 6. Se proponen como obras para el mejoramiento de la estabilidad, la implementación de un sistema de subdrenes compuesto por 5 líneas de subdrenes de 25 metros de longitud y diámetro 2". Un arreglo en tres bolillo separados 3 metros en la horizontal y 2 metros en la vertical.

Perfil 7. Para el perfil 7 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 3 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3

cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 2 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

Se recomienda inyección de los anclajes tipo IRS (repetitiva y selectiva).

A continuación, se analizará la estabilidad de cada uno de los perfiles analizados, pero ahora bajo la consideración de que se incluirán las obras o propuestas de mejoramiento de la estabilidad, para cada uno de éstos.

15.1.1 Análisis de estabilidad condición proyectada

Perfil 1

Considerando las condiciones topográficas y geotécnicas del perfil y la evaluación de la estabilidad en condiciones existentes, se planteó como propuesta para mejorar la estabilidad la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 8 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 1 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.52, un factor medio de 1.69 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 175).

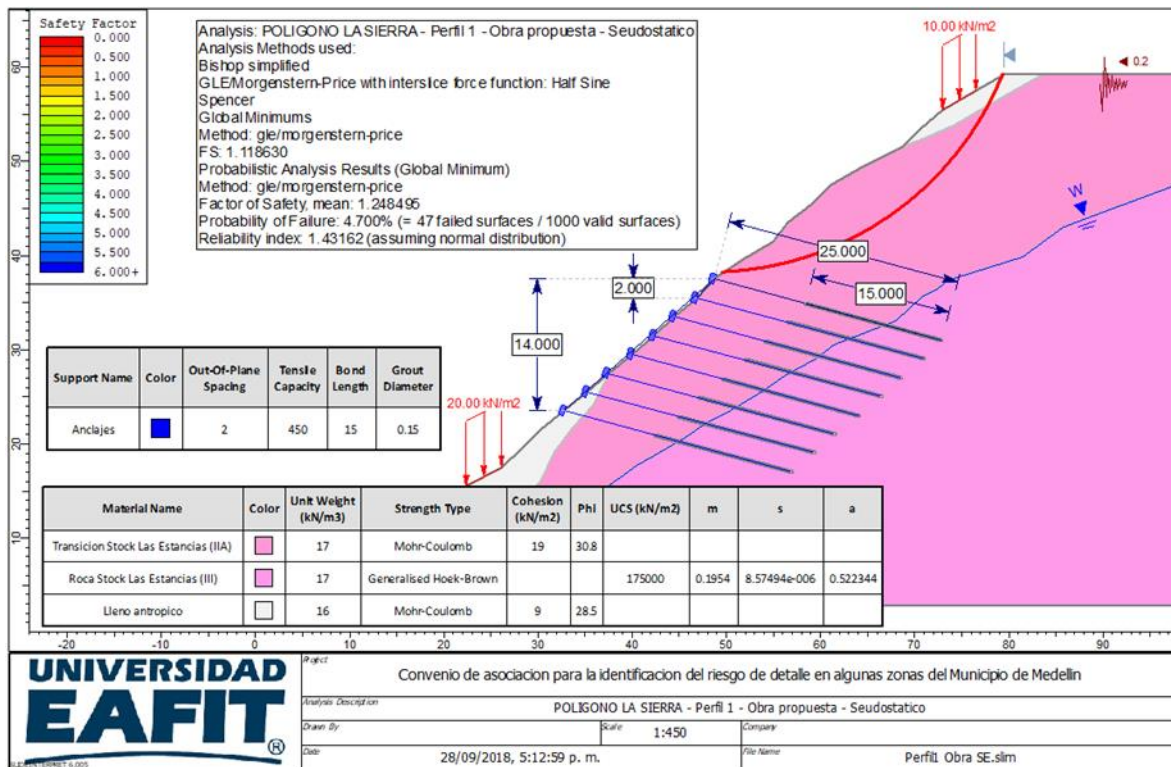


Figura 176. Análisis estabilidad perfil 1. Solución final, condición seudoestática.

Perfil 2 Para el perfil 2 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 8 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 2 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.61, un factor medio de 1.81 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 177).

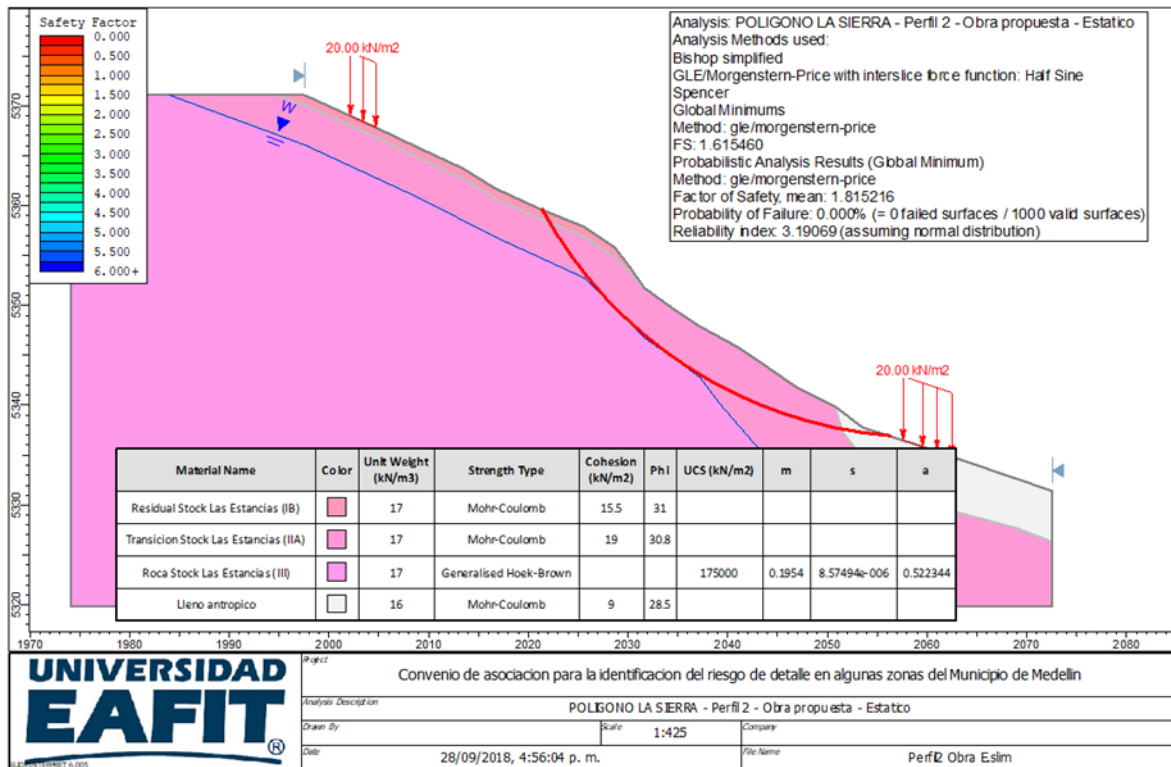


Figura 177. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.17, un factor de seguridad medio de 1.32 con una probabilidad de falla de 1.2%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 178).

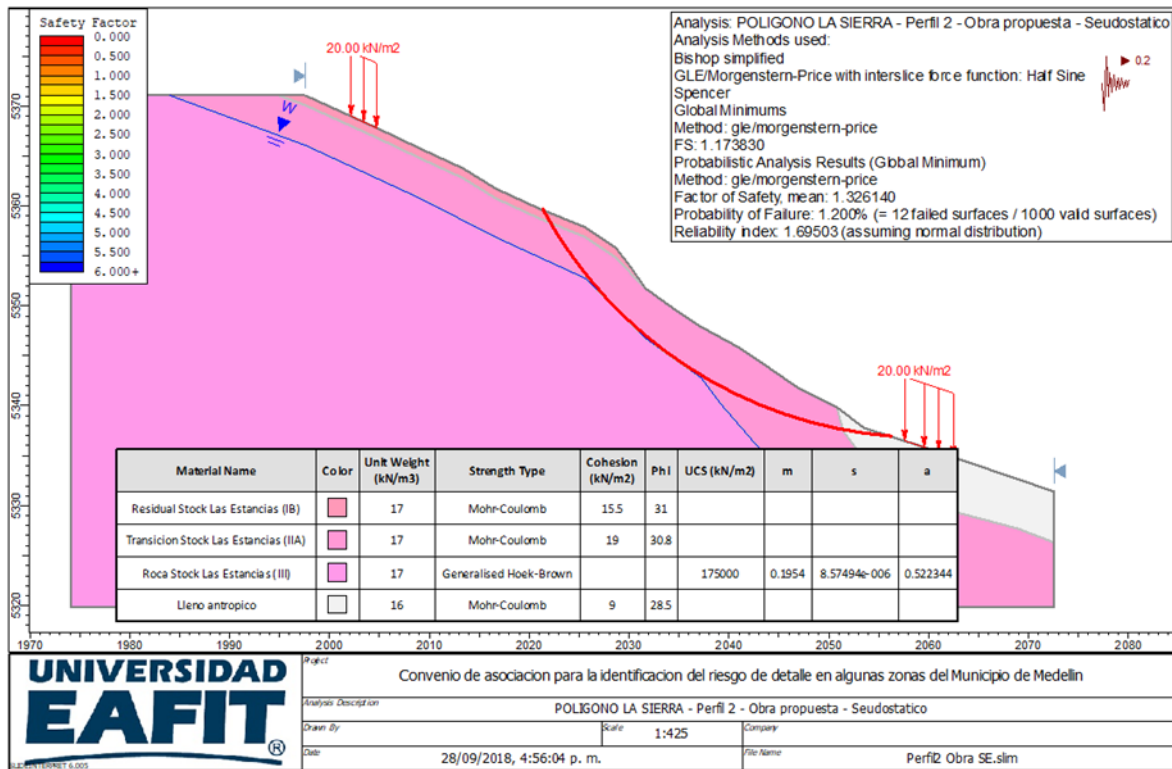


Figura 178. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición seudoestática.

Perfil 3 Para el perfil 3 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 7 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 3 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.55, un factor medio de 1.67 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 179).

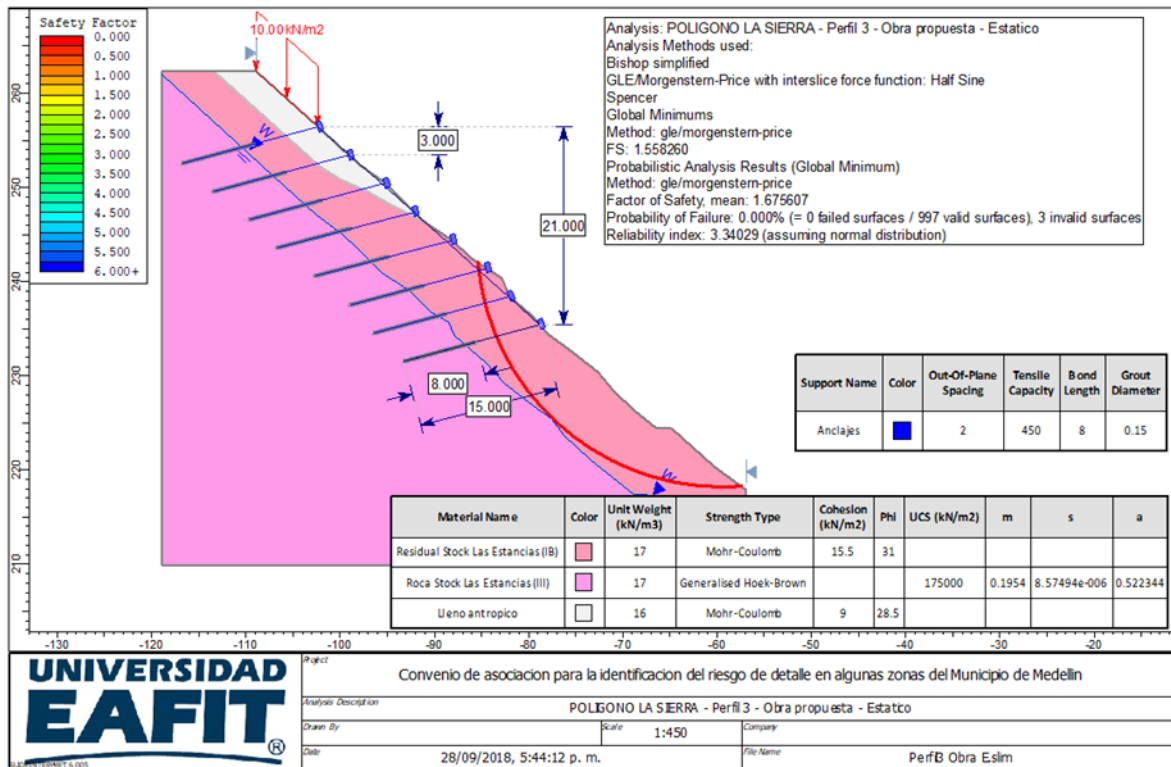


Figura 179. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición estática.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición seudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.14, un factor de seguridad medio de 1.16 con una probabilidad de falla de 6.8%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 180).

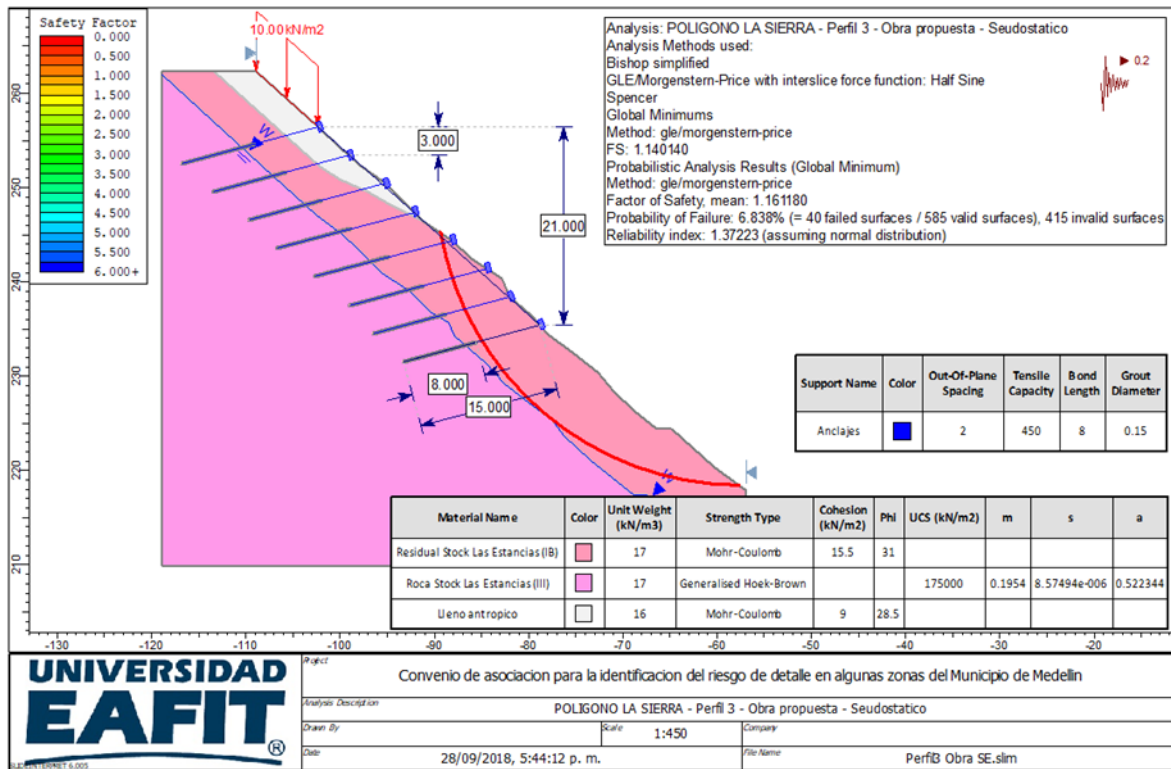


Figura 180. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final, condición seudoestática.

Perfil 4 Para el perfil 4 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 4 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.52, un factor medio de 1.36 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 181).

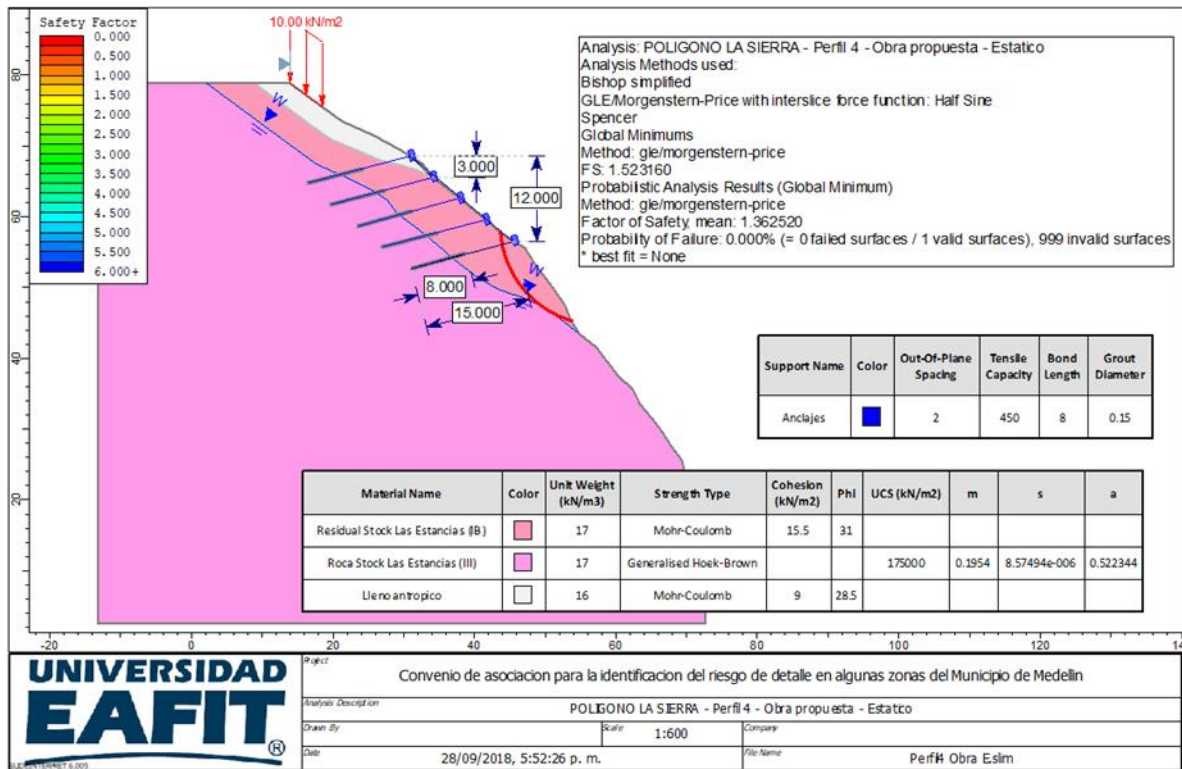


Figura 181. Análisis estabilidad perfil 4. Solución final condición estática.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.10, un factor de seguridad medio de 1.12 con una probabilidad de falla de 15%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 182).

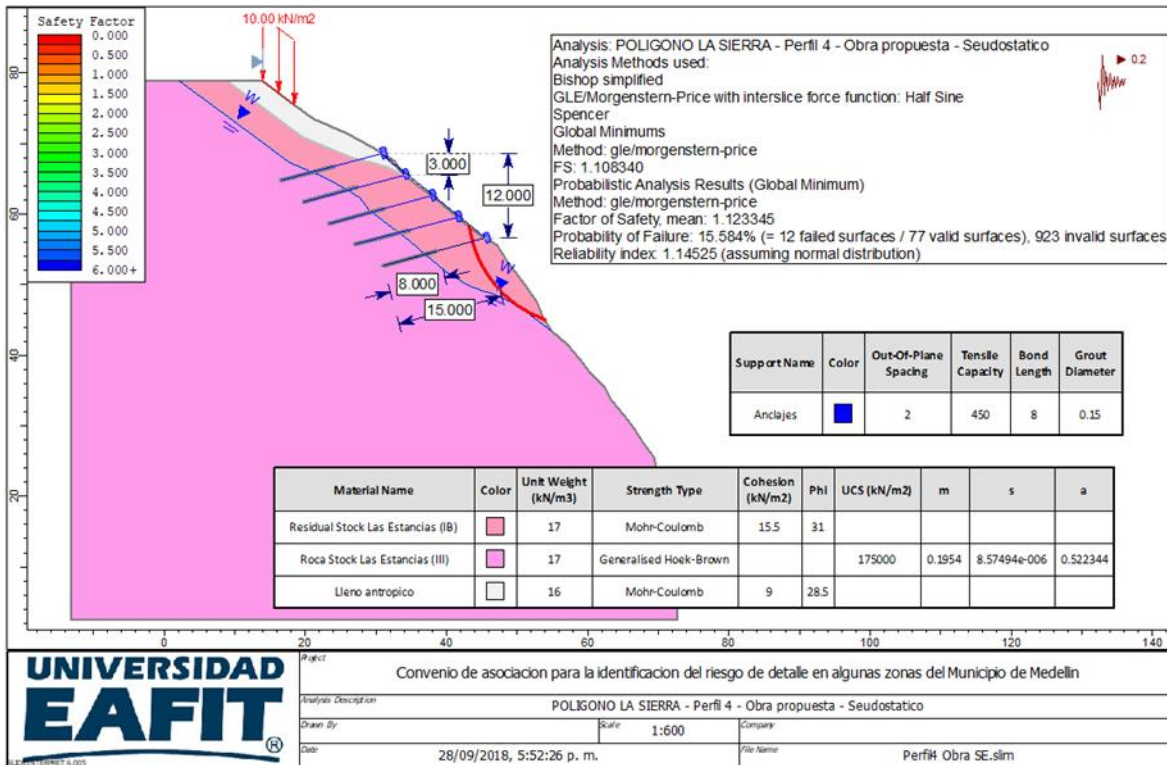


Figura 182. Análisis estabilidad perfil 4. Solución final, condición pseudoestática.

Perfil 5. Para el perfil 5 se recomienda la construcción de dos sistemas de anclajes, el primer sistema de anclajes ubicado en la parte superior del perfil compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo (separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 20 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El segundo sistema ubicado en la parte inferior del perfil compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 7 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 5 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.58, un factor medio de 1.68 y una probabilidad de falla de 0.0% que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 183).

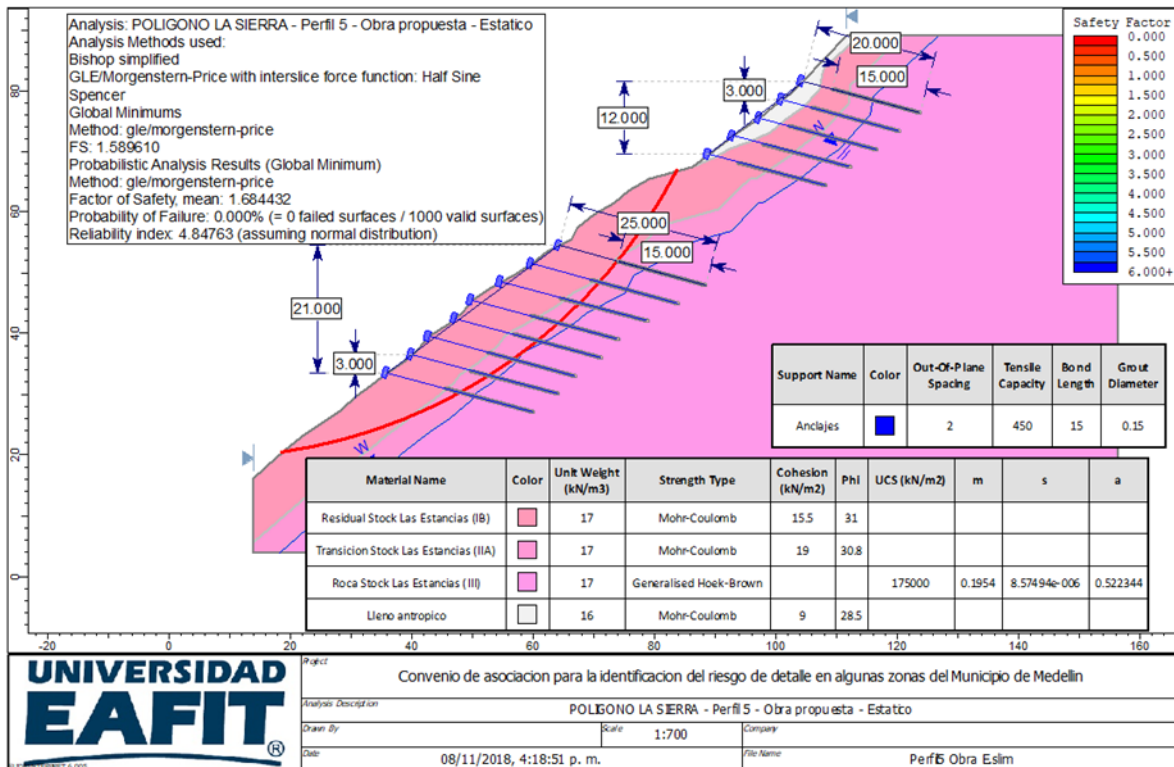


Figura 183 Perfil 5 obra propuesta estático.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.10, un factor de seguridad medio de 1.17 con una probabilidad de falla de 3%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 184).

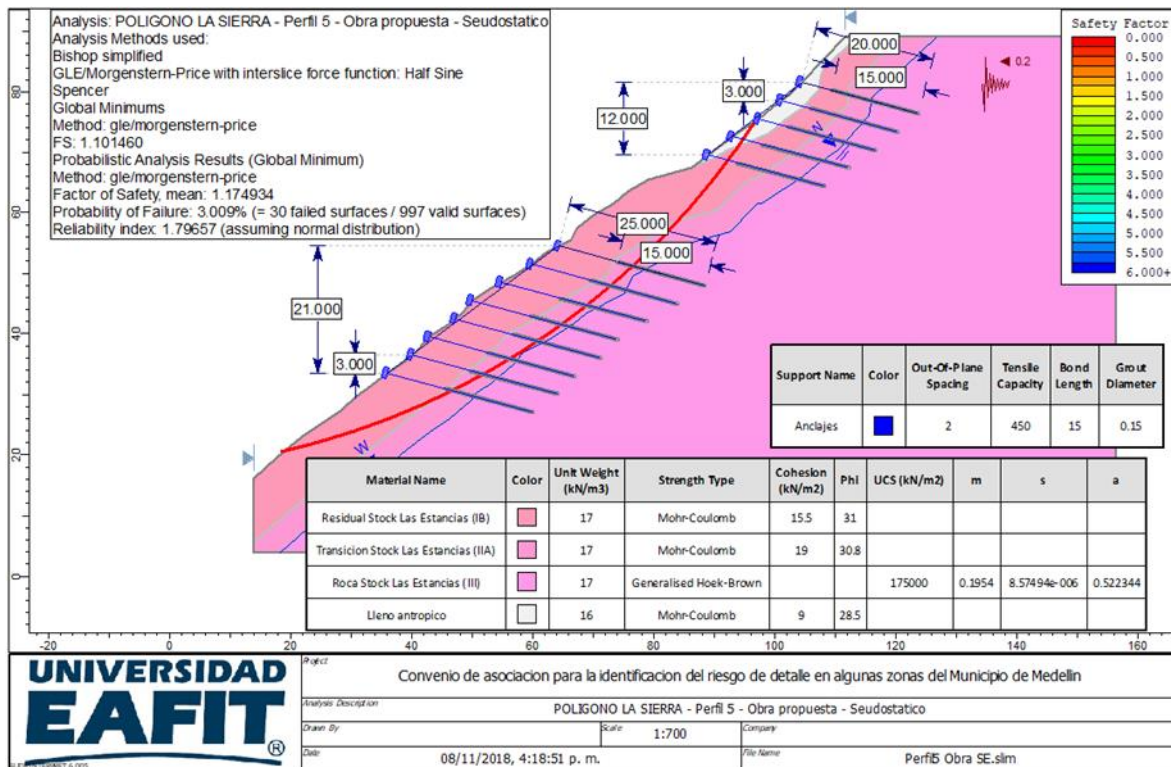


Figura 184 Análisis de estabilidad perfil 5 obra seudoestático.

Perfil 6. Se proponen como obras para el mejoramiento de la estabilidad, la implementación de un sistema de subdrenes compuestos por 5 líneas de subdrenes de 25 metros de longitud y diámetro 2". Un arreglo en tres bolillo separados 3 metros tanto en la horizontal como en la vertical.

El análisis de esta configuración para el perfil No 6 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.53, un factor medio de 1.76 y una probabilidad de falla de 0.0% que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 185).

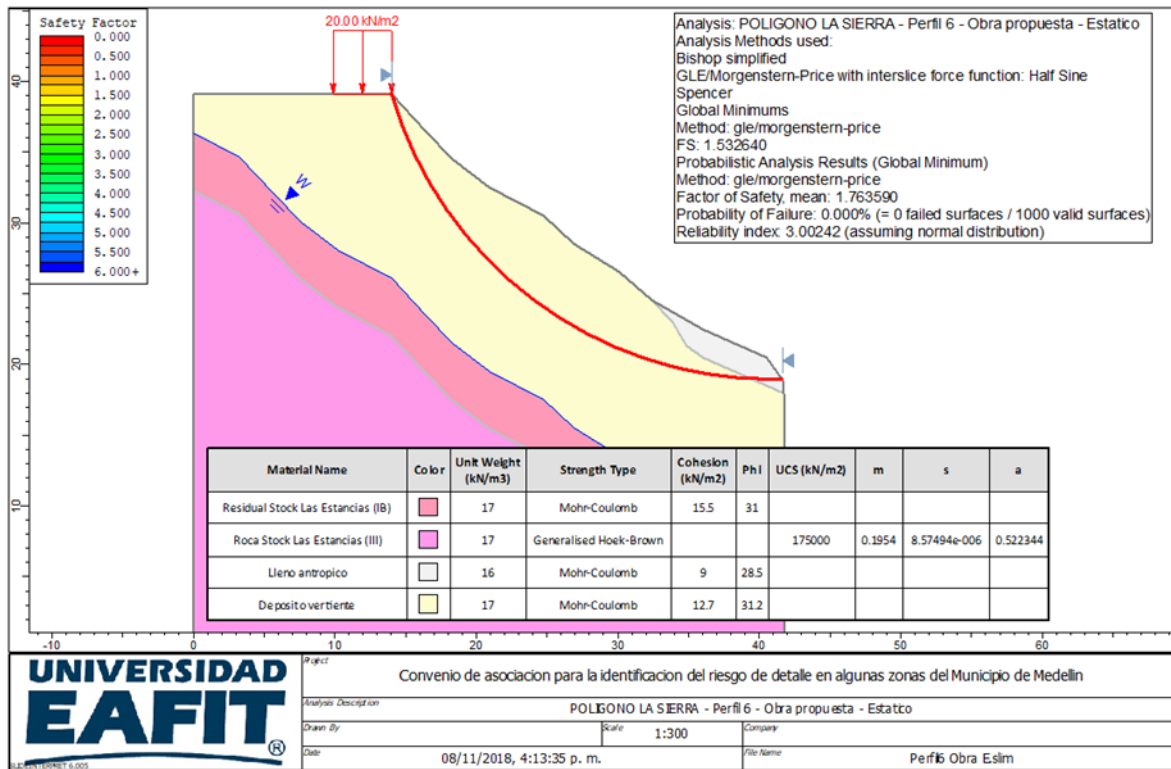


Figura 185 Análisis de estabilidad perfil 6 obra estático.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.10, un factor de seguridad medio de 1.27 con una probabilidad de falla de 4.8%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 186).

