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



**CONTRATO No: 0286 de 2014**

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



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

**MAYO DE 2018**

**VERSIÓN 6**

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

<b>CONTROL DE VERSIÓN</b>			
<b>Versión</b>	<b>Fecha</b>	<b>Capítulo Modificado</b>	<b>Descripción</b>
0	16/07/2015	No Aplica	Documento Inicial
1	15/09/2015	Todos	Documento Final
2	30/10/2015	Todos	Correcciones documento final
3	24/11/2015	Fue incluido un nuevo capítulo con análisis de redes de servicios públicos y fueron modificados los de vulnerabilidad y conclusiones y recomendaciones	Revisión del documento Final
4	11/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
5	30/11/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final
6	23/05/2018	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de La Interventoría con base en requerimientos del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final

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

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

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

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CONTROL DE VERSIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>2</b>
<b>CONTROL DE DISTRIBUCIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>.....</b>	<b>5</b>
<b>3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)</b>	<b>.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 GENERALIDADES</b>	<b>.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>9</b>
<b>4. ASPECTOS GEOLÓGICOS</b>	<b>.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 GEOLOGÍA REGIONAL</b>	<b>.....</b>	<b>20</b>
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)	.....	20
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)	.....	22
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)	.....	22
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)	.....	22
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)	.....	22
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	.....	23
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)	.....	23
<b>4.2 GEOLOGÍA LOCAL</b>	<b>.....</b>	<b>24</b>
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)	.....	29
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ	.....	30
4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)	.....	31



4.2.4	Depósitos coluviales (Qcol).....	31
4.2.5	Depósitos de deslizamiento (Qd) .....	32
4.2.6	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) .....	33
4.2.7	Dunitas de Medellín (JKuM).....	35
<b>5.</b>	<b>ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....</b>	<b>42</b>
5.2.1	Macrounidades geomorfológicas .....	42
5.2.2	Unidades Geomorfológicas.....	45
<b>5.3</b>	<b>GEOMORFOLOGÍA LOCAL .....</b>	<b>48</b>
5.3.1	Unidad de Altiplano AP .....	51
5.3.2	Unidad de Peldaño Alto PÑA .....	52
5.3.3	Unidad de Peldaño Tectónico PÑT .....	52
5.3.4	Unidad de Picacho P .....	53
5.3.5	Unidad de Lomeríos Estrechos LRE .....	53
5.3.6	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM.....	54
5.3.7	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM.....	55
5.3.8	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Suaves LAVS .....	55
5.3.9	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF .....	56
5.3.10	Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC.....	56
5.3.11	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI.....	57
5.3.12	Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI.....	57
5.3.13	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI .....	58
5.3.14	Unidad de Superficie Antrópica SA .....	59
5.3.15	Unidad de Escarpe E .....	59
5.3.16	Unidad de Vertiente Moderada VM .....	60
5.3.17	Unidad de Vertiente Suave VS .....	60

5.3.18	Unidad de Dolinas.....	61
<b>5.4</b>	<b>MORFODINÁMICA REGIONAL .....</b>	<b>63</b>
<b>5.5</b>	<b>MORFODINÁMICA LOCAL .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>76</b>
<b>6.1</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL .....</b>	<b>76</b>
<b>6.2</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....</b>	<b>76</b>
6.2.1	Orientación y buzamiento .....	78
6.2.2	Espaciamiento .....	84
6.2.3	Continuidad.....	85
6.2.4	Abertura.....	85
6.2.5	Relleno .....	86
6.2.6	Alteración.....	87
6.2.7	Rugosidad .....	87
6.2.8	Agua .....	89
6.2.9	Resistencia de las paredes.....	90
<b>6.3</b>	<b>ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....</b>	<b>90</b>
<b>7.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA.....</b>	<b>95</b>
<b>7.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>95</b>
<b>7.2</b>	<b>MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS.....</b>	<b>96</b>
<b>7.3</b>	<b>MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA .....</b>	<b>100</b>
<b>7.4</b>	<b>MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA.....</b>	<b>102</b>

<b>8.</b>	<b>ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS .....</b>	<b>107</b>
<b>8.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>107</b>
<b>8.2</b>	<b>LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG .....</b>	<b>109</b>
<b>8.3</b>	<b>EL GRADIENTE OROGRÁFICO .....</b>	<b>113</b>
<b>8.4</b>	<b>EL GRADIENTE NULO .....</b>	<b>116</b>
<b>8.5</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL .....</b>	<b>121</b>
8.5.1	Zonas de recarga.....	121
8.5.2	Caracterización del acuífero .....	122
8.5.3	Flujo regional y flujo local.....	122
8.5.4	Zonas de descarga .....	122
<b>8.6</b>	<b>INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA .....</b>	<b>123</b>
8.6.1	Piezómetros P-G-PZ-32B y P-G-PZ-32D .....	126
8.6.2	Piezómetros P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D .....	127
8.6.3	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	127
<b>8.7</b>	<b>AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL .....</b>	<b>128</b>
<b>9.</b>	<b>ASPECTOS SÍSMICOS.....</b>	<b>133</b>
<b>10.</b>	<b>ASPECTOS GEOTÉCNICOS .....</b>	<b>137</b>
<b>10.1</b>	<b>SONDEOS EXPLORATORIOS .....</b>	<b>137</b>
10.1.1	Perforaciones.....	137
10.1.2	Líneas geofísicas .....	152
<b>10.2</b>	<b>ENSAYOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>172</b>



10.2.1	Ensayos de clasificación.....	173
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	177
<b>10.3</b>	<b>PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>183</b>
10.3.1	Aspectos generales .....	183
10.3.2	Lleno antrópico .....	183
10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros .....	185
10.3.4	Depósitos coluviales .....	186
10.3.5	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC) .....	187
10.3.6	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte.....	189
<b>11.</b>	<b>ASPECTOS HIDROLÓGICOS .....</b>	<b>190</b>
<b>11.1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>190</b>
<b>11.2</b>	<b>REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA.....</b>	<b>190</b>
<b>11.3</b>	<b>ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN.....</b>	<b>192</b>
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa.....	195
11.3.2	Estación Mazo .....	195
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga.....	196
<b>11.4</b>	<b>DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS .....</b>	<b>197</b>
11.4.1	Usos del suelo .....	200
11.4.2	Tiempos de concentración.....	202
<b>11.5</b>	<b>CAUDALES MÁXIMOS.....</b>	<b>203</b>
11.5.1	Intensidades de Diseño .....	203
11.5.2	Método Racional.....	204
11.5.3	Hidrogramas sintéticos .....	205
11.5.4	Regionalización de caudales .....	209

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

11.5.5	Resumen de caudales .....	212
<b>12.</b>	<b>ASPECTOS HIDRÁULICOS .....</b>	<b>214</b>
<b>12.1</b>	<b>REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA .....</b>	<b>214</b>
<b>12.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES .....</b>	<b>214</b>
<b>12.3</b>	<b>ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES .....</b>	<b>220</b>
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D .....	220
12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	221
12.3.3	Información topográfica .....	222
12.3.4	Tamaño de la malla .....	222
12.3.5	Condiciones de frontera .....	222
12.3.6	Condiciones iniciales .....	223
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica.....	223
12.3.8	Coeficiente de rugosidad .....	223
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	223
12.3.10	Resultados en la Quebrada La Loca (Condiciones Actuales).....	224
<b>13.</b>	<b>AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA .....</b>	<b>226</b>
<b>13.1</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>226</b>
13.1.1	Objetivo y aspectos generales .....	226
13.1.2	Escenarios de análisis .....	226
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad .....	228
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla .....	231
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	233
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza .....	236
<b>13.2</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>237</b>

<b>14.</b>	<b>AMENAZA POR INUNDACIONES .....</b>	<b>248</b>
<b>14.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>248</b>
<b>14.2</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>248</b>
<b>14.3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>251</b>
<b>15.</b>	<b>AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES .....</b>	<b>253</b>
<b>15.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>253</b>
<b>15.2</b>	<b>AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA .....</b>	<b>253</b>
<b>15.3</b>	<b>AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN Y TRANSPORTE DEL MATERIAL DEL LECHO.....</b>	<b>254</b>
<b>15.4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>256</b>
<b>15.5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>259</b>
<b>15.6</b>	<b>AMENAZAS POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES PARA PLANIFICACIÓN DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL .....</b>	<b>263</b>
<b>16.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD .....</b>	<b>264</b>
<b>16.1</b>	<b>ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL.....</b>	<b>264</b>
<b>16.2</b>	<b>VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....</b>	<b>266</b>
<b>16.2.1</b>	<b>Metodología de análisis .....</b>	<b>266</b>
<b>16.2.2</b>	<b>Calibración de la metodología.....</b>	<b>272</b>
<b>16.2.3</b>	<b>Levantamientos de campo y análisis de la información.....</b>	<b>281</b>
<b>16.2.4</b>	<b>Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas.....</b>	<b>294</b>

<b>16.3</b>	<b>VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES.....</b>	<b>305</b>
<b>16.4</b>	<b>SOPORTE FOTOGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS .....</b>	<b>317</b>
<b>17.</b>	<b>RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....</b>	<b>319</b>
<b>17.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>319</b>
<b>17.2</b>	<b>CÁLCULO DEL RIESGO .....</b>	<b>319</b>
<b>17.3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>320</b>
<b>18.</b>	<b>RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES .....</b>	<b>328</b>
<b>18.1</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>328</b>
<b>18.2</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>328</b>
<b>19.</b>	<b>ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....</b>	<b>332</b>
<b>19.1</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES.....</b>	<b>332</b>
<b>19.2</b>	<b>SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA .....</b>	<b>332</b>
<b>19.3</b>	<b>ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES.....</b>	<b>336</b>
<b>19.4</b>	<b>EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES .....</b>	<b>336</b>
<b>20.</b>	<b>PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO.....</b>	<b>337</b>
<b>20.1</b>	<b>OBRAS PARA MOVIMIENTOS EN MASA .....</b>	<b>337</b>
<b>20.2</b>	<b>OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES .....</b>	<b>352</b>

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

21.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>361</b>
22.	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>370</b>
23.	<b>LIMITACIONES .....</b>	<b>374</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de la UMI El Faro - Golondrina resaltando el Polígono Golondrinas (Sin Escala).....	13
Figura 2.	Parte superior de la Zona 1 UMI El Faro - Golondrina.....	14
Figura 3.	Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrina limitando con la UMI Trece de Noviembre y parte baja de la Zona 1 de la UMI El Faro – Golondrina .....	14
Figura 4.	Redes antrópicas de servicios instaladas por la comunidad encontradas en el Polígono Golondrinas.....	14
Figura 5.	Vista de la parte baja de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas.....	15
Figura 6.	Vista de la parte alta de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas.....	16
Figura 7.	Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono Golondrinas... ..	17
Figura 8.	Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono Golondrinas (Segunda Parte).....	17
Figura 9.	Panorama del urbanismo del Polígono Golondrinas, márgenes de la Quebrada La Loca.....	18
Figura 10.	Condiciones actuales del Drenaje La Loca.....	18
Figura 11.	Condiciones actuales del Drenaje La Loca (Continuación).....	19
Figura 12.	Lleno antrópico en el Polígono Golondrinas .....	29
Figura 13.	Lleno antrópico en la Perforación P-G-PR-33.....	30
Figura 14.	Cenizas volcánicas en la parte este de la UMI El Faro - Golondrinas.....	30
Figura 15.	Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Loca en las Estaciones de Campo AMD05-U-EFG y AMD03-U-EFG .....	31
Figura 16.	Depósitos coluviales típicos de la zona .....	32
Figura 17.	Depósito de deslizamiento en la parte alta de la UMI El Faro-Golondrinas..	33
Figura 18.	Depósito de flujo de lodos y/o escombros ubicado en la parte superior de la UMI en la Estación de Campo KGL01-U-EFG .....	35
Figura 19.	Depósito de flujos de lodos y/o encontrado en la Perforación P-G-PP-41 ...	35
Figura 20.	Dunita cizallada encontrada en las Perforaciones P-G-PR-40 y P-G-PR-41	36
Figura 21.	Horizonte IB reportado en la Perforación U-EFG-PP-01 .....	37

Figura 22.	Horizonte IB de meteorización en Estación AMD42-U-EFG .....	37
Figura 23.	Horizonte IC de meteorización A) En la Perforación P-PR-G-32 y B) En la Estación de Campo MAD08-G .....	38
Figura 24.	Horizonte IIA de meteorización de la Dunita cizallada .....	39
Figura 25.	Horizonte IIA de meteorización mostrando bloques de dunitas fuertemente diaclasados .....	39
Figura 26.	Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa .....	40
Figura 27.	Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa (Continuación) .....	40
Figura 28.	Brecha de Dunitas A) En la Estación de Campo AMD01-G y B) En la Perforación P-EF-PR-34.....	41
Figura 29.	Brecha de Dunitas sobre la Quebrada La Loquita .....	41
Figura 30.	Perfil geomorfológico A-A´ .....	51
Figura 31.	Perfil geomorfológico B-B´ .....	51
Figura 32.	Perfil geomorfológico C-C´ .....	51
Figura 33.	Unidad de Altiplano AP.....	52
Figura 34.	A) Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA y B) Unidad de Vertiente Suave VS .....	53
Figura 35.	Unidad de Picacho P .....	54
Figura 36.	Unidad de Lomeríos Estrechos LRE.....	54
Figura 37.	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM, Escarpe E, Vertiente Moderada VM y Superficies sobre Depósitos SSDMI .....	55
Figura 38.	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM .....	56
Figura 39.	Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF .....	56
Figura 40.	Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC en la parte alta del polígono. ....	57
Figura 41.	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI .....	58
Figura 42.	Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión y Escarpe Largo Semicircular ELSC .....	58
Figura 43.	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI.....	59
Figura 44.	Unidad de Superficie Antrópica AS .....	59
Figura 45.	Vertiente Escarpada VE exhibiendo bloques en superficie.....	60

Figura 46.	Unidad de Vertiente Moderada VM con bloques en superficie.....	60
Figura 47.	Vertiente Suave VS en la parte superior del Polígono Golondrinas .....	61
Figura 48.	Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007).....	61
Figura 49.	Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales.....	62
Figura 50.	Dolinas por colapso SFJ13-U-EFG .....	63
Figura 51.	A) Dolina generada por colapso reportada en la Estación de Campo SFJ13-U-EFG y B) Dolina vegetada reportada en la Estación de Campo SFJ14-U-EFG.....	63
Figura 52.	Distribución de los fenómenos.....	66
Figura 53.	Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos.....	66
Figura 54.	Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987 .....	68
Figura 55.	Deslizamiento activo en Estación de Campo MAD03-U-TN .....	72
Figura 56.	Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen la caída .....	73
Figura 57.	Frentes de roca inestables .....	73
Figura 58.	(A) Surcos y (B) bloques en superficie en pendientes moderadas.....	74
Figura 59.	Corona activa contenida en cárcava.....	74
Figura 60.	Cárcavas activas ubicadas en la parte superior de la UMI en las Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG .....	75
Figura 61.	Socavación lateral en la Quebrada Chorro Hondo.....	75
Figura 62.	Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	80
Figura 63.	Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	80
Figura 64.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN .....	81
Figura 65.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG y SFJ05-U-EFG .....	82
Figura 66.	Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades .....	84
Figura 67.	Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.....	85

Figura 68.	Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades .....	86
Figura 69.	Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades .....	87
Figura 70.	Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades .....	88
Figura 71.	Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002) .....	89
Figura 72.	Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades .....	89
Figura 73.	Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.....	89
Figura 74.	Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	90
Figura 75.	Secciones analizadas en la UMI El Faro-Golondrinas .....	91
Figura 76.	Análisis cinemático Secciones 1 y 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	92
Figura 77.	Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	93
Figura 78.	Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica.....	95
Figura 79.	Localización esquemática de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala) .....	108
Figura 80.	Recta Meteórica para Colombia .....	109
Figura 81.	Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio .....	111
Figura 82.	Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental ...	113
Figura 83.	Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia .....	115
Figura 84.	Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia .....	115
Figura 85.	Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental .....	116
Figura 86.	Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental .....	116
Figura 87.	Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012).....	119

Figura 88.	Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá.....	121
Figura 89.	Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil .....	125
Figura 90.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-G-PZ-32B y P-G-PZ-32D.....	126
Figura 91.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D.....	127
Figura 92.	Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono Golondrinas.....	128
Figura 93.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica .....	131
Figura 94.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica .....	132
Figura 95.	Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999) .....	133
Figura 96.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro – Golondrinas .....	141
Figura 97.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	142
Figura 98.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	143
Figura 99.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	144
Figura 100.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	145
Figura 101.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	146
Figura 102.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	147
Figura 103.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	148
Figura 104.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	149
Figura 105.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	150