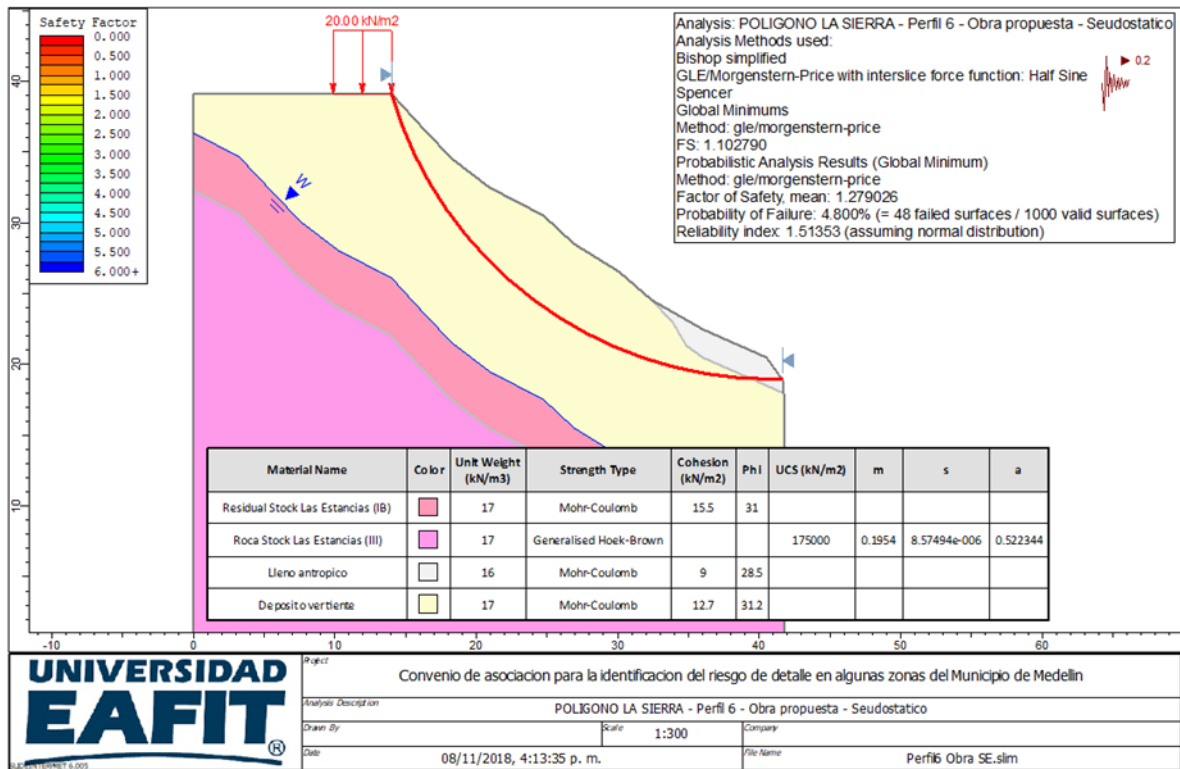


Figura 186 Análisis de estabilidad perfil 6 obra seudoestático.

Perfil 7. Para el perfil 7 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 3 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 2 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El análisis de esta configuración para el perfil No 6 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.84, un factor medio de 2.23 y una probabilidad de falla de 0.0% que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 187).

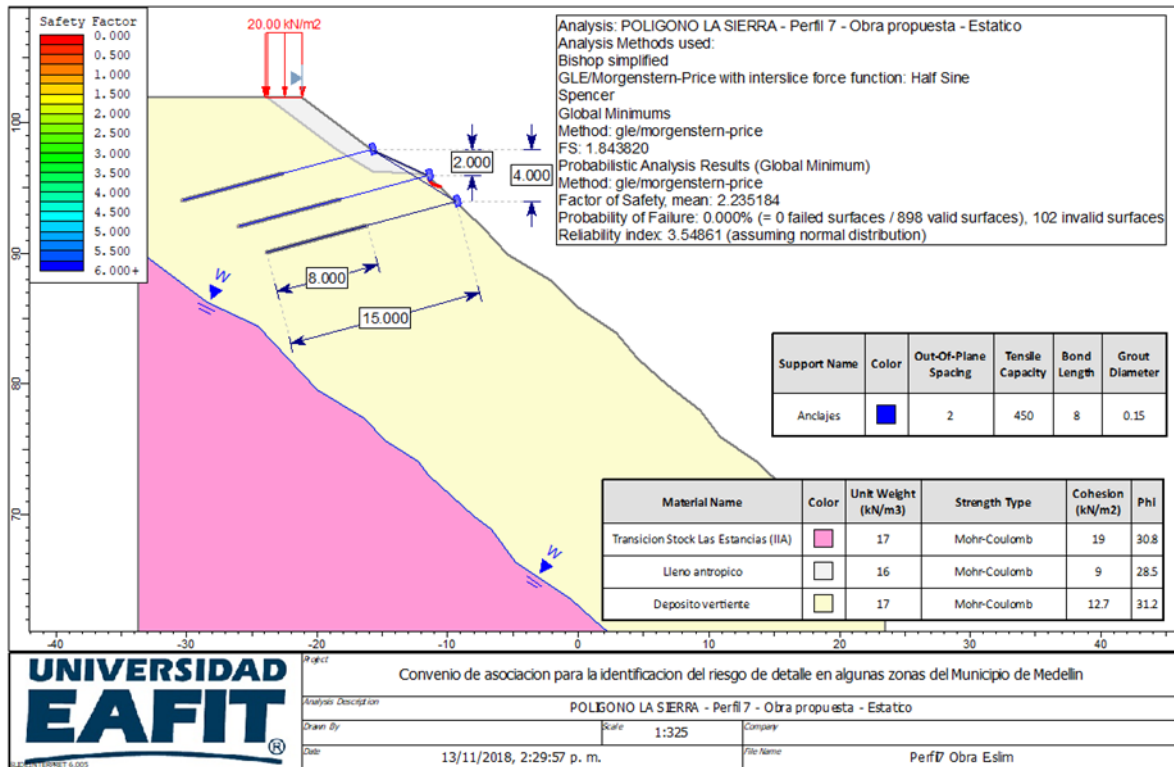


Figura 187 Análisis de estabilidad perfil 7 obra estático.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición seudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.38, un factor de seguridad medio de 1.70 con una probabilidad de falla de 0%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 188).

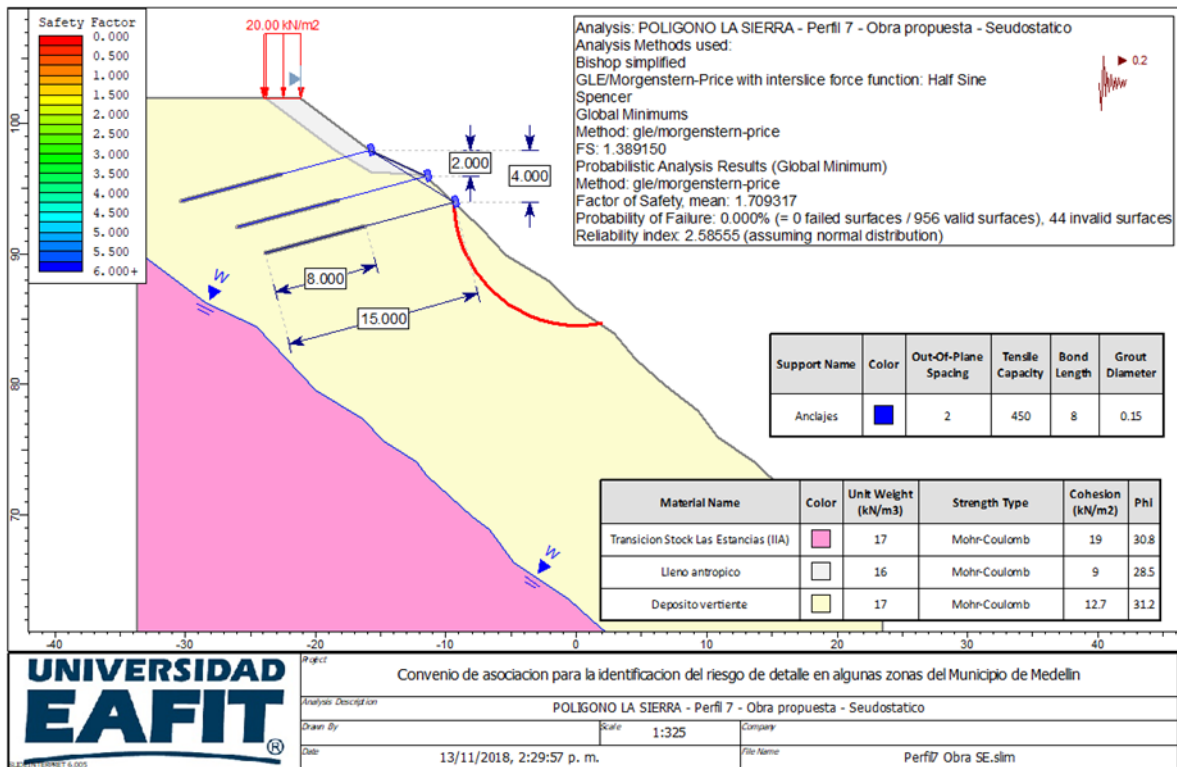


Figura 188 Análisis de estabilidad perfil 7 obra seudoestático.

15.1.2 Dimensionamiento geotécnico de obras

A continuación se presentan las propuestas de las obras con las memorias de cálculo correspondientes a los anclajes a implementar en cada uno de los perfiles (Figura 189).

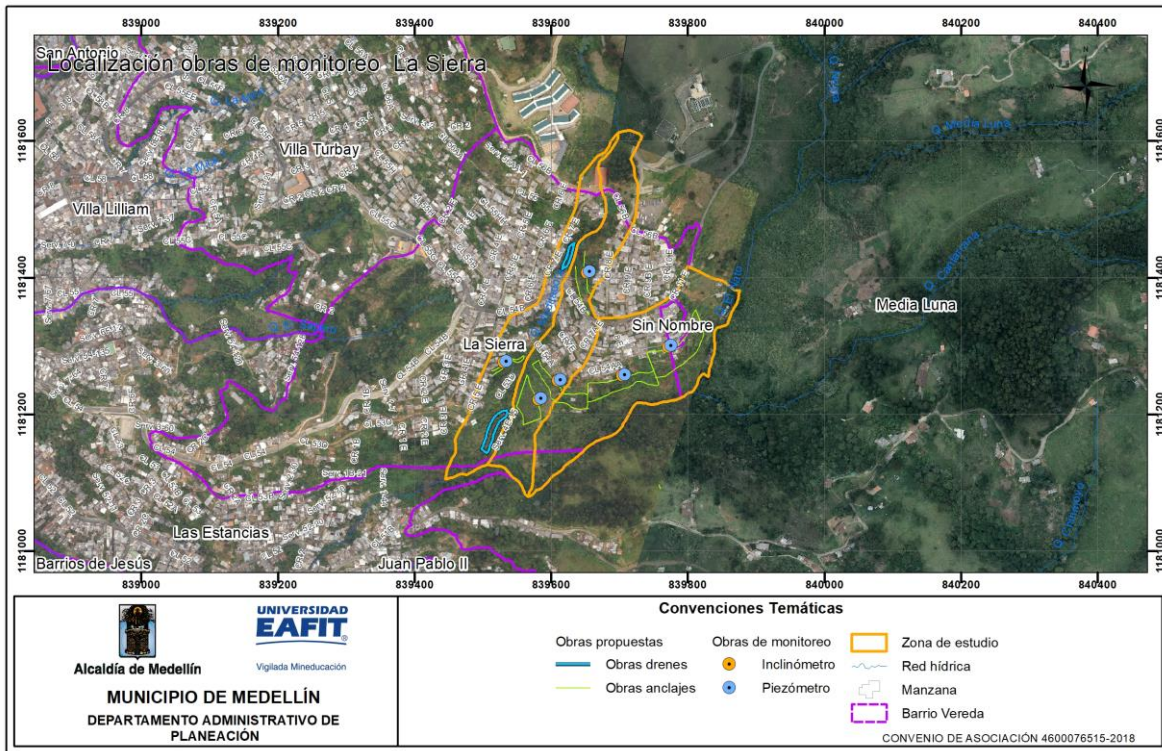


Figura 189. Localización de las obras proyectadas polígono La Sierra

Perfil 1.

Para el perfil 1 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 8 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

PRE-DISEÑO GEOTÉCNICO SISTEMA DE ANCLAJE											
Memorias de Cálculo											
Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 1											
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo	
	γ (KN/m3) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2			
	C (KPa)=	100	Talud:	α° =	36		No. Anclajes=	8	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).	
	Φ° =	35					Inclinación (°):	15			
Estrato inestable	Φ° =	31	γ (KN/m3) =	17							
Fuerza Estabilizadora						Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)		Dp (mm):	100	N=	>20		
21	0.3201	1267.1112	1900.6669	3801.333733		Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Roca		
						PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	200		
						α =	1.5	F.S.	3		
Dimensionamiento del Acero						Vi=	2 Vt				
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable				Pi>PL					
	Sa (mm2)=	181				Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Φ (pulgadas)=	0.625				0.15	66.66666667	31.41592654	15.65857951	491.9299	10
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)				Dimensionamiento de la Piel					
1700	1530	874.2857				Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
Dimensionamiento de Tensores											
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	491.9287835							
	Sección del cable (Sa) (mm2)	181									
Tensayomáx(KN)	Tdiseño(KN)	No. Cables									
276.93	158.25	3.1									

Perfil 3.

Para el perfil 3 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 7 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 3										
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo
	γ (KN/m3) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2		
	C (KPa)=	100	Talud:	α ° =	41		No. Anclajes=	8	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).
	Φ ° =	35					Inclinación (°):	15		
Estrato inestable	Φ ° =	31	γ (KN/m3) =	17						
Fuerza Estabilizadora					Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)	Dp (mm):	100	N=	>20		
22	0.3201	1387.3084	2080.9625	4161.925073	Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Roca		
					PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	200		
					α =	1.5	F.S.	1.5		
					Vi=	2 Vt				
Dimensionamiento del Acero					Pi>PL					
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable			Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Sa (mm2)=	181			0.15	133.3333333	62.83185307	8.571969634	538.5940	7
	Φ (pulgadas)=	0.625								
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)			Dimensionamiento de la Piel					
1700	1530	874.2857			Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
Dimensionamiento de Tensores										
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	538.5927365						
	Sección del cable (Sa) (mm2)	181								
Tensayomáx(KN)	Tdiseño(KN)	No. Cables								
276.93	158.25	3.4								

Perfil 4.

Para el perfil 4 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 4										
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo
	γ (KN/m ³) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2		
	C (KPa)=	100	Talud:	α ° =	36		No. Anclajes=	5	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).
	Φ ° =	35					Inclinación (°):	15		
Estrato inestable	Φ ° =	31	γ (KN/m ³) =	17						
Fuerza Estabilizadora					Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)	Dp (mm):	100	N=	>20		
16	0.3201	747.7509	1121.6263	2243.252646	Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Roca		
					PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	200		
					α =	1.5	F.S.	1.5		
					Vi=	2 Vt				
					Pi>PL					
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable			Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Sa (mm ²)=	181			0.15	133.3333333	62.83185307	7.392384334	464.4783	7
	Φ (pulgadas)=	0.625								
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)								
1700	1530	874.2857								
Dimensionamiento del Acero					Dimensionamiento de la Piel					
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	464.4772063	Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
	Sección del cable (Sa) (mm ²)	181								
Tensayomáx(KN)	T diseño(KN)	No. Cables								
276.93	158.25	2.9								

Perfil 5.

Para el perfil 5 se recomienda la construcción de dos sistemas de anclajes, el primer sistema de anclajes ubicado en la parte superior del perfil compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 20 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 5 sistema de anclajes ubicados en la parte superior del talud.										
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo
	γ (KN/m ³) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2		
	C (KPa)=	100	Talud:	α ° =	36		No. Anclajes=	5	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).
	Φ ° =	35					Inclinación (°):	15		
Estrato inestable	Φ ° =	31	γ (KN/m ³) =	17						
Fuerza Estabilizadora					Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)	Dp (mm):	100	N=	>20		
17	0.3201	840.7396	1261.1094	2522.218783	Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Roca		
					PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	200		
					α =	1.5	F.S.	2		
					Vi=	2 Vt				
					Pi>PL					
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable			Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Sa (mm ²)=	181			0.15	100	47.1238898	11.0822474	522.2398	5
	Φ (pulgadas)=	0.625								
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)								
1700	1530	874.2857								
Dimensionamiento del Acero					Dimensionamiento de la Piel					
Dimensionamiento de Tensores					Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	522.2386055						
	Sección del cable (Sa) (mm ²)	181								
Tensayomáx(KN)	T diseño(KN)	No. Cables								
276.93	158.25	3.3								

El segundo sistema ubicado en la parte inferior del perfil compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 7 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 5 sistema de anclajes ubicados en la parte inferior del talud.										
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo
	γ (KN/m3) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2		
	C (KPa)=	100	Talud:	α° =	39		No. Anclajes=	8	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).
	Φ° =	35					Inclinación ($^{\circ}$):	15		
Estrato inestable	Φ° =	31	γ (KN/m3) =	17						
Fuerza Estabilizadora					Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)	Dp (mm):	100	N=	>20		
22	0.3201	1387.3084	2080.9625	4161.925073	Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Roca		
					PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	200		
					α =	1.5	F.S.	2.5		
					Vi=	2 Vt				
Dimensionamiento del Acero					Pi>PL					
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable			Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Sa (mm2)=	181			0.15	80	37.69911184	14.28661606	538.5940	11
	Φ (pulgadas)=	0.625								
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)			Dimensionamiento de la Piel					
1700	1530	874.2857			Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
Dimensionamiento de Tensores										
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	538.5927365						
	Sección del cable (Sa) (mm2)	181								
Tensayomáx(KN)	T diseño(KN)	No. Cables								
276.93	158.25	3.4								

Perfil 7.

Para el perfil 7 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 3 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuestos por 3 cables de 3/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 2 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

El método utilizado para los diseños es el método de Bustamante y Doix 1985. A continuación se anexan las memorias de cálculo:

Proyecto: Estudio Geotécnico polígono La Sierra perfil 7.										
Caracterización del estrato de suelo receptor	U.S.C =	SC	Sobrecarga	Q (Kpa)=	10	Predimensionamiento del anclaje	Sh (m)=	2	Descripción y Clasificación:	Anclaje Activo
	γ (KN/m3) =	17		F.S.=	1.5		Sv (m)=	2		
	C (KPa)=	13	Talud:	α ° =	39		No. Anclajes=	3	Método de Cálculo:	Bustamante y Doix (1985).
	Φ ° =	31					Inclinación (°):	15		
Estrato inestable	Φ ° =	31	γ (KN/m3) =	17						
Fuerza Estabilizadora					Dimensionamiento del Bulbo					
H (m)	Ka	Ea (KN/m)	Pd (KN/m)	Fht (KN)	Dp (mm):	100	N=	>20		
13	0.3201	501.4348	752.1522	1504.304482	Sistema de Inyección:	IRS	Tipo Material:	Depósito		
					PL (Mpa)=	1	Qs(teo) (Kpa)	180		
					α =	1.5	F.S.	1.5		
					Vi=	2 Vt				
Dimensionamiento del Acero					Pi>PL					
Características del refuerzo	Tipo Refuerzo:	Cable			Ds (m)	Qs(adm) (Kpa)	Ta(KN/m)	Lb (m)	Ta (KN)	LL (m)
	Sa (mm2)=	181			0.15	120	56.54866776	9.180119592	519.1247	6
	Φ (pulgadas)=	0.625								
σ_e (Mpa)	σ_{ensayo} (Mpa)	$\sigma_{diseño}$ (Mpa)			Dimensionamiento de la Piel					
1700	1530	874.2857			Se recomienda Lanzado en concreto sobre malla electrosoldada sobre la cara del talud.					
Dimensionamiento de Tensores										
Características del cable	Diámetro cable (mm)=	15.2	Treqanclaje (KN)	519.1235329						
	Sección del cable (Sa) (mm2)	181								
Tensayomáx(KN)	Tdiseño(KN)	No. Cables								
276.93	158.25	3.3								

15.1.3 Plan de Seguimiento y Monitoreo

Para el polígono La Sierra se propone instalar un inclinómetro y un piezómetro en la parte superior central de cada uno de los sistemas de anclajes, cada uno a una profundidad de 30 metros.

El espacio anular de los inclinómetros se debe llenar con una lechada de agua-cemento lo suficientemente fluida para que llene este espacio de manera adecuada. El tubo se debe alinear de tal manera que un par de ranuras se encuentren alineadas en la dirección anticipada del movimiento (Figura 189). La ranura que se encuentra, en dirección ladera abajo, se marca como A0 y la ranura opuesta, se marca como A180. Las otras dos ranuras se marcan como B0 y B180 (Figura 190).

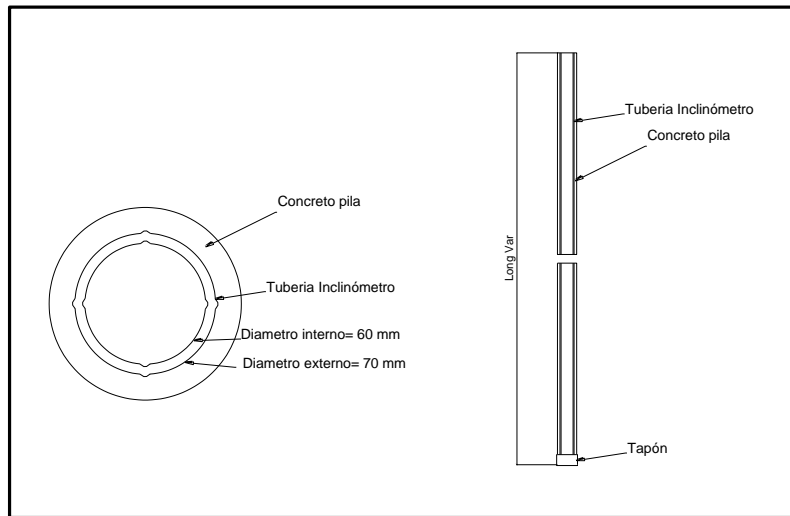


Figura 190. Detalle de inclinómetro

Se recomienda colocar en la cabeza del inclinómetro una caja o protector metálico para preservarlo de actos vandálicos.

La lectura de inicio o lectura base se podrá realizar una vez haya fraguado la lechada que fija el tubo al terreno y a partir de esta lectura se recomienda realizar lecturas mensuales durante al menos un año, que iniciarán una vez se encuentre construida la pantalla de contención.

La propuesta de monitoreo del nivel freático para el polígono La Sierra (Figura 189), consiste en instalar un piezómetro de tubo abierto de 30 m de longitud al lado de cada uno de los inclinómetros.

Estos elementos permitirán realizar seguimiento a las variaciones del nivel freático y advertir sobre elevaciones del mismo para evaluar la eficiencia de las obras de drenaje proyectadas. El piezómetro propuesto consiste en realizar una perforación con diámetro NQ en la longitud recomendada e instalar una tubería de p.v.c ranurada de 1 ½ “ envuelta en geotextil no tejido tipo NT 2000 o equivalente. El espacio entre el tubo y la pared de la perforación se deberá rellenar con arena gruesa o gravilla limpia. En el fondo de la tubería se deberá colocar un tapón que evite el ingreso de sedimento a la tubería. De igual manera en la parte superior, se deberá construir una caja o protector metálico para su preservación.

El nivel freático se podrá medir con un indicador de nivel acústico y se llevará el registro de las mediciones, anotando, además, la ocurrencia o no de lluvias en horas previas a la medición. Se propone realizar las mediciones de control y seguimiento

en un período no inferior a 12 meses con lecturas de periodicidad mensual (Figura 191).

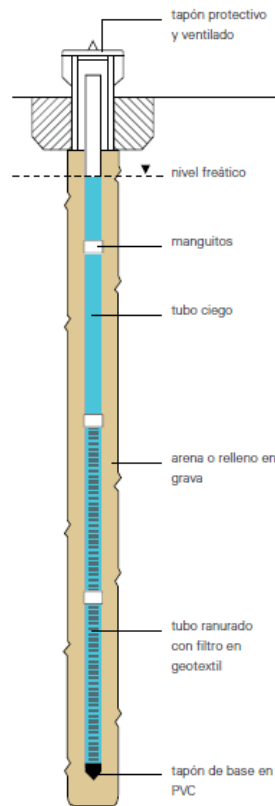


Figura 191. Detalle de piezómetro de tubo abierto

Debe tenerse en cuenta que el monitoreo no está concebido para definir un sistema de alerta sino para el evaluar el comportamiento de las obras construidas y proceder con la desafectación de la áreas o polígonos con condición de riesgo. Se ha aclarado con el DAP que la desafectación solo se hará cuando se hayan construido las obras y verificado su adecuado funcionamiento de las mismas. El plan de monitoreo propuesto busca determinar la efectividad de las obras y en caso extremo proponer soluciones complementarias para lograr la estabilidad que garantice la desafectación de las áreas involucradas. Se consideran deformaciones admisibles hasta de una pulgada, sin embargo, cuando se haya alcanzado el 50% de esta magnitud, se deberá alertar sobre esta condición.

15.1.4 Recomendaciones particulares construcción de anclajes

En el presente documento se describe el procedimiento correspondiente a la construcción y tensionamiento de anclajes.

- Para el caso de anclajes activos verificar, si se realizara con cable o perno, diámetro de los torones y número de torones, longitud libre, longitud del bulbo, diámetro de perforación, presión de inyección y tipo de inyección (IRS en este planteamiento), relación agua/cemento. Verificar además en los planos dimensiones del dado y platina.
- Verificar en campo si la conformación de los taludes se realizó conforme a los diseños.
- Posteriormente la comisión de topografía debe ubicar y marcar en campo los sitios donde se realizarán cada uno de los anclajes de acuerdo a diseños.
- Inicialmente se realiza la perforación con el diámetro de acuerdo a diseños, si la perforación se realiza en suelo residual se utiliza broca tipo Mano de Ángel, en el caso de presencia de fragmentos de roca tricono o martillo de fondo y en el caso de roca martillo de fondo.
- Si la perforación es inestable se realiza revestimiento hasta donde se encuentre zona estable.
- Se realiza el armado del anclaje uniendo en toda su longitud los torones y la tubería de inyección. La tubería de inyección se ubica en el centro y los torones la rodean, los torones van aislados con separadores y los separadores cuentan con un orificio central por donde va la tubería de inyección.
- La tubería de inyección es tubería de PVC presión de 1" y se perfora cada 25 o 30 cm para permitir la salida de la lechada a presión, El perímetro perforado se cubre con manguitos de caucho (puede ser neumático rin 24). Los manguitos se sellan con cinta aislante en toda su longitud y en los extremos con cinta transparente. La actividad descrita se realiza solo a lo largo del bulbo.
- La longitud libre se engrasa y va recubierta con manguera negra.
- Posteriormente se instala el anclaje armado en la perforación y se procede al llenado del barreno (hueco) con lechada, el llenado termina cuando la lechada sale al talud por la boca del barreno o perforación. El llenado se realiza por gravedad o con una presión mínima por la tubería de inyección. Una vez

- Terminado el llenado se procede a lavar la tubería de inyección y se esperan 12 horas para realizar la inyección.
- La inyección definida es IRS (repetitiva y selectiva) según diseños.
- La inyección IRS se introduce por la tubería de inyección una tubería galvanizada (flauta) por medio de la cual se inyecta la lechada, la flauta va conectada a manguera y la manguera va hasta la motobomba de lodos.
- La motobomba de lodos debe contar con manómetro con el fin de controlar la presión de inyección.
- La flauta se lleva hasta el fondo y se inyecta metro a metro obturando cada metro hasta donde termine el bulbo según diseños. Al final se lava la tubería de inyección.
- Finalmente se realiza la construcción del dado con las dimensiones de acuerdo a los diseños. Se debe verificar que el anclaje quede localizado en el centro del dado. Se debe tener la precaución que el anclaje no entre en contacto con el concreto. Se debe proteger la longitud libre mínimo 30 cm por fuera del dado.

PROCEDIMIENTO PARA EL TENSIONAMIENTO DE ANCLAJES

Postensado o tensionamiento

- Proceso en el que se tensionan los torones de un anclaje. Como su nombre lo indica este proceso se realiza después del fraguado y cuando el concreto del dado y la lechada tengan resistencia suficiente. Con este proceso se introducen fuerzas de tensión a los torones (Figura 192). Para esto se requieren diferentes clases de Equipos o gatos hidráulicos dependiendo de la cantidad de torones del cable y si el proceso será multitorón o monotorón.



Figura 192. Tensionamiento de anclajes

- Es necesario tener un formato en campo con el fin de registrar en este los datos de campo obtenidos durante la ejecución del tensionamiento, el formato debe contener la siguiente información:
- Fuerza en el gato que se debe aplicar a cada torón, (tf) y presión que debe marcar el manómetro de la bomba (bares o PSI) para alcanzar esta fuerza.
- Elongación real o teórica de cada cable o torón con su correspondiente tolerancia.
- Obra, tipo de torón, equipo de tensionamiento, bomba hidráulica, certificado de calibración, resistencia mínima del concreto y fecha.
- Se limpian los restos de concreto y oxido que tengan los torones con un cepillo de alambre, se cortan las puntas de las mangueras que interfieran con los elementos a instalar (placas cuñas). Se abren los torones.
- Se coloca en cada anclaje una platina, posteriormente se coloca en cada punta de torón una cuña de anclaje y con un buje se empuja hasta acomodarla en el hueco de la platina de anclaje. Las platinas de anclaje solo se colocan antes de tensionar para evitar su oxidación.
- El operador con ayudantes introduce el gato en los torones hasta apoyarlo en la platina de anclaje. Acciona el botón “tensionar” (SP)
- Hasta ajustarla sobre la platina. Se revisa que el gato no este rosando con la estructura ni que la platina esté descentrada.