Figura 106.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación) .....	151
Figura 107.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-01 .....	154
Figura 108.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-01 .....	154
Figura 109.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01	154
Figura 110.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01 .....	155
Figura 111.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-02 .....	156
Figura 112.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-02 .....	156
Figura 113.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02	156
Figura 114.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02.....	157
Figura 115.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-03 .....	158
Figura 116.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-03 .....	158
Figura 117.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03	158
Figura 118.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03.....	159
Figura 119.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-04 .....	160
Figura 120.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-04 .....	160
Figura 121.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04	160
Figura 122.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04.....	161
Figura 123.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01 .....	162
Figura 124.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01 .....	162
Figura 125.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01 .....	162
Figura 126.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01 .....	163
Figura 127.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-02 .....	164
Figura 128.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-02 .....	164

Figura 129. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02 .....	164
Figura 130. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02 .....	165
Figura 131. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-03 .....	166
Figura 132. Dispersión y ajuste para la Línea P—EF-LG-03 .....	166
Figura 133. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03 .....	166
Figura 134. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03 .....	167
Figura 135. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-04 .....	168
Figura 136. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-04 .....	168
Figura 137. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04 .....	168
Figura 138. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04 .....	169
Figura 139. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10 .....	170
Figura 140. Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10 .....	170
Figura 141. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10 .....	170
Figura 142. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14 .....	171
Figura 143. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14 .....	171
Figura 144. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14 .....	172
Figura 145. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14 .....	172
Figura 146. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande .....	175
Figura 147. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad .....	175
Figura 148. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad. ....	176
Figura 149. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad .....	176



Figura 150.	Resultados corte directo Muestra P-G-PR-34-M2 a 2.2 m de profundidad	179
Figura 151.	Resultados corte directo Muestra P-G-PP-40-M3 a 3.2 m de profundidad.	179
Figura 152.	Resultados corte directo Muestra G2-M1 a 2.0 m de profundidad .....	180
Figura 153.	Resultados corte directo Muestra UEFG1-M1 a 1.0 m de profundidad .....	180
Figura 154.	Resultados corte directo Muestra UEFG2-M1 a 2.0 m de profundidad .....	180
Figura 155.	Resultados corte directo Muestra UEFG3-M1 a 3.0 m de profundidad .....	181
Figura 156.	Resultados corte directo Muestra UEFG4-M1 a 0 m de profundidad .....	181
Figura 157.	Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad .....	181
Figura 158.	Resultados corte directo Muestra UEFG6-M1 a 0 m de profundidad .....	182
Figura 159.	Resultados corte directo Muestra UEFG7-M1 a 3.0 m de profundidad .....	182
Figura 160.	Resultados corte directo Muestra UEFG8-M1 a 0 m de profundidad .....	182
Figura 161.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico	184
Figura 162.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente .....	185
Figura 163.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos .....	187
Figura 164.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas .....	188
Figura 165.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa .....	195
Figura 166.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo .....	196
Figura 167.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga .....	196
Figura 168.	Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA) .....	197
Figura 169.	Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILCON (2014) (Fuente: Documento “Anexo C. Parámetros Regionalización Hidrología - Norte_Ene_2015”) .....	213
Figura 170.	Confluencia de drenaje a la Quebrada La Loca .....	217
Figura 171.	Tuberías de descarga y conducción de agua .....	217
Figura 172.	Basuras en el cauce y columnas de apoyo para viviendas .....	217



Figura 173.	Descarga de aguas residuales a la Quebrada la Loca .....	218
Figura 174.	Invasión del cauce de la Quebrada La Loca con muros .....	219
Figura 175.	Depositación de material en las márgenes de la Quebrada La Loca .....	219
Figura 176.	Vista en planta Quebrada La Loca (sin escala) .....	220
Figura 177.	Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar .....	229
Figura 178.	Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa .....	235
Figura 179.	Esquema con localización de los focos de inestabilidad que afectan el Polígono Golondrinas.....	245
Figura 180.	Esquema de localización en planta de la sección analizada.....	246
Figura 181.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Loca	247
Figura 182.	Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo .....	249
Figura 183.	Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006) .....	250
Figura 184.	Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Loca ...	256
Figura 185.	Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno.....	259
Figura 186.	Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa .....	267
Figura 187.	Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables.....	271
Figura 188.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa .....	272
Figura 189.	Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo...	273
Figura 190.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías .....	274
Figura 191.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973.....	275

Figura 192.	Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	277
Figura 193.	Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	280
Figura 194.	Zonificación del Polígono Golondrinas (Sin escala)	283
Figura 195.	Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras	299
Figura 196.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales	307
Figura 197.	Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	328
Figura 198.	Análisis de estabilidad del Perfil 1 cercano a Foco 28, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	339
Figura 199.	Análisis de estabilidad del Perfil 2 cercano a Foco 27, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	339
Figura 200.	Análisis de estabilidad del Perfil 3 cercano a Foco 5, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	340
Figura 201.	Análisis de estabilidad del Perfil 4 cercano a Foco 23, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	340
Figura 202.	Análisis de estabilidad del Perfil 5 cercano a Foco 24, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	341
Figura 203.	Análisis de estabilidad del Perfil 6 cercano a Foco 25, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	341
Figura 204.	Esquema de localización en planta de los Perfiles 1 a 6 cercanos a los Focos 5, 23, 24, 25, 27 y 28 incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles	342
Figura 205.	Análisis de estabilidad del Perfil 1 cercano a Foco 28 implementando solución en pantalla de pilas considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo	343
Figura 206.	Muro de escalar planteado para el proyecto Barrios Sostenibles	343
Figura 207.	Esquema de la solución propuesta para el Perfil 1	344
Figura 208.	Zonificación del Polígono Golondrinas de acuerdo con focos de inestabilidad	346
Figura 209.	Imagen asociada al Perfil 2 (Foco 27)	347

Figura 210.	Localización general de obras de mitigación propuestas para el Foco 26 .	347
Figura 211.	Localización general de obras de mitigación propuestas para los Perfiles 3, 4, 5 y 6 .....	348
Figura 212.	Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente.....	351
Figura 213.	Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros .....	352
Figura 214.	Estructura general de la información entregada .....	369

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local .....	48
Tabla 2.	Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles .....	65
Tabla 3.	Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio .....	67
Tabla 4.	Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor .....	68
Tabla 5.	Colores definidos para los procesos según año .....	71
Tabla 6.	Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006.....	76
Tabla 7.	Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas de campo .....	79
Tabla 8.	Familias de discontinuidades considerando todos los datos.....	81
Tabla 9.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD01-U-TN .....	82
Tabla 10.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD03-U-TN .....	82
Tabla 11.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD16-U-TN .....	83
Tabla 12.	Familias de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG .....	83
Tabla 13.	Descripción del espaciamiento de las discontinuidades .....	84
Tabla 14.	Descripción de la continuidad de las discontinuidades .....	85
Tabla 15.	Descripción de la abertura de las discontinuidades .....	86
Tabla 16.	Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas.....	91
Tabla 17.	Resumen resultados análisis cinemático .....	93
Tabla 18.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas .....	96
Tabla 19.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas ....	98
Tabla 20.	Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica.....	100

Tabla 21.	Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio.....	111
Tabla 22.	Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá.....	112
Tabla 23.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá .....	114
Tabla 24.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás.....	117
Tabla 25.	Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10 .....	135
Tabla 26.	Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños....	136
Tabla 27.	Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas.....	139
Tabla 28.	Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI El Faro - Golondrinas ....	153
Tabla 29.	Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio .....	173
Tabla 30.	VARIABLES DE ESTADO DE ALGUNAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	174
Tabla 31.	VARIABLES DE ESTADO DE ALGUNAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	178
Tabla 32.	Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales .....	189
Tabla 33.	Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual .....	193
Tabla 34.	Coordenadas de los puntos de salida del flujo en la cuenca .....	200
Tabla 35.	Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Golondrinas ..	200
Tabla 36.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en Golondrinas .....	202
Tabla 37.	Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración.....	202
Tabla 38.	Tiempos de concentración calculados para las cuencas .....	202
Tabla 39.	Valores de los Parámetros C, H y M para las Curvas IDF de las Estaciones EPM (2005) .....	203
Tabla 40.	Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca .....	204
Tabla 41.	Coeficientes de escorrentía calculados para la cuenca .....	205
Tabla 42.	Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización .....	210
Tabla 43.	Resultados de regionalización de caudales máximos.....	210

Tabla 44.	Resumen de caudales máximos para TR 2.33 Años .....	212
Tabla 45.	Resumen de caudales máximos para TR 10 Años .....	212
Tabla 46.	Resumen de caudales máximos para TR 50 Años .....	212
Tabla 47.	Resumen de caudales máximos para TR 100 Años .....	212
Tabla 48.	Resumen de caudales empleados en la modelación hidráulica.....	222
Tabla 49.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en la Qda. La Loca. Condiciones actuales .....	224
Tabla 50.	Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad .....	236
Tabla 51.	Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años ....	237
Tabla 52.	Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones .....	249
Tabla 53.	Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones .....	250
Tabla 54.	Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Golondrinas.....	255
Tabla 55.	Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales ...	258
Tabla 56.	Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996).....	268
Tabla 57.	Factor por tipo de estructura.....	269
Tabla 58.	Factor por altura de la estructura.....	269
Tabla 59.	Factor de estado de la estructura .....	270
Tabla 60.	Tipo de ocupación – Movimiento en Masa.....	286
Tabla 61.	Tipo de estructura – Movimiento en Masa .....	286
Tabla 62.	Estado de la estructura – Movimiento en Masa .....	286
Tabla 63.	Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa .....	287
Tabla 64.	Categorización de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos de movimientos en masa .....	295
Tabla 65.	Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa .....	300
Tabla 66.	Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono Golondrinas.....	302
Tabla 67.	Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales.....	305

Tabla 68.	Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV .....	306
Tabla 69.	Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales .....	308
Tabla 70.	Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales .....	308
Tabla 71.	Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales .....	309
Tabla 72.	Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales.....	309
Tabla 73.	Registro fotográfico en el Polígono Golondrinas.....	317
Tabla 74.	Registro fotográfico en el Polígono Golondrinas (Continuación).....	318
Tabla 75.	Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total .....	324
Tabla 76.	Categorización del riesgo total .....	324
Tabla 77.	Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	327

## LISTA DE MAPAS

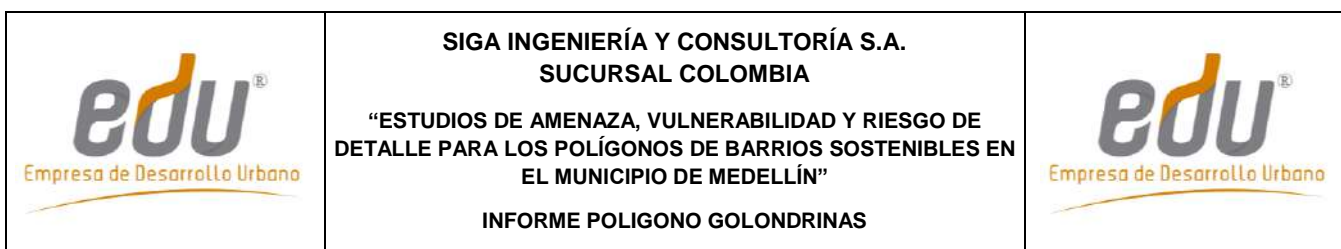
Mapa 1.	Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles .....	6
Mapa 2.	Localización de la UMI asociada al Polígono Golondrinas.....	8
Mapa 3.	Usos generales del suelo rural UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014).....	11
Mapa 4.	Usos generales del suelo urbano UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)..	12
Mapa 5.	Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006) .....	21
Mapa 6.	Geología local de UMI El Faro - Golondrinas .....	26
Mapa 7.	Perfiles estratigráficos de la UMI El Faro - Golondrinas.....	27
Mapa 8.	Perfiles estratigráficos de la UMI El Faro - Golondrinas.....	28
Mapa 9.	Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	44
Mapa 10.	Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	47
Mapa 11.	Análisis de pendientes de la UMI El Faro - Golondrinas .....	49
Mapa 12.	Unidades Geomorfológicas de la UMI El Faro - Golondrinas.....	50
Mapa 13.	Procesos morfodinámicos de UMI El Faro - Golondrinas .....	70
Mapa 14.	Estructuras encontradas en la UMI El Faro - Golondrinas .....	77
Mapa 15.	Criticidad geomorfológica UMI El Faro - Golondrinas .....	97
Mapa 16.	Criticidad de zonas homogéneas UMI El Faro - Golondrinas.....	99
Mapa 17.	Criticidad morfodinámica UMI El Faro - Golondrinas .....	101
Mapa 18.	Aptitud Geológica UMI El Faro - Golondrinas .....	103
Mapa 19.	Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)	105
Mapa 20.	Clasificación del suelo (POT, 2014).....	106
Mapa 21.	Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	124
Mapa 22.	Localización de la exploración directa e indirecta .....	138
Mapa 23.	Información cartográfica empleada en el estudio.....	191
Mapa 24.	Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	194
Mapa 25.	Red hídrica en la UMI El Faro - Golondrinas .....	198
Mapa 26.	Delimitación de las cuencas con influencia sobre el Polígono Golondrinas	199



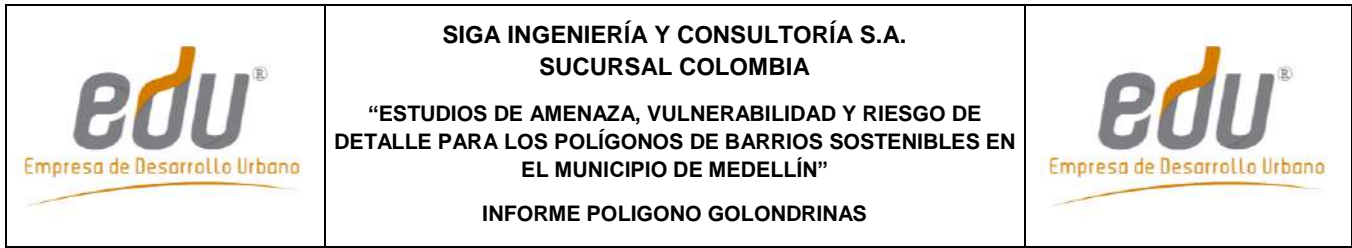
Mapa 27.	Usos del suelo en las cuencas de influencia sobre la UMI El Faro - Golondrinas Modificado del POT (2014).....	201
Mapa 28.	Cuencas consideradas en el método de regionalización .....	211
Mapa 29.	Localización drenajes cercanos al Polígono Golondrinas y mancha de inundación para los diferentes periodos de retorno Quebrada La Loca .....	216
Mapa 30.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales para el Polígono Golondrinas .....	225
Mapa 31.	Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones estáticas .....	239
Mapa 32.	Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudo-estáticas con sismo de 0.25g.....	240
Mapa 33.	Análisis de probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones actuales y naturales.....	241
Mapa 34.	Análisis de probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años .....	242
Mapa 35.	Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g.....	243
Mapa 36.	Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g .....	244
Mapa 37.	Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en la Quebrada La Loca en el Polígono Golondrinas.....	252
Mapa 38.	Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3) .....	260
Mapa 39.	Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3) .....	261
Mapa 40.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales.Condiciones actuales en el Polígono Golondrinas .....	262
Mapa 41.	Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018) .....	276
Mapa 42.	Localización vías de acceso y equipamiento en el Polígono Golondrinas .	284
Mapa 43.	Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas.....	288

Mapa 44.	Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas .....	289
Mapa 45.	Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas .....	290
Mapa 46.	Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas.....	291
Mapa 47.	Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas .....	292
Mapa 48.	Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa .....	293
Mapa 49.	Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Golondrinas.....	296
Mapa 50.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	297
Mapa 51.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono Golondrinas.....	298
Mapa 52.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	301
Mapa 53.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Golondrinas ..... por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles .....	303
Mapa 54.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Golondrinas por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	304
Mapa 55.	Localización espacial del tipo de estructura para inundaciones en el Polígono Golondrinas.....	310
Mapa 56.	Localización espacial del estado de la estructura para inundaciones en el Polígono Golondrinas.....	311
Mapa 57.	Localización espacial de la altura de las estructura para inundaciones en el Polígono Golondrinas.....	312
Mapa 58.	Localización espacial de la densidad de población para inundaciones en el Polígono Golondrinas.....	313
Mapa 59.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones y avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas.....	314

Mapa 60.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Golondrinas con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	315
Mapa 61.	Análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales en el Polígono Golondrinas para las Vías de Acceso y Equipamientos.....	316
Mapa 62.	Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	321
Mapa 63.	Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	322
Mapa 64.	Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas.....	323
Mapa 65.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones actuales.....	326
Mapa 66.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas para viviendas y construcciones.....	329
Mapa 67.	Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas para las vías de acceso y equipamientos.....	330
Mapa 68.	Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas para las vías de acceso y equipamientos.....	331
Mapa 69.	Cámaras de inspección sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g. ....	333
Mapa 70.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales.Condiciones actuales.....	335
Mapa 71.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones proyectadas considerando implementación de medidas de contención y mitigación.....	350
Mapa 72.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas. Polígono Golondrinas.....	354
Mapa 73.	Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en la Quebrada La Loca. Polígono Golondrinas.....	355
Mapa 74.	Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas.....	356
Mapa 75.	Mancha de avenidas torrenciales en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3).....	357