Gato multitoron

- Luego de ajustar el gato se toma una lectura inicial de abertura del embolo, luego se procede a realizar el postensado subiendo la carga por intervalos de 25% de la carga hasta llegar al valor deseado. En cada intervalo de carga se mide cuanto se ha desplazado el embolo y esta medida es registrada en el formato. Finalmente, si el recorrido del gato no es suficiente para la elongación total estimada, se interrumpe el proceso cuando la apertura del gato este llegando a 20 cm, luego se clavan las cuñas y se registra la presión alcanzada; acto seguido se recupera el gato. Luego con el gato recuperado se procede a “tensionar”
- Nuevamente llevando el manómetro directamente a la carga donde se hizo la interrupción. En este punto se toma la abertura del embolo del gato y este valor se registra como el inicio de esta segunda etapa de operación.
- Cuando se llega a la carga final, después de tomar el registro de abertura, se procede a clavar las cuñas y a recuperar el gato. Para esto se usa el dispositivo clavador de cuñas del gato, en caso de que este lo haga por retrocesos, se debe sacar el embolo una longitud adicional de 6 mm, ya que se considera que esta es la longitud que se pierde por el ajuste de las mismas. Esta sobrecarga adicional se registra en el formato como carga de bloqueo.
- La elongación final será la resultante de restar la final menos la inicial.
- Como medida adicional es importante que antes de comenzar el postensado se marquen algunos torones a una medida estándar desde la cara de la platina y luego de finalizado el proceso se verifique esta medida. La elongación obtenida de esta forma comparada con la obtenida por la apertura del embolo del gato (descrita anteriormente) debe ser similar, en caso contrario se deberá revisar si la carga de bloqueo no es suficiente y si por el contrario se puede reducir.

Gato monotoron

- Para este es necesario marcar los torones a una medida estándar antes de introducir el gato. Luego se introduce, se ajusta y se procede a tensionar. El gato mediante el sistema hidráulico agarra el torón y empieza el recorrido hasta llegar bien sea hasta el tope cuando la elongación es mayor que el recorrido o hasta alcanzarla cuando es menor. Después se procede a clavar la cuña y luego a destensionar.

- Cuando la elongación es mayor que el recorrido se repite el proceso hasta llegar a la elongación y presión calculadas. El mismo proceso se repite con todos los demás torones en forma alternada.
- Para ambos tipos de equipos, si las elongaciones obtenidas coinciden con las teóricas se continua exitoso el procedimiento. Si no se cumple esto, es necesario analizar y llegado el momento se puede retensar los torones con elongaciones bajas con la misma carga o aun aumentándola, pero sin sobrepasar el 80% de la carga de rotura del torón (para torón de 0.5" (1/2) 15.2 ton, para torón de 0.6" (5/8) 2106 ton.

Pruebas de carga

- Los anclajes se ensayan aleatoriamente, al momento del tensionamiento a 1.25 veces la tensión de diseño, mediante al uso de gato multitorón para anclajes de más de 4 torones y monotorón para anclajes de menos de 4 torones. Al inicio del tensionamiento se procederá a igualar la posición y longitud de los cables en la parte viva con el gato, cuñándolos provisionalmente con una precarga inicial de 2 toneladas por torón. A continuación, se instala el gato y se lleva la carga a 125% de la carga de trabajo manteniéndola al menos por un minuto. Si la aguja del manómetro se mantiene absolutamente quieta y el alargamiento corresponde a los límites de fabricación del cable, el anclaje supera la prueba. De no ser así, el anclaje debe ser nuevamente inyectado. Una vez aprobado el ensayo por el interventor, se descargará y se procederá al tensionamiento definitivo. Se debe tener en cuenta que todos los anclajes que sean sometidos a las pruebas se deben relajar nuevamente y llevar hasta el 80% de la fuerza máxima, y verificando el alargamiento de los cables recomendado en el diseño.

15.2 RECOMENDACIONES GENERALES

En terrenos inclinados la fuerza de gravedad juega un importante papel en la formación de inestabilidades pues existe un componente sobre la masa de suelo que induce a que una masa se deslice a lo largo de una superficie de falla, una vez se supera la resistencia al cortante de dicho material. Para que esto suceda existen una serie de factores que coadyuvan a que se disminuyan las propiedades de resistencia de los suelos tales como incremento de los niveles de humedad – saturación, inclinación o pendiente de los terrenos, modificaciones antrópicas entre otras.

Con el fin de mitigar las inestabilidades generadas o prevenir la ocurrencia de estas, se presentan a continuación una serie de medidas que deben tenerse en cuenta en los procesos de intervención de un terreno. Las medidas se plantean como obras de mitigación y/o control hacia dos aspectos fundamentales: Las modificaciones del terreno por factores antrópicos y el control de las aguas, que constituyen la principal causa de la formación de inestabilidades en nuestro medio.

Para la construcción de viviendas nuevas y obras de infraestructura se deben realizar los estudios de detalle, para definir las condiciones de estabilidad puntuales, estos estudios deben ser aprobados en curaduría de acuerdo con la normatividad vigente.

15.2.1 Modificaciones del terreno

La creciente demanda por terrenos para construir viviendas ha hecho que se ocupen terrenos de altas pendientes y pobres propiedades geotécnicas, mediante emplazamientos logrados a través de cortes de las laderas que deterioran la estabilidad precaria de por sí, de las mismas.

Con el fin de prevenir inestabilidades en las zonas de alta pendiente, es necesario incluir en las prácticas de construcción algunas recomendaciones que pretenden disminuir la probabilidad de que ocurran movimientos en masa que pueden tener graves consecuencias en los aspectos económicos y sociales

Es necesario que la comunidad que interviene las laderas que conforman las vertientes de las diferentes quebradas, conserven el retiro mínimo establecido en el POT de la ciudad, con el fin de prevenir emergencias asociadas a las crecientes o avenidas torrenciales como a la posibilidad de ser afectados por movimientos en masa.

En primer lugar, se recomienda que los cortes de la ladera que se realizan entre viviendas adyacentes no deben superar 3 m de altura y es necesario mantener un retiro mínimo de las zonas de taludes para el establecimiento de la vivienda, dejando un retiro tanto en la parte superior del talud como en la parte inferior del mismo, no menos de 2/3 de la altura antes mencionada, como se muestra en la Figura 162.

En el caso de existir taludes con mayores alturas a la mencionada se deberán construir estructuras de contención que permitan garantizar la estabilidad de esta. Estas estructuras deberán cimentarse adecuadamente sobrepasando materiales de lleno y empotrándose en terrenos aptos para tal fin.

Para el caso de terrenos con predominio de materiales limo arcillosos o arcillosos, se podrán conformar taludes hasta la altura recomendada anteriormente con inclinación que mantenga una relación de corte de 0.5H:1V (62°). En el caso de materiales limosos o arenosos, la inclinación o pendiente del talud generado no debe exceder de 1H:1V.

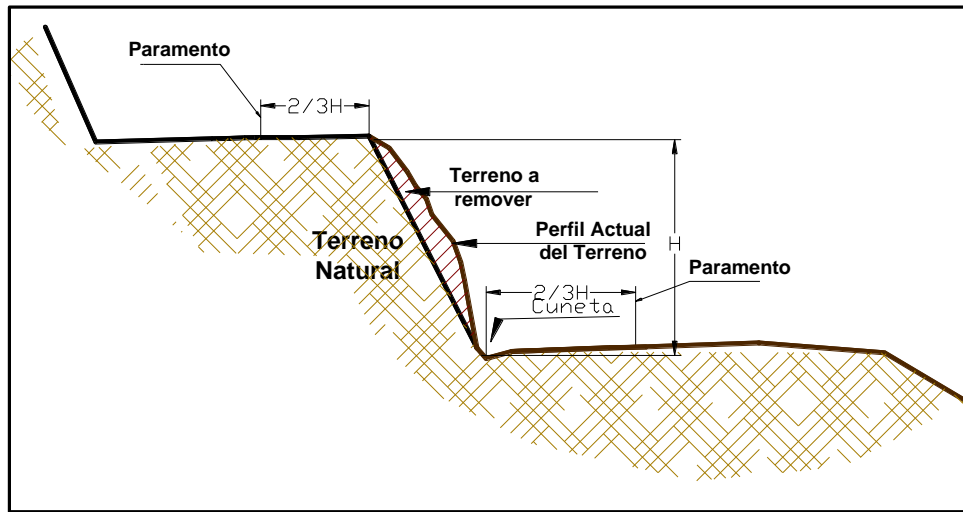


Figura 193. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.

En sectores en donde se detecte la presencia de agrietamientos en el terreno o deformaciones en el talud que amenacen el sector, deben intervenirse estos taludes retirando el material inestable y conformando las pendientes anteriormente recomendadas, de acuerdo con el tipo de material que conforma el talud (Figura 163). Esta intervención debe realizarse con medios manuales y con la orientación de personal calificado, además de tener las respectivas medidas de seguridad para el personal que labore allí.

Si el talud a intervenir presenta suelos limo arcillosos o arcillosos se podrá cubrir el área afectada o intervenida con cespiones de grama o en su defecto se podrán utilizar productos sintéticos (biomantos, agromantos, etc) mezclados con semillas de pastos que permitan el establecimiento de la cobertura en el menor tiempo posible

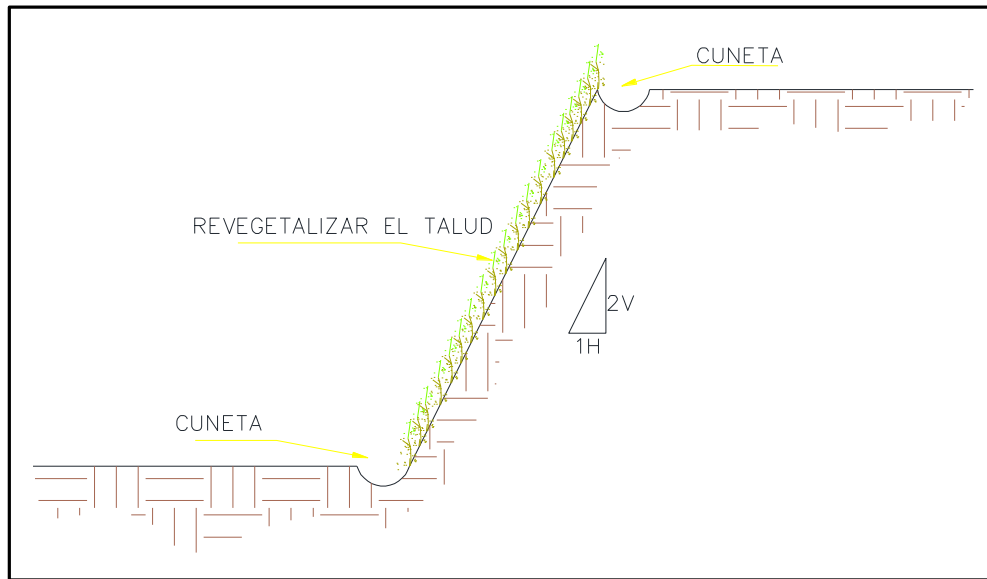


Figura 194. Esquema de recomendaciones para taludes

Si los materiales que conforman el talud son limosos o arenosos, se recomienda el cubrimiento de la zona expuesta mediante la utilización de malla de gallinero y mortero. La malla debe anclarse al talud utilizando pernos de acero, que deberán tener longitudes no inferiores a 0.50 m. Sobre la malla se colocará un mortero de arena-cemento en un espesor no inferior a 5 cm. se deberán dejar oídos o lloraderos para permitir el drenaje de aguas infiltradas detrás de la piel o placa. Estos lloraderos se construirán con trozos de tubería pvc sanitaria de 2 pulgadas de diámetro de 40 cm de longitud, que atravesarán la cubierta y se dejará 5 cm por fuera de la misma. Se deberá garantizar una pendiente del 5% con respecto a la horizontal.

En sectores donde se presenten grietas de tensión, se deberá inicialmente rellenarlas y sellarlas utilizando el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se debe preparar una lechada de agua-cal lo suficientemente fluida para que percole por la grieta y descienda la mayor profundidad posible. Una vez hecho esto, se excavará a lado y lado de la grieta en un ancho máximo de 10 cm, y hasta una profundidad no inferior a 0.50 m, donde se colocará una mezcla de suelo y cal en proporción de 8:1, la cual colocará en capas de no más de 0.20 m y se compactará utilizando pisones manuales, hasta alcanzar la superficie del terreno. Se deberá mantener la vigilancia sobre estos terrenos y en caso de que se presenten nuevos agrietamientos, se deberá evaluar la posibilidad de intervenir el talud reconfigurándolo con las inclinaciones anteriormente mencionadas.

15.2.2 Control de drenaje

El agua constituye un factor determinante en la formación de inestabilidades de terrenos inclinados, pues causan deterioro de las propiedades que gobiernan la resistencia de los suelos que conforman los taludes. Por lo anterior, es preciso mantener el control estricto sobre las aguas lluvias y de escorrentía para prevenir o mitigar efectos adversos sobre la estabilidad de taludes y laderas. Para lograr el fin antes mencionado, se presentan algunas recomendaciones generales que buscan el control de las aguas y por ende mantener condiciones de estabilidad adecuadas.

Cunetas y rondas de coronación

Es necesario que, en sectores con áreas aferentes importantes, se construya una cuneta o ronda de coronación que intercepte las aguas de escorrentía que puedan afectar el talud objeto de intervención. Estas cunetas o rondas deben construirse por detrás de la corona de este, a una distancia mínima de 1.0 m. Estos elementos deberán tener una pendiente no inferior al 2% y no superior al 5% y deberán entregarse a drenajes naturales o a la red de aguas lluvias. Estas cunetas se podrán construir con sacos de suelo-cemento o con concreto simple, como se muestra en la Figura 164.

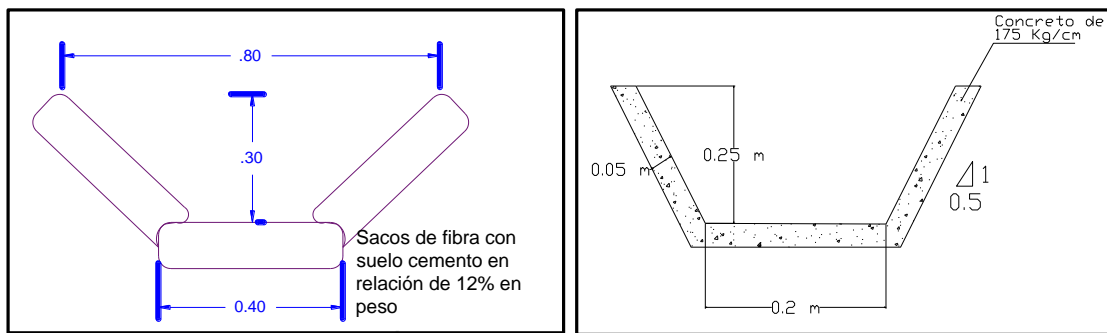


Figura 195. Características de las cunetas

En la parte inferior del talud (pie o pata del talud) se deberá construir una cuneta que permita captar y conducir las aguas de escorrentía que fluyan por el talud, de tal manera que se evite la infiltración o la formación de procesos erosivos.

Las cunetas recomendadas podrán construirse en concreto y debajo de la misma, se deberá colocar un entresuelo en piedra y arena con espesor no inferior a 10 cm. Las especificaciones de pendiente y entrega serán las recomendadas anteriormente

para las rondas de coronación. Estas cunetas deberán llevar las aguas hacia la red de aguas lluvias de la zona o hacia los drenajes naturales. Se debe verificar que la entrega se haga de manera adecuada, evitando la formación de procesos erosivos.

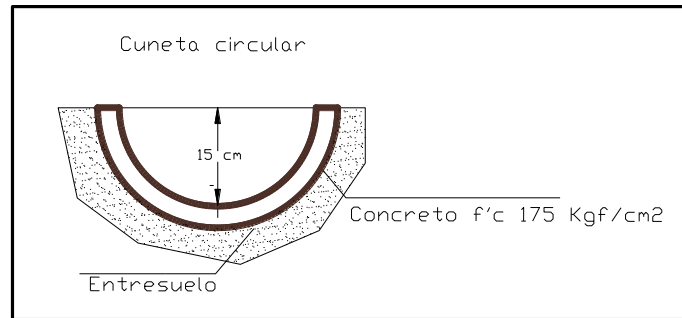


Figura 196. Forma de construcción de las cunetas propuestas

Captación y conducción de aguas lluvias en viviendas

Cada vivienda debe implementar un sistema de captación y conducción de aguas lluvias mediante canoas que recojan las aguas de los techos y las conduzcan por medio de bajantes a la red de aguas lluvias del sector o en su defecto a tanques de almacenamiento para ser aprovechadas en labores de limpieza.

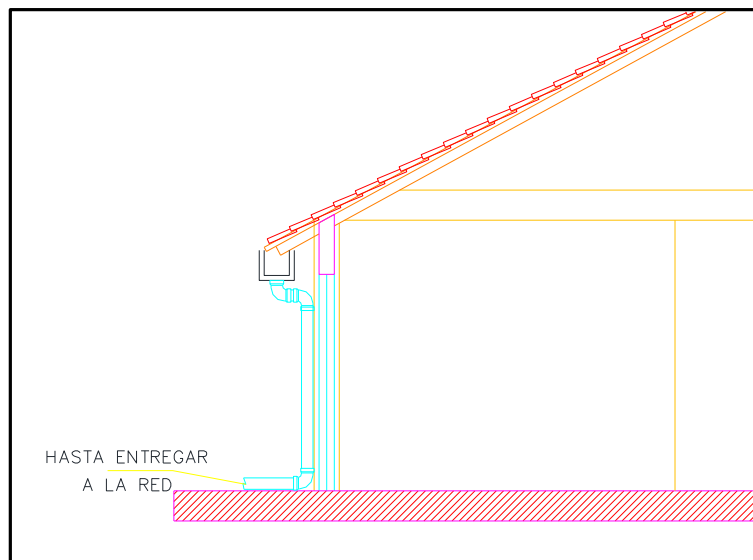


Figura 197. Esquema de bajantes

Las redes de acueducto y alcantarillado de cada vivienda deben construirse en tuberías de p.v.c que permitan cierta flexibilidad y eviten el rompimiento o deterioro ante pequeños movimientos o desplazamientos del terreno. Debe realizarse

periódicamente evaluaciones del estado de las redes con el fin verificar su adecuado comportamiento y/o la necesidad de reemplazar alguna de ellas.

Es necesario que al interior y/o exterior de cada vivienda se verifique que no existen zonas de empozamiento y que las aguas lluvias y de escorrentía fluyen adecuadamente hacia las obras de drenaje o hacia los drenajes naturales.

Drenaje en vías y senderos

Se debe implementar o mejorar el sistema de drenaje en calles y senderos mediante la construcción o adecuación de cunetas y canales que permitan captar y conducir adecuadamente las aguas lluvias y de escorrentía hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales. Para lo anterior, durante el programa de intervención se definirán los trazados de las redes de cunetas, ajustándose a las condiciones de espacio, pendiente y caudal o se reemplazarán las que se requieran por su estado o por su capacidad.

Estos sistemas de captación de aguas lluvias deberán estar provistos de estructuras de disipación para atravesar terrenos de muy alta pendiente, sin que se afecte el flujo normal de las aguas.

Tanto las redes de acueducto como alcantarillado deben ubicarse sobre terrenos estables. En sectores que muestren alguna actividad inestable, deberán colocarse superficialmente para mantener vigilancia sobre las mismas.

Deberá procurarse la construcción de sumideros en calles y senderos para captar las aguas lluvias y escorrentías que fluyen por los mismos y conducirlos adecuadamente hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales.

Obras de drenaje complementarias

Todas las obras de ingeniería que se recomiendan para mejorar la estabilidad tales como muros, pantallas ancladas, pantalla de pilas etc, deberán complementarse con obras de drenaje que eviten el deterioro o la falla de estas. En este orden se deberán construir cunetas, filtros y drenes horizontales que mantengan controlado las aguas lluvias, de escorrentía y el nivel freático en los sectores intervenidos.

Drenes horizontales o de penetración.

Los drenes subhorizontales consisten en introducir una tubería de p.v.c con una leve pendiente al terreno para abatir o controlar el nivel freático y mantener las

condiciones de estabilidad del sector. Los drenes se construirán en tubería de p.v.c sanitaria de 2 pulgadas de diámetro, ranurada o perforada y se forrará con tela de geotextil no tejido tipo NT 2500 o similar. La inclinación de los drenes será de 4 a 6° con respecto a la horizontal. El espaciamiento tanto vertical como horizontal se especifica en cada uno de los planos constructivos.

Se dejará un tramo de tubería de 15 a 20 cm por fuera del talud y se conectará con manguera flexible para conducir las aguas captadas hacia una cuneta, la red de aguas lluvias o hacia un drenaje natural.

Filtros detrás de muros

Detrás de las estructuras de contención es obligatorio la construcción de filtros para el control de las aguas infiltradas. Los filtros detrás de estructuras se podrán construir con material granular limpio envuelto en geotextil no tejido con un ancho mínimo de 0.50 m y con altura de 2/3 partes de la altura del muro. La parte restante hasta llegar a la corona del muro se hará con material de lleno convencional. En la parte inferior del filtro se colocará una tubería perforada de 4 pulgadas, que se conectará a la red de aguas lluvias o a un drenaje del sector.

En la Figura 198 se presentan los detalles para el filtro detrás de estructuras.

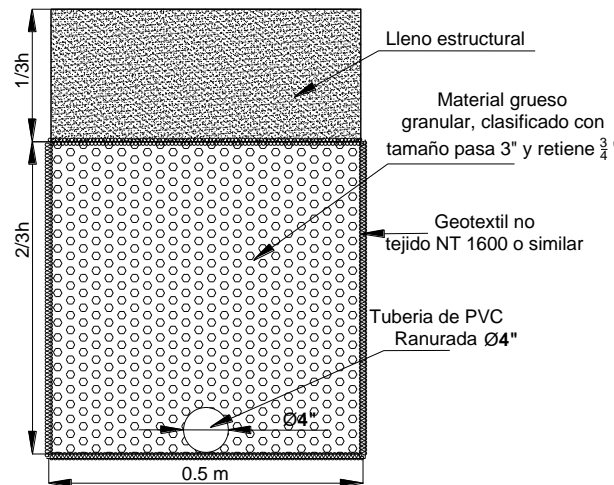


Figura 198. Características de los filtros propuestos

Es conveniente que en la pantalla del muro de contención se construyan oídos o lloraderos que faciliten la evacuación de excesos de agua para evitar presiones

adicionales sobre la estructura. Estos oídos se conforman dejando embebido en el concreto la tubería de p.v.c de 2 pulgadas que atraviesan la pantalla de concreto.

15.2.3 Viviendas afectadas por obras propuestas

Para la localización de las obras de estabilización propuestas para el polígono La Sierra, se presenta afectación en un total de 7 edificaciones para la construcción de anclajes. En la Tabla 64 se relacionan las viviendas afectadas para el polígono:

Tabla 64 Viviendas afectadas por obras propuestas

OBRA	CBML	DIRECCIÓN	NIVELES	Polígono
Obras anclajes	8170010066001	Cr 5 Este b # 53 d 112 (101)	1	La Sierra
	8170010067001	Cr 5 Este # 53 d 112	1	La Sierra
	8170010049001	Cr 6 Este-79 cl 54a	1	La Sierra
	8170010099001	No identificada	1	La Sierra
	8170010099002	No identificada	1	La Sierra
	8170010038002	Cl 54AA 7A Este 49 116	1	La Sierra
	8170010100001	Vivienda demolida	0	La Sierra
	8170010030001	Cr 10 Este 54AA 01	1	La Sierra
	8170010033001	No identificada	1	La Sierra
	90080010003002	CRA 10 Este # 54 aa 02	1	La Sierra
	90080010021001	Vivienda demolida	0	La Sierra
	90080010021002	No identificada	1	La Sierra
	90080010001001	Cr 10 Este cl 55aa	1	La Sierra
	90080010002001	Cr 10 Este 53B 74	1	La Sierra
	90080010022001	Vivienda demolida	0	La Sierra
	90080010001002	Cr 10 Este 53B 68	1	La Sierra
	8170010030002	Cr 9 a Este	1	La Sierra

15.2.4 Viviendas en zona de riesgo no mitigable

En el polígono La Sierra se identifican un total de 23 viviendas ubicadas en zonas de riesgo alto no mitigable, estas se relacionan en la Tabla 65.

Tabla 65 Viviendas localizadas en zonas de alto riesgo no mitigable en el polígono La Sierra.

CBMLC	Direccion	Niveles	Estado construcción
8170110092002	Sin nomenclatura	1	Completa
8170010072001	Cr 5 este # 53 d 16	2	Completa
8170010075001	No identificada	1	Completa
8170010086001	Ni	1	En construccion
8170010073001	Cr 5 este 53 d 14	1	Completa
8170010037001	Cr5e#53-04	2	Completa
8170010038002	Cl 54AA 7A Este 49 116	1	Completa
8170010030001	Cr 10 Este 54AA 01	1	Completa
90080010003001	Cr10e#54aa	1	Completa
90080010003002	CRA 10 este # 54 aa 02	1	Completa
90080010005002	Cr 10este 54aa 04 (115)	1	Completa
8170010009002	Cr3e#54	1	Completa
90080010021002	No identificado	1	Completa
90080010015001	Crr10e	2	Completa
90080010001001	Cr 10 este cl 55aa	1	Completa
90080010002001	Cr 10 Este 53B 74	1	Completa
90080010016001	No identificado	1	Completa
90080010012001	Cr 10 Este 54A 28 0115	1	completa
8170010034002	CL 54aa 7a este 49 (110)	1	completa
8170010099002	No identificado	1	completa
90080010019001	No identificado	1	completa
90080010001002	Cr 10 Este 53B 68	1	completa
90080010019002	No identificada	1	completa

15.3 RECOMENDACIONES HIDRÁULICA

15.3.1 Diseño de obra

Análisis de Problemática – Inundación

En el capítulo de análisis hidráulico se presentaron los resultados obtenidos de la quebrada La Meditadora en la zona entre la calle 56 B y 54 A y entre la carrera 7 Este y 8 Este, barrio La Sierra, municipio de Medellín, ratificando los aspectos ya evidenciados en el recorrido de campo en cuanto a las zonas de inundación, específicamente en la zona de paso entre las calles 56 B y 54 B, que para la zona colindante al coliseo y parque infantil, no se cuenta con un canal definido para el tránsito del flujo. En cuanto a este tipo de afectaciones, se tienen las siguientes causas generales:

- Encharcamiento por lluvias intensas sobre áreas planas
- Encharcamiento por deficiencias de drenaje.
- Desbordamiento de corrientes naturales.
- Desbordamiento de ciénagas.
- Avalanchas producidas por erupciones volcánicas, sismos, deslizamientos y formación de presas naturales.
- Obstáculos al flujo por la construcción de obras civiles.
- Sedimentación.

Para el caso particular del sitio de estudio se presentan dos condiciones particulares del desbordamiento del agua, la primera correspondiente a la falta de un canal principal que conduzca las aguas, zona colindante a la calle 56 B, así como la ocupación de la vertiente con infraestructura tipo coliseo y juegos infantiles, y la segunda, debido a la construcción de obras insuficientes para la captura, conducción y descarga de los caudales de creciente en la quebrada La Meditadora. Estas condiciones fueron validadas a partir de los resultados obtenidos en la modelación hidráulica de las condiciones actuales, en cuanto a los niveles del agua y la generación de la mancha de inundación.

La mitigación de las afectaciones por inundaciones se puede subdividir en las siguientes alternativas de solución: Medidas No Estructurales: Protección De La Cuenca, Zonificación Rural Y Urbana, Políticas De Desarrollo, Normas De Operación, Dragados, Construcción A Prueba De Inundaciones, y Medidas Estructurales: Este conjunto de medidas comprende aquellas obras de ingeniería que se diseñan con el propósito de mitigar las grandes crecientes de los ríos en

todas sus zonas susceptibles a inundaciones, ya sea almacenando, protegiendo sus márgenes, confinando, evacuando los excesos y adecuando sus canales (Posada, 1994). Entre las obras comúnmente usadas se encuentran las siguientes: Embalses de regulación, Diques de confinamiento lateral, Diques de confinamiento perimetral, By Pass par evacuación de excesos, Adecuación de canal para condiciones hidráulicas eficientes.

Los análisis buscarán plantear las obras que permitan captar, conducir y descargar el flujo de creciente de la quebrada La Meditadora, en las zonas aferentes a las calles 56 B y 54 B. Inicialmente, es necesario contemplar el retiro de la zona de juegos infantiles y coliseo, así como las viviendas ubicadas en la zona de retiro de la corriente, especialmente para el tramo aguas abajo de la calle 56 B y en la zona de la calle 54 B.

Diseño Obra – Canal Zona de Calle 56 B

Dentro de la zona aguas arriba de la calle 56 B, la quebrada La Meditadora no cuenta con un cauce o canal principal, el cual permita concentrar el flujo dentro de una sección, y por ello, se presenta el escurrimiento de forma difusa al momento de fuertes tormentas.

Se propone implementar un canal escalonado de sección prismática, el cual cuenta con una estructura de encole y descole iniciando aguas arriba del sitio donde actualmente se ubican los juegos infantiles, y finalice aguas abajo de la calle 56 B. La obra permitirá concentrar las crecientes de la quebrada La Meditadora dentro de la sección transversal del mismo y sin afectaciones por el desbordamiento del agua.