Mapa 76.	Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3) .....	358
Mapa 77.	Análisis de riesgo por torrencialidad para las condiciones proyectadas.....	359
Mapa 78.	Retiro POT y retiro hidrológico por avenidas torrenciales para las Quebrada La Loca .....	360

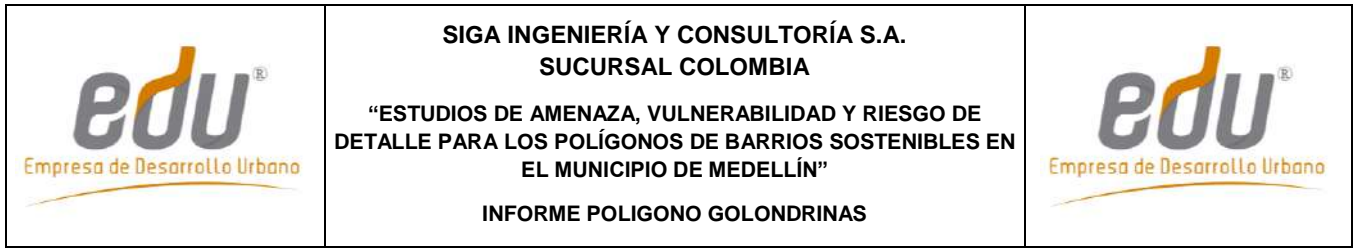


## LISTA DE MAPAS DEL ATLAS

- 01\_GOLLocalizacionGeneral\_Medellin\_T
- 02\_GOLLocalizacionUMI\_Medellin\_T
- 03\_GOLGeologiaRegional\_Medellin\_T
- 04\_GOLGeologiaLocalUMI\_Medellin\_T
- 05\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_T
- 06\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_T
- 07\_GOLMacroUnidadesGeomorfologicas\_Medellin\_T
- 08\_GOLUnidadesGeomorfologicas\_Medellin\_T
- 09\_GOLPendientes\_Medellin\_T
- 10\_GOLGeomorfologiaLocal\_Medellin\_T
- 11\_GOLProcesosMorfodinamicos\_Medellin\_T
- 12\_GOLGeologiaEstructural\_Medellin\_T
- 13\_GOLExploracion\_Medellin\_T
- 14\_GOLClasificaciondelSuelo\_Medellin\_T
- 15\_GOLCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano\_Medellin\_T
- 16\_GOLUsosdelSueloUrbano\_Medellin\_T
- 17\_GOLUsosdelSueloRural\_Medellin\_T
- 18\_GOLAptitudGeologicaGeotecnica\_Medellin\_T
- 19\_GOLAmenazaMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 20\_GOLRedHidricaUMI\_Medellin\_T
- 21\_GOLManchaInundaciones\_Medellin\_T
- 22\_GOLManchaInundacionesCondProyecto\_Medellin\_T
- 23\_GOLManchaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T
- 24\_GOLManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T
- 25\_GOLAmenazaInundaciones\_Medellin\_T
- 26\_GOLAmenazaInundacionesCondProyecto\_Medellin\_T

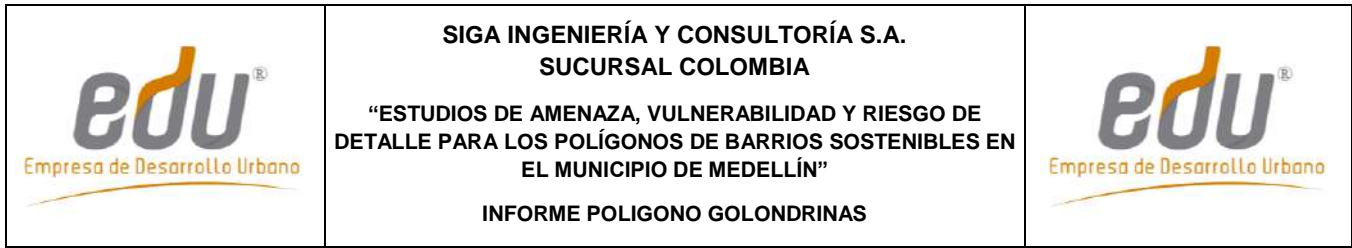
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A.</b>  <b>SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE  DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN  EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
--	--	--

- 27\_GOLAmenazaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T
- 28\_GOLAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T
- 29\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_T
- 30\_GOLDesplantedeFundaciones\_Medellin\_T
- 31\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_T
- 32\_GOLTipodeCubierta\_Medellin\_T
- 33\_GOLAlturadelaConstrucción\_Medellin\_T
- 34\_GOLMapadeResistencia\_Medellin\_T
- 35\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_T
- 36\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_T
- 37\_GOLAlturadelaConstrucción\_Medellin\_T
- 38\_GOLDensidaddePoblacion\_Medellin\_T
- 39\_GOLViasdeAccesosyEquipamientos\_Medellin\_T
- 40\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 41\_GOLVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 42\_GOLVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T
- 43\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 44\_GOLRiesgoPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 45\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasa\_Medellin\_T
- 46\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto\_Medellin\_T
- 47\_GOLRiesgoInundaciones\_Medellin\_T
- 48\_GOLRiesgoInundacionesCondProyecto\_Medellin\_T
- 49\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T
- 50\_GOLRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T
- 51\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_T
- 52\_GOLVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos\_Medellin\_T
- 53\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_T
- 54\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_ViasEquipamientos\_Medellin\_T



## LISTA DE PLANOS

P-2445-G-OM-01	Pantalla de pilas
P-2445-G-OM-02	Refuerzo Detalles



## LISTA DE ANEXOS

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



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



## 1. INTRODUCCIÓN

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

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

Es importante aclarar que esta Versión 7 del estudio atiende todas las observaciones que finalmente se acordaron con La Interventoría y La EDU que se harían a las versiones iniciales entregadas en mayo de 2016. Se tienen en cuenta observaciones de entidades tales como Planeación Municipal, Secretaría del Medio Ambiente y el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo (DAGR). Si se consultan versiones anteriores, se podrá verificar que existen diferencias en los resultados, algunas mayores y otras menores. Todo esto obedece al hecho de que la ejecución de varias versiones del estudio de todos los polígonos que hacen parte del Proyecto Barrio Sostenibles, ha permitido una depuración y perfeccionamiento de la metodología. Los resultados que finalmente deben tenerse en cuenta son los de esta Versión 7 del informe, de tal manera que los de otras versiones no son válidos ni comparables con los acá presentados. Si se revisan en conjunto las entregas finales de los ocho polígonos estudiados, se puede ver incluso que hay una total coherencia en las metodologías de uno y otro sitio de estudio y que se han solucionado problemas de versiones anteriores tales como la excesiva importancia que sobre los mapas finales de riesgo de algunos polígonos tenían variables tales como la vulnerabilidad. Es importante aclarar en este punto que pese a las modificaciones efectuadas en esta Versión 7 del estudio del Polígono Golondrinas, las obras de mitigación recomendadas en las versiones anteriores siguen siendo las necesarias para atender el nivel de riesgo obtenido.



La metodología empleada para el estudio es la presentada de forma detallada en el Informe I-2445-01-Rev7, entregado como parte de este mismo contrato a la Empresa de Desarrollo Urbano. En dicho informe se presentan los pasos generales y específicos que se siguen para la evaluación tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad y el riesgo en la zona del Proyecto Barrios Sostenibles. La idea principal sobre la que se desarrolla la metodología es la implementación de teorías básicas de equilibrio límite, flujo de agua y flujo de detritos y la probabilidad de ocurrencia de los mismos, que permitan determinar

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

condiciones críticas de factor de seguridad, velocidades de flujo y niveles de agua y establecer con estas las condiciones de amenaza regional y local de la zona de estudio. Las condiciones de amenaza por los diferentes eventos antes descritos, se analizan a la luz de la información de la infraestructura física presente en cada uno de los polígonos, determinándose para tal fin la vulnerabilidad física de las estructuras a través de la identificación de algunos aspectos específicos de la misma como son el tipo de estructura y sus materiales, el estado o mantenimiento y el nivel de fundación. Finalmente, los análisis de amenaza y vulnerabilidad por los diferentes escenarios, permiten obtener las zonas de riesgo y determinar si el mismo puede ser mitigable o no mitigable.

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

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



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

Los estudios de vulnerabilidad se concentran en el análisis de la vulnerabilidad física, por medio de la cual se determinaron las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas, considerando factores como tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras.



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

Los resultados del estudio se presentan en los 23 capítulos de este informe, distribuidos de la siguiente manera:

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

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

- ✓ El análisis de vulnerabilidad de los elementos físicos expuestos a los tres fenómenos en estudio (movimiento en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) es presentado en el Capítulo 16. Este capítulo es de suma importancia no sólo por cuanto muestra en el Numeral 16.2 lo concerniente a vulnerabilidad por movimientos en masa, sino porque también en este capítulo, en el Numeral 16.2.2, se muestran resultados de aplicación de la metodología al Deslizamiento Villatina como la manera más contundente de validación de la metodología.
- ✓ Luego de tenerse los resultados de la amenaza y la vulnerabilidad por movimiento en masa, éstos son procesados y en el Capítulo 17 se presenta el resultado para el riesgo por dicho evento para la zona de estudio. Por su parte, el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales se presenta en el Capítulo 18.
- ✓ En el Capítulo 19 se incluyen los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa, por inundaciones y por avenidas torrenciales para las líneas vitales asociadas a redes de servicio público. La amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo ante los tres fenómenos estudiados para las demás líneas vitales, como las vías y los equipamientos son analizados al interior de cada uno de los capítulos donde se expone cada fenómeno, es decir, en los Capítulos 13, 14 y 15 para la amenaza, en el Capítulo 16 para la vulnerabilidad y en los Capítulos 17 y 18 para el riesgo.
- ✓ Los Capítulos 20 y 21 comprenden los diseños de obras de mitigación ante los diferentes fenómenos, así como las conclusiones y recomendaciones para el polígono de estudio.
- ✓ Finalmente, los Capítulos 22 y 23 contienen las referencias bibliográficas y las limitaciones del estudio.

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

## **2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se localiza en la parte alta de la ladera centro oriental, entre los límites rurales y urbanos de la ciudad de Medellín. Los polígonos correspondientes al “Proyecto Barrios Sostenibles”, se encuentran ubicados en su mayoría en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique).

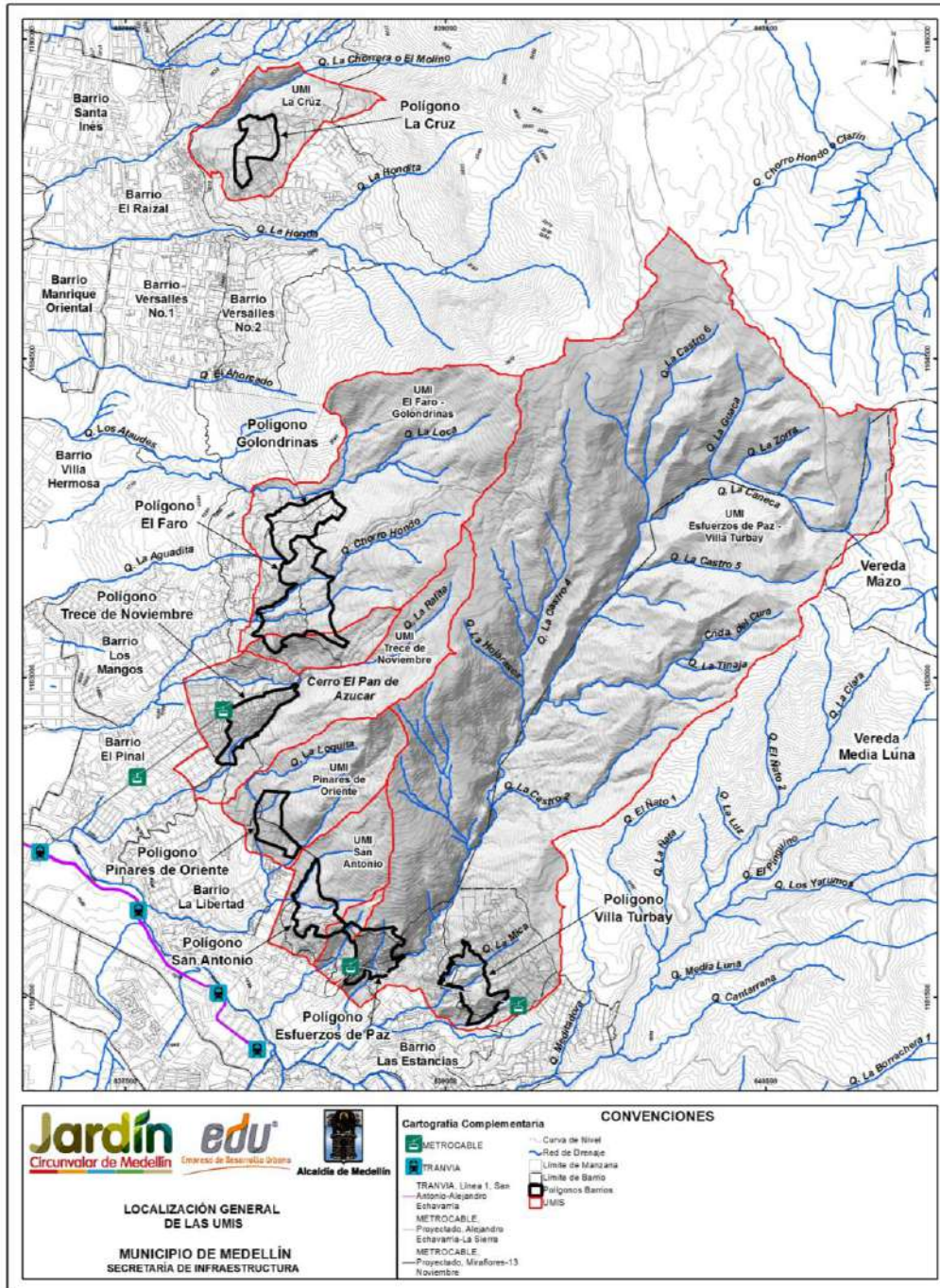
Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los correspondientes a los Barrios Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. El polígono localizado al interior de la Comuna 3 corresponde al Barrio La Cruz.

En el Mapa 1 se presenta la localización general de todas las UMI definidas para cada uno de los polígonos de estudio.



El Polígono Golondrinas se encuentra ubicado en el Barrio Llanaditas y sus sectores El Faro, Golondrinas, Altos de La Torre y El Pacífico, además de una parte de la zona rural del Corregimiento Santa Elena en las Veredas Piedras Blancas – Matasano, Media Luna y una pequeña porción de Mazo, teniendo a su vez ocupación en sectores de las cuencas de las Quebradas La Castro, Chorro Hondo, La Aguadita, La Loca, El Ahorcado y una pequeña fracción de la del Ñato.

El Sector Golondrinas se ubica en la zona norte del Cerro Pan de Azúcar, en límites con los predios del Batallón de Girardot y pertenece al Barrio Llanaditas. El polígono Golondrinas, el cual tiene un área aproximada de 5.27 hectáreas, limita con la Comuna 3 en la ladera oriental de la ciudad.