Un análisis hidráulico se realizó con el fin de determinar la sección transversal que cuente con capacidad hidráulica para el tránsito de los máximos caudales en la quebrada. Para este análisis, inicialmente se utilizó el software Flow Pro. Este es un software que permite resolver ecuaciones de flujo gradualmente y rápidamente variado en canales abiertos con el fin de proveer un diseño hidráulico, el cual fue desarrollado por la firma ProSoft Apps. Entre sus herramientas, se encuentran diseños de perfiles de flujo en estado estacionario de los canales abiertos, que ayuda a visualizar alternativas de diseño y permite exportar a hojas de cálculo los informes del perfil de superficie e impresiones gráficas. El software permite el manejo de dos tipos de flujo sub crítico y supercrítico. Calcula rápidamente las propiedades de flujo y el canal, tales como la profundidad crítica, pendiente, radio

hidráulico, perímetro mojado, profundidad normal, rugosidad del canal, etc. Utiliza la ecuación de Manning y la integración numérica para la exactitud del estado del canal.

Para el análisis, se propone una sección transversal de 1,50 m por 1,50 m de profundidad, en concreto y una pendiente en cada huella del 3%. De acuerdo al material, se toma un coeficiente de rugosidad de manning de 0,017, resultados que se indican en la Figura 199.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el pre dimensionamiento hidráulico de la sección transversal para un canal en la quebrada La Meditadora, zona aferente a la calle 56 B, se cuenta con una profundidad normal de 1,10 m, inferior a la profundidad propuesta de 1,50 m, garantizando así un borde libre de 0,40 m. Es de indicar que estos resultados corresponden a un análisis previo a la modelación hidráulica de la obra.

Required Inputs		Computed Results	
Start station, m:	0+00.000	Normal depth, m:	1.027
End station, m:	0+010	Normal area, m ² :	1.540
Flowrate, m ³ /s:	8.99	Critical depth, m:	1.542
Width, m:	1.5	Critical area, m ² :	2.312
Manning's n:	0.017	Profile type:	steep, S-2
Bottom slope:	0.03	Flow type:	supercritical
Control depth, m:	1.542		
Side slope:	0		

Figura 199. Resultados Flow Pro, pre dimensión hidráulica canal.

Dentro de la Figura 107, se puede observar que la zona de juegos infantiles, inicia aproximadamente en la abscisa 0+090, sección en el modelo 280, por lo cual, se ha planteado iniciar la obra en la abscisa 0+085. Adicionalmente, de acuerdo a la topografía, para la zona aguas abajo de la calle 56 B, se tiene un tramo inicial de un canal de descarga proveniente de un sumidero en la vía, el cual entrega el flujo de aguas lluvias desde dicho lugar, y descarga sobre un punto donde la corriente cuenta con un canal natural definido. Por tal razón, se propone como sitio final del canal, la abscisa 0+185, sección del modelo 185.

A partir del sitio de inicio y fin del canal propuesto, se realizó el trazado del eje del canal, conservando la menor cantidad de curvas y con el radio de curvatura mínimo con el fin de evitar afectaciones por procesos de sobre elevación en curva, o formación de corrientes secundarias que conlleven al desbordamiento del flujo.

Según el eje de la quebrada La Meditadora para el escenario actual, y la proyección del nuevo canal, se ha trazado un alineamiento iniciando en la abscisa 0+085 y finalizando en 0+185, con un total de 5 curvas. Para el diseño geométrico del canal, específicamente el diseño horizontal, se utiliza en concepto de curvas circulares que también es utilizado en el diseño geométrico de vías. Esto con el fin de contar con elementos que permitan el cambio de dirección de forma suave y sin alterar el régimen normal de la corriente

En una curva circular la curvatura es constante. Para definir una curva circular se parte de dos elementos conocidos, siendo uno de ellos el ángulo de deflexión, definido como aquel que se mide entre un alineamiento y la prolongación del alineamiento anterior, corresponde al ángulo central de la curva necesaria para entrelazar los dos alineamientos geométricos. Este ángulo es usualmente llamado delta (Δ) de la curva (Agudelo, 2002).

Cuando el ángulo de deflexión o delta se mide en el sentido de las agujas del reloj, a partir de la prolongación del alineamiento anterior o primer lado, entonces se llamará derecho, mientras que, si se mide en sentido antihorario, izquierdo. El punto de tangencia entre el círculo y la recta, correspondiente al inicio de la curva, se denomina PC y el punto de tangencia donde termina la curva es el PT. Se llama tangente, T, al segmento PI - PC, que es igual al segmento PI - PT. Si se trazan las normales a la poligonal en el PC y en el PT se interceptarán en el punto O, centro de la curva. El ángulo PC.O.PT es igual al ángulo de deflexión delta. Los ángulos PC.O.PI y PT.O.PI son iguales y equivalentes a $\Delta/2$ (Agudelo, 2002). Esta información puede observarse en la Figura 200.

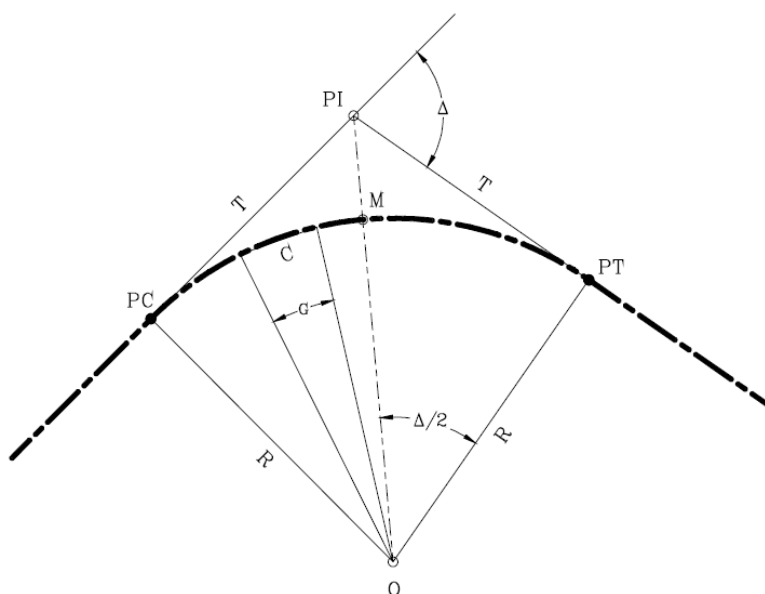


Figura 200. Elementos de una curva circular.

En un principio, se realizó el trazado del eje del futuro canal, el cual es similar al eje del tránsito de agua generado por la quebrada La Meditadora, con el fin de evitar variaciones importantes en el trazado de la corriente. A partir de lo anterior y como fue indicado previamente, se proponen cinco (5) puntos de cambio de dirección, los cuales corresponden a los elementos PI de las curvas circulares. En la Tabla 66, se presentan las coordenadas que permiten definir el alineamiento de futuro canal en zona aferente a la calle 56 B.

Tabla 66. Definición del alineamiento para canal, zona calle 56 B.

PI	Coordenadas	
	Este	Norte
1	839683,39	1181580,87
2	839673,31	1181562,85
3	839672,21	1181526,59
4	839680,71	1181517,30
5	839683,14	1181511,19

Una vez se ubicaron los PI que conforman el trazado, y según el ángulo de giro en cada uno de los cambios de dirección, se plantearon tangencias que varía entre 4,0 m y 2,0 m, para así definir los elementos PC y PT en cada una de las curvas. Este análisis y teniendo en cuenta cada uno de los elementos que conforman la curva

circular, se realizó el trazado geométrico del eje del futuro canal para la quebrada La Meditadora. En la Tabla 67, se presentan los elementos geométricos de cada una de las curvas proyectadas.

Tabla 67. Elementos geométricos de curvas en canal proyectado.

PI		1	2	3	4	5
R	(m)	33,16	12,27	9,85	10,92	14,94
T	(m)	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00
L	(m)	5,98	5,88	7,60	3,96	3,98
C	(m)	5,98	5,83	7,41	3,93	3,96
Δ		10°20'21"	27°28'47"	44°12'19"	20°45'15"	15°14'43"
O	Este	839710,87	839685,48	839682,18	839671,30	839668,52
	Norte	1181562,07	1181559,48	1181530,29	1181511,40	1181507,52
PC	Este	839685,31	839674,78	839672,33	839679,36	839682,40
	Norte	1181583,18	1181565,47	1181530,59	1181518,77	1181513,05
PI	Este	839683,39	839673,31	839672,21	839680,71	839683,14
	Norte	1181580,87	1181562,85	1181526,59	1181517,30	1181511,19
PT	Este	839681,93	839673,22	839674,91	839681,45	839683,37
	Norte	1181578,25	1181559,85	1181523,64	1181515,44	1181509,20

Teniendo en cuenta el trazo del eje del canal, se realizó el trazado de cada uno de los costados de la obra, teniendo en cuenta que la misma contará con un ancho de 1,50 m, información que, según el pre dimensionamiento hidráulico, contará con capacidad hidráulica para el paso de las crecientes. En la Figura 201, se presenta la ubicación en planta de la obra tipo canal que se plantea ubicar en la zona aferente a la calle 56 B.

Por otra parte, se realizó el trazado vertical del canal, para lo cual se propone mantener una pendiente de 3% en todo el recorrido de la obra. Dados los cambios en la pendiente del terreno – lecho de la quebrada, se realizará escalones con diferente longitud de huella y contra huella y así garantizar la pendiente en cada una de las huellas de 3%. Esto se realiza, además, con el fin de generar la disipación de la energía del flujo y evitar que se presenten afectaciones por procesos erosivos a la salida del canal.

Para este análisis, se tiene en cuenta los niveles obligados al inicio y fin del canal, abscisas 0+085 y 0+185, respectivamente, así como la propuesta de un box culvert en la zona de cruce bajo la vía Calle 56 B, considerando la conservación de este cruce vehicular. Por ello, se tiene una cota de inicio del canal de 1927,20 m.s.n.m.

y una cota final de 1915,16 m.s.n.m. En cuanto al cruce bajo la vía calle 56 B, se propone conservar una diferencia de altura de aproximadamente 1,50 m entre la rasante actual y la cota superior de la cobertura, con el fin de evitar afectaciones en la rasante o en la futura obra, así como el cruce de las redes existentes y futuras.

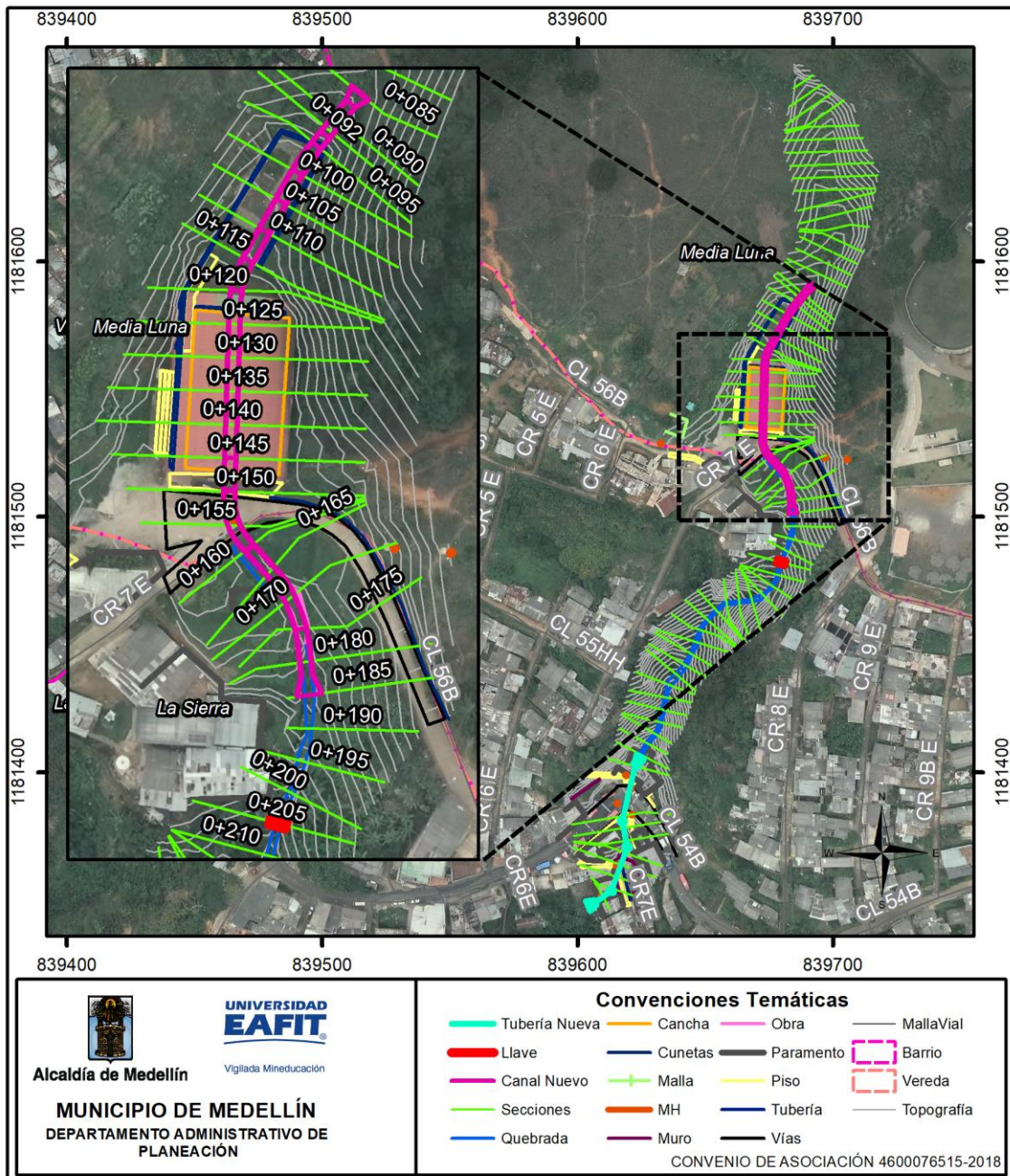


Figura 201. Ubicación en planta del canal proyectado.

Partiendo de esta información, se realizó el trazado vertical de la obra, conformando escalones en todo el recorrido. Inicialmente, es necesario realizar un descenso en la zona del encole, iniciando en la abscisa 0+085 y finalizando en 0+095, con el fin de realizar la profundización del canal con relación al nivel del terreno actual, esto debido a que en la actualidad no se cuenta con un canal principal o sección que confine el flujo. Este descenso permite que los bordes superiores del canal se encuentren cercanos al nivel actual del terreno.

Es importante considerar que, para realizar el desarrollo del canal en concreto planteado, es necesario realizar el retiro de la zona de juegos infantiles, así como el coliseo, junto con las viviendas ubicadas a una distancia menor de 15,0 m del eje del canal propuesto, así como del canal natural en la zona aguas abajo de la calle 56 B. En la Tabla 68, se presentan las cotas propuestas para cada uno de los tramos del canal.

Tabla 68. Cotas de fondo en el canal propuesto.

Abscisa	Cota (m.s.n.m.)	Abscisa	Cota (m.s.n.m.)
0+085	1927,20	0+105	1921,48
0+085	1926,58	0+110	1921,33
0+087	1926,52	0+110	1920,33
0+087	1926,02	0+115	1920,18
0+089	1925,96	0+115	1919,68
0+089	1924,96	0+120	1919,53
0+091	1924,90	0+120	1919,03
0+091	1923,90	0+145	1918,28
0+093	1923,84	0+145	1917,05
0+093	1923,34	0+150	1916,91
0+095	1923,28	0+160	1916,61
0+095	1922,78	0+175	1916,17
0+100	1922,63	0+175	1915,46
0+100	1922,13	0+185	1915,16
0+105	1921,98	-	-

Según la propuesta vertical de la obra, se contará con un total de 13 huellas y 12 contra huellas, donde las huellas tendrán una longitud de 2,0 m para el tramo entre la abscisa 0+085 y 0+095, correspondiente al tramo del descenso, zona inicial, y longitud entre 5,0 m y 25,0 m para el tramo posterior. Las contra huellas variarán entre 0,5 m y 1,20 m.

Para el planteamiento de estructuras escalonadas, es necesario tener en cuenta que las alturas verdaderas de flujo son mayores que las calculadas por la ecuación de Manning por la presencia de aire atrapado. En este aspecto, se presentan dos tipos diferentes de canales: El canal rápido y el canal en gradería (Suárez, 2001).

El canal rápido se construye a una pendiente igual a la del talud y en ocasiones se le colocan elementos sobresalientes en su fondo para disipar energía. Este sistema es muy utilizado por ser más económico, pero presenta el problema de la poca energía disipada. A lo largo de las canaletas se recomienda colocar elementos que produzcan gran rugosidad para generar flujo amortiguado y minimizar la velocidad en su pie (Suárez, 2001).

El sistema de graderías es más eficiente para disipar energía. El flujo en este tipo de canal es turbulento y debe construirse un muro lateral de borde libre suficiente para permitir la salpicadura del flujo. En la Figura 202, se presenta un esquema de canal escalonado y el paso del flujo.

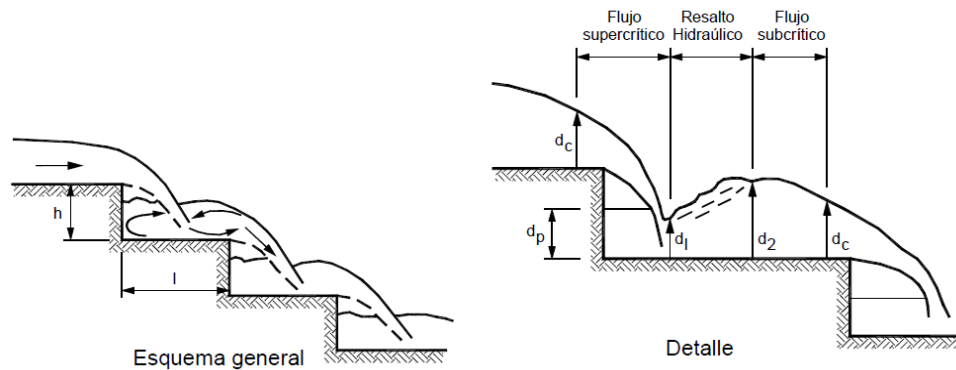


Figura 202. Régimen de flujo saltante en un canal escalonado (tomado de Suárez, 2001).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la esquematización del perfil del fondo del canal a través de toda la longitud a intervenir, información que se muestra en la Figura 203. Para el caso específico de la obra de cruce bajo la calle 56 B, se contará con un box culvert de geometría igual a la del canal rectangular (1,50 m de ancho por 1,50 m de alto), lo que permite evitar algún tipo de transición aguas arriba y aguas abajo de la obra de cruce. La cobertura contará con cota de fondo al inicio de 1916,91 m.s.n.m. y en el punto final de 1916,61 m.s.n.m., ubicado entre las abscisas 0+150 y 0+160, respectivamente, con una longitud total de 10,0 m.

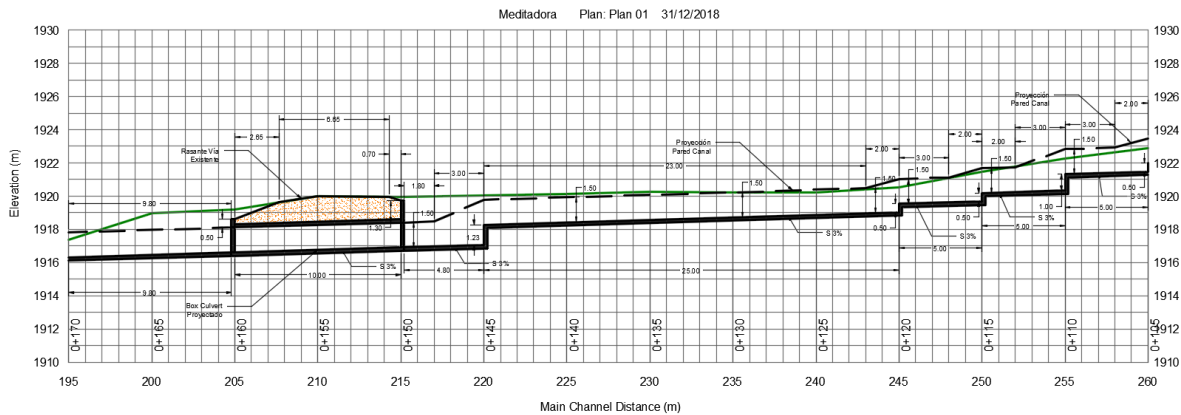


Figura 203. Perfil del canal proyectado en la quebrada La Meditadora.

Con el fin de confinar la vía calle 56 B, se propone ubicar un muro frontal en la zona de entrada al box culvert de 2,80 m, lo que representa una pantalla de 1,30 m por encima de las paredes del canal rectangular, y en la zona de salida de 0,50 m por encima, lo que indica una pantalla de 2,0 m de altura.

En cuanto a las paredes del canal, estas contarán con altura de 1,50 m, que, para las zonas de los escalones, se deberá realizar un ajuste entre la cota superior de la pantalla para el tramo aguas arriba y aguas abajo, donde la línea de la pantalla se ubicará con longitud variable entre 1,0 m y 3,0 m, con el fin de que el chorro no presente una zona con altura de pared inferior a la del nivel de la creciente. En la Figura 204, se presentan las diferentes geometrías de la sección transversal.

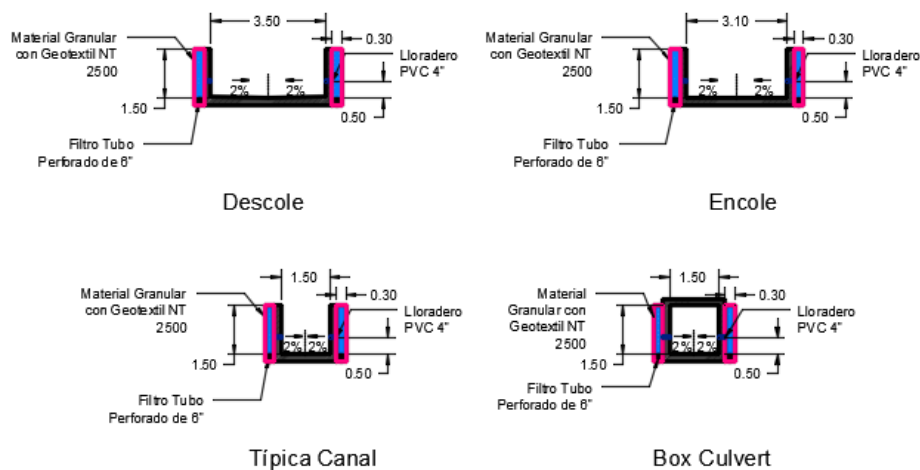


Figura 204. Secciones transversales del canal propuesto.

El canal propuesto contará con una sección transversal de 1,50 m de ancho por 1,50 m de alto. Para la zona de encole, se tendrá una longitud de transición de 2,20 m, iniciando con un ancho de 3,10 m hasta alcanzar el ancho de 1,50 m, longitud que corresponde al tamaño de la primera huella. Una transición similar se presenta en la zona de descole, donde se realizará un cambio de ancho de 1,50 m hasta 3,50 m en la abscisa 0+185, transición a realizar en una longitud de 3,50 m. Las transiciones en la zona de encole y descole, permiten que el flujo pase del canal natural a la estructura proyectada sin la generación de cambios fuertes en el comportamiento de la lámina del agua. En la Figura 205, se muestra la sección transversal del canal propuesto dentro de la geometría de la topografía.

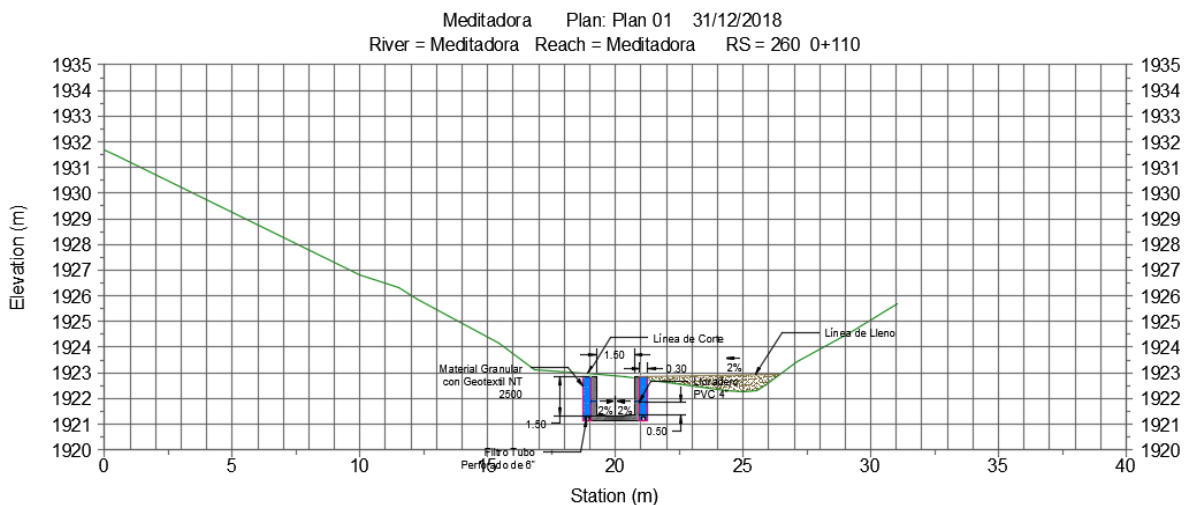


Figura 205. Sección transversal en topografía del canal propuesto.

Adicionalmente, la sección transversal tendrá una inclinación hacia el centro del canal con pendiente del 2%, a modo de geometría en “U”, con el fin de concentrar el flujo en la zona central de la sección y evitar procesos de sedimentación en los costados del canal. En la parte posterior de las paredes, es necesario incluir un filtro de 0,30 m de ancho por una altura de 1,50 m (igual a la altura de la pared), el cual debe contar con material granular empaquetado dentro de un geotextil NT 2500 o similar. En la zona inferior del filtro, se podrá utilizar una tubería perforada de diámetro igual a 6”. Esta obra permitirá abatir el nivel del agua sobre las caras posteriores del canal. Finalmente, se podrá utilizar una línea de lloraderos en las paredes del canal, conformados por pasos en PVC de 4”, ubicados a una altura de 0,50 m desde el fondo del canal y espaciados horizontalmente cada 3,0 m.

Estas obras, estarán complementadas con una llave anti socavación en la zona de encole y descole del canal proyectado, la cual contará con una profundidad mínima de 1,50 m, cumpliendo con la profundidad de socavación calculada.

Finalmente, se propone ubicar una llave control de fondo en la abscisa 0+205, sitio donde se presenta un leve cambio de pendiente del lecho, posterior a una zona de alta pendiente a la salida del canal en concreto proyectado, y evitar procesos erosivos que generen el descenso en el fondo del mismo. Esta llave contará con un espesor de 1,00 m y una profundidad de 1,50 m, con un ancho promedio de 2,50 m, lo cual permite que la estructura se encuentre inmersa dentro de las orillas del canal. Es de indicar que la cota de la cresta de la obra será igual a la cota actual del donde del canal natural. La obra será ejecutada en concreto ciclópeo con un porcentaje de piedra mayor al 60% y concreto de mínimo, 28 MPa. El tramo de canal natural entre el descole del canal en concreto proyectado y la llave de fondo, podrá ser recubierto con piedra empastada de tamaño 0,50 m, ya que, en dicho tramo, se observan procesos erosivos sobre el lecho, y así evitar afectaciones que conlleven a la formación de movimientos en masa.

Diseño Obra – Conducción en Calle 54 B

Según los análisis realizados y resultados obtenidos dentro del presente estudio, se ha demostrado las afectaciones generadas por la quebrada La Meditadora en la zona de cruce con la calle 54 B, debido a la insuficiencia hidráulica de la obra actual (tubería en concreto de 0,70 m), así como las intervenciones dentro de la corriente que conllevan al desbordamiento del flujo de creciente. Inicialmente, es necesario realizar el retiro de las viviendas ubicadas sobre el alineamiento principal de la corriente, así como en una franja de mínimo 10,0 m sobre ambos costados, con el fin de garantizar un corredor a través del cual se ejecute una obra que permita la captura, conducción y descarga de las aguas de la quebrada.

Es de indicar que la alternativa propuesta, controla y maneja los niveles de creciente de la quebrada La Meditadora, por lo cual, no se presentan obras de manejo de escorrentía desde la vía calle 54 B.

Teniendo en consideración la topología del tramo de interés (colindante a la calle 54 B), donde se cuenta con una vía existente, la cual cuenta con un sistema de redes actuales, así como las redes ubicadas en el tramo aguas abajo, junto a un paso peatonal de la zona, se plantea como alternativa el paso de la corriente a través de una conducción conformada por tramos de tubería y cámaras de inspección, las cuales me permitan el cambio de dirección y de nivel, minimizando

la pendiente en el fondo de esta, inferior a la pendiente en la topografía, la cual se considera alta y puede conllevar a la formación de procesos erosivos.

En un principio, se realizó la verificación de la capacidad hidráulica de varios diámetros de tubería para el alcantarillado propuesto, y diferentes pendientes de diseño. Esta información permite definir el diámetro de la tubería mínimo requerido para contar con la capacidad hidráulica de la obra y que la misma permita la conducción de la totalidad de las aguas residuales domésticas y no domésticas, teniendo en cuenta que se deben conducir a través de redes independientes. Para este análisis se utilizó la ecuación de manning la cual se muestra a continuación:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = V \cdot A$$

Donde n es el coeficiente de manning y representa la rugosidad de la superficie de la tubería, Rh es el Radio Hidráulico correspondiente a una sección circular de la tubería y S la pendiente de cada uno de los tramos. Como se indicó previamente, en un principio, se realizó un análisis para verificar la capacidad hidráulica de varios diámetros en un rango de pendientes, conservando el mismo material correspondiente a tubería en concreto (por ejemplo, tipo TITAN) y donde el coeficiente de rugosidad asumido es de 0,015 (valor recomendado por el proveedor, ajustado por el arrastre de material aluvial en una corriente natural). Los resultados del análisis de verificación de capacidad hidráulica se indica en la Tabla 69.

Tabla 69. Validación de capacidad hidráulica para diferentes pendientes y diámetros.

S (%)	D (")	D (mm)	n	V (m/s)	Q (l/s)	q (l/s)	q/Q <0,85	Check	Vreal/V
3,00	56	1400	0,015	5,73	8827,97	8990	1,02	NO	FALSO
4,00	56	1400	0,015	6,62	10193,66	8990	0,88	NO	1,01
5,00	56	1400	0,015	7,40	11396,86	8990	0,79	OK	0,98
3,00	60	1500	0,015	6,00	10611,15	8990	0,85	OK	1,00
4,00	60	1500	0,015	6,93	12252,71	8990	0,73	OK	0,96
5,00	60	1500	0,015	7,75	13698,94	8990	0,66	OK	0,93

Se realizó la verificación de capacidad hidráulica para el caudal de diseño correspondiente al caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en 40%, como consideración de seguridad, y para pendientes que varían entre 3% y 5%, como pendientes mínimas para una conducción.

Los resultados indican que, se requiere como mínimo, una pendiente del 5% para una conducción con diámetro interno de 1400 mm (56”), ya que, para pendientes y diámetros mayores, se continúa presentando capacidad hidráulica. Si bien para la pendiente del 4% y el diámetro de 1400 mm se presenta una capacidad de tubo lleno superior al caudal de diseño (10,19 m³/s), no se cumple con el criterio de relación de llenado (caudal de diseño sobre caudal a tubo lleno) que debe ser inferior a 0,85, RAS, 2000. Por otra parte, se tiene en cuenta que al aumentar el diámetro a 1500 mm – 60”, se puede contar con pendiente mínima de 3%, garantizando la capacidad hidráulica de la conducción.

Teniendo en consideración los resultados de validación hidráulica para las redes de alcantarillado, se plantea contar con pendiente mínima del 5% y diámetro de la conducción de 1400 mm. Esta red puede ser tipo TITAN, correspondiente a tubería en concreto con refuerzo. Considerando las condiciones del terreno, en cuanto a sección transversal y pendiente del fondo del canal para el tramo aguas arriba, se plantea la construcción de un cabezote de encole y de descole, que en general, busca conservar las normas dadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en el documento Normas y Especificaciones Generales de Construcción en Redes de Servicio, Tomo I, y en Redes y Acometidas de Alcantarillado, Capítulo 8, específicamente para el diámetro de 1400 mm correspondiente a la conducción proyectada.

Se realizó el trazado de la conducción siguiendo el alineamiento actual de la quebrada La Meditadora, sin la generación de cambios importantes en el trazado de la corriente. Como puntos de control se ubicó el sitio de encole, el cual se encuentra cercano al encole de la obra de cruce actual (0,70 m de diámetro) bajo la calle 54 B, en la abscisa 0+310, y un sitio de descarga ubicado aguas abajo de la abscisa 0+365, aproximadamente 7,0 m aguas abajo de dicho lugar. En la Tabla 70, se presenta la ubicación del centro de cada una de las cámaras que conforman a las redes de alcantarillado.

Tabla 70. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.

MH	Coordenadas	
	Este	Norte
E00	839622,55	1181402,51
C01	839617,44	1181380,84
C02	839619,32	1181370,78
C03	839613,24	1181353,53
B04	839606,92	1181348,90

A partir de la ubicación del eje de la conducción planteada, se generó el perfil del terreno, así como la ubicación de las cámaras de inspección proyectadas en el cambio de dirección de la misma. En la Figura 206, se presenta la ubicación en planta para la conducción de la quebrada La Meditadora en la zona colindante con la calle 54 B, incluyendo la propuesta de obra para el encole y descole, la cual será descrita posteriormente.

En la Figura 206, se puede observar la ubicación de la conducción planteada, la cual buscó conservar el mismo alineamiento de la corriente actual, minimizando el desplazamiento del drenaje. Teniendo en cuenta las especificaciones dadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en el documento Normas y Especificaciones Generales de Construcción en Redes de Servicio, Tomo I, y en Redes y Acometidas de Alcantarillado, Capítulo 8, para el diámetro planteado (1400 mm), las cámaras de inspección deben contar con un diámetro interno de 2,00 m, información que será ampliada más adelante.

Como información adicional, se contó con la ubicación de redes existentes que presentan incidencia en el trazado de la quebrada La Meditadora, con el fin de que la futura conducción, no genere intersección con dichas tuberías. Dentro de la información disponible, se contó con una red ubicada bajo la calle 54 B, donde se tiene dos cámaras de inspección sobre ambos lados del trazado de la futura conducción, cuyas cotas de fondo son 1866,86 m.s.n.m. y 1864,82 m.s.n.m., separadas una distancia de 5,21 m, lo que representa una pendiente de esta red de 0,39 m/m. Por tal razón, y considerando que la distancia entre una cámara de inspección y el trazado de la conducción para la quebrada La Meditadora es de 4,3 m, se estimó la cota de fondo de dicha red en el sitio de la conducción, con valor de 1865,18 m.s.n.m. Esta cota se encuentra cercana a la superficie o rasante de vía y por ello, se considera necesario realizar el cruce de la futura conducción para la quebrada La Meditadora por debajo de dicha red.

Un análisis similar fue realizado para una red existente bajo un paso peatonal ubicado aguas abajo de la calle 54 B. En dicho lugar se estimó una cota inferior de la red para la zona de cruce con la futura conducción de 1857,02 m.s.n.m., que al igual que para el cruce anterior, se ubica cercano a la superficie y por ello, el paso de la conducción deberá realizarse por debajo de dicha red.

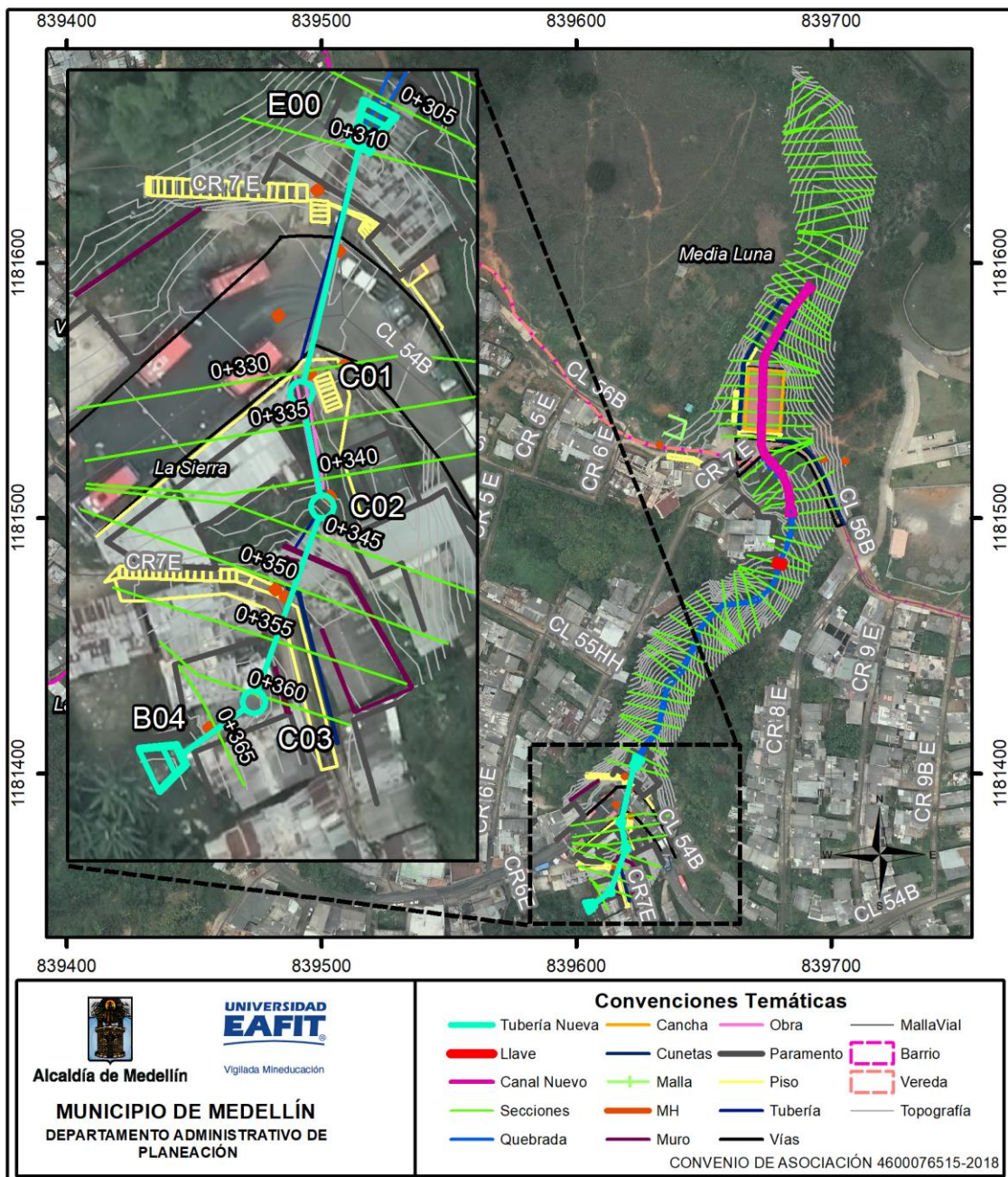


Figura 206. Localización en planta de las redes de alcantarillado planteadas.

A partir de la cota de entrega de la conducción sobre el fondo de la vertiente o cauce natural de la quebrada La Meditadora, las cotas inferiores de las redes existentes que cruzarán la conducción, y el sitio de encole, se planteó un perfil de la nueva obra, conservando una pendiente mínima del 5%, y así garantizara la capacidad hidráulica de la obra, que si bien para pendientes mayores se puede reducir el diámetro de la obra, se conservó en 1400 mm para permitir su mantenimiento y paso de sólidos – sedimentos, ya que la obra será utilizada por una corriente natural. Como primera instancia en la evaluación hidráulica de la nueva conducción para la quebrada La Meditadora, se realizará la verificación hidráulica de cada uno de los tramos. En la Tabla 71, se presentan las características de cada tramo de la red que se propone en la corriente.

Tabla 71. Especificaciones de los tramos de tubería.

MH	Cotas (m.s.n.m.)		Diámetros (mm)		Coordenadas	
	Llegada	Salida	Llegada	Salida	Este	Norte
E00	-	1864,10	-	1400	839622,55	1181402,51
C01	1861,55	1861,25	1400	1400	839617,44	1181380,84
C02	1858,53	1856,52	1400	1400	839619,32	1181370,78
C03	1853,26	1852,61	1400	1400	839613,24	1181353,53
B04	1852,27	-	1400	-	839606,92	1181348,90

Para la conducción proyectada, se cuenta con un total de 5 puntos o cámaras, las cuales permiten el cambio en pendiente y alineamiento. Teniendo en consideración la ubicación en planta de las redes, así como el perfil planteado de las obras, se determinaron las cotas bateas en cada uno de los tramos de tubería de las redes, información que permitió estimar la longitud real de tuberías y las pendientes de cada tramo, así realizar la verificación hidráulica real de la conducción diseñada. En la Figura 207, se presenta un esquema típico para la conducción proyectada.

Para realizar la verificación hidráulica de la conducción propuesta, nuevamente se utilizó la ecuación de manning, con el fin de analizar cada uno de los tramos propuestos y teniendo como parámetro de verificación, la capacidad de llenado de este, y que dicho parámetro se encuentre inferior a 0,85, tal como lo recomienda el RAS, 2000.

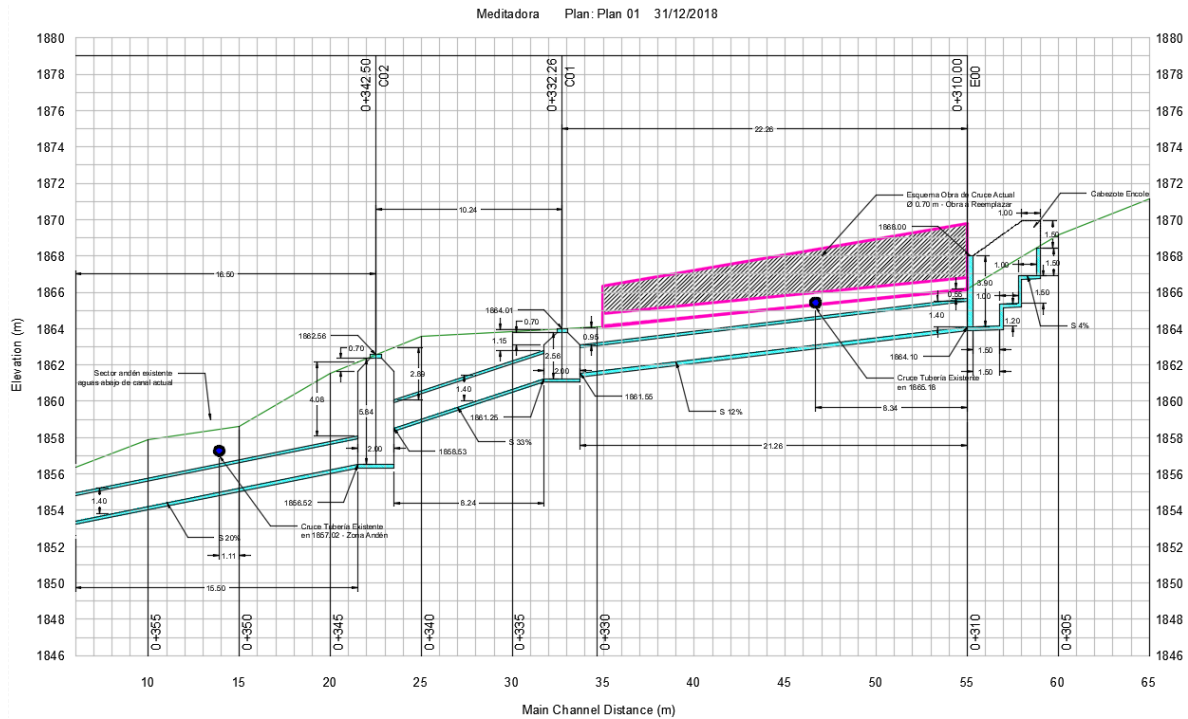


Figura 207. Perfil longitudinal de la conducción planteada.

En la Tabla 72, se presentan los resultados en el proceso de verificación. Es de indicar que la pendiente de cada uno de los tramos corresponde a la pendiente real, la cual ha sido estimada a partir de la cota de salida y llegada a cada una de las cámaras, utilizando la longitud real de tubería, no la longitud entre ejes de cámaras.

Tabla 72. Verificación de capacidad hidráulica para la conducción.

De	A	Cotas (m.s.n.m.)		L (m)	S (%)	D (mm)	n	V (m/s)	Q (l/s)	q (l/s)	q/Q <0.85	Check
		Inicial	Final									
E00	C01	1864,10	1861,55	21,26	12,0	1400	0,015	11,47	17651,78	8990	0,51	OK
C01	C02	1861,25	1858,53	8,24	33,0	1400	0,015	19,02	29283,36	8990	0,31	OK
C02	C03	1856,52	1853,26	16,29	20,0	1400	0,015	14,81	22800,71	8990	0,39	OK
C03	B04	1852,61	1852,27	6,83	5,0	1400	0,015	7,39	11371,80	8990	0,79	OK

Según los resultados obtenidos en el proceso de verificación de capacidad hidráulica, se cuenta con una máxima relación de llenado para el tramo C03-B04, con un valor de 0,79, inferior a 0,85, garantizando la capacidad hidráulica de toda la condición proyectada. Es de mencionar que el caudal de diseño utilizado corresponde al caudal para el periodo de retorno de 100 años mayorado en 40%.

Este incremento en el caudal con periodo de retorno, corresponde a un factor de seguridad asumido.

Es importante considerar que, con el fin de plantear el trazado vertical de la conducción, fue necesario partir de una cota de fondo en la zona del encole, inferior a la cota actual de la corriente. Para ello, se propone un canal de encole conformado por 3 huellas de 1,0 m, 1,0 m y 1,50 m, siendo la huella de mayor longitud, la ubicada previo al ingreso de la tubería de 1,40 m. Estas huellas se complementan con 3 contra huellas de 1,50 m, 1,50 m y 1,20 m, generando un canal escalonado con pendiente en las huellas del 4%, y así permitir el descenso del flujo hasta la cota inicial de la conducción. El cabezote de encole, contará además con un muro frontal de 3,90 m, con el fin de que al mismo alcance una altura cercana a la rasante de la vía. Es de indicar que el canal escalonado de encole, contará con una transición de 2,0 m de longitud (correspondiente a las dos primeras huellas), pasando de un ancho de 3,0 m a 1,80 m en el sitio de ingreso a la conducción.

Para la zona de descole, se contará con un cabezote en una longitud de 3,0 m, donde el ancho final será de 4,0 m. El muro frontal de descarga, tendrá una altura de 1,80 m por 1,80 m, y contará con un escalón intermedio de 0,70 m de contra huella y 1,0 m en la huella inicial, para así permitir una zona de transición en longitud de 2,0 m. La obra finalizará con una llave anti socavación de 1,50 m de profundidad. En la Figura 208, se muestra el detalle en las obras de encole y descole de la conducción proyectada.

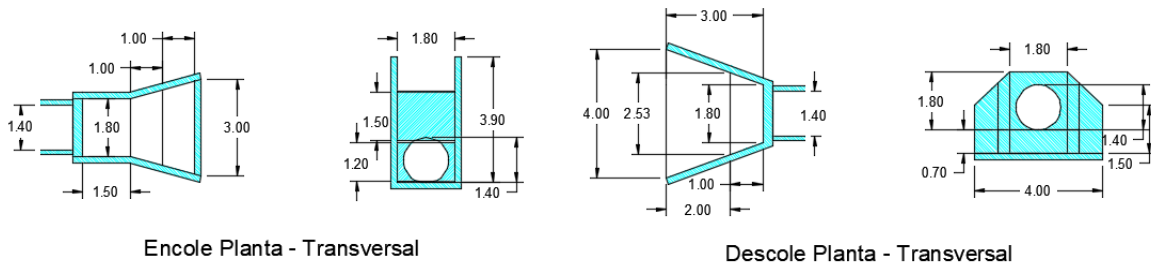


Figura 208. Detalles obra de encole y descole en conducción.

El análisis hidráulico planteado será complementado con la simulación hidráulica de la quebrada La Meditadora al incluir las obras en el sistema fluvial y que las transiciones entre el canal natural y las obras de conducción, cuente con un comportamiento adecuado y no se generen zonas de desbordamiento.

15.3.2 Evaluación condiciones futuras

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis hidráulico de la quebrada La Meditadora, así como la información suministrada por los residentes de la zona, se han presentado afectaciones por el desbordamiento del agua en los tramos aferentes a las calles 56 B y 54 B, barrio La Sierra, en el municipio de Medellín, teniendo en cuenta la falta de obras definidas para la conducción de las crecientes de la corriente, así como por varias intervenciones que han modificado el patrón de drenaje de la corriente. Por ello, se han planteado obras que permitan la captura, conducción y descarga de la quebrada La Meditadora en las zonas afectadas, tales como un canal rectangular en concreto para el tramo colindante a la calle 56 B y una conducción en la zona de la calle 54 B. Una vez propuestas las obras, se adelantó la evaluación del comportamiento hidráulico de la corriente al incluir estas obras dentro del sistema fluvial, así como la comparación entre los cambios de las principales variables para el escenario actual y el proyectado. En este análisis se utilizó nuevamente el modelo hidráulico HEC-RAS teniendo como base el modelo implementado para las condiciones existentes.

Las obras son planteadas teniendo en cuenta las afectaciones actuales en la quebrada La Meditadora y que, de acuerdo a las consideraciones propuestas por la Secretaría de Medio Ambiente, El Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo y Desastres – DAGRD, y Departamento Administrativo de Planeación, buscarán dar solución a los problemas específicos en el tramo de interés.

Parámetros de Entrada

El análisis hidráulico en condiciones futuras, es realizado a partir del modelo hidráulico utilizado para el escenario actual. Con base en esta información, se realizó el ajuste en la geometría, teniendo en cuenta que entre las abscisas 0+085 y 0+185, se implementará un canal rectangular en concreto. Por tal razón, ubicando el eje del canal y las cotas de fondo, se realizó el ajuste en geometría de estas secciones, y así incluir la nueva propuesta para la conducción de las aguas de la quebrada La Meditadora. Como complemento, se realizó la interpolación de secciones transversales, y así contar con secciones en los puntos de inicio y fin de cada una de las huellas del canal escalonado, ya que esto permite incluir dentro del modelo, la pendiente real en el fondo del canal para cada uno de los tramos.

La geometría del canal contempla la sección transversal de 1,50 m de ancho por 1,50 m de alto, con variaciones para la zona de encole y descole, donde los anchos son de 3,10 m y 3,50 m, respectivamente.

Adicionalmente, se realizó la eliminación de la abscisa 0+155, ya que se incluyó la futura cobertura – box culvert bajo la calle 56 B, la cual se ubica entre abscisas 0+150 y 0+160. En todo el recorrido del canal, se utilizó un coeficiente de rugosidad de manning de 0,017, correspondiente al material del concreto con proceso de abrasión por el paso de material aluvial.

Para el caso de la obra ubicada en el tramo de la calle 54 B, la cual consiste en una conducción (MH y tramos de tubería), solo se realizó el análisis del primer tramo de conducción (E00-C01), ya que dentro del modelo HEC RAS, no se permite realizar el análisis hidráulico de este tipo de obras. Sin embargo, el procedimiento realizado, permite evaluar la transición entre el canal natural y la conducción propuesta, especialmente en la zona del canal escalonado de encole y el primer tramo de tubería. Para los tramos aguas abajo de la conducción, en la Tabla 72, se demostró la capacidad hidráulica de cada uno de los tramos, con una relación de llenado inferior al 85%.

Con el fin de realizar una adecuada evaluación hidráulica del canal de encole, se realizó la interpolación de secciones transversales, tal y como se hizo para la primera obra (canal rectangular), y así incluir dentro del modelo, la pendiente real de esta obra. Se ajustó la geometría de las abscisas 0+310 y 0+335 con el fin de que representarán adecuadamente el tramo de la conducción E00 a C01. El coeficiente de rugosidad de manning usado en este tramo, fue de 0,015, tal como se implementó en el proceso de verificación hidráulica de la conducción.

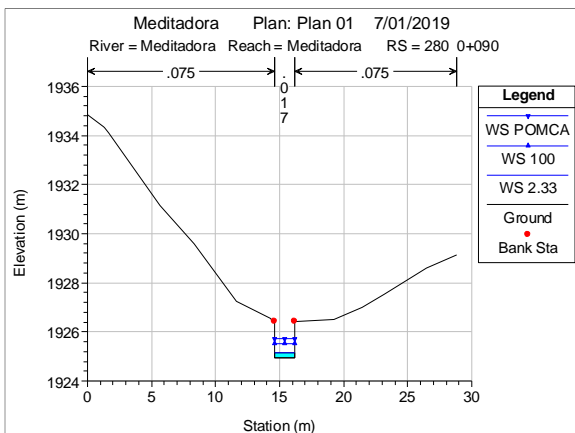
En cuanto a los caudales de diseño, condiciones de frontera, coeficientes de expansión y contracción, se conservan los valores utilizados para el modelo en condiciones actuales ya que estos no presentan variación al incluir las obras dentro del sistema fluvial. El caudal que permitirá evaluar el adecuado funcionamiento de las obras planteadas será aquel con periodo de retorno de 100 años mayorado en 40%, como factor de seguridad al momento de analizar la capacidad hidráulica de las obras.

Resultados

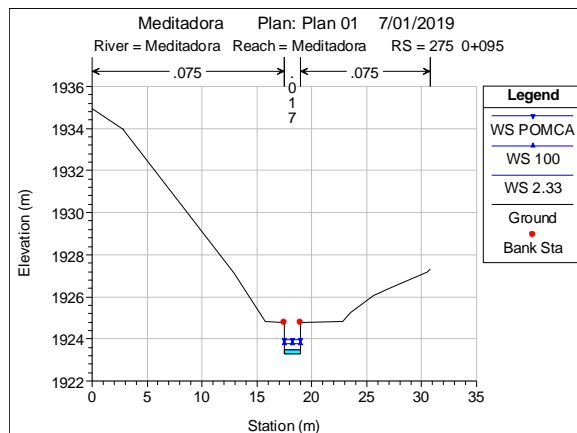
Una vez actualizada la geometría del modelo hidráulico en la quebrada La Meditadora, se realizó nuevamente la simulación hidráulica del tramo de estudio con el fin de analizar los cambios en las diferentes variables hidráulicas al incluir las obras dentro del sistema fluvial. Se presentan los resultados para los caudales máximos con periodo de retorno de 2,33, 100 años y POMCA, los demás resultados se muestran en el anexo 6.

Para el escenario con obras, se tiene un valor máximo de la velocidad de 9,46 m/s, 10,4 m/s y 10,6 m/s, para los caudales con periodos de retorno de 2.33, 100 años y POMCA, cuyos valores promedios son de 4,85 m/s, 6,12 m/s y 6,51 m/s, respectivamente. Es de indicar que estos valores son mayores que los presentados para el escenario actual, teniendo en cuenta que se reduce la rugosidad en varios tramos debido a la presencia de obras.

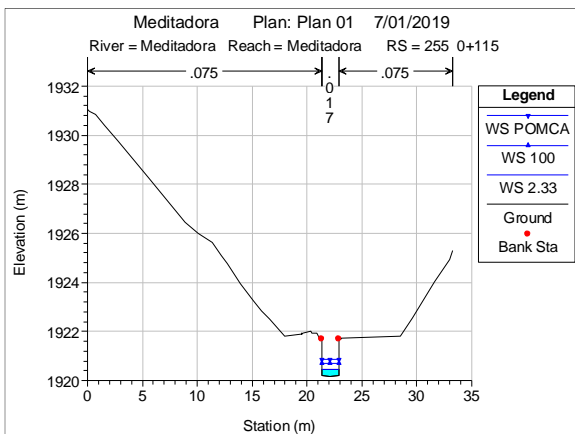
En cuanto a la profundidad del agua, se obtienen valores máximos de 1,04 m, 1,24 m y 1,45 m, cuyos valores promedios son de 0,36 m, 0,63 m y 0,77 m para los caudales con periodos de retorno de 2.33 y 100 años, así como para el caudal POMCA. Para el tramo específico del canal rectangular propuesto, la máxima profundidad del agua es de 1,30 m, con una variación en la zona de encole del box culvert propuesto cuya profundidad es de 1,40 m. Estos resultados permiten identificar que el flujo de creciente será contenido dentro de la sección transversal propuesta para el canal. En la Figura 209, se presentan algunas secciones transversales de la zona donde se plantea el canal rectangular en concreto.



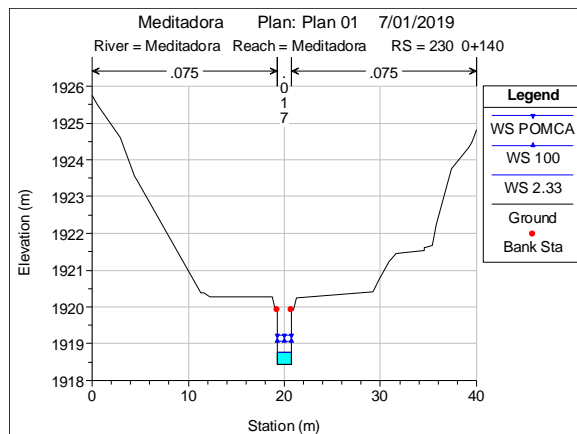
Sección 280 – 0+090



Sección 275 – 0+095



Sección 255 – 0+115



Sección 230 – 0+140

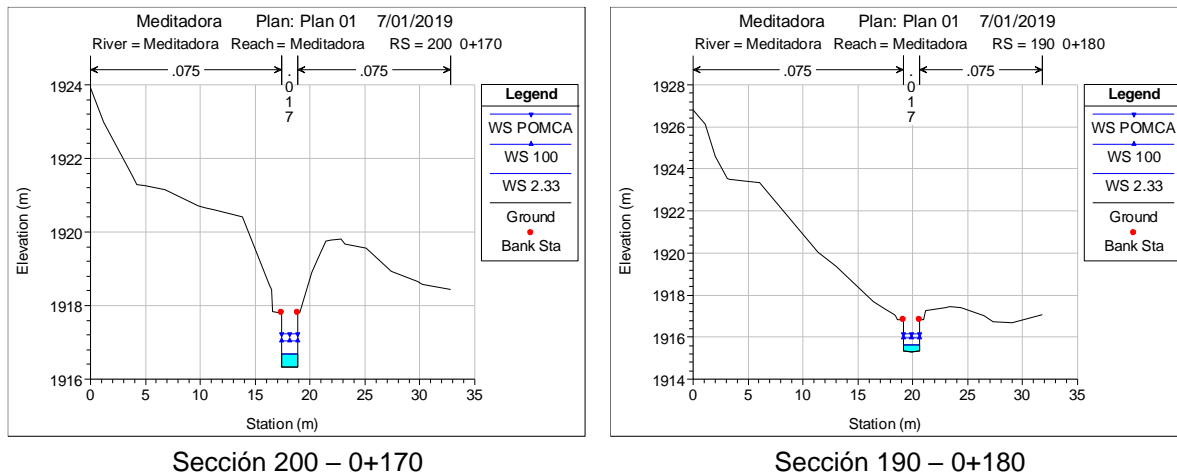


Figura 209. Secciones transversales sector canal en concreto proyectado

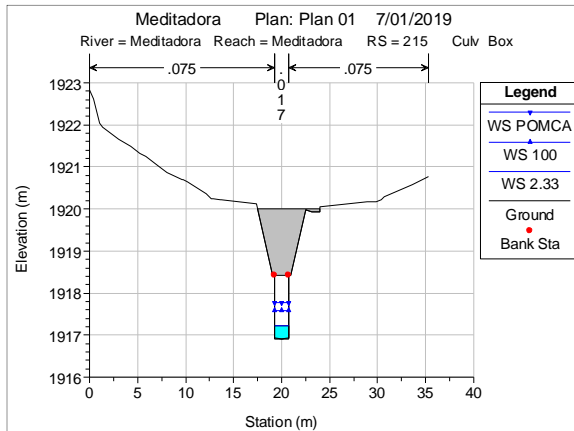
En la Tabla 73, se presentan los resultados numéricos para el paso de la creciente con periodo de retorno de 100 años mayorada en 40% - POMCA a través del box culvert a ubicar bajo la calle 56 B.

Tabla 73. Resultados numéricos, obra de cruce calle 56 B proyectada, caudal POMCA.