**Mapa 1. Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles (01\_GOLLocalizacionGeneral\_Medellin\_C y 01\_GOLLocalizacionGeneral\_Medellin\_T)**

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

### **3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)**

#### **3.1 GENERALIDADES**

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

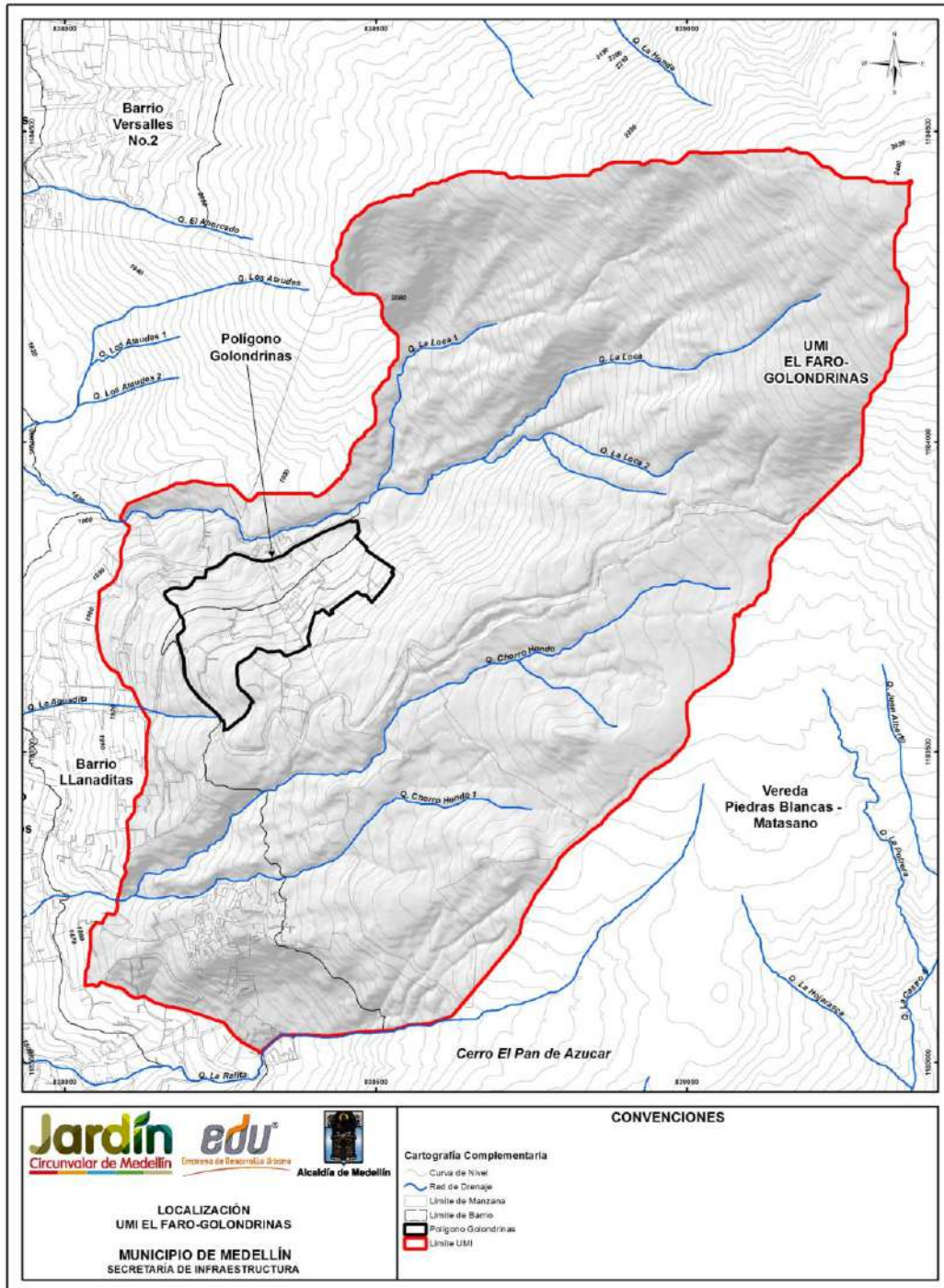
Se trata de un concepto de obligatorio cumplimiento para estudios de nuevos proyectos en las zonas de ladera Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es tratado de forma detallada en el Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012).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

De acuerdo con lo anterior, se procedió a delimitar la UMI de los polígonos de estudio en las Comunas 3 y 8 que hacen parte del Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente la del Barrio Golondrinas la cual es objeto de este informe. Siguiendo los lineamientos del Código de Laderas del Valle de Aburrá, se consideraron aspectos de tipo geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico. De forma resumida, puede decirse que se incluyó el área en la que cualquier proceso de inestabilidad, potencial o existente, pudiera afectar las estructuras existentes y programadas, bien fuera porque las impactara directamente o porque a través de las corrientes de agua pudiera llegar hasta la zona del proyecto.

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



En el Mapa 2 se presenta la UMI asociada a los Polígonos Golondrinas y El Faro. La inclusión de estos dos Polígonos dentro de la misma UMI resulta como consecuencia de su proximidad; la selección de la UMI independiente para cada polígono generó que ambas UMI presentaran una intercepción mayor al 80% en su área de influencia, es decir más de la mitad del área de una UMI consideraba el área de la UMI vecina, por lo tanto existirían procesos en común para ambas UMI. Por lo anterior, para efectos de optimizar los trabajos de análisis, ambas UMI se unificaron. Finalmente la UMI asociada a los Polígonos El Faro y Golondrinas tiene un área aproximada de 158 hectáreas aproximadamente.





**Mapa 2. Localización de la UMI asociada al Polígono Golondrinas (02\_GOLLocalizaciónUMI\_Medellin\_C y 02\_GOLLocalizaciónUMI\_Medellin\_T)**



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

En el numeral siguiente, se hace referencia a la UMI correspondiente a los polígonos ubicados dentro de los Barrios El Faro y Golondrinas, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI El Faro - Golondrinas o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono Golondrinas, correspondiente al polígono en estudio dentro del barrio con este mismo nombre.



### **3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN**

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

De forma general, la UMI se localiza en el centro de la Comuna 8 y se posiciona en el extremo norte del Proyecto Barrios Sostenibles, limitando al sur con la UMI del Polígono Trece de Noviembre, al oriente con la UMI Esfuerzos de Paz y Villa Turbay y hacia la zona occidental con el Barrio Llanaditas. Desde el punto de vista específico de sus límites, la UMI se encuentra acotada principalmente en sus flancos sur, norte y oriente por la presencia física de algunas divisorias de aguas. Se resalta que los límites escogidos se manifiestan estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales del Polígono Golondrinas específicamente.

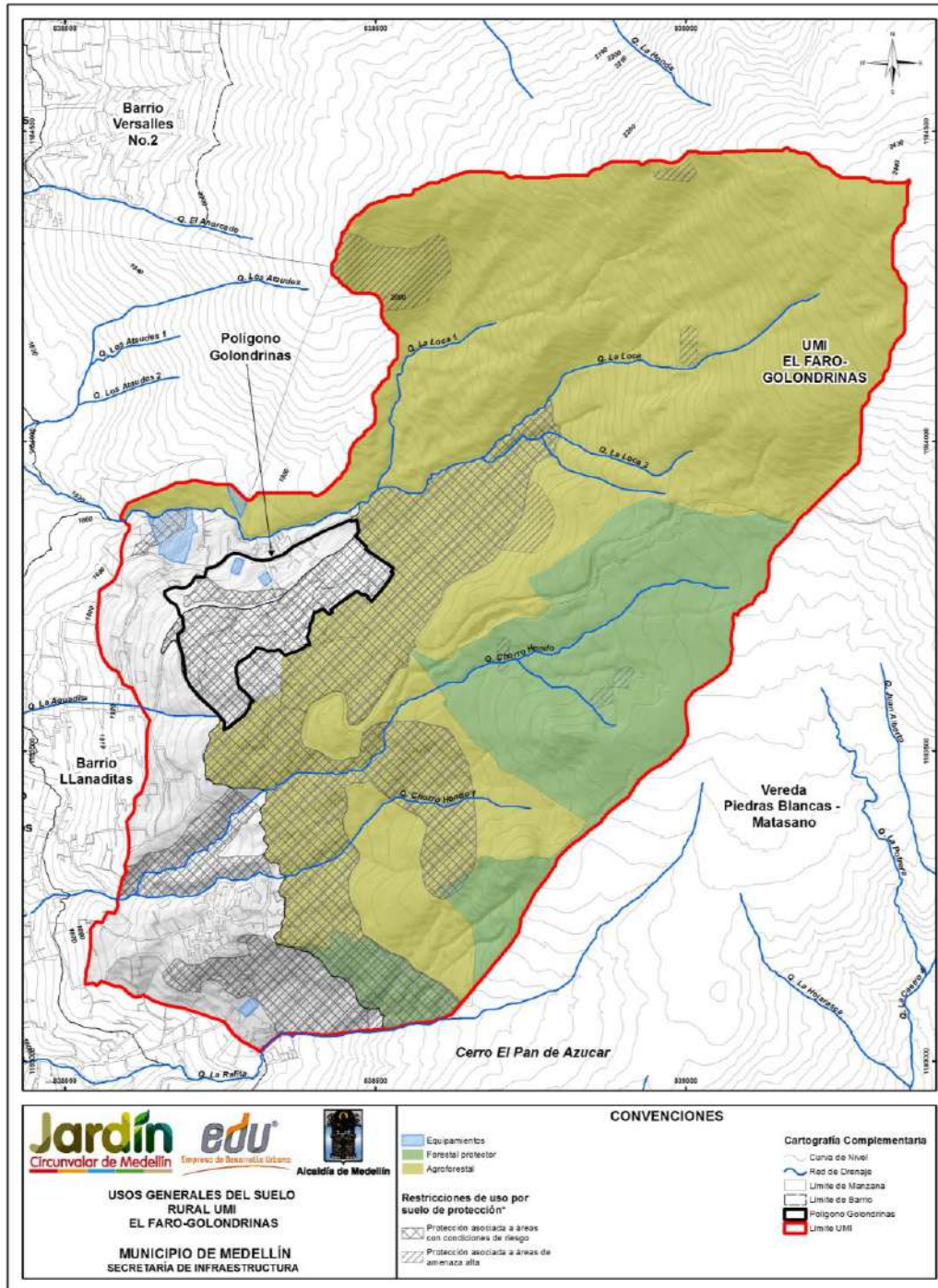
Al sur de la UMI, esta se encuentra limitada en gran parte por la divisoria de aguas de la margen derecha de la Quebrada La Rafita, ya que parte del Polígono El Faro se encuentra inmerso en la zona de afectación de la UMI Trece de Noviembre. Este límite desciende desde la parte alta rural (Mapa 3) por dicha divisoria, pero en el extremo más sur, entrando a la zona urbana (Mapa 4) de la ladera, el límite se convierte en parte del cauce de la Quebrada La Rafita. Esta inclusión es fundamental ya que dentro de la UMI deben contenerse algunos procesos existentes sobre el cauce y la margen derecha de la Quebrada La Rafita, que se comparten con el sector del Trece de Noviembre, y que podrían afectar principalmente el extremo sur del Polígono El Faro por efectos de desconfinamiento de la ladera. Este límite no consideró parte de la margen izquierda de la Quebrada La Rafita ya que esta no presenta una dinámica hidráulica importante por no presentar un caudal constante, además los procesos existentes en dicha margen no son relevantes para la estabilidad de la UMI en este sector, por lo que se consideró suficiente apenas considerar el límite izquierdo del cauce. Además de enmarcar la totalidad de los procesos que podrían afectar el Polígono de El Faro, el límite sur de la UMI incluye todas las áreas de drenaje de las Quebradas Chorro Hondo, Chorro Hondo 1 y los afluentes superiores de la Quebrada La Loca, áreas fundamentales para los análisis por inundaciones de estos drenajes sobre el Polígono El Faro.

El límite norte, por su parte, considera principalmente la divisoria de aguas de la Quebrada La Loca. Este límite de la UMI desciende desde la parte alta de la zona rural involucrando toda la zona de cuenca de la Quebrada La Loca y sus respectivos afluentes.

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

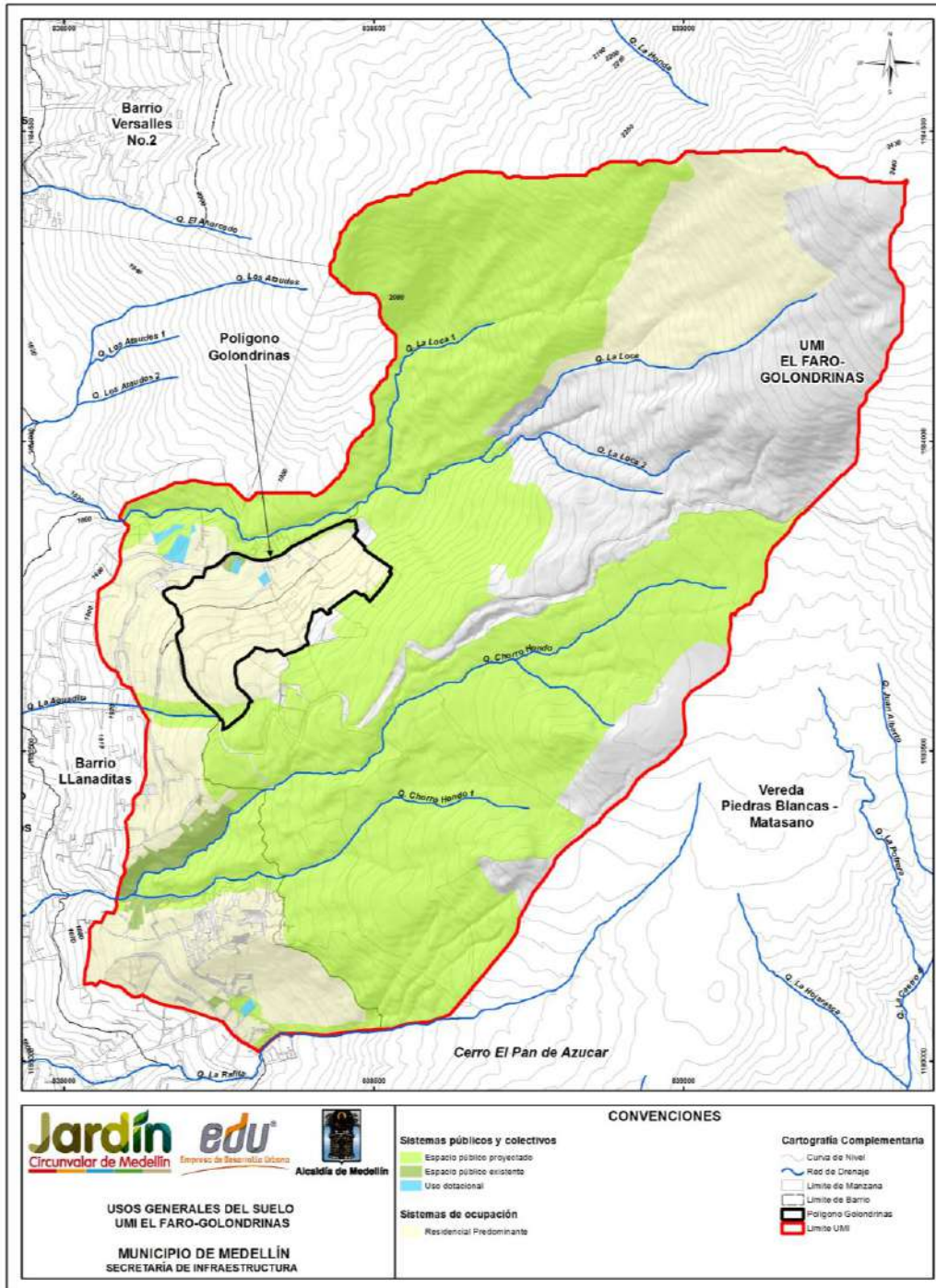
Dentro de este límite se involucran en la parte alta, todos aquellos procesos morfodinámicos generados en las márgenes de los afluentes La Loca, La Loca 1 y La Loca 2, los cuales podrían afectar principalmente al Polígono Golondrinas por efectos de inundaciones y avenidas torrenciales, teniéndose evidencia concreta de estos procesos en las partes bajas de la UMI, muy cerca del Polígono Golondrinas. Hacia la zona urbana, este límite adiciona parte de la margen derecha del cauce de La Loca, que aunque no es trascendental como una zona que pueda amenazar al Polígono Golondrinas, si es importante para efectos de las modelaciones proyectadas para los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales y se requiere de la caracterización del mismo por considerarse un cauce con caudal base y una dinámica hidráulica importante.

Finalmente, el límite inferior estuvo enmarcado por atravesar la zona urbana del sector, determinado principalmente por las vías principales del sector de Llanaditas correspondientes a la Carrera 18B, Carrera 18C y la Carrera 17A. No obstante, se debe recalcar que parte de estos límites cruzan por senderos peatonales consecuencia del urbanismo desordenado del sector. Estos límites enmarcaron principalmente la zona de los procesos morfodinámicos que por efectos de desconfinamiento pudieran afectar directamente los límites del Polígono Golondrinas. La escogencia además de este límite inferior se hizo tratando de tomar las zonas de mayor consolidación urbana y las zonas de mayor estabilidad de tal forma que los mismos límites garantizaran su propia característica de estabilidad.



Mapa 3. Usos generales del suelo rural UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)  
(17\_GOLUsosdelSueloRural\_Medellin\_C y 17\_GOLUsosdelSueloRural\_Medellin\_T).