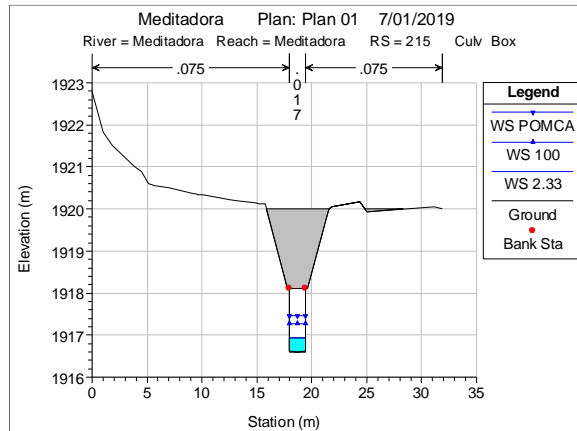
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Energía Arriba (m)	1921,18	Agua Inlet (m)	1917,78
Agua Arriba (m)	1917,64	Agua Outlet (m)	1917,47
Energía Abajo (m)	1919,98	H Normal (m)	0,83
Agua Abajo (m)	1917,47	V Arriba (m/s)	6,91
Delta Energía (m)	1,2	V Abajo (m/s)	6,96
Delta Agua (m)	0,16	Fondo Inlet (m)	1916,91
Culvert Control	Outlet	Fondo Outlet (m)	1916,61

De acuerdo a los resultados del modelo hidráulico para la obra de paso, se contará con una profundidad normal de 0,83 m al interior de la obra, garantizando un borde libre de 0,60 m teniendo en cuenta que la altura total de la obra será de 1,50 m.

Si bien en la zona de ingreso a la cobertura es probable alcanzar una mayor profundidad, según el modelo hidráulico, esto se debe al proceso de simulación dentro del programa utilizado, ya que, al encontrarse con una sección prismática a lo largo de la obra, los cambios de profundidad son mínimos y solo se generan en la zona de caída, debido a la formación de un pequeño resalto hidráulico como disipador de la energía del agua. En la Figura 210, se muestran las secciones transversales de la obra de paso bajo la calle 56 B, de acuerdo al diseño planteado.



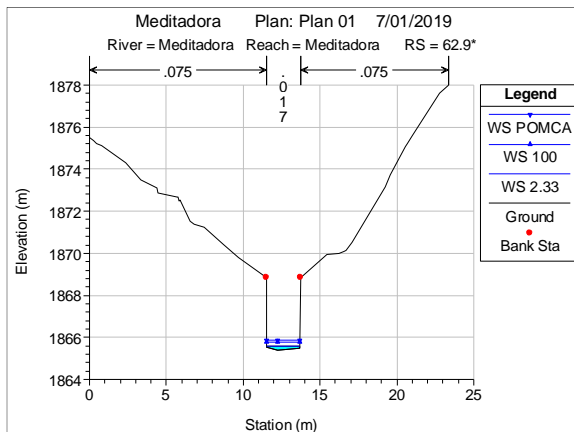
Sección 200 – 0+170



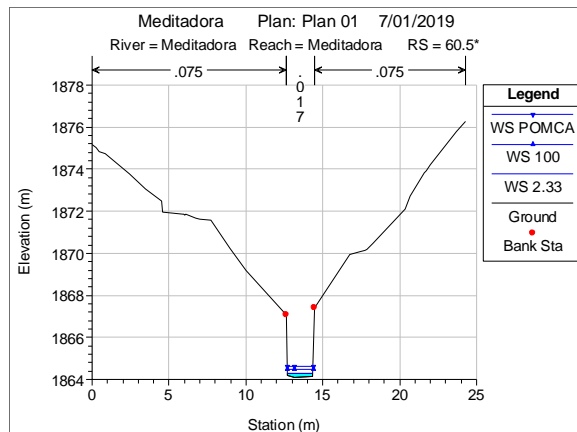
Sección 190 – 0+180

Figura 210. Secciones transversales obra de paso futura calle 56 B.

Adicionalmente se analizó la zona de encole para la obra a ubicar en la zona de la calle 54 B – conducción. Según los resultados del modelo hidráulico, de tiene una profundidad máxima para el caudal POMCA de 1,40 m, inferior a la altura del canal de encole de 1,50 m. En la Figura 211, se presentan las secciones transversales en la zona de encole y cruce para la calle 54 B, cuyo tramo analizado corresponde a E00 – C01.



Sección 200 – 0+170



Sección 190 – 0+180

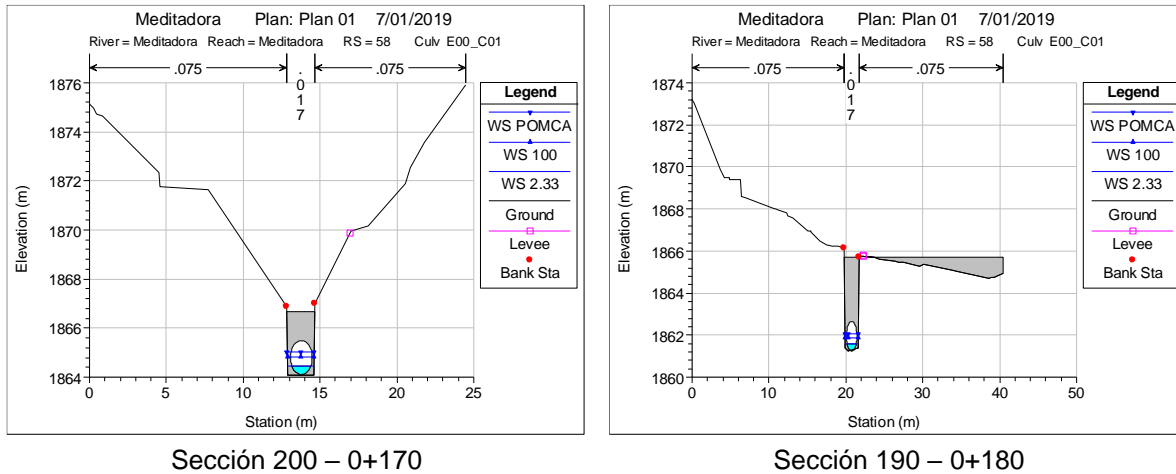


Figura 211. Secciones transversales zona de cruce en zona de calle 54 B.

Los resultados del modelo hidráulico, indican que en la zona de transición entre el canal natural y la conducción planteada bajo la calle 54 B, se contará con capacidad hidráulica para el paso de las crecientes en la quebrada La Meditadora. Estos resultados, complementan el análisis de capacidad hidráulica realizado para cada uno de los tramos que conforman esta conducción. En la Tabla 74, se presentan los resultados numéricos para el caudal POMCA, en el primer tramo de la conducción proyectada para la calle 54 B.

Tabla 74. Resultados, tramo E00 – C01 obra de cruce calle 54 B, caudal POMCA.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Energía Arriba (m)	1870,14	Agua Inlet (m)	1865,01
Agua Arriba (m)	1864,6	Agua Outlet (m)	1862,04
Energía Abajo (m)	1864,5	H Normal (m)	0,68
Agua Abajo (m)	1862,04	V Arriba (m/s)	8,48
Delta Energía (m)	5,64	V Abajo (m/s)	10,07
Delta Agua (m)	2,56	Fondo Inlet (m)	1864,1
Culvert Control	Outlet	Fondo Outlet (m)	1861,25

Según el modelo hidráulico, se tendrá una profundidad normal en dicha conducción de 0,68 m, inferior al valor del diámetro total de 1,40 m, garantizando la capacidad hidráulica de la obra. Específicamente para la zona de encole, se tiene una profundidad máxima de 0,91 m, lo que representa que el perfil del flujo en el proceso de transición entre el encole y la conducción, contará con una profundidad inferior a la del diámetro de la obra, sin afectar el comportamiento normal de la corriente.

En la Figura 212, se presenta el perfil del agua para el escenario con obras en la quebrada La Meditadora, tramo de análisis entre calles 56 B y 54 B, barrio La Sierra, municipio de Medellín.

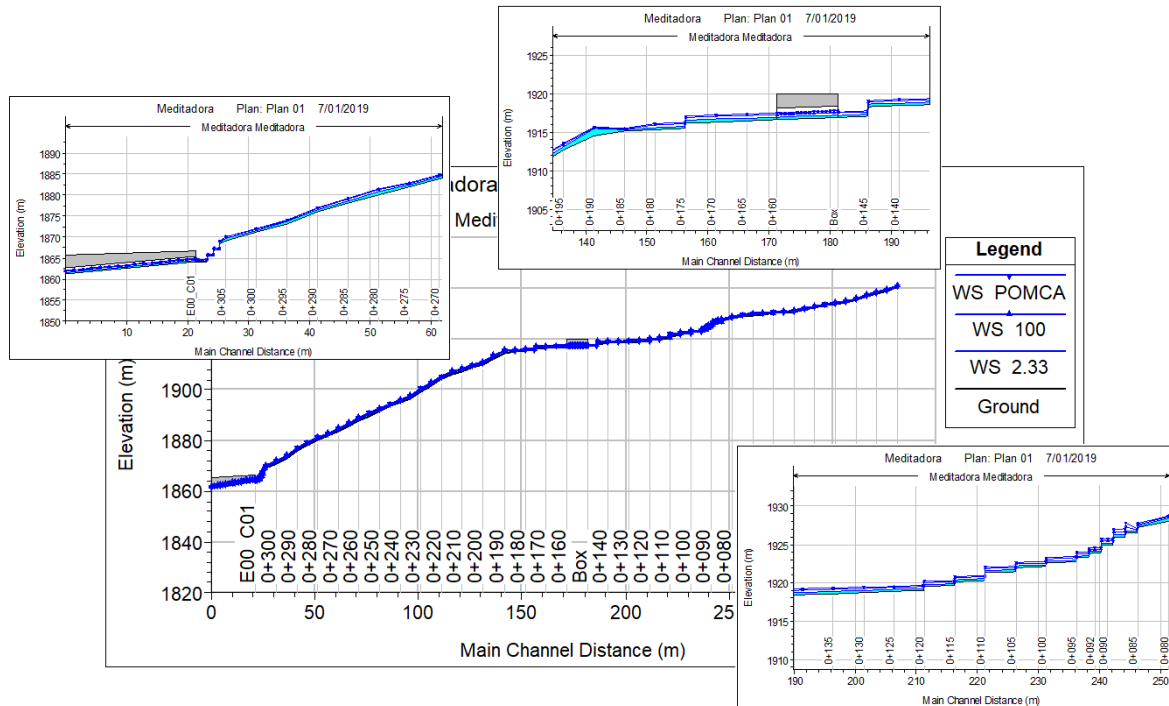


Figura 212. Perfil del flujo a lo largo del canal, condición proyectada.

El perfil hidráulico para la quebrada La Meditadora, muestra un comportamiento estable a través de las diferentes obras, especialmente en las zonas de paso proyectadas en la calle 56 B – box culvert y en la calle 54 B – conducción, incluyendo además el descenso por los canales escalonados proyectados.

En la Tabla 75, se presentan los resultados del modelo para el caudal POMCA en la quebrada La Meditadora y para el escenario en condiciones con obras.

Tabla 75. Resultados numéricos, caudal POMCA escenario con obras.

Modelo	Abscisa	TR	Q (m3/s)	Cotas (m)		Sf (m/m)	V (m/s)	A (m2)	T (m)	F	H (m)
				Fondo	Agua						
370	0+000	POMCA	8,99	1940,37	1941,06	0,158352	4,76	2,42	5,01	1,92	0,69
365	0+005	POMCA	8,99	1939,27	1939,77	0,345495	5,02	2,26	8,42	2,61	0,49
360	0+010	POMCA	8,99	1938,11	1938,51	0,24723	3,94	2,47	8,76	2,17	0,4
355	0+015	POMCA	8,99	1936,85	1937,34	0,242604	4,93	2,76	8,9	2,28	0,49
350	0+020	POMCA	8,99	1935,35	1936,1	0,159542	4,86	2,47	5,83	1,93	0,75

Modelo	Abscisa	TR	Q	Cotas (m)		Sf	V	A	T	F	H
			(m3/s)	Fondo	Agua	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)		(m)
345	0+025	POMCA	8,99	1934,54	1935,18	0,210908	4,94	2,47	7,16	2,16	0,64
340	0+030	POMCA	8,99	1933,93	1934,54	0,144249	4,09	2,93	7,61	1,79	0,61
335	0+035	POMCA	8,99	1933,34	1933,74	0,171982	3,55	2,69	7,93	1,84	0,4
330	0+040	POMCA	8,99	1932,47	1932,94	0,167108	3,34	2,85	8,79	1,8	0,47
325	0+045	POMCA	8,99	1931,72	1932,19	0,160029	3,06	3,1	10,43	1,73	0,46
320	0+050	POMCA	8,99	1931,03	1931,41	0,156753	2,91	3,19	11,41	1,69	0,38
315	0+055	POMCA	8,99	1930,55	1931,02	0,073086	2,21	4,16	12,62	1,19	0,47
310	0+060	POMCA	8,99	1930,14	1930,63	0,074449	2,45	4,31	13,57	1,23	0,49
305	0+065	POMCA	8,99	1929,75	1930,46	0,037749	2,42	5,16	13,39	0,95	0,71
300	0+070	POMCA	8,99	1929,35	1930,11	0,05663	2,67	3,91	9,78	1,13	0,76
295	0+075	POMCA	8,99	1928,84	1929,66	0,075158	3,53	3,57	8,27	1,34	0,82
290	0+080	POMCA	8,99	1928,07	1928,74	0,159245	4,33	2,55	6,76	1,87	0,67
285	0+085	POMCA	8,99	1927,2	1927,74	0,017421	5,49	1,64	3,1	2,41	0,54
284,9*		POMCA	8,99	1926,58	1927,04	0,049839	6,52	1,38	3,07	3,11	0,46
283,*		POMCA	8,99	1926,52	1927,88	0,001296	4,44	2,03	1,5	1,22	1,36
282,9*		POMCA	8,99	1926,02	1927,05	0,03031	5,87	1,53	1,5	1,86	1,03
281,*		POMCA	8,99	1925,96	1926,99	0,030337	5,87	1,53	1,5	1,86	1,03
280,9*		POMCA	8,99	1924,96	1925,79	0,05685	7,47	1,2	1,47	2,64	0,83
280	0+090	POMCA	8,99	1924,93	1925,74	0,056535	7,46	1,2	1,5	2,66	0,81
279,047*		POMCA	8,99	1924,9	1925,72	0,055259	7,4	1,22	1,5	2,62	0,82
278,952*		POMCA	8,99	1923,9	1924,6	0,083344	8,63	1,04	1,5	3,31	0,7
278	0+092	POMCA	8,99	1923,87	1924,58	0,080845	8,53	1,05	1,5	3,25	0,71
277,1*		POMCA	8,99	1923,84	1924,56	0,078893	8,46	1,06	1,5	3,21	0,72
277,*		POMCA	8,99	1923,34	1924,01	0,093393	9	1	1,5	3,52	0,67
275	0+095	POMCA	8,99	1923,28	1923,97	0,087708	8,8	1,02	1,5	3,4	0,69
274,9*		POMCA	8,99	1922,78	1923,43	0,102466	9,32	0,96	1,5	3,71	0,65
270	0+100	POMCA	8,99	1922,63	1923,32	0,086998	8,77	1,02	1,5	3,39	0,69
269,9*		POMCA	8,99	1922,13	1922,78	0,101776	9,29	0,97	1,5	3,69	0,65
265	0+105	POMCA	8,99	1921,98	1922,67	0,08647	8,75	1,03	1,5	3,38	0,69
264,9*		POMCA	8,99	1921,48	1922,13	0,101215	9,28	0,97	1,5	3,68	0,65
260	0+110	POMCA	8,99	1921,33	1922,02	0,086077	8,74	1,03	1,5	3,37	0,69
259,9*		POMCA	8,99	1920,33	1920,95	0,116234	9,76	0,92	1,5	3,98	0,62
255	0+115	POMCA	8,99	1920,18	1920,84	0,097569	9,15	0,98	1,5	3,61	0,66
254,9*		POMCA	8,99	1919,68	1920,31	0,112683	9,65	0,93	1,5	3,91	0,63
250	0+120	POMCA	8,99	1919,53	1920,2	0,094833	9,06	0,99	1,5	3,55	0,67
249,9*		POMCA	8,99	1919,03	1919,67	0,109862	9,56	0,94	1,5	3,85	0,63
245	0+125	POMCA	8,99	1918,88	1919,56	0,092759	8,98	1	1,5	3,51	0,67
240	0+130	POMCA	8,99	1918,73	1919,45	0,079175	8,47	1,06	1,5	3,21	0,72
235	0+135	POMCA	8,99	1918,58	1919,33	0,068621	8,03	1,12	1,5	2,97	0,75
230	0+140	POMCA	8,99	1918,43	1919,22	0,060365	7,65	1,18	1,5	2,76	0,79
225	0+145	POMCA	8,99	1918,28	1919,11	0,053979	7,33	1,23	1,5	2,59	0,82
224,9*		POMCA	8,99	1917,05	1917,74	0,08875	8,84	1,02	1,5	3,42	0,69
220	0+150	POMCA	8,99	1916,91	1917,64	0,076033	8,34	1,08	1,5	3,14	0,73
215			Culvert								

Modelo	Abscisa	TR	Q	Cotas (m)		Sf	V	A	T	F	H
			(m3/s)	Fondo	Agua	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)		(m)
210	0+160	POMCA	8,99	1916,61	1917,47	0,048099	7,02	1,28	1,5	2,42	0,86
205	0+165	POMCA	8,99	1916,47	1917,36	0,043814	6,77	1,33	1,5	2,3	0,89
200	0+170	POMCA	8,99	1916,32	1917,24	0,040847	6,59	1,36	1,5	2,21	0,92
195	0+175	POMCA	8,99	1916,17	1917,11	0,038482	6,44	1,4	1,5	2,13	0,94
194,9*		POMCA	8,99	1915,46	1916,27	0,05755	7,51	1,2	1,5	2,68	0,81
190	0+180	POMCA	8,99	1915,31	1916,15	0,051978	7,23	1,24	1,5	2,53	0,84
185	0+185	POMCA	8,99	1915,16	1915,51	0,088638	7,59	1,18	3,5	4,17	0,35
180	0+190	POMCA	8,99	1914,49	1915,64	1,147374	2,93	2,03	4,77	0,91	1,15
175	0+195	POMCA	8,99	1912,72	1913,54	0,08729	2,42	3,83	6,95	0,98	0,81
170	0+200	POMCA	8,99	1910,09	1911,19	0,421286	5,92	1,62	2,71	2,08	1,1
165	0+205	POMCA	8,99	1908,79	1909,73	0,363814	4,7	2,24	5,47	1,68	0,95
160	0+210	POMCA	8,99	1907,44	1908,62	0,17842	4,07	2,8	8,42	1,43	1,17
155	0+215	POMCA	8,99	1906,59	1907,61	0,285884	4,21	2,53	6,57	1,57	1,02
150	0+220	POMCA	8,99	1904,18	1905,12	0,424624	5,57	1,79	4,43	2,28	0,94
145	0+225	POMCA	8,99	1901,75	1902,84	0,428497	5,66	1,59	1,87	1,96	1,09
140	0+230	POMCA	8,99	1899,29	1900,49	0,471461	5,83	1,56	1,93	1,94	1,2
135	0+235	POMCA	8,99	1896,86	1897,78	0,526048	6,18	1,48	2,53	2,4	0,92
130	0+240	POMCA	8,99	1895,18	1896,21	0,309203	5,52	1,84	3,64	2	1,03
125	0+245	POMCA	8,99	1893,38	1894,4	0,381037	5,72	1,76	3,7	2,19	1,02
120	0+250	POMCA	8,99	1891,39	1892,69	0,371575	5,51	1,88	3,83	1,94	1,3
115	0+255	POMCA	8,99	1889,63	1890,84	0,361978	5,18	1,77	3,02	1,96	1,21
110	0+260	POMCA	8,99	1888,06	1889,23	0,312491	5,1	1,89	3,52	1,78	1,17
105	0+265	POMCA	8,99	1885,97	1886,8	0,680876	5,92	1,82	6,33	2,75	0,83
100	0+270	POMCA	8,99	1883,93	1884,86	0,30451	5,14	1,97	4,15	1,97	0,93
95	0+275	POMCA	8,99	1881,91	1882,98	0,290673	5,72	1,75	2,95	2,09	1,07
90	0+280	POMCA	8,99	1880,08	1881,53	0,345125	5,19	1,78	2,15	1,54	1,45
85	0+285	POMCA	8,99	1878,09	1879,17	0,426822	5,92	1,56	2,11	2,07	1,08
80	0+290	POMCA	8,99	1876,07	1876,97	0,384076	6,44	1,58	2,97	2,31	0,9
75	0+295	POMCA	8,99	1873,15	1874,15	0,655112	6,62	1,36	2,21	2,65	1
70	0+300	POMCA	8,99	1871,14	1872,01	0,41203	5,66	1,6	2,67	2,21	0,87
65	0+305	POMCA	8,99	1869,14	1870,15	0,43794	5,39	1,94	4,41	1,84	1,01
64,*		POMCA	8,99	1868,55	1869,07	0,044171	6,47	1,39	2,8	2,93	0,52
63,9*		POMCA	8,99	1866,94	1867,36	0,101096	8,5	1,06	2,74	4,37	0,42
63,*		POMCA	8,99	1866,9	1867,4	0,083161	8,29	1,08	2,33	3,88	0,5
62,9*		POMCA	8,99	1865,4	1865,88	0,128186	9,79	0,92	2,16	4,79	0,48
62,*		POMCA	8,99	1865,36	1865,93	0,110453	9,56	0,94	1,81	4,24	0,57
61,9*		POMCA	8,99	1864,16	1864,73	0,142499	10,6	0,85	1,67	4,75	0,57
60,5*		POMCA	8,99	1864,1	1864,64	0,140837	10,5	0,86	1,67	4,66	0,54
60	0+310	POMCA	8,99	1864,1	1864,6	0,144735	10,4	0,86	1,74	4,72	0,5
58			Culvert								
38,9583		POMCA	8,99	1861,25	1862,04	0,045265	6,96	1,29	1,81	2,63	0,79

Nuevamente, se utiliza la herramienta RasMapper disponible en el software HEC RAS, para la generación del campo de profundidad para el caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en 40% y en condición proyectada. Esta información es presentada en la Figura 213.

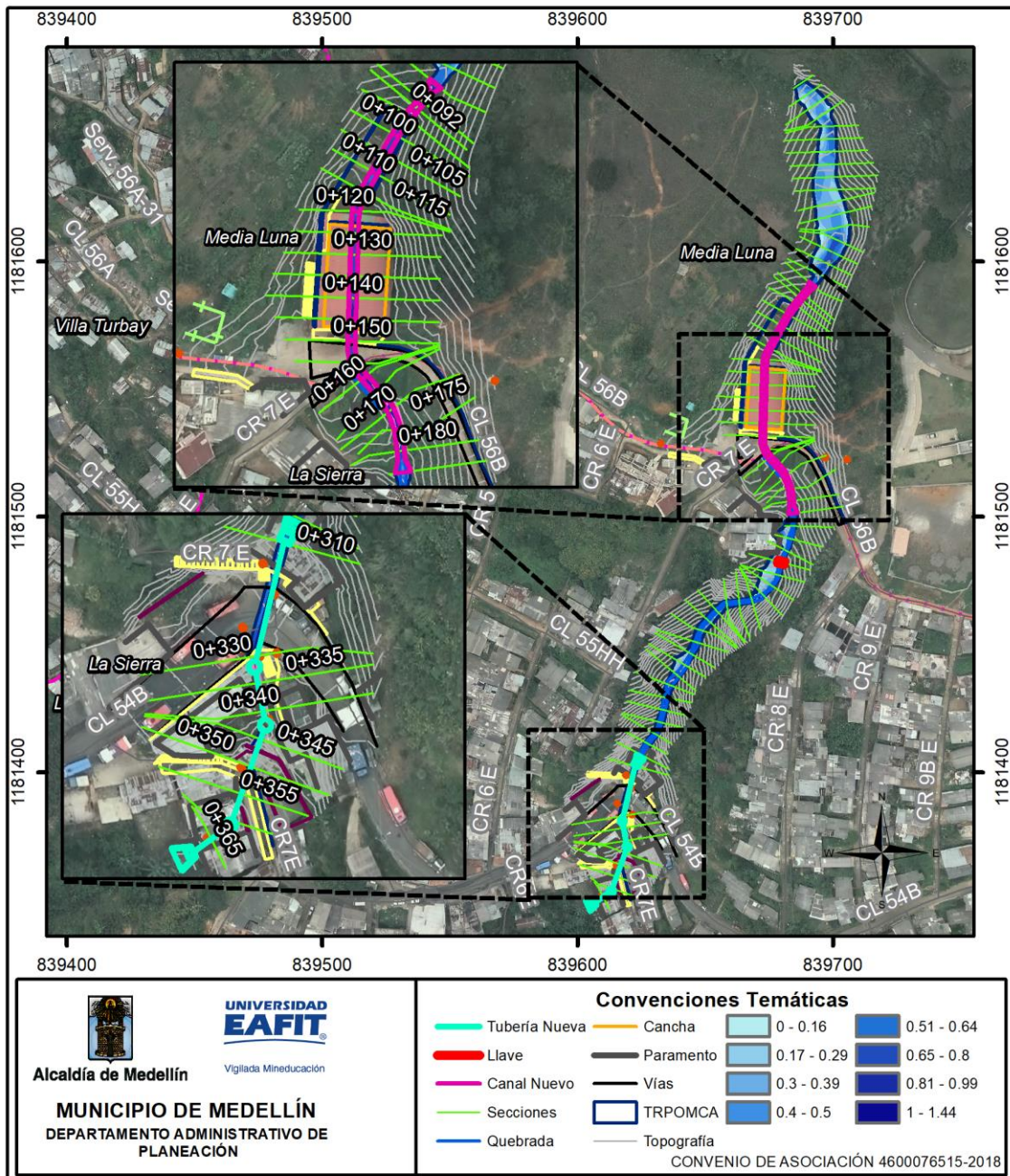


Figura 213. Campo de profundidad escenario futuro.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la mancha de inundación para el escenario con obras, se puede observar que la creciente POMCA es contenida dentro de las obras planteadas, específicamente para el canal en la zona colindante a la calle 56 B y para el primer tramo de la conducción en la calle 54 B, sin que se presenten afectaciones por el desbordamiento del agua. Es fundamental completar las obras proyectadas con el retiro de las viviendas ubicadas en cercanía de la quebrada, así como el retiro del coliseo y zona de juegos infantiles para el tramo aguas arriba de la calle 56 B.

En el anexo 6 se presentan la tabla de resultados completa con la modelación hidráulica en condiciones proyectadas para cada una de las secciones transversales en el tramo de análisis y cada uno de los periodos de retorno analizados. En el Anexo 6, se presentan las secciones transversales evaluadas con su respectiva lámina de agua en condiciones proyectadas. En el Anexo 6, se presenta de forma digital los archivos que hacen parte del modelo hidráulico en condiciones proyectadas realizado en el software HEC-RAS.

15.3.3 Comparación de resultados

Una vez obtenidos los resultados del modelo hidráulico al incluir las obras dentro del canal de la corriente de interés, finalmente se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para las condiciones actuales y para las condiciones futuras, específicamente para los cambios en las variables de velocidad y altura de la lámina de agua. La comparación de los resultados se realizó para el caudal con periodo de retorno de 100 años mayorado en 40% como caudal de diseño definitivo.

En la Figura 214, se muestra la comparación de la velocidad de forma gráfica y para el tramo de interés en la quebrada La Meditadora, y para el caudal de diseño.

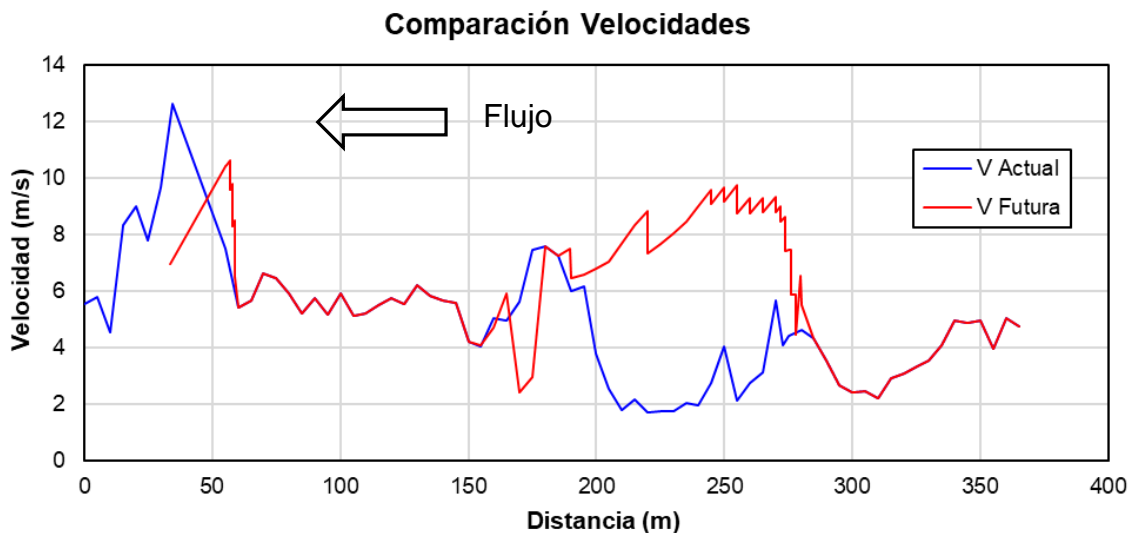


Figura 214. Comparación velocidades en zona de interés.

La comparación de la velocidad entre ambos escenarios, presenta un incremento notable entre secciones 290 y 190, correspondiente al tramo entre abscisas 0+085 y 0+185, aproximadamente, donde se ha implementado el canal rectangular en concreto, aferente a la calle 56 B. El aumento de la velocidad es la respuesta a la reducción de la rugosidad y el confinamiento del flujo dentro de una sección transversal principal, ya que, para el escenario actual, se presenta una zona de inundación con un ancho superficial que hasta de 25,0 m, que al realizar el confinamiento del flujo dentro de una sección transversal de 1,50 m (ancho del canal proyectado), se presenta el aumento de la velocidad.

Según los resultados, el máximo valor de la velocidad en este tramo será inferior a 10 m/s. Según diferentes autores, el concreto con resistencia superior a 28 Mpa, puede contar con velocidad admisible cercana a 14,0 m/s, sin que se presenten procesos de abrasión, lo que indica que la velocidad para la creciente de diseño se encontrará por debajo de la máxima velocidad permisible para este tipo de material.

Una situación similar se presenta en la zona de encole para la conducción aferente a la calle 54 B, donde el canal escalonado para el ingreso del flujo en la conducción, representa un aumento en la velocidad debido a la menor rugosidad del canal. Sin embargo, dicho aumento en velocidad es mitigado por los escalones como estructura de disipación, teniendo en cuenta que la velocidad no superará el valor permisible para el concreto. En la Figura 215, se presenta la comparación gráfica entre el escenario actual y futuro para la profundidad del agua y en el tramo de estudio en la quebrada La Meditadora.

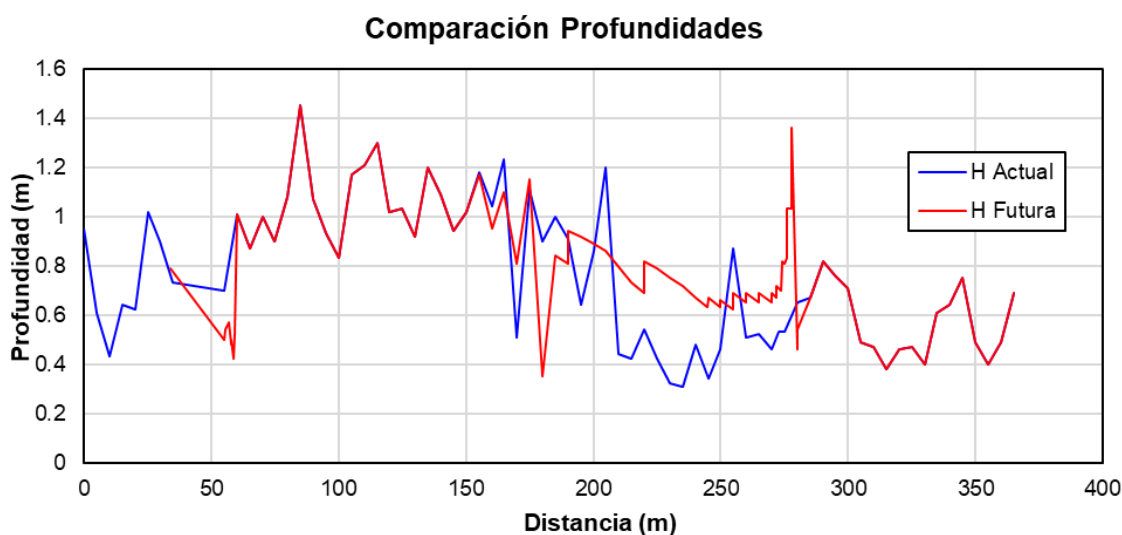


Figura 215. Comparación profundidades en zona de interés.

Adicionalmente, es de tener en cuenta que para las zonas de descole de las obras planteadas, se ha propuesto una pendiente menor a la del terreno natural, que, para el caso del canal, se cuenta con una pendiente del 3% igual a la del canal, y para la conducción, una placa de fondo con pendiente del 1%. Esto permite que el flujo a descargar sobre el canal natural, presente velocidades similares a la del escenario actual.

En cuanto a la profundidad del agua, para la zona del canal proyectado, en general se presenta un incremento, teniendo en cuenta lo mencionado previamente (confinamiento del flujo en una sección transversal), ya que al transitar sin un canal definido y de forma difusa, se presenta un ancho superficial de toda la vertiente y una baja profundidad (0,50 m). Sin embargo, al incluir la obra de canal y concentrar el flujo dentro de la sección transversal, se presenta el aumento de velocidad y una mayor profundidad a la estimada en el escenario actual.

Es de tener en cuenta que, si bien se presenta el aumento de la profundidad, todo el nivel de creciente para el caudal de diseño se encuentra dentro de la sección transversal del canal planteado, minimizando las afectaciones por el desbordamiento del agua que son evidenciadas para el escenario actual.

Al realizar la comparación entre la profundidad y velocidad del flujo en cada uno de los tramos a intervenir, se establece que, si bien se generan cambios por la presencia de las obras, estos son manejados por las obras planteadas. Las estructuras propuestas buscan dar solución a los procesos de inundación

generados en las zonas de la calle 56 B y 54 B, permitiendo la captura, conducción y descarga adecuada de los caudales en la quebrada La Meditadora.

15.3.4 Especificaciones técnicas de obras

Los resultados obtenidos en el modelo hidráulico de la quebrada La Meditadora, el análisis geomorfológico y las apreciaciones del recorrido de campo, se estableció que las crecientes asociadas a la corriente para los caudales de diseño, presenta el desbordamiento del flujo para los tramos aferentes a las calles 56 B y 54 B, barrio La Sierra en el municipio de Medellín.

En este documento, se muestran los diferentes análisis realizados para el planteamiento de cada una de las obras de manejo que se proponen implementar dentro de la quebrada La Meditadora en el tramo de estudio, según las condiciones evaluadas dentro del estudio hidráulico. Esta información se presenta como recuento de los aspectos mostrados en el capítulo 15.3.1.

Obra 1 – Canal en zona de calle 56 b

Se propone implementar un canal escalonado de sección prismática, el cual cuenta con una estructura de encole y descole iniciando aguas arriba del sitio donde actualmente se ubican los juegos infantiles, y finalice aguas abajo de la calle 56 B. La obra permitirá concentrar las crecientes de la quebrada La Meditadora dentro de la sección transversal del mismo y sin afectaciones por el desbordamiento del agua.

Según el eje de la quebrada La Meditadora para el escenario actual, y la proyección del nuevo canal, se ha trazado un alineamiento iniciando en la abscisa 0+085 y finalizando en 0+185, con un total de 5 curvas.

Se realizó el trazado del eje del futuro canal, el cual es similar al eje del tránsito de agua generado por la quebrada La Meditadora, con el fin de evitar variaciones importantes en el trazado de la corriente. A partir de lo anterior y como fue indicado previamente, se proponen cinco (5) puntos de cambio de dirección, los cuales corresponden a los elementos PI de las curvas circulares. En la Tabla 76 (retomada del capítulo 15.3.1), se presentan los elementos geométricos de cada una de las curvas proyectadas.

Tabla 76. Elementos geométricos de curvas en canal proyectado (retomada del capítulo 15.3.1).

PI		1	2	3	4	5
R	(m)	33,16	12,27	9,85	10,92	14,94
T	(m)	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00
L	(m)	5,98	5,88	7,60	3,96	3,98
C	(m)	5,98	5,83	7,41	3,93	3,96
Δ		10°20'21"	27°28'47"	44°12'19"	20°45'15"	15°14'43"
O	Este	839710,87	839685,48	839682,18	839671,30	839668,52
	Norte	1181562,07	1181559,48	1181530,29	1181511,40	1181507,52
PC	Este	839685,31	839674,78	839672,33	839679,36	839682,40
	Norte	1181583,18	1181565,47	1181530,59	1181518,77	1181513,05
PI	Este	839683,39	839673,31	839672,21	839680,71	839683,14
	Norte	1181580,87	1181562,85	1181526,59	1181517,30	1181511,19
PT	Este	839681,93	839673,22	839674,91	839681,45	839683,37
	Norte	1181578,25	1181559,85	1181523,64	1181515,44	1181509,20

Se realizó el trazado vertical del canal, para lo cual se propone mantener una pendiente de 3% en todo el recorrido de la obra. Dados los cambios en la pendiente del terreno – lecho de la quebrada, se realizará escalones con diferente longitud de huella y contra huella y así garantizar la pendiente en cada una de las huellas de 3%.

Para este análisis, se tiene en cuenta los niveles obligados al inicio y fin del canal, abscisas 0+085 y 0+185, respectivamente, así como la propuesta de un box culvert en la zona de cruce bajo la vía Calle 56 B, considerando la conservación de este cruce vehicular. Por ello, se tiene una cota de inicio del canal de 1927,20 m.s.n.m. y una cota final de 1915,16 m.s.n.m. En cuanto al cruce bajo la vía calle 56 B, se propone conservar una diferencia de altura de aproximadamente 1,50 m entre la rasante actual y la cota superior de la cobertura, con el fin de evitar afectaciones en la rasante o en la futura obra, así como el cruce de las redes existentes y futuras.

Inicialmente, es necesario realizar un descenso en la zona del encole, iniciando en la abscisa 0+085 y finalizando en 0+095, con el fin de realizar la profundización del canal con relación al nivel del terreno actual, esto debido a que en la actualidad no se cuenta con un canal principal o sección que confine el flujo. Este descenso permite que los bordes superiores del canal se encuentren cercanos al nivel actual del terreno.

Es necesario realizar el retiro de la zona de juegos infantiles, así como el coliseo, junto con las viviendas ubicadas a una distancia menor de 15,0 m del eje del canal propuesto, así como del canal natural en la zona aguas abajo de la calle 56 B. En la Tabla 77 (retomada del capítulo 15.3.1), se presentan las cotas propuestas para cada uno de los tramos del canal.

Tabla 77. Cotas de fondo en el canal propuesto (retomada del capítulo 15.3.1).

Abscisa	Cota (m.s.n.m.)	Abscisa	Cota (m.s.n.m.)
0+085	1927,20	0+105	1921,48
0+085	1926,58	0+110	1921,33
0+087	1926,52	0+110	1920,33
0+087	1926,02	0+115	1920,18
0+089	1925,96	0+115	1919,68
0+089	1924,96	0+120	1919,53
0+091	1924,90	0+120	1919,03
0+091	1923,90	0+145	1918,28
0+093	1923,84	0+145	1917,05
0+093	1923,34	0+150	1916,91
0+095	1923,28	0+160	1916,61
0+095	1922,78	0+175	1916,17
0+100	1922,63	0+175	1915,46
0+100	1922,13	0+185	1915,16
0+105	1921,98	-	-

Según la propuesta vertical de la obra, se contará con un total de 13 huellas y 12 contra huellas, donde las huellas tendrán una longitud de 2,0 m para el tramo entre la abscisa 0+085 y 0+095, correspondiente al tramo del descenso, zona inicial, y longitud entre 5,0 m y 25,0 m para el tramo posterior. Las contra huellas variarán entre 0,5 m y 1,20 m.

Para el caso específico de la obra de cruce bajo la calle 56 B, se contará con un box culvert de geometría igual a la del canal rectangular (1,50 m de ancho por 1,50 m de alto), lo que permite evitar algún tipo de transición aguas arriba y aguas abajo de la obra de cruce. La cobertura contará con cota de fondo al inicio de 1916,91 m.s.n.m. y en el punto final de 1916,61 m.s.n.m., ubicado entre las abscisas 0+150 y 0+160, respectivamente, con una longitud total de 10,0 m.

Con el fin de confinar la vía calle 56 B, se propone ubicar un muro frontal en la zona de entrada al box culvert de 2,80 m, lo que representa una pantalla de 1,30 m por

encima de las paredes del canal rectangular, y en la zona de salida de 0,50 m por encima, lo que indica una pantalla de 2,0 m de altura.

En cuanto a las paredes del canal, estas contarán con altura de 1,50 m, que, para las zonas de los escalones, se deberá realizar un ajuste entre la cota superior de la pantalla para el tramo aguas arriba y aguas abajo, donde la línea de la pantalla se ubicará con longitud variable entre 1,0 m y 3,0 m, con el fin de que el chorro no presente una zona con altura de pared inferior a la del nivel de la creciente.

El canal propuesto contará con una sección transversal de 1,50 m de ancho por 1,50 m de alto. Para la zona de encole, se tendrá una longitud de transición de 2,20 m, iniciando con un ancho de 3,10 m hasta alcanzar el ancho de 1,50 m, longitud que corresponde al tamaño de la primera huella. Una transición similar se presenta en la zona de descole, donde se realizará un cambio de ancho de 1,50 m hasta 3,50 m en la abscisa 0+185, transición a realizar en una longitud de 3,50 m. Las transiciones en la zona de encole y descole, permiten que el flujo pase del canal natural a la estructura proyectada sin la generación de cambios fuertes en el comportamiento de la lámina del agua.

La sección transversal tendrá una inclinación hacia el centro del canal con pendiente del 2%, a modo de geometría en “U”, con el fin de concentrar el flujo en la zona central de la sección y evitar procesos de sedimentación en los costados del canal. En la parte posterior de las paredes, es necesario incluir un filtro de 0,30 m de ancho por una altura de 1,50 m (igual a la altura de la pared), el cual debe contar con material granular empaquetado dentro de un geotextil NT 2500 o similar. En la zona inferior del filtro, se podrá utilizar una tubería perforada de diámetro igual a 6”. Esta obra permitirá abatir el nivel del agua sobre las caras posteriores del canal. Finalmente, se podrá utilizar una línea de lloraderos en las paredes del canal, conformados por pasos en PVC de 4”, ubicados a una altura de 0,50 m desde el fondo del canal y espaciados horizontalmente cada 3,0 m.

Estas obras, estarán complementadas con una llave anti socavación en la zona de encole y descole del canal proyectado, la cual contará con una profundidad mínima de 1,50 m, cumpliendo con la profundidad de socavación calculada.

Se propone ubicar una llave control de fondo en la abscisa 0+205, sitio donde se presenta un leve cambio de pendiente del lecho, posterior a una zona de alta pendiente a la salida del canal en concreto proyectado, y evitar procesos erosivos que generen el descenso en el fondo del mismo. Esta llave contará con un espesor de 1,00 m y una profundidad de 1,50 m, con un ancho promedio de 2,50 m, lo cual

permite que la estructura se encuentre inmersa dentro de las orillas del canal. Es de indicar que la cota de la cresta de la obra será igual a la cota actual del donde del canal natural. La obra será ejecutada en concreto ciclópeo con un porcentaje de piedra mayor al 60% y concreto de mínimo, 28 MPa.

El tramo de canal natural entre el descole del canal en concreto proyectado y la llave de fondo, podrá ser recubierto con piedra empastada de tamaño 0,50 m, ya que, en dicho tramo, se observan procesos erosivos sobre el lecho, y así evitar afectaciones que conlleven a la formación de movimientos en masa.

En la Tabla 78, se presenta la ubicación de cada una de las abscisas del canal, coordenadas que fueron tomadas a partir del eje del canal.

Tabla 78. Coordenadas de ubicación para el canal.

Abscisa	Modelo	Este	Norte
0+085	285	839691,72	1181590,95
0+090	280	839688,53	1181587,09
0+092	278	839687,21	1181585,49
0+095	275	839685,35	1181583,24
0+100	270	839682,45	1181579,19
0+105	265	839680,01	1181574,82
0+110	260	839677,57	1181570,46
0+115	255	839675,13	1181566,09
0+120	250	839673,41	1181561,56
0+125	245	839673,12	1181556,57
0+130	240	839672,97	1181551,57
0+135	235	839672,82	1181546,58
0+140	230	839672,66	1181541,58
0+145	225	839672,51	1181536,58
0+150	220	839672,37	1181531,78
0+160	210	839675,28	1181523,23
0+165	205	839678,44	1181519,78
0+170	200	839681,35	1181515,69
0+175	195	839683,04	1181511,19
0+180	190	839683,70	1181506,23
0+185	185	839684,27	1181501,26

Obra 2 – Conducción en zona de calle 54 b

Se plantea contar con pendiente mínima del 5% y diámetro de la conducción de 1400 mm. Esta red puede ser tipo TITAN, correspondiente a tubería en concreto con refuerzo. Considerando las condiciones del terreno, en cuanto a sección transversal y pendiente del fondo del canal para el tramo aguas arriba, se plantea la construcción de un cabezote de encole y de descole, que en general, busca conservar las normas dadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en el documento Normas y Especificaciones Generales de Construcción en Redes de Servicio, Tomo I, y en Redes y Acometidas de Alcantarillado, Capítulo 8, específicamente para el diámetro de 1400 mm correspondiente a la conducción proyectada.

Se realizó el trazado de la conducción siguiendo el alineamiento actual de la quebrada La Meditadora, sin la generación de cambios importantes en el trazado de la corriente. Como puntos de control se ubicó el sitio de encole, el cual se encuentra cercano al encole de la obra de cruce actual (0,70 m de diámetro) bajo la calle 54 B, en la abscisa 0+310, y un sitio de descarga ubicado aguas abajo de la abscisa 0+365, aproximadamente 7,0 m aguas abajo de dicho lugar. En la Tabla 70, se presenta la ubicación del centro de cada una de las cámaras que conforman a las redes de alcantarillado.

Tabla 79. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.

MH	Coordenadas	
	Este	Norte
E00	839622,55	1181402,51
C01	839617,44	1181380,84
C02	839619,32	1181370,78
C03	839613,24	1181353,53
B04	839606,92	1181348,90

A partir de la cota de entrega de la conducción sobre el fondo de la vertiente o cauce natural de la quebrada La Meditadora, las cotas inferiores de las redes existentes que cruzarán la conducción, y el sitio de encole, se planteó un perfil de la nueva obra, conservando una pendiente mínima del 5%, y así garantizara la capacidad hidráulica de la obra, que si bien para pendientes mayores se puede reducir el diámetro de la obra, se conservó en 1400 mm para permitir su mantenimiento y paso de sólidos – sedimentos, ya que la obra será utilizada por una corriente natural.

Se utilizarán las recomendaciones dadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en el documento Normas y Especificaciones Generales de Construcción en Redes de Servicio, Tomo I, y en Redes y Acometidas de Alcantarillado, Capítulo 8, específicamente para el diámetro de 1400 mm correspondiente a la conducción proyectada. En la Figura 216, se presenta el esquema típico de la obra de descole plantada.

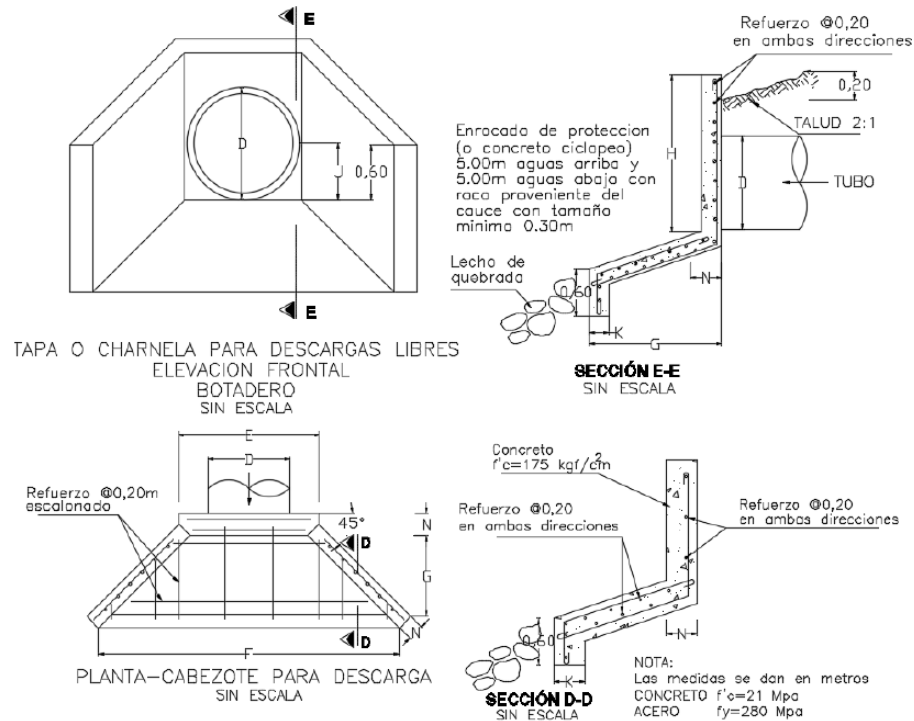


Figura 216. Esquema típico de obra de descole.

Según la información indicada en Normas y Especificaciones Generales de Construcción en Redes de Servicio, Tomo I, y en Redes y Acometidas de Alcantarillado, Capítulo 8, por EPM, se tienen las siguientes dimensiones del cabezote, tal como se indica en la Tabla 71.

Tabla 80. Ubicación de las cámaras que conforman las redes de alcantarillado.

D	E	F	G	H	J	K	L	N	Varillas
(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	Nº
1400	2,00	4,58	1,52	1,60	0,80	0,24	0,30	0,30	6

Teniendo en cuenta las condiciones topográficas de las zonas de descole, se ajustó el cabezote propuesto por las Normas de Empresas Públicas de Medellín E.S.P., en cuanto a la longitud de salida a 3,0 m (valor dado por EPM de 1,52 m), en la altura del muro frontal de la tubería a 1,80 (valor dado por EPM de 1,60) m y 1,50 m la altura de las aletas en la zona de entrada y salida (valor dado por EPM de 0,80 m), y así garantizar una mayor estabilidad de la obra, cambios que no generan afectaciones en el comportamiento hidráulico de la obra.

Se propone entonces un canal de encole conformado por 3 huellas de 1,0 m, 1,0 m y 1,50 m, siendo la huella de mayor longitud, la ubicada previo al ingreso de la tubería de 1,40 m. Estas huellas se complementan con 3 contra huellas de 1,50 m, 1,50 m y 1,20 m, generando un canal escalonado con pendiente en las huellas del 4%, y así permitir el descenso del flujo hasta la cota inicial de la conducción. El cabezote de encole, contará además con un muro frontal de 3,90 m, con el fin de que al mismo alcance una altura cercana a la rasante de la vía. Es de indicar que el canal escalonado de encole, contará con una transición de 2,0 m de longitud (correspondiente a las dos primeras huellas), pasando de un ancho de 3,0 m a 1,80 m en el sitio de ingreso a la conducción.

Para la zona de descole, se contará con un cabezote en una longitud de 3,0 m, donde el ancho final será de 4,0 m. El muro frontal de descarga, tendrá una altura de 1,80 m por 1,80 m, y contará con un escalón intermedio de 0,70 m de contra huella y 1,0 m en la huella inicial, para así permitir una zona de transición en longitud de 2,0 m. La obra finalizará con una llave anti socavación de 1,50 m de profundidad.

En la Tabla 81, se presentan las especificaciones técnicas de cada uno de los tramos que hacen parte de la red.

Tabla 81. Especificaciones tramos de red de conducción quebrada La Meditadora.

Parámetro	E00	C01		C02		C03		B04
Altura clave tubería (m)	0,55	0,95	1,15	2,89	4,08	1,28	1,17	-1,05
Cota terreno cámara (m)	1868,00	1864,01		1862,56		1855,71		1854,07
Cota batea (m)	1864,10	1861,55	1861,25	1858,53	1856,52	1853,26	1852,61	1852,27
Longitud eje cámara (m)	22,26		10,24		18,29		7,83	
Longitud tubería (m)	21,26		8,24		16,29		6,83	
Pendiente (%)	12,00		33,00		20,00		5,00	
Diámetro nominal (mm)	1400		1400		1400		1400	
Caudal (l/s)	8990		8990		8990		8990	
Cimentación	E3		E4		E4		E5	
Clase Tubería	Concreto CIII		Concreto CIII		Concreto CIII		Concreto CIII	

Clase de Piso	Pavimento	Zona Verde	Zona Verde	Zona Verde
Clase Lleno	Arenilla	Arenilla	Arenilla	Arenilla
Anclaje por pendiente	NO	SI	SI	NO

De acuerdo a las especificaciones dadas por EPM para dicha condición (Redes y Acometidas de Alcantarillado EPM), se implementarán cimentaciones tipo E3, E4 y E5, de acuerdo al tipo de superficie definitiva sobre la conducción, así como a la pendiente del tramo, ya que para pendientes superiores al 15%, se deberán realizar obras complementarias para el anclaje de las redes. En la Figura 217, se muestran los tipos de cimentaciones según EPM.

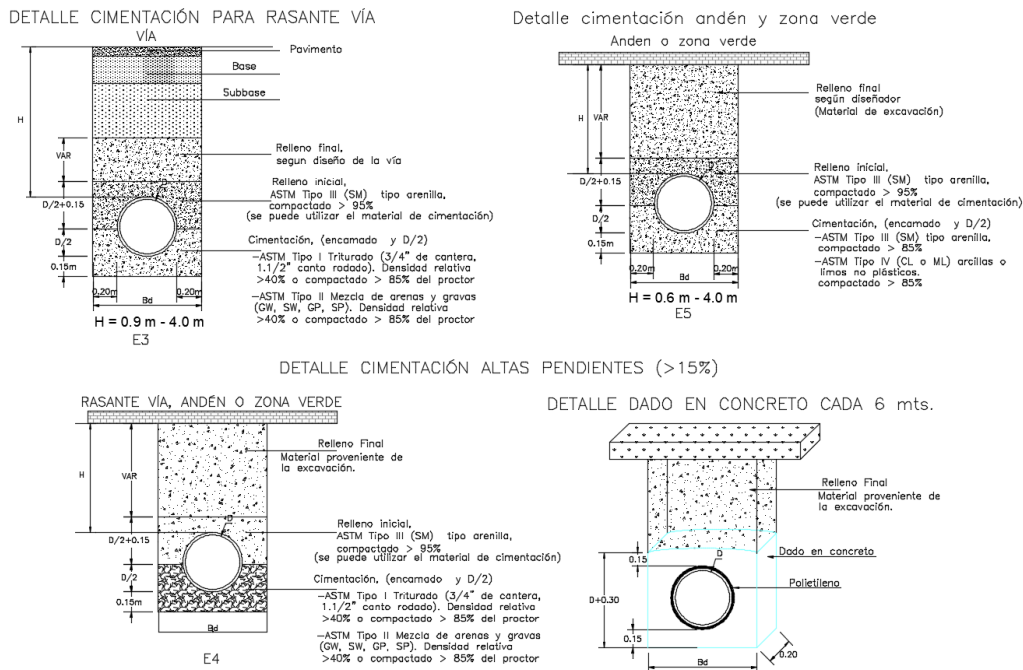


Figura 217. Tipo cimentaciones para redes, según EPM.

Características de los Elementos

Tubería en Concreto Con Refuerzo

La tubería de concreto con refuerzo es utilizada para la conducción de aguas lluvias y negras, residuos líquidos industriales, drenajes en vías y en general en conductos no sometidos a presión hidrostática. Este tipo de tubería es fabricada en diámetros que se utilizan en el presente diseño, utilizando mezclas secas con baja relación

agua cemento, con lo cual se obtiene un concreto de alta densidad, baja absorción, baja permeabilidad y larga durabilidad.

El refuerzo consiste en acero trefilado en frío, enrollado en una o varias capas de manera helicoidal, o una o varias mallas de acero trefilado, enrolladas de manera perimetral. La tubería de concreto con refuerzo se clasifica, según su resistencia. En la Tabla 82, se presentan las especificaciones de la tubería planteada.

Tabla 82. Especificaciones tubería en concreto con refuerzo (TITAN).

Diámetro Interno (cm)	Diámetro Nominal (")	Espesor (mm)	Longitud Útil (m)	Peso (Kg/un)
110	44	126	2,5	2,790

Juntas

En sistemas de alcantarillados en que se requiere garantizar la estanqueidad del sistema, en las uniones de los tubos de concreto con refuerzo se utilizan empaques de caucho tipo circular para diámetros menores a 1,30 m (52"), y tipo arpón para diámetros mayores e iguales a 1,40 m (56"), que permiten pequeñas deflexiones entre tubos sin que se presenten fugas o infiltraciones.

Se hace la siguiente anotación: La rugosidad de la tubería de concreto Titán (proveedor en el medio para este tipo de tuberías) está catalogada como concreto prefabricado de interior liso y para los cálculos hidráulicos puede utilizarse un valor de $n=0.010$ de Manning. Este valor es inferior al asumido en el diseño (rugosidad asumida de 0,015), lo que representa una postura más desfavorable en el diseño. La vida útil estimada es superior a 50 años en condiciones normales de instalación.

Cámaras de Inspección – Manhole

Varios proveedores pueden suministrar cámaras de inspección de forma prefabricadas, sin embargo y teniendo en cuenta el tamaño de la conducción (diámetro interno 1400 mm), se requiere utilizar cámaras con diámetro interior de 2,00 m, por lo que se recomienda realizar el vaciado en campo de la obra. Para ello, se retoman algunas características recomendadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en el documento: Normas de Construcción para Cámaras de Inspección Vaciadas en Sitio, 2017.

Requisitos Técnicos

Descripción general de las cámaras de inspección vaciadas en sitio

Las cámaras de inspección vaciadas en sitio están conformadas por los siguientes elementos: losa inferior, cañuelas, panes, cilindro, cono de reducción, peldaños, losa superior (anillo, cuello) y tapa.

En casos especiales donde la red de alcantarillado tenga tuberías de grandes diámetros; se debe contar con una estructura dimensionada especialmente para estos casos, donde su acceso debe cumplir los requisitos de seguridad adecuados. En lugares donde no sea posible la construcción de una cámara de inspección por espacios limitados se debe construir una caja de inspección especial.

Geometría y dimensiones de los elementos de una cámara de inspección

Las cámaras de inspección son estructuras de concreto de forma cilíndrica, a excepción de casos especiales donde el diseño de la red amerite una estructura especial, cuentan en su parte superior con un cono truncado y una tapa removible que permite la ventilación y el ingreso de personal para labores de operación y mantenimiento. En los siguientes numerales se describen las características geométricas y dimensionales de cada uno de los elementos que componen una cámara de inspección.

Losa Inferior

La base de la cámara de inspección, está conformada por una losa circular de concreto de 0,20 m de espesor, con diámetro mayor que el externo del cilindro de la cámara, de tal forma que sobresalga de éste 0,10 m. Al realizar el vaciado de la losa inferior, se debe dejar una llave perimetral de concreto monolítica con la losa, de 0,08 m de ancho y 0,10 m de altura a una distanciada 0,16 m del borde externo de la losa; de tal manera que sobresalga, con el fin de hacer conexión entre el cuerpo del cilindro y la losa inferior y así evitar filtraciones de agua en esta zona. Para diámetros internos del cilindro de la cámara, iguales a 2,00 m, el diámetro exterior de la losa inferior será de 2,60 m.

Cañuelas y panes

Para dar continuidad al flujo entre las tuberías de entrada y la de salida, se deben construir, sobre la base, antes descrita unos canales de transición o cañuelas, cuyas secciones transversales deben ser semicirculares. La sección final para la construcción de las cañuelas debe estar determinada por el diámetro interior de la tubería de salida de la cámara en donde debe quedar conformada una sección semicircular con diámetro D_{is} (D_{is} es el diámetro interno de la tubería de salida); en la intersección de las tuberías de entrada, la sección de la cañuela debe ser un semicírculo de diámetro D_{ie} (D_{ie} es el diámetro interno de la tubería de entrada correspondiente) y, adicionalmente, pueden tenerse paredes verticales con una altura máxima igual a la mitad de la diferencia entre el diámetro de salida D_{is} y el de entrada D_{ie} .

El acabado de la superficie de las cañuelas debe ser similar a la superficie interna de las tuberías y, además, “esmaltarse” mediante la aplicación de una capa de cemento. Cuando se requiera que la cañuela tenga una curva horizontal para entregar el flujo a la tubería de salida.