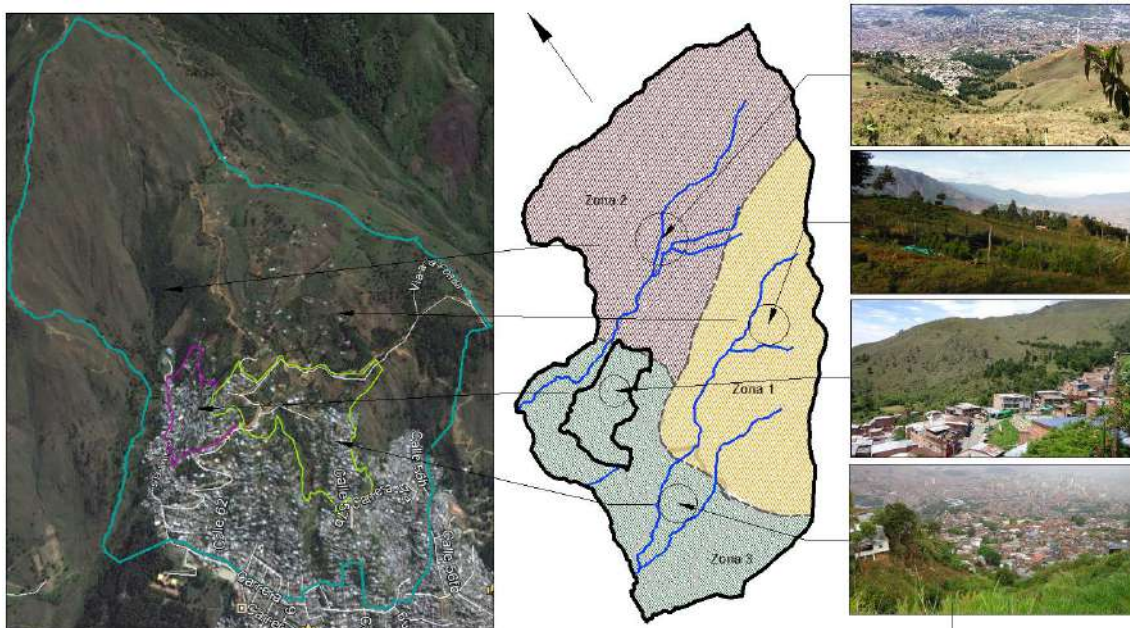




Mapa 4. Usos generales del suelo urbano UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)  
(16\_GOLUsosdelSueloUrbano\_Medellin\_C y 16\_GOLUsosdelSueloUrbano\_Medellin\_T)

La Figura 1 muestra la UMI El Faro – Golondrinas, dividiéndose en las Zonas 1, 2 y 3, delimitadas de acuerdo con sus pendientes, usos del suelo y condiciones de actividad morfodinámica.

La Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrinas se ubica sobre el flanco sur del mismo, limitando con la UMI Trece de Noviembre. Esta zona se caracteriza por pertenecer a la zona rural donde los usos del suelo están enfocados más a la parte agrícola y turística con la presencia de los senderos de Cinturón Verde y Ruta de Campeones. No se presentan grandes asentamientos humanos y sólo se ubican algunas viviendas y parcelaciones campesinas. Las pendientes que se presentan en esta zona varían principalmente entre laderas de pendientes bajas a altas, con inclinaciones que van entre los 5° hasta los 30°. La actividad morfodinámica en este sector es baja a media y la ubicación de la gran mayoría de estos procesos se encuentra en las márgenes de los cauces de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Otros procesos se encuentran muy relacionados con la actividad antrópica del sector y los usos del suelo que se le dan a esta zona. Las evidencias en campo permitieron constatar la presencia de redes artesanales de acueductos y las descargas no controladas de alcantarillado, así como también sistemas de riego no tecnificados. Actualmente, se viene trabajando en la instalación de dichos servicios públicos, de tal forma que a futuro esta problemática podrá ser mitigada de forma definitiva. En la Figura 2 y en la Figura 3 se presentan algunas imágenes sobre la panorámica general de la Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrinas y en la Figura 4 se muestran algunos hallazgos de redes antrópicas instaladas por la comunidad.



**Figura 1. Zonificación de la UMI El Faro - Golondrina resaltando el Polígono Golondrinas (Sin Escala)**





**Figura 2. Parte superior de la Zona 1 UMI El Faro - Golondrina**





**Figura 3. Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrina limitando con la UMI Trece de Noviembre y parte baja de la Zona 1 de la UMI El Faro – Golondrina**

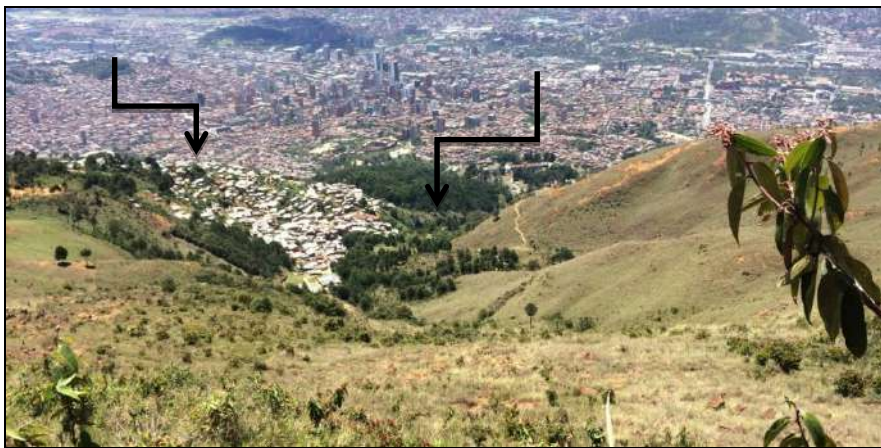


**Figura 4. Redes antrópicas de servicios instaladas por la comunidad encontradas en el Polígono Golondrinas**



La Zona 2 se ubica sobre el flanco norte y oriental de la UMI y corresponde principalmente a la geoforma de la cuenca de la Quebrada La Loca quien afecta directamente al Polígono

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

Golondrinas. Esta zona se caracteriza por pertenecer a la zona rural donde los usos del suelo están encaminados a usos de interés estratégico al presentarse como cuencas destinadas para el abastecimiento de acueductos o cuencas hidrográficas de orden cero. Adicionalmente, desde el punto de vista de la vegetación, es un área totalmente desprovista de la misma y sólo se tienen áreas con cobertura vegetal. Las pendientes que se presentan en esta zona son mayores que 30°, correspondiente a laderas de pendientes altas y escarpadas, por esta razón, en esta zona no se identifica ningún tipo de asentamiento urbano. La Zona 2 es la que presenta mayores indicios de actividad morfodinámica, con todo tipo de procesos que van desde coronas de deslizamientos antiguos, cicatrices de deslizamientos activos y procesos erosivos superficiales. Todos estos procesos se encuentran direccionados hacia el drenaje de la Quebrada la Loca, la cual en su lecho ha mostrado la presencia de depósitos de origen torrencial. La importancia de la prolongación de la UMI hasta la Zona 2, involucrando la cuenca de la Quebrada La Loca, está en la necesidad de analizar fenómenos de inestabilidad en la cuenca que podrían desencadenar torrencialidades sobre la Quebrada La Loca. En la Figura 5 y en la Figura 6 se presenta una vista panorámica de las condiciones actuales de la zona 2 de la UMI Faro Golondrinas.



**Figura 5. Vista de la parte baja de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas**

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



**Figura 6. Vista de la parte alta de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas**

La Zona 3 finalmente corresponde a la parte baja de la UMI y estará directamente influenciado por lo que ocurra en las Zonas 1 y 2. Esta zona abarca los Polígonos El Faro y Golondrinas y desde el punto de vista del uso de suelo esta zona comparte el límite entre lo urbano y lo rural, no obstante el crecimiento urbanístico del sector ha llevado a que casi la totalidad del área se encuentre urbanizada, incluyendo las zonas cercanas a los drenajes. En lo que respecta al Polígono Golondrinas, su área se encuentra catalogada como un área forestal con condiciones de riesgo. Las pendientes que se presentan son variables, entre 15° y mayores a 30° que corresponden a laderas de pendiente moderada a muy alta. Presenta una actividad morfodinámica media a alta consecuencia de la pendiente y de las malas prácticas de urbanismo. Los principales procesos se encuentran en las zonas de las márgenes de las Quebradas Chorro Hondo 1 y Chorro Hondo 2 y la Quebrada La Loca. En el caso específico del Polígono Golondrinas, se concentran cicatrices de procesos morfodinámicos localizados principalmente hacia ambas márgenes de la Quebrada La Loca. Adicionalmente, se destaca la presencia de algunas cicatrices de deslizamientos sobre el extremo oriental superior de la UMI. En la Zona 3 la UMI comparte una parte de la UMI Trece de Noviembre, específicamente parte de la margen derecha de la Quebrada La Rafita como consecuencia de que parte del Polígono El Faro se encuentra afectado por la actividad de dicha margen. En la Figura 7, Figura 8 y en la Figura 9 se presenta un panorama general de las condiciones actuales de la Zona 3 de la UMI El Faro - Golondrinas, especialmente algunos procesos e intervenciones antrópicas evidenciadas al interior del Polígono Golondrinas.





**Figura 7. Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono Golondrinas**



**Figura 8. Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono Golondrinas  
(Segunda Parte)**



**Figura 9. Panorama del urbanismo del Polígono Golondrinas, márgenes de la Quebrada La Loca**

Desde los puntos de vista hidrológico e hidráulico, la UMI es atravesada por los drenajes de la Quebrada La Loca y sus afluentes Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 en sentido oriente occidente, los cuales fluyen sobre cauces naturales. La Quebrada La Loca, en especial, es el único drenaje que afecta directamente al Polígono Golondrinas, principalmente ante la amenaza de inundaciones y avenidas torrenciales producto de los procesos morfodinámicos que se generan en la Zona 2 y que son canalizados por los Afluentes La Loca 1 y La Loca 2. La Figura 11 presenta las condiciones del drenaje de la Quebrada La Loca donde se observa la presencia de fragmentos de roca que muestra la torrencialidad de este drenaje.





**Figura 10. Condiciones actuales del Drenaje La Loca**



**Figura 11. Condiciones actuales del Drenaje La Loca (Continuación)**

En la Zona 3 también es posible evidenciar la presencia de un tramo del Drenaje La Aguadita, correspondiente a su punto de nacimiento. No obstante, este drenaje no será considerado en este proyecto al no representar ningún tipo de amenaza para los polígonos de la UMI El Faro - Golondrinas.



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

## **4. ASPECTOS GEOLÓGICOS**

### **4.1 GEOLOGÍA REGIONAL**

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

La UMI El Faro-Golondrinas se ubica sobre las unidades geológicas denominadas como Dunitas de Medellín (JKuM), depósitos de flujos de lodos y/o escombros (QFIII, NQFII), depósito de deslizamiento (Qd) y llenos antrópicos (QII). A continuación, se describen en orden cronológico todas las unidades geológicas donde se ubican los polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, desde las más recientes hasta las más antiguas.



#### **4.1.1 Llenos antrópicos (QII)**

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

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

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



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

#### **4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)**

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

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

#### **4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)**

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

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

#### **4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)**

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



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

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

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

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



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

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

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

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

#### **4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)**



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

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

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

#### **4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)**

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

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

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

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

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



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

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

## **4.2 GEOLOGÍA LOCAL**

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

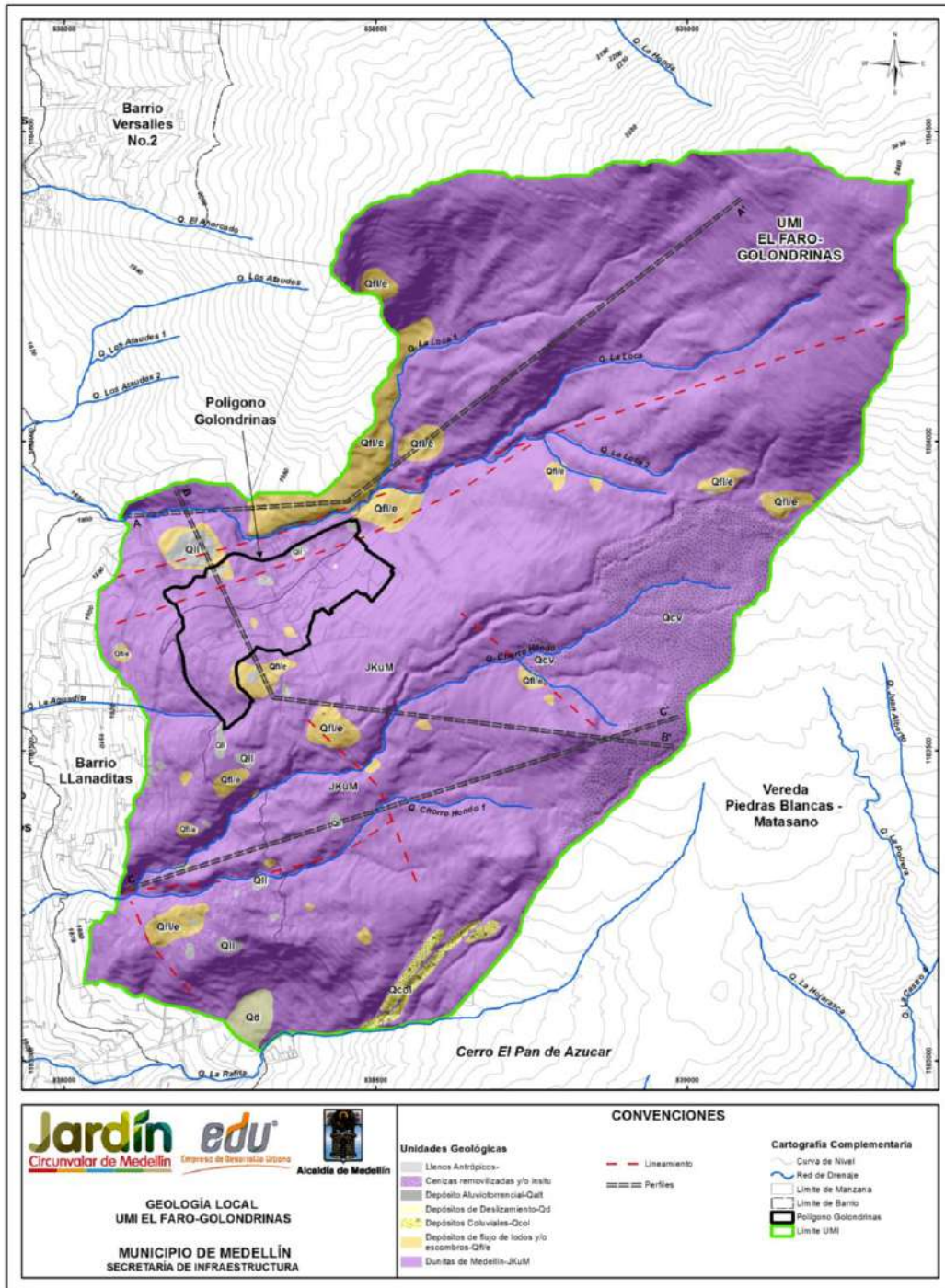


	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

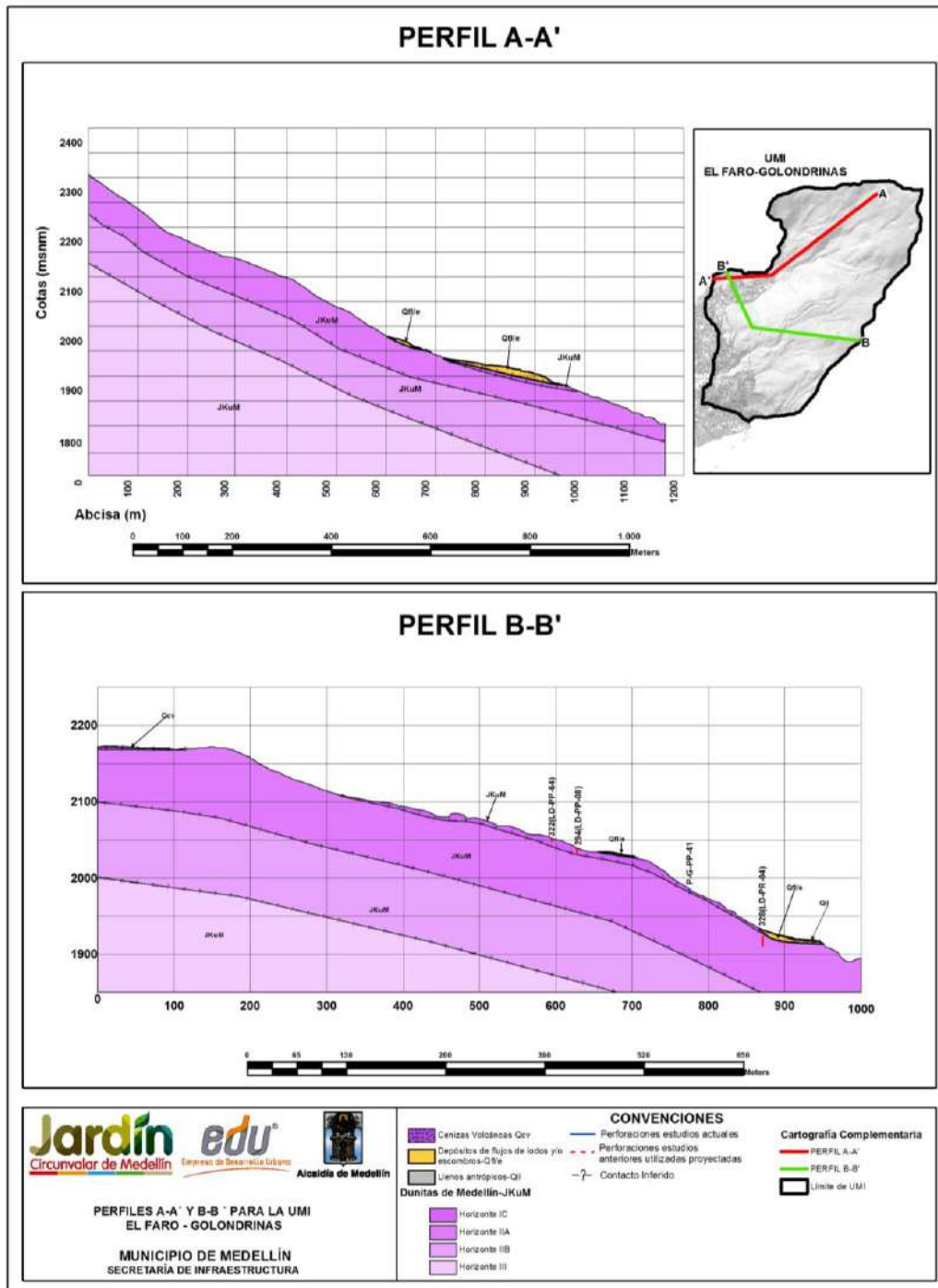
Después de correlacionar dichas perforaciones con la exploración directa e indirecta ejecutada para el presente estudio, de realizar los recorridos de campo y de utilizar herramientas como análisis multitemporal y geomorfológico, se obtuvo como resultado el modelo geológico de la UMI El Faro - Golondrinas mostrado en el Mapa 6. Por su parte, en el Mapa 7 y en el Mapa 8 se presentan los perfiles estratigráficos típicos.

Las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

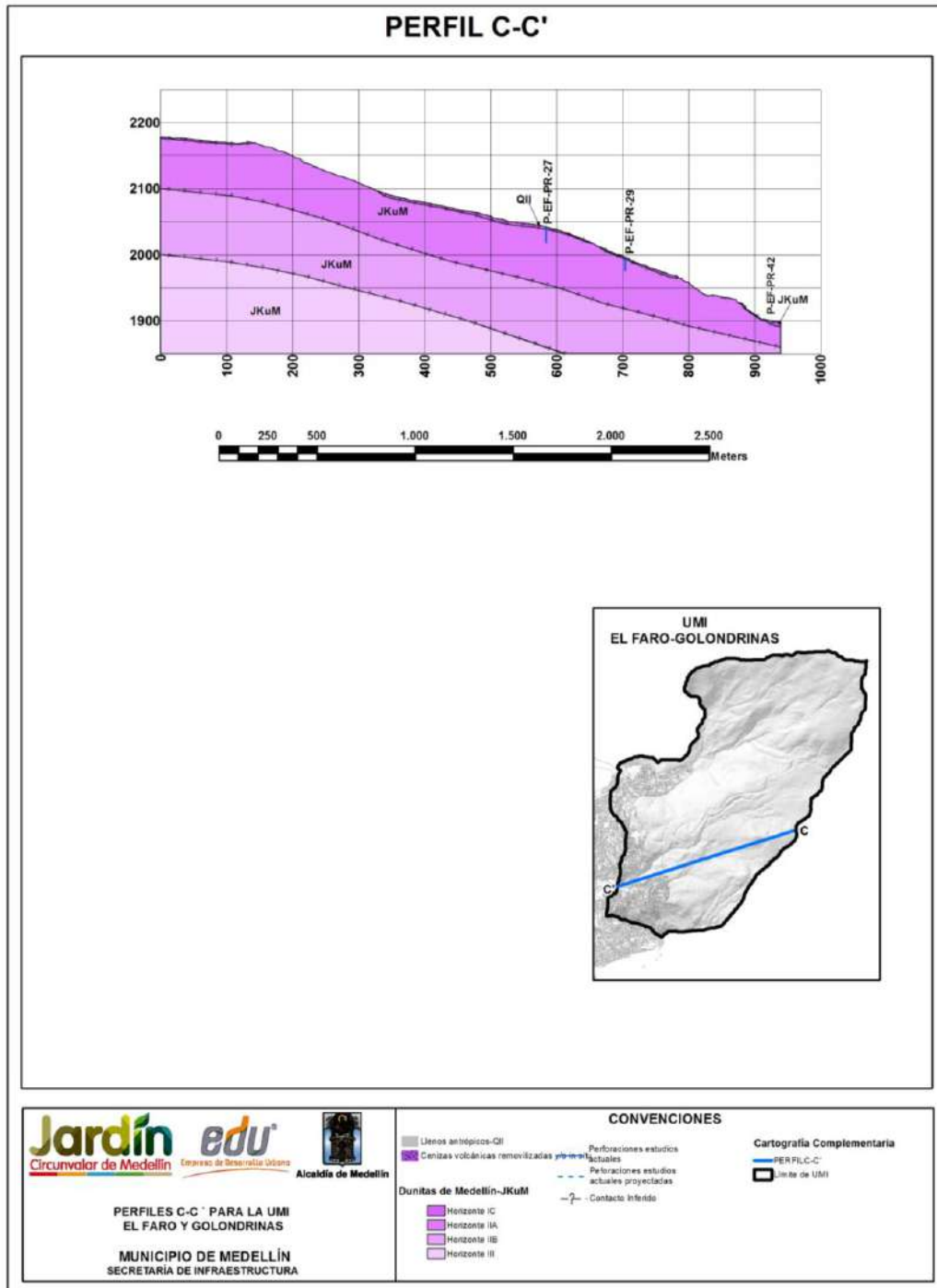
En el Polígono Golondrinas se presentan los Horizontes IC y IIA del perfil de meteorización de las Dunitas de Medellín, el Horizonte IC hacía el extremo sur, y el Horizonte IIA en el extremo noreste. Suprayaciendo las unidades anteriores se encuentran depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) en el centro del polígono y llenos antrópicos (Qll) en la parte norte.



**Mapa 6. Geología local de UMI El Faro - Golondrinas**  
(04\_GOLGeologiaLocalUMI\_Medellin\_C y 04\_GOLGeologiaLocalUMI\_Medellin\_T)



Mapa 7. Perfiles estratigráficos de la UMI El Faro - Golondrinas  
(05\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_C y 05\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_T)



Mapa 8. Perfiles estratigráficos de la UMI El Faro - Golondrinas  
(06\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_C y 06\_GOLPerfilesGeologicos\_Medellin\_T)



A continuación, se hace una breve descripción de cada una de estas unidades encontradas en la UMI El Faro-Golondrinas, desde la más reciente hasta la más antigua.

#### **4.2.1 Llenos antrópicos (QII)**

En la UMI El Faro - Golondrinas se encuentran cuerpos que en superficie abarcan longitudes entre 5 m y 30 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.5 m y 3.0 m, los cuales se concentran hacia la parte baja de la UMI. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-G-PR-33, 327 (LD-PR-03), 328 (LD-PR-04), 331 (LD-PR-07), suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizaron algunas líneas geofísicas como apoyo para determinar algunos cuerpos y las Estaciones de Campo MAD11-G, AMD02-G, GPL33-U-EFG, GPL08-U-EF, GPL10-U-EFG, GPL11-U-EFG, GPL06-U-EFG, GPL22-U-EFG.

Se encuentran cuerpos pequeños principalmente hacia la parte occidental de la UMI y la parte norte del polígono, la mayoría como resultado de la construcción de viviendas, con diferente geometría y profundidad (Figura 12).



**Figura 12. Lleno antrópico en el Polígono Golondrinas**

El lleno antrópico encontrado en la Perforación P-EF-PR-3 con otros cuerpos pequeños como los hallados en las Perforaciones 326(LD-PR-02), 294(LD-PP-08), presenta un espesor de 1.8 m, está compuesto por material limoso de color café naranja con zonas café grisáceas y negras, con fragmentos de dunitas de forma angular y tamaños de hasta 0,025 m, moderadamente meteorizados.

El lleno antrópico encontrado en la Perforación P-G-PR-33 se encuentra hacia el extremo noreste del polígono. Presenta aproximadamente 1 m de espesor, compuesto por material limoso de color café naranja con zonas café grisáceas y negras, con fragmentos de dunitas con forma angular y tamaños de hasta 0,025 m, moderadamente meteorizados (Figura 13).



**Figura 13. Lleno antrópico en la Perforación P-G-PR-33**

Hacia la parte inferior de la UMI se encuentran llenos antrópicos identificados en las Estaciones de Campo GPL35-U-EFG, GPL36-U-EFG, GPL37-U-EFG y GPL39-U-EFG, asociados a las viviendas de la zona, y en la Perforación 331 (LD-PR-07) con 1.4 m de espesor, formado por material limo arcilloso de color café rojizo.



#### **4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ**

Las cenizas volcánicas se encuentran como capas discontinuas, por lo general in situ, aunque también se hallan removilizadas. En la UMI El Faro - Golondrinas están localizadas en la unidad geomorfológica denominada como Peldaño Alto, identificadas en las Estaciones de Campo GPL23-U-EFG, GPL25-U-EFG, AMD24-U-EFG y en la perforación U-EFG-PP-01 con un espesor de 1.8 m.

En algunas partes se encuentran mezcladas con suelo residual de las Dunitas de Medellín, el tamaño de grano es principalmente limo, de color pardo amarillento y generalmente se encuentran húmedas (Figura 14).



**Figura 14. Cenizas volcánicas en la parte este de la UMI El Faro - Golondrinas**

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

### 4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)

Estos depósitos se han asociados al comportamiento torrencial de las quebradas de la zona, como la Quebrada La Loca, que ha sido referenciada en el Inventario de Procesos de Desinventar con un episodio torrencial en el año 1936, sin mayor detalle de la zona afectada, sin embargo el reporte indica el daño de una vivienda y la muerte de cuatro personas.

En el extremo noroeste de la UMI se encuentra un cuerpo con aproximadamente 200 m de longitud, identificado en las Estaciones de Campo AMD02-U-EFG, AMD03-U-EFG y AMD05-U-EFG.

Se encuentra principalmente en el cauce de la Quebrada La Loca y en algunas de sus márgenes, especialmente aguas abajo de la desembocadura de la Quebrada La Loca 1. La relación matriz/fragmentos varía de 60/40 a 10/90. La matriz es arenosa limosa a limo arenosa de color café oscuro con naranja, se encuentra húmeda y/o saturada, presenta consistencia blanda y tenacidad baja. Los fragmentos corresponden a dunitas ligera a moderadamente meteorizadas, subangulares, con tamaños de 2 mm a 1 m (Figura 15).



**Figura 15. Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Loca en las Estaciones de Campo AMD05-U-EFG y AMD03-U-EFG**

En algunas partes se encuentra mezclado con el depósito de vertiente de la zona y en otras con basura y llenos superficiales generados para las viviendas del sector.

### 4.2.4 Depósitos coluviales (Qcol)

Con este nombre se clasifican los depósitos generados por procesos erosivos superficiales, que están conformados por materiales finos que han sufrido poco desplazamiento y el movimiento es grano a grano. En la UMI El Faro - Golondrinas, esta unidad se encuentra en el extremo sur, en límites la UMI Trece de Noviembre, en la parte media de los afluentes de la Quebrada La Rafita, generando cuerpos de forma alargada que miden entre 70 m y 250 m de longitud y entre 10 m y 20 m de ancho.



Estos depósitos fueron identificados en las fotografías aéreas de 1987 y verificados durante los recorridos de campo en las Estaciones de Campo MAD-13-U-TN, MAD-14-U-TN, KGL-04-U-EFG, KGL-05-U-EFG y KGL-06-U-EFG.

Consisten en una matriz limosa a limo arenosa con altos contenidos de materia orgánica y nódulos de hierro, de color café, húmeda, de consistencia blanda a firme y tenacidad baja a nula, con menos del 10% de fragmentos de roca, subangulares a angulares, que miden hasta 10 cm. Estos cuerpos se hallan en medio de bloques métricos in situ de las Dunitas de Medellín, los cuales quedan expuestos en superficie por erosión hídrica y/o eólica (Figura 16).





**Figura 16. Depósitos coluviales típicos de la zona**

#### **4.2.5 Depósitos de deslizamiento (Qd)**

En la zona de estudio, se encuentran algunos depósitos de deslizamiento de pocos metros de extensión (1 m a 3 m), no cartografiados a la escala del plano. En la parte superior de la UMI, hacia el extremo este, se encuentra un depósito de este tipo, suprayaciendo un depósito de flujo de lodos y/o escombros. Este depósito fue identificado en la Estación de Campo AMD19-U-EFG (Figura 17), es producto de un proceso morfodinámico (desgarre) y está formado por material limoso de color pardo naranja.

Hacia el extremo sur de la UMI, en el límite con la UMI Trece de Noviembre, se encuentra un depósito de deslizamiento, cerca de las Estaciones de Campo MAD-02-U-TN y MAD-03-U-TN. Tiene un espesor superior a 5 m. Es angosto en la parte superior y se amplía hacia la base. Se trata de un depósito clasto soportado con relación matriz/fragmentos de 10/90 que varía en la parte superior, donde tiene acumulación de material fino mezclado con materia orgánica, el color varía de café oscuro a negro. En la parte distal del depósito, donde se hace más ancho, se encuentra acumulación de



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

fragmentos de roca con tamaños menores que 1 m, las rocas son dunitas moderadamente meteorizadas y angulares.



**Figura 17. Depósito de deslizamiento en la parte alta de la UMI El Faro-Golondrinas**

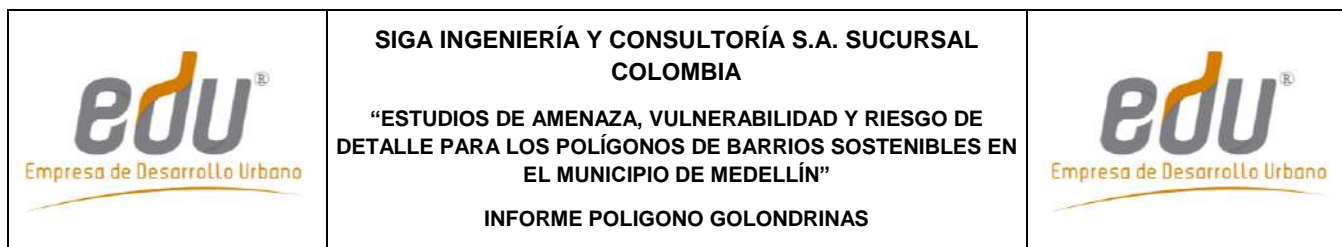
El material de este depósito proviene del Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, que se encuentra en el escarpe de la parte media de la UMI, dejado por una cárcava inactiva, en la cual están contenidos otros procesos menores actualmente activos. Además, contiene superficialmente materiales antrópicos como basura y escombros, provenientes de las viviendas ubicadas en la parte superior del escarpe mencionado anteriormente.

En el Polígono Golondrinas, se encuentra un depósito identificado en los recorridos de campo en la Estación de Campo MAD12-G, con un espesor de 4 m, formado por una matriz areno limosa de color café oscuro, húmeda, de consistencia firme, con aproximadamente 80% de fragmentos subangulares de dunitas, producto de un proceso morfodinámico que se encuentra inactivo, cubierto por vegetación.

#### **4.2.6 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)**

Se encuentran distintos cuerpos distribuidos aleatoriamente en toda la UMI, especialmente en la parte media y baja, en algunos casos cubiertos de forma parcial por lodos antrópicos. Tienen espesores entre 3 m y 10 m y abarcan longitudes entre 15 m y 470 m. Se encontraron en las Perforaciones P-G-PP-40, P-G-PP-41, 10 (P1), 11 (P2), 291 (LD-PP-03C), 299 (LD-PP-18), 301 (LD-PP-22), 319 (LD-PP-61), 322 (LD-PP-64), 323 (LD-PP-66), 328 (LD-PR-04) y 331 (LD-PR-07), así como en las Estaciones de Campo AMD01-U-EFG, AMD02-U-EFG, AMD04-U-EFG, AMD13-U-EFG, AMD14-U-EFG, AMD15-U-EFG, AMD19-U-EFG, AMD35-U-EFG y KGL01-U-EFG.