Cilindro

Los diámetros internos de los cilindros en las cámaras de conexión y/o inspección deben ser de 1,20 m, 1,50 m y 2,00 m (para el caso específico de 2,00 m); dependiendo del alineamiento y diámetro de las redes que conectan, y del criterio hidráulico de limitación de pérdidas por curvatura. El espesor de las paredes del cilindro debe ser de 0,20 m; los cilindros pueden tener alturas variables según el diseño de la red y sus pendientes.

Cono de Reducción

El cono de reducción consiste en un elemento que sirve de transición entre el cilindro de la cámara de inspección ($1,20\text{ m} \leq D_{is} \leq 2,00\text{ m}$), la boca de ingreso a ésta ($D_{ie}=0,60\text{ m}$). La altura del cono puede variar entre 0,50 m y 0,70 m, según la disponibilidad de altura para el caso específico de la cámara de inspección (para este caso se propone una altura de cono de 0,70 m).

En general, este elemento debe ser concéntrico; es decir, el cilindro y el orificio de acceso tienen el mismo centro. El espesor de la pared del cono debe ser de 0,10 m para el caso de las cámaras con cilindros de 1,20 m de diámetro interno; 0,125 m para las cámaras con cilindros de 1,50 m de diámetro interno. En cámaras con cilindros de 2,00 m de diámetro interno, el espesor de la pared del cono se debe determinar mediante un cálculo estructural.

Losa superior

Cuando la profundidad de la cámara de inspección, medida como la diferencia de cotas entre la tapa y la clave de la tubería más superficial conectada a ella es inferior a 1,20 m, no debe haber cono de reducción. El anillo o cuello para soportar la tapa se debe reemplazar con una losa de concreto reforzado. Para diámetros interiores de cámaras iguales a 1,50 m, el diámetro externo de la losa superior será de 1,90 m.

Anillo (cuello o descargue)

El anillo o cuello es un elemento que puede ser de material polimérico o de Concreto y sirven para soportar la tapa de acceso a la cámara de inspección, su superficie o acabado debe quedar a nivel con la rasante de la vía, puede ir unido con mortero al cono de la cámara en caso de ser prefabricado en Concreto.

Acceso

Los accesos a las cámaras de inspección generalmente se elaboran con ganchos de acero grado 60 $f_y = 420 \text{ MPa}$ $\varnothing = 5/8"$ con recubrimiento de zinc en caliente según (NTC 2076 Galvanizado por Inmersión en caliente para elementos de hierro y acero) y deben cumplir la norma (NTC 2289 Barras corrugadas y lisas para acero de baja aleación, para refuerzo de concreto); sin embargo, pueden emplearse otros materiales como: aluminio o materiales poliméricos que cumplan los estándares de seguridad industrial y ergonomía.

Peldaños en Ganchos de acero

Las cámaras de inspección de 1,20 m, 1,50 m y otros diámetros, deben estar provistas de ganchos para facilitar la inspección y trabajos de mantenimiento. Deben colocarse dos ganchos adicionales en extremos diametralmente opuestos a los peldaños de descenso en el cono a 0,20 m del apoyo del cono en el cilindro, para permitir al personal de inspección sostenerse al ingresar a la cámara. Los ganchos deben espaciarse horizontalmente uno del otro 0,10 - 0,15 m.

Los ganchos metálicos pueden ser instalados de dos formas: dejándose embebidos en el vaciado del cilindro o pueden anclarse perforando la pared interna del cilindro 0,15 m y se debe utilizar un producto para anclajes epóxicos de dos componentes

que cumpla la normativa (ASTM C-881-02 tipo IV, grado 3) sin sobrepasar el espesor de la pared del cilindro.

Concreto de refuerzo de la cámara de inspección

En las normas (NC-MN-OC07-01 Concretos), se establecen las especificaciones técnicas que debe cumplir el concreto en la construcción de la cámara de inspección o estructura de conexión vaciada en sitio. En general, se debe conservar una resistencia en el concreto de 28 Mpa para las cámaras en concreto reforzado.

Es fundamental tener en cuenta que el estudio presentado en este informe corresponde a los análisis hidráulicos y pre dimensión de las obras para el manejo de las crecientes en la quebrada La Meditadora. Si bien se retoman aspectos y recomendaciones dadas en las normas de Empresas Públicas de Medellín E.S.P. en cuanto a cimentaciones y aspectos de diseño en los elementos de la red, se deberán realizar las respectivas verificaciones en cuanto a los aspectos geotécnicos y estructurales de los elementos, especialmente en cuanto a las cámaras de inspección, y las estructuras de encole y descole, así como en las demás obras diseñadas desde el componente hidráulico.

15.3.5 Otras Recomendaciones Hidráulicas

De acuerdo a la información presentada dentro del documento y específicamente para las zonas donde se encuentra la quebrada La Meditadora, las obras presentarán incidencia en las zonas de cruce de las calles calle 56 B y 54 B, para la obra en canal y conducción respectivamente. Por tal razón, justo en la zona de encole de cada estructura, se presentará la captura y conducción del flujo de creciente, sin embargo, las áreas tributarias colindantes a las estructuras de paso, presentará el escurrimiento de las aguas lluvias a través de vías y andenes (áreas menores colindantes a las obras de paso).

Por tal razón, es necesario complementar las obras de paso con obras de manejo de aguas lluvias, tales como cunetas y sumideros que descarguen directamente sobre la corriente (a través de la obra de paso diseñada) o sobre redes que descarguen a dichos puntos, con el fin de entregar adecuadamente el flujo de escorrentía superficial sobre la fuente receptora, minimizando las afectaciones por encharcamiento de aguas para las viviendas aledañas. Es de indicar que el alcance en el diseño del presente documento, abarca el planteamiento de la obra de paso con el fin de mitigar las afectaciones en zonas que actualmente presentan riesgo por inundación y avenidas torrenciales.

Adicionalmente, se deberá reubicar la placa polideportiva y el coliseo ubicado en la zona colindante con la calle 56 B, teniendo en cuenta que dicha infraestructura se ubica sobre toda la vertiente de la quebrada La Meditadora y sus respectivos retiros. Además, en dicho tramo, se ha planteado el diseño de un canal rectangular que permita capturar, conducir y descargar las aguas de la corriente sin afectaciones por el desbordamiento del flujo.

15.4 RECOMENDACIONES VULNERABILIDAD.

15.4.1 Servicios públicos domiciliarios

Consolidar la construcción de redes locales de acueducto, redes locales de alcantarillado de aguas servidas y lluvias en todo el polígono.

En el polígono estudiado se localizan 62 construcciones que presentan operador de acueducto no formalizado (comunal o conexiones erradas), para las cuales, se recomienda tramitar la conexión y legalización de este sistema ante la entidad prestadora del servicio, EPM. Igualmente 36 edificaciones presentan como tipo de descarga en talud y sistema no convencional, por lo tanto, se recomienda la conexión de dichos predios a la red de alcantarillado existente.

Finalmente, se localizan 236 construcciones que no cuentan con sistema de recolección de aguas lluvia, arrojando libremente dichas aguas al terreno, lo que puede ocasionar la erosión, infiltración y humedades de las estructuras y taludes colindantes, por ende, se sugiere la adecuación de cubiertas y bajantes para la captación y conducción a la red de EPM.

15.4.2 Líneas vitales – energía y alumbrado público

En el polígono La Sierra de los 131 postes de energía con lo que cuenta esta zona, se encontraron 55 postes que presentaron algún tipo de deficiencia, sea inclinación o fisuras, por lo tanto, se recomienda el reemplazo de estos, en especial a los que se les identifica madera como material de composición.

15.4.3 Vías de acceso y obras de drenaje

Se deben construir cunetas, sumideros y obras transversales en vías vehiculares, andenes o senderos peatonales.

15.4.4 Mejoramiento saludable

Este tipo de mejoramiento consiste en implementar obras menores, que tienen como finalidad mantener el inmueble en las debidas condiciones de higiene y ornato sin afectar su estructura portante, su distribución interior, sus características funcionales, formales y/o volumétrica, para las cuales no se requerirán licencias de construcción en los términos del artículo 10 del decreto Nacional 1469 de 2010 o a las normas que lo adicionen, modifiquen o sustituyan. Se otorga para corregir: habilitación o instalación de baños, lavadero, cocinas, redes hidráulicas y sanitarias, cubiertas parciales, pisos, enchapes, instalaciones eléctricas etc.

En el polígono La Sierra se identificaron 29 construcciones que representan las estructuras con tipologías (D), (C) y (B) que aplican a este tipo de mejoramiento.

15.4.5 Mejoramiento locativo

Mejoramiento estructural que se aplica, cuando supera una o varias deficiencias básicas perteneciente a un desarrollo legal o en proceso de legalización, para los cuales es necesario la consecución de permisos o licencias previas ante las autoridades competentes, dichas mejoras pueden consistir en: defectos de la cimentación, vigas, columnas, losas, muros, reforzamiento estructural para actualizarse a la Norma Sismo Resistente NSR-10.

La solución a las deficiencias constructivas que este tipo de mejoramiento pueden aportar serian:

- Tratamiento de grietas.
- Consolidación de ladrillos con proceso degradatorio incipiente.
- Cambio de chapas en los ladrillos con procesos degradatorios avanzados, en los cuales se haya presentado pérdida de volumen.
- Recuperación de morteros de pega.
- Mantenimiento y reposición de cubiertas, impermeabilización con productos epóxidos.
- Construcción de filtros perimetrales para recolección de aguas subterráneas
- Construcción de Sistemas de fundación y sistemas estructurales que brinden un confinamiento y otorgue estabilidad a las edificaciones,

haciendo una rehabilitación sísmica o actualización a la Norma vigente, mediante un reforzamiento estructural.

Dicho tipo de mejoramiento es aplicable a 140 construcciones encontradas con tipología E, es decir, estructuras ligeras que son todas aquellas edificaciones construidas con materiales tradicionales o de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros.

Adicionalmente en el polígono La Sierra se encontraron 33 construcciones con tipología estructural “Construcciones Simples (F)”, es decir, aquellas edificaciones que no poseen una estructura definida y que generalmente son de carácter improvisado y construidas con materiales precarios o de recuperación, a las cuales se les recomienda realizar una intervención integral, dentro de los cuales se considera la reposición.

15.5 OTRAS RECOMENDACIONES

- Las estructuras de contención no están diseñadas para soportar cargas adicionales de construcciones por lo cual debe prohibirse su desarrollo sobre este tipo de obras.
- A pesar de que en el tramo analizado no se identifican zonas de amenaza por inundación o avenida torrencial asociado a las quebradas La Meditadora y El Ñato, se recomienda recuperar el retiro de dichas corrientes y emprender procesos de restauración de la cobertura natural.
- Se recomienda restringir la realización de huertas en zonas de pendientes mayores al 40%, o en zonas de antiguos movimientos en masa.
- Se recomienda restringir la realización de escombreras y botaderos de basuras en las zonas denominadas como de amenaza alta y media por movimientos en masa.
- El cambio en las restricciones de uso del suelo para el polígono en estudio, están sujetas a la ejecución de las obras planteadas y su monitoreo, hasta que se garantice la estabilidad de la zona.
- Para la construcción de viviendas nuevas y obras de infraestructura se deben realizar los estudios de suelos ajustados a la Norma sismo resistente NSR-10, para definir las condiciones de estabilidad puntuales, estos estudios deben ser aprobados en curaduría de acuerdo a la normatividad vigente.

- Se recomienda realizar mantenimiento a las diferentes obras proyectadas, el cual incluye:
 - Mantenimiento rutinario, es aquel que puede realizarlo un grupo de personas no calificadas y que comprende labores básicas como limpieza de cunetas y rondas, también el retiro de escombros. Debe realizarse con la siguiente periodicidad: dos veces al mes, antes y después de una temporada invernal y cuando ocurra un evento que así lo requiera.
 - Mantenimiento periódico, es aquel que un grupo de personas calificadas para labores de reparación puede llevar a cabo. Comprende labores de reparaciones menores de estructuras de contención, sistemas de contención y de obras de drenaje. Este mantenimiento se debe realizar con la siguiente periodicidad: dos veces al año y cuando ocurra un evento que así lo requiera.
- Si para la ejecución de las obras geotécnicas se requiere la intervención de los árboles, se recomienda realizar un inventario forestal y tramitar los permisos ambientales ante la autoridad ambiental competente (Área Metropolitana el Valle de Aburrá – Corantioquía).
- Previo al desarrollo de anclajes o drenes se deberá consultar ante la empresa prestadora de servicios públicos si existen redes que puedan resultar afectadas, además se deberá tener en cuenta el artículo 557 del Acuerdo 48 de 2014: *“Criterios de seguridad que deben tener las obras geotécnicas que se realicen en el municipio de Medellín. Previo a la ejecución de obras geotécnicas que tengan prevista la realización de anclajes o subdrenes que traspasen a predios colindantes en proyectos urbanísticos, será necesario la constitución de servidumbre por los propietarios de los mismos, junto con un escrito de responsabilidad, suscrita por parte del constructor del proyecto o responsable de la obra geotécnica, que incluya la obligación de salvaguardar la integridad de las edificaciones, espacio público y las redes de líneas vitales vecinas. En el caso de no ser factible la localización de estas obras geotécnicas sobre predios vecinos, el responsable del proyecto deberá generar otra alternativa de obra geotécnica, que permita garantizar la estabilidad del terreno donde se proyecta la obra, de los predios y edificaciones colindantes”*.
- Cuando las obras de mitigación generen espacios residuales potencialmente aprovechables, se recomienda que éstos se adecúen como espacios públicos (zonas verdes, recreación pasiva, senderos, entre otros) para evitar la ocupación indebida (invasión) de los mismos.

- Previo a la ejecución de las obras de mitigación recomendadas para cada área de estudio, se debe verificar si las condiciones iniciales (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y geotécnicas) se mantienen, de lo contrario se tendría que realizar una actualización a los estudios y diseños de las mismas.
- Previo a la construcción de las obras de mitigación, se debe verificar si los predios a intervenir son de propiedad del municipio de Medellín, en caso contrario se deberán solicitar los respectivos permisos o proceder a realizar la compra de estos. Igualmente, las edificaciones afectadas por el desarrollo de las obras, deben ser compradas o reubicadas.
- Cuando las obras de mitigación recomendadas obedecen a causas generadas durante el desarrollo de un proceso constructivo, están deberán ser ejecutadas por la firma o empresa constructora responsable de dicho proyecto.
- Si con el desarrollo de las obras de mitigación se generan descoles, producto del manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, estos deberán ser conducidos a una red de drenaje natural o artificial, previo trámite ante las entidades competentes.
- Las áreas clasificadas de amenaza baja y media producto de los estudios de riesgo de detalle, podrán ser objeto de actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos y la prestación de servicios públicos normatizados (convencionales). La implementación o el desarrollo de cualquiera de las actuaciones, deberá cumplir con la norma urbanística establecida en el Acuerdo 48 de 2014 – Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y las disposiciones establecidas en la Norma NRS-10, el Acuerdo Metropolitano 09 de 2.012 o demás normas que las adicionen, modifiquen o sustituyan.
- Las áreas no urbanizadas, ocupadas o edificadas, clasificadas como de amenaza alta por movimientos en masa, no pueden ser objeto de procesos de urbanización, otorgamiento de licencias urbanísticas y prestación de servicios públicos convencionales. Las acciones u obras de mitigación recomendadas en el estudio deberán ser ejecutadas por el urbanizador responsable o, en su defecto, por el titular durante la vigencia de la licencia.

Las áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, clasificadas de amenaza alta dentro de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) y por fuera del área de estudio, se clasificarán como zonas con condición del riesgo, y deben ser objeto de estudios detallados de riesgo, siguiendo las especificaciones técnicas y el procedimiento para su incorporación en la cartografía oficial del Plan, establecido en el Decreto 1626 de 2015, en consonancia con la normativa nacional vigente.

- Las áreas clasificadas de riesgo bajo y medio podrán ser objeto de actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos y la prestación de servicios públicos normatizados (convencionales). La implementación o desarrollo de cualquiera de las actuaciones, deberá cumplir con la norma urbanística establecida en el Acuerdo 48 de 2014 – Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y las disposiciones establecidas en la Norma NRS-10, el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 o demás normas que las adicionen, modifiquen o sustituyan. No aplican estas condiciones de manejo para las zonas de riesgo bajo por inundaciones y/o avenidas torrenciales, que hagan parte de la faja de retiro de una corriente natural de agua.
- En las zonas de alto riesgo mitigables solo se permiten actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos y la prestación de servicios públicos normatizados (convencionales), una vez se hayan ejecutado las obras de mitigación propuestas y los procesos de monitoreo recomendados para cada área de influencia directa de dichas obras. En las áreas de terreno caracterizadas como zonas de alto riesgo mitigables por inundación y/o avenida torrencial, que hagan parte de la faja de retiro de una corriente natural de agua, no aplica las anteriores condiciones de manejo.
- En las zonas de alto riesgo no mitigables no se permiten actuaciones urbanísticas, otorgamiento de licencias de urbanización, construcción, reconocimiento de edificaciones, adecuaciones de espacio público o equipamientos, la prestación de servicios públicos normatizados ni el desarrollo de escombreras. Mientras se realizan los procesos de reasentamiento, se podrán implementar obras de mitigación de desastres y la prestación de servicios públicos no convencionales temporales (saneamiento básico).

- Las zonas caracterizadas como de alto riesgo no mitigables, requieren de programas de reasentamiento. Una vez efectuado el proceso de reasentamiento en estas zonas, se determinará la factibilidad de ubicar en ellas ecoparques para la mitigación del riesgo, las cuales pueden ser adecuadas como espacios públicos para la recreación pasiva y/o activa, o determinar cuales se deben destinar sólo a protección.
- Las construcciones ubicadas dentro de los cauces o en cercanías de los mismos, cuya clasificación de riesgo por inundación y/o avenida torrencial sea alto no mitigable, deben ser objeto de reubicación; al igual de aquellas que se localicen en las áreas donde se requiera implementar las obras de mitigación proyectadas.
- El plan de monitoreo para hacer seguimiento al comportamiento de las obras de mitigación en el tiempo, deberá desarrollarse conforme se plantea en las recomendaciones de este estudio, en relación a la localización y profundidad de la instrumentación, la duración total del proceso y la periodicidad de las lecturas.

16. CONCLUSIONES

Para el sector del polígono La Sierra se detectaron materiales antrópicos en superficie dispuestos sin ninguna especificación técnica, subyaciendo estos llenos se encontraron depósitos de vertiente en las perforaciones 7,8 y 9 y suelo residual en las perforaciones 4,5 y 6. En las perforaciones 1,2 y 3 se encontró transición suelo roca subyaciendo el lleno.

A continuación se muestran los parámetros geomecánicos calculados para el lleno antrópico: Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 29° a partir de Kishida, JRB, Muller, Parra y Ramos y 9 kPa para la cohesión según Mesri ya que es el mínimo valor obtenido teniendo en cuenta que son llenos que no fueron conformados técnicamente. A continuación se anexan los parámetros estadísticos:

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	28.5	9.0
Desviación	0.9	0.0
Mínimo	27	9.0
Máximo	29	9.0

Para el depósito de vertiente los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 26° y 45° Descartando Kulhaway para la cohesión entre 0 kPa y 20kPa según Mesri, Parra y Ramos. A continuación se anexan los parámetros estadísticos:

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	31.2	12.7
Desviación	4.8	9.0
Mínimo	26	0
Máximo	45	20

Para el horizonte IB de la Dunita los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 37° descartando Kullhaway, Peck y

Schmertman y entre 4 kPa y 25 kPa para la cohesión (según Mesri y Parra). A continuación se anexan los parámetros estadísticos:





	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	31	15.5
Desviación	2.8	8.0
Mínimo	27	4.2
Máximo	37.9	25

Para la transición suelo roca los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 37.9° descartando Kullhaway, Peck y Schmertman y entre 4.2 kPa y 36 kPa descartando Stroud.

A continuación se muestran los parámetros estadísticos obtenidos:

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	30.8	19
Desviación	2.8	10.5
Mínimo	27	4.2
Máximo	37.9	38

Para la definición de los parámetros geomecánicos del material clasificado como roca fracturada y meteorizada se utilizó la metodología generalizada de Hoek and Brown fundamentada en el GSI.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	a
Lleno		17	Mohr-Coulomb	15.5	31				
Transición suelo roca (IIA)		17	Mohr-Coulomb	19	30.8				
Dunita (III)		17	Generalised Hoek-Brown			175000	0.1954	8.57494e-006	0.522344
Lleno antropico		16	Mohr-Coulomb	9	28.5				

El coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático sería (KST) = 0.20.

Para el perfil 1 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el

estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.13 y el factor de seguridad medio es de 1.21 con una probabilidad de falla del 3.5%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.82 y el factor de seguridad medio es de 0.89 con una probabilidad de falla de 84%. Finalmente, para el perfil No 1 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.41 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad son menores que 1.2. La profundidad de falla se estima en 8.89 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición pseudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.0017$ Para la condición saturada $PF=0.04$ a amenaza es media.

Para el perfil 2 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.6 y el factor de seguridad medio es de 1.46 con una probabilidad de falla del 0%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.92 y el factor de seguridad medio es de 1.06 con una probabilidad de falla de 40.8%. Finalmente, para el perfil No 2 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.83 y un factor de seguridad medio de 1.02, con una probabilidad de falla de 51%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como baja para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 3.5 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición pseudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.00086$. Para la condición saturada $PF=0.02$ la amenaza es media.

Para el perfil 3 El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la

consideración estática fue de 1.08 y el factor de seguridad medio es de 1.16 con una probabilidad de falla del 11%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.79 y el factor de seguridad medio es de 0.86 con una probabilidad de falla de 89%.

Finalmente, para el perfil No 3 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.39 y un factor de seguridad medio de 0.45, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 6.82 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición seudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.0018$ Para la condición saturada $PF=0.04$ la amenaza es media.

Para el perfil 4 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.07 y el factor de seguridad medio es de 1.16 con una probabilidad de falla del 11%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.78 y el factor de seguridad medio es de 0.84 con una probabilidad de falla de 90%.

Finalmente, para el perfil No 4 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.12 y un factor de seguridad medio de 0.17, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 5.49 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición seudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.0019$ Para la condición saturada $PF=0.04$ la amenaza es media.

Para el perfil 5 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la

consideración estática fue de 1.16 y el factor de seguridad medio es de 1.26 con una probabilidad de falla del 0.2%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.82 y el factor de seguridad medio es de 0.88 con una probabilidad de falla de 93%.

Finalmente, para el perfil No 5 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.41 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 10.6 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición pseudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.0019$ Para la condición saturada $PF=0.04$ la amenaza es media.

Para el perfil 6 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.12 y el factor de seguridad medio es de 1.43 con una probabilidad de falla del 1.2%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.91 y el factor de seguridad medio es de 1.05 con una probabilidad de falla de 38%. Finalmente, para el perfil No 6 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.7 y un factor de seguridad medio de 0.9, con una probabilidad de falla de 73%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 6.96 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición pseudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.0008$ Para la condición saturada $PF=0.029$ la amenaza es media.

Para el perfil 7 el primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la situación de estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.11 y el factor de seguridad medio es de 1.26 con

una probabilidad de falla del 6%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.8 y el factor de seguridad medio es de 0.93 con una probabilidad de falla de 70%. Finalmente, para el perfil No 7 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 0.36 y un factor de seguridad medio de 0.48, con una probabilidad de falla de 100%.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como alta para la condición estática, según decreto 1626 de 2015. La profundidad de falla se estima en 10.29 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta. En condición pseudoestática la amenaza es baja ya que $PF=0.001$ Para la condición saturada $PF=0.04$ la amenaza es media.

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas y topográficas que caracterizan el polígono La Sierra y los resultados de los análisis de estabilidad de cada uno de los perfiles evaluados, se propone la implementación de las siguientes obras:

Perfil 1. Para el perfil 1 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 30 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes en las cuatro hileras inferiores.

Perfil 2. Teniendo en cuenta las características geotécnicas y topográficas del perfil 2, se proponen como obras para el mejoramiento de la estabilidad, la implementación de un sistema de subdrenes compuesto por 4 líneas de subdrenes de 20 metros de longitud y diámetro 2". Un arreglo en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical.

Perfil 3. Para el perfil 3 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser

complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes en las cuatro hileras inferiores.

Perfil 4. Para el perfil 4 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 3 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud ubicados entre las tres hileras inferiores de los anclajes.

Perfil 5. Para el perfil 5 se recomienda la construcción de dos sistemas de anclajes, el primer sistema de anclajes ubicado en la parte superior del perfil compuesto por 5 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 20 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 3 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre las 3 líneas inferiores de anclajes.

El segundo sistema ubicado en la parte inferior del perfil compuesto por 8 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros en la horizontal y 3 metros en la vertical, anclajes de 25 metros de longitud de los cuales 15 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser complementado por 4 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 30 metros de longitud los cuales se deben ubicarse entre las 4 hileras inferiores de anclajes.

Perfil 6. Se proponen como obras para el mejoramiento de la estabilidad, la implementación de un sistema de subdrenes compuesto por 5 líneas de subdrenes de 25 metros de longitud y diámetro 2". Un arreglo en tres bolillo separados 3 metros en la horizontal y 2 metros en la vertical.

Perfil 7. Para el perfil 7 se recomienda la construcción de un sistema de anclajes compuesto por 3 líneas de anclajes activos ubicados en tres bolillo separados 2 metros tanto en la horizontal como en la vertical, anclajes de 15 metros de longitud de los cuales 8 metros corresponden al bulbo, cada anclaje compuesto por 3 cables de 5/8" y 45 toneladas de capacidad. Este sistema de anclajes debe ser

complementado por 2 líneas de subdrenes de 2" de diámetro y 25 metros de longitud los cuales se deben ubicar entre anclajes.

Se recomienda inyección de los anclajes tipo IRS (repetitiva y selectiva)

17. LIMITACIONES

- Las conclusiones y recomendaciones consignadas en este documento se basan en los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio que se describen en los capítulos respectivos y en la experiencia de los profesionales que participaron en el estudio.
- Debe tenerse en cuenta que existen condiciones especiales en los diferentes polígonos que impidieron definir con precisión algunos aspectos fundamentales necesarios para los análisis, evaluaciones y recomendaciones requeridos en el proyecto, tales como la ocupación del territorio debido a la alta densidad de construcción, escasez de afloramientos y condiciones topográficas especiales que limitaron la accesibilidad a las zonas de afloramientos.
- Para subsanar las limitaciones mencionadas, se contó con la participación de un grupo de profesionales expertos en dichos temas quienes realizaron un amplio y detallado trabajo de campo ajustándolo de la mejor manera, con la información puntual obtenida de los sondeos.
- Los levantamientos topográficos corresponden en su mayoría a restituciones aerofotogramétricas, con los cuales se evaluaron los perfiles de estabilidad y ubicaron las obras propuestas. Es posible que se requiera precisar la ubicación de las obras con levantamientos en campo de mayor detalle.
- Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda que previo a la ejecución de las obras se deberán realizar el levantamiento topográfico complementario y los sondeos o exploraciones necesarias para ajustar y calibrar los modelos presentados en este documento, dando cumplimiento a los requisitos mínimos establecidos en el Código Colombiano de Puentes (CCP-14) en cuanto a número y profundidad de sondeos. Lo anterior, permitirá validar las hipótesis presentadas, ajustar las mismas o realizar los cambios requeridos a nivel geotécnico y estructural.
- Las recomendaciones planteadas en el documento buscan atender la estabilidad global de las laderas objeto de estudio, preservando y/o mejorando las condiciones geotécnicas actuales; sin embargo, los alcances contractuales no

permiten definir obras locales para la atención de cada uno de los procesos reportados, para los cuales se presentan las recomendaciones de manejo generales en aspectos como cortes, excavaciones, manejo de aguas superficiales y subsuperficiales entre otros.

18. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCALDIA DE MEDELLÍN. 2014. Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín, Acuerdo 48 de 2014.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLÉ DE ABURRÁ (AMVA)- ALCALDÍA DE MEDELLÍN. 2017. Armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín. En revisión.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2006. Plan de ordenación y manejo (PIOM) de la microcuenca de la quebrada Santa Elena. Municipio de Medellín.
- CARDINALI, M., REICHENBACH, P., GUZZETTI, F., ARDIZZONE, F., ANTONINI, G., GALLI, M., CACCIANO, M. 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2), 57–72.
- CORANTIOQUIA. 2002. CORANTIOQUIA - Universidad Nacional de Colombia. 2002. Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. Informe Final. Medellín. 143 pág.
- CORREA, A.; MARTENS, U.; RESTREPO, J.J.; ORDÓÑEZ – CARMONA, O.; PIMENTEL, M. 2005. Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – cordillera Central de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (112), pp. 325-344.
- FELL, R., HARTFORD, D. 1997. Landslide risk management in Landslide Risk Assessment , Cruden and Fell (eds) Balkema, Rotterdam: 51- 109
- GONZÁLEZ, H. 2002. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia. Neis de la Iguana (Pzni), cordillera Central departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas. 2002. 24 p.

- GONZÁLEZ, H.; LONDOÑO, A. 2002. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia. Diorita de Altavista (Stock de Altavista) (K1da) Cordillera Central Departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas. 22 p.
- HIDALGO, A. L., LOKE, M. H., FANTON, G. O., & RUBÍ, E. C. 2010. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D).
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. (2002) An Introduction to geophysical exploration. Blackwell Science, 281, 183-196.
- LOKE, D. M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Cangkat Minden Lorong, 6574525(1999), 63. Doi: 10.3390/su8111117.
- NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- ORELLANA, E. 1982. Prospección geoeléctrica en corriente continua. Segunda Edición, Ed. Paraninfo, Madrid, España. 578 pp.
- PEREIRA, E.; ORTIZ, F.; PROCHARD, H. 2006. Contribución al conocimiento de las Anfibolitas y Dunitas DE Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá). Dyna 73 (149), pp. 17-30.
- POLANÍA, M. C. 2017. Caracterización geofísica usando prospección geoeléctrica en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.
- RESTREPO, J.J. 2008. Obducción y metamorfismo de ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, cordillera Central de Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra 22, pp. 49-100.
- RODRÍGUEZ G., GONZÁLEZ, H.; ZAPATA, G. 2008. Complejo El Retiro, cordillera Central, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra 22, pp. 101-121.
- SÁNCHEZ, F. 2004. Prospección geofísica: Sondeos eléctricos verticales. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca, España.(En línea). Disponible en: <http://web.usal.es>.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO – SGC. 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C. 179 p.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA (2013). Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el centro y sur del valle de Aburrá. Contrato 254 de 2013. Medellín. 343 pp.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2009. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión. Medellín.