Es importante tener en cuenta que un depósito de flujo de lodos y/o escombros (de vertiente) puede presentar grandes variaciones en cuanto a su fábrica (relación matriz/fragmentos), tanto lateral como en profundidad, haciendo que existan diferencias



en cuanto a la concentración de fragmentos y/o matriz (matriz soportado o clasto soportado) en un mismo cuerpo. Por lo anterior, de manera general se ha denominado a esta unidad litológica como depósitos de flujos de lodos y/o escombros a todos los cuerpos de este tipo encontrados en la zona de estudio.

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

Para la UMI El Faro - Golondrinas se identificaron depósitos de flujos de lodos y/o escombros principalmente hacia la parte media e inferior, y al interior del Polígono Golondrinas, con espesores de al menos 2 m. Los depósitos encontrados al noreste de la UMI, se caracterizaron gracias a las Estaciones de Campo AMD15-U-EFG, AMD19-U-EFG, AMD41-U-EFG y KGL01-U-EFG. Tienen una relación matriz/fragmentos de 70/30, con matriz limosa, de color naranja, húmeda, de consistencia blanda y tenacidad media. Los fragmentos corresponden a dunitas milonitizadas, moderadamente meteorizados, subangulares y con tamaños menores a 10 cm (Figura 18).

Los depósitos localizados hacia el oeste de la UMI son los más extensos de la zona de estudio. Se definieron tres depósitos con espesores de hasta de 10 m. Para ello fue fundamental el apoyo de fotografías aéreas, el uso de perfiles topográficos y la información tomada en las Estaciones de Campo AMD01-U-EFG, AMD02-U-EFG, AMD04-U-EFG y con la Línea Geofísica P-G-LG-03. Presentan relación matriz/fragmentos de 80/20, con matriz limosa de color pardo anaranjado con café, húmeda a saturada, de consistencia blanda y tenacidad media a alta. Los fragmentos corresponden a dunita y esquistos, subredondeados, con tamaños entre 50 cm y 1 m.

Los depósitos definidos de acuerdo con las Perforaciones 323 (LD-PP-66), 331 (LD-PR-07) y 291 (LD-PP-03C) presentan espesores de al menos 4 m, con relación matriz/fragmentos 95/5, matriz limosa de color pardo anaranjado, húmeda, de consistencia blanda y tenacidad media. Los fragmentos corresponden a dunitas, moderadamente meteorizadas, subredondeados, con tamaños menores a 7 cm.

Los depósitos encontrados en las Perforaciones P-G-PP-40, P-G-PP-41, se encuentran hacia el sur del polígono, en la parte media y superior. Presentan espesores hasta de 3 m, la relación matriz/fragmentos varía entre 80/20 y 60/40, la matriz es arcillosa de color café anaranjado se encuentra húmeda, es de consistencia firme a blanda y de tenacidad baja a media. Los fragmentos corresponden a dunita, fuertemente meteorizada, angulares, con tamaños inferiores a 3 cm, en ocasiones presentan materia orgánica (Figura 19).



**Figura 18. Depósito de flujo de lodos y/o escombros ubicado en la parte superior de la UMI en la Estación de Campo KGL01-U-EFG**



**Figura 19. Depósito de flujos de lodos y/o encontrado en la Perforación P-G-PP-41**

#### **4.2.7 Dunitas de Medellín (JKuM)**

Esta unidad fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad y los recorridos de campo, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Fueron halladas en las Perforaciones Hallados en las Perforaciones P-G-PR-32, P-G-PR-33, P-G-PR-34 P-G-PR-40, P-G-PR-41, U-EFG-PP-01 y en las Líneas Geofísicas P-G-LG-01, P-G-LG-02, P-G-LG-03, P-G-LG-04. En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos, milonitas,

salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunitas cizalladas (Figura 20).

El Horizonte IB se localiza en la parte alta y media de la UMI, específicamente donde se tienen las zonas con pendientes suaves correspondientes a las unidades geomorfológicas de Altiplano y Peldaño. De acuerdo con las Perforaciones P-EF-PR-30, P-EF-PR-42 y U-EFG-PP-01, se tiene que este material presenta espesores entre 1.5 m y 10 m. Consiste en un suelo de color pardo naranja, en algunas partes con tonalidades verdosas debido a la presencia de minerales como talco y clorita, con tamaño de grano limo y arcilla, húmedo, consistencia firme a blanda y tenacidad baja. Contiene raíces, micas y nódulos de hierro con longitudes de hasta de 5.0 mm (Figura 21).

Además, en las Estaciones de Campo SFJ08-U-EFG, SFJ09-U-EFG, AMD42-U-EFG, AMD43-U-EFG, AMD44-U-EFG, AMD45-U-EFG, AMD46-U-EFG, GPL28-U-EFG, GPL29-U-EFG y KGL05-EFG se identificó el Horizonte IB como un suelo limoso con alto contenido de nódulos de hierro de hasta 6.0 mm de longitud, consistencia blanda y húmedo, como se ilustra en la Figura 22.



**Figura 20. Dunita cizallada encontrada en las Perforaciones P-G-PR-40 y P-G-PR-41**





**Figura 21. Horizonte IB reportado en la Perforación U-EFG-PP-01**

El Horizonte IC se encuentra en las Perforaciones P-G-PR-34, P-G-PR-40, P-G-PR-41 y U-EFG-PP-01 y en las Líneas Geofísicas P-G-LG-01, P-G-LG-02, P-G-LG-03, P-G-LG-04, donde muestra espesores de hasta 10 m. En todos los casos se trata de un horizonte de meteorización de una brecha (Figura 23). El suelo es limo arcilloso, de color pardo anaranjado con manchas verdes, húmedo y con tenacidad media. Contiene bloques de dunitas, frescos y con estructura esquistosa. En las Estaciones de Campo MAD08-G y GPL26-G se encuentra este horizonte en taludes de 2.0 m de altura, en el cual el suelo residual exhibe estructura esquistosa y bloques angulosos de dunitas, como se ilustra en la Figura 23.



**Figura 22. Horizonte IB de meteorización en Estación AMD42-U-EFG**



**Figura 23. Horizonte IC de meteorización A) En la Perforación P-PR-G-32 y B) En la Estación de Campo MAD08-G**

El Horizonte IIA tiene espesores inferidos superiores a 20 m, de acuerdo con las Perforaciones P-G-PR-32, P-G-PR-33, P-G-PR-34 P-G-PR-40, P-G-PR-41, U-EFG-PP-01, las líneas geofísicas P-G-LG-01, P-G-LG-02, P-G-LG-03, P-G-LG-04 y las Estaciones de Campo AMD04-EF, AMD05-EF y MAD04-G, entre otras. Este horizonte de meteorización está formado por bloques de dunitas y dunitas milonitizadas con longitudes inferiores a 30 cm en promedio, con suelo limoso de color pardo naranja a pardo rojizo, que varía entre 80% y 30%. La roca se encuentra moderadamente meteorizada, altamente fracturada y diaclasada, presenta alteraciones a serpentina y talco, con pátinas de oxidación negras y pardas. Se observan igualmente espejos de falla y zonas de cizalla.

En la Perforación P-EF-PR-39 se encontró el Horizonte IIA de diques de rocas graníticas que intruyen las Dunitas de Medellín. Las rocas graníticas varían entre diorita y tonalita, están fracturadas, tienen tamaños de hasta 0,05 m, forma angular y están alteradas.

En las Estaciones de Campo SFJ03-U-EFG, SFJ05-U-EFG y GPL15-U-EFG, es común encontrar zonas donde el suelo residual ha sido lavado, quedando bloques de roca frescos en superficie de tamaños menores de 50 cm. Los bloques están fuertemente diaclasados y cizallados como se ilustra en la Figura 24 y en la Figura 25, en la parte alta de la margen derecha de la Quebrada La Loca y cerca del extremo norte del polígono.



**Figura 24. Horizonte IIA de meteorización de la Dunita cizallada**



**Figura 25. Horizonte IIA de meteorización mostrando bloques de dunitas fuertemente diaclasados**

Además, cabe resaltar que aunque en la zona de estudio las dunitas están afectadas tectónicamente, hacia el sur se halla salbanda de dunitas (tacto jabonoso) y hacia el norte y noreste de la UMI se encuentran zonas en donde las brechas tectónicas son más evidentes. La salbanda de dunitas (tacto jabonoso) fue identificada en las Estaciones de Campo AMD01-EF y AMD09-U-EFG y en la Perforación P-EF-PP-29, localizadas en la parte superior del Polígono El Faro, cerca del CAI (límites con la UMI del Trece de Noviembre) y sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca. Este suelo residual tiene estructura esquistosa (Figura 26 y Figura 27) con minerales verdes tales como talco, clorita y serpentina, de aspecto jabonoso.





**Figura 26. Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa**



**Figura 27. Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa (Continuación)**



Las brechas tectónicas fueron encontradas en las Estaciones de Campo AMD01-G, MAD01-G y en las Perforaciones P-G-PR-33 y P-EF-PR-34 (Figura 28 y Figura 29). En la Perforación P-EF-PR-34, entre 14 m y 16 m, se presenta una brecha soldada donde se identifican los bloques angulares de dunitas, embebidos en un suelo tamaño arena completamente consolidado (duro-cementado). Se encuentra en contacto neto con la dunita, tal y como se observa en la Figura 28B.



**Figura 28. Brecha de Dunitas A) En la Estación de Campo AMD01-G y B) En la Perforación P-EF-PR-34**



**Figura 29. Brecha de Dunitas sobre la Quebrada La Loquita**

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

## **5. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS**



### **5.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL**

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

#### **5.2.1 Macrounidades geomorfológicas**

Las macrounidades o bloques se asocian a unidades de paisaje en escalas regionales relacionadas genéticamente en cuanto a su geología, procesos de erosión y controles estructurales. La UMI El Faro - Golondrinas se ubica sobre la macrounidad denominada como Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA). A continuación se presenta la descripción de todas las macrounidades.

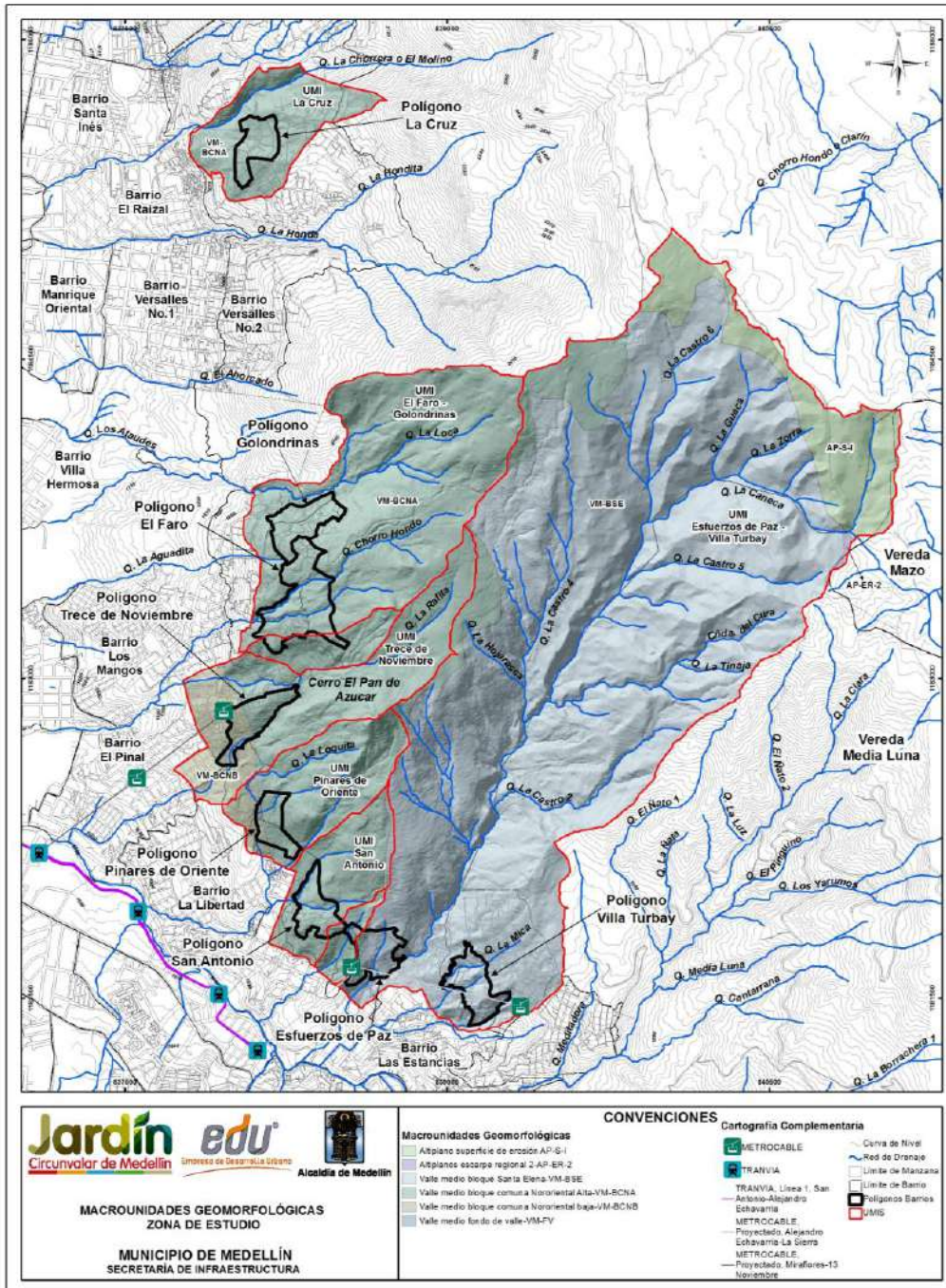
- ✓ Superficie de erosión S-I (AP-S-I), ubicada a altura del corregimiento de Santa Elena hacia el oriente de Medellín. Se encuentran entre alturas de 2500 msnm y 2600 msnm y se caracterizan por ser superficies con baja incisión pertenecientes al altiplano mencionado anteriormente en medio de sistemas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

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

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



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





**Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio (07\_GOLMacroUnidadesGeomorfológicas\_Medellin\_C y 07\_GOLMacroUnidadesGeomorfológicas\_Medellin\_T)**





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

## 5.2.2 Unidades Geomorfológicas

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

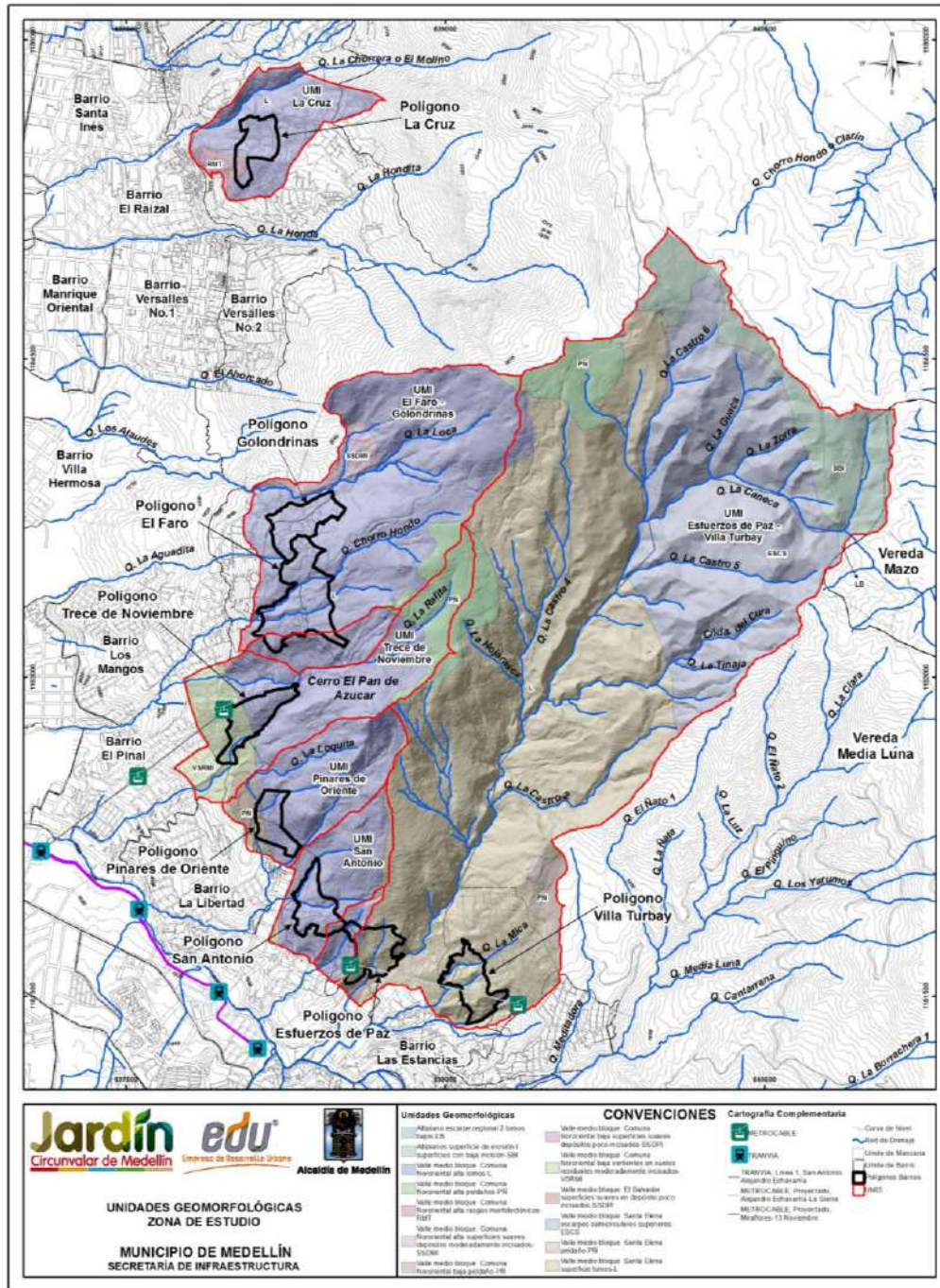
La UMI El Faro-Golondrinas se ubica sobre la Unidad de Lomos (L), Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados (SSDMI) y Peldaños (PÑ). A continuación se presenta la descripción de todas las unidades geomorfológicas y se menciona la macrounidad donde se encuentran.

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

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

- ✓ Unidad de Vertiente en suelos residuales moderadamente incisados (VSRMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja. La localización de esta geoforma varía de acuerdo con la unidad geológica presente. Corresponden a laderas con filos estrechos y topes agudos. Para el caso de estudio se desarrollan sobre suelos residuales de las Dunitas de Medellín.
- ✓ Unidad de Escarpes semicirculares superiores (ESCS), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio-Bloque Santa Elena. Se encuentra en zonas escarpadas y superficies rocosas hacia los límites con los altiplanos, caracterizándose por presentar fuertes pendientes.

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



**Mapa 10. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio**  
**(08\_GOLUnidadesGeomorfológicas\_Medellin\_C y**  
**08\_GOLUnidadesGeomorfológicas\_Medellin\_T)**

### 5.3 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

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

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

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

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

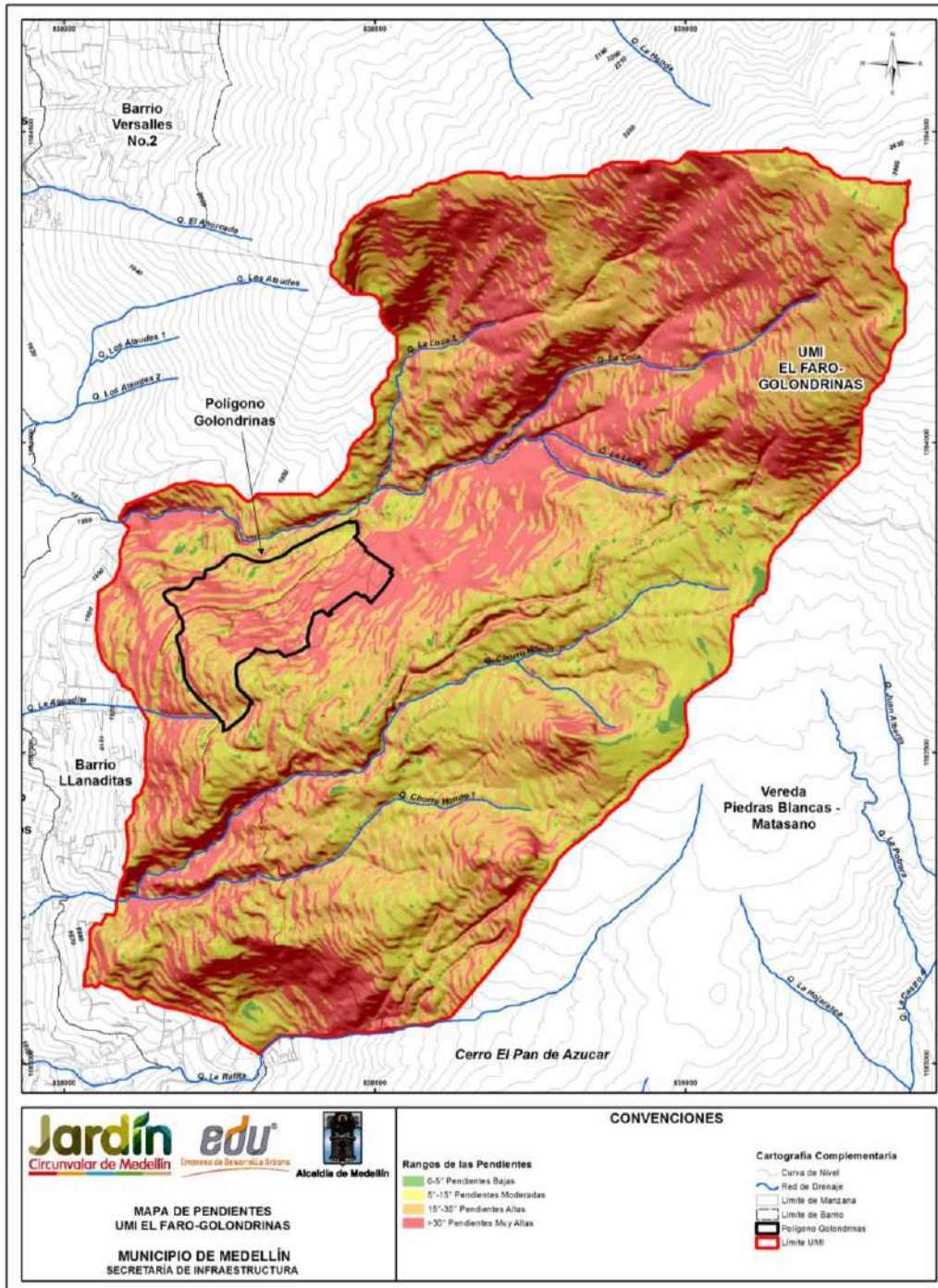
Haciendo uso de Herramientas SIG se obtuvo el mapa de pendientes que se presenta en el Mapa 11, de manera que pueden hacerse las siguientes observaciones:

- ✓ Las zonas resaltadas en color verde son las de pendientes bajas (0° a 5°), correspondientes a planicies. Estas zonas son las menos predominantes y están asociadas a rasgos tectónicos denominados como peldaños o descansos y también a superficies suaves modeladas en depósitos y explanaciones antrópicas.
- ✓ Las zonas con pendientes moderadas (5° a 15°) y altas (15° a 30°) corresponden a las sombreadas de colores amarillo y naranja, respectivamente. Son las predominantes en el Polígono El Faro. Corresponden a superficies suaves y moderadas modeladas por la incisión de las quebradas y sus afluentes.
- ✓ Las zonas con pendientes muy altas (>30°) se resaltan con color rojo. Éstas son caracterizadas por presentar vertientes escarpadas moldeadas en roca, estando algunas hoy día cubiertas por la vegetación.

Teniendo en cuenta el análisis del mapa de pendientes, los recorridos de campo y la geología local de la zona de estudio, se lograron definir 18 unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los Numerales 5.3.1 a la 5.3.18 de este capítulo.

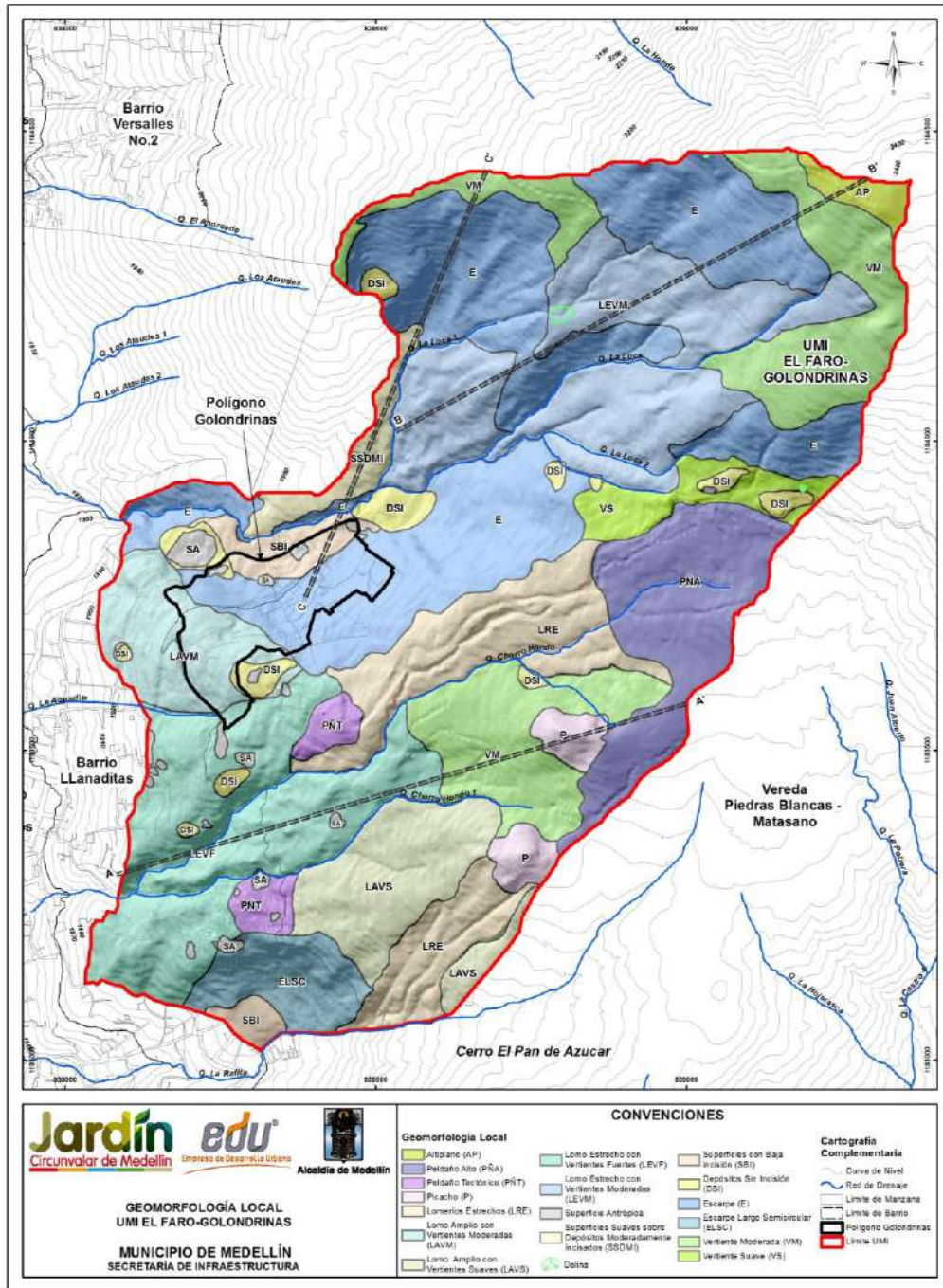
En el Mapa 12 se presenta la planta con cada una de las unidades geomorfológicas de la UMI El Faro - Golondrinas.





Mapa 11. Análisis de pendientes de la UMI El Faro - Golondrinas  
(09\_GOLPendientes\_Medellin\_C y Mapa 09\_GOLPendientes\_Medellin\_T)





**Mapa 12. Unidades Geomorfológicas de la UMI El Faro - Golondrinas  
 (10\_GOLGeomorfologiaLocal\_Medellin\_C y 10\_GOLGeomorfologiaLocal\_Medellin\_T)**

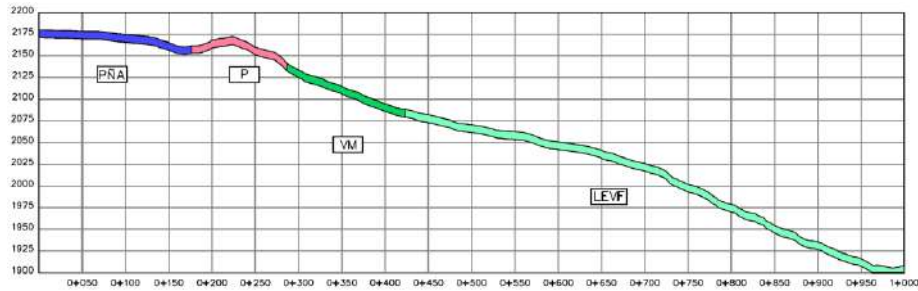


Figura 30. Perfil geomorfológico A-A´

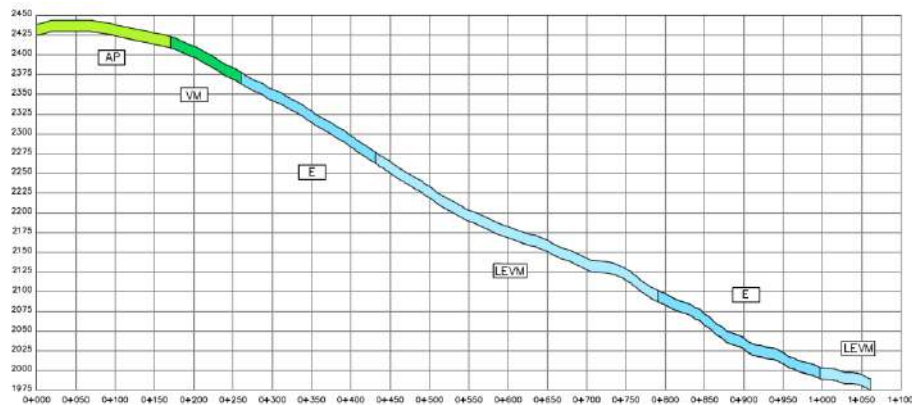


Figura 31. Perfil geomorfológico B-B´

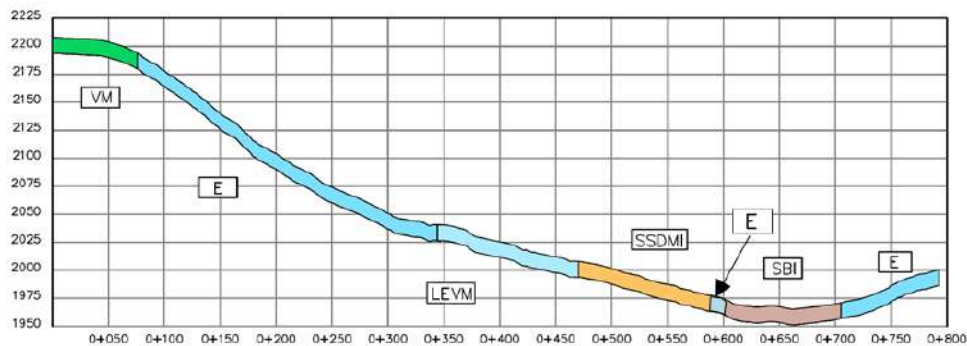




Figura 32. Perfil geomorfológico C-C´

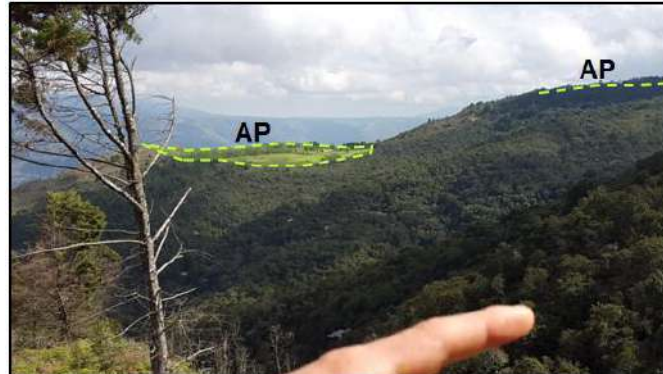
Se puede observar que predominan la Unidad Escarpes E y Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM.

### 5.3.1 Unidad de Altiplano AP

Se localiza en el extremo nororiental de la UMI, en las cercanías del Altiplano de Santa Elena entre las cotas 2141 msnm y 2444 msnm. Esta unidad se caracteriza por presentar

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

pendientes suaves menores de 5°, compone una superficie plana continua casi horizontal con baja incisión (Figura 33). Litológicamente se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.



**Figura 33. Unidad de Altiplano AP**

### **5.3.2 Unidad de Peldaño Alto PÑA**

Se localiza en el extremo oriental de la UMI hacia los límites con la UMI del Trece de Noviembre. Esta geoforma se encuentra dispuesta en sentido preferencial NE en la parte alta de la Quebrada Chorro Hondo, entre las cotas 2206 msnm y 2134 msnm. Se relaciona con rasgos estructurales asociados a descansos de falla, ya que limita tanto en la parte superior como inferior por escarpes y lineamientos de gran continuidad observados en quiebres de pendiente y lomos deflectados. Presenta baja inclinación entre los 0° y 5° (superficies suaves), son de gran continuidad encontrándose desde la parte alta de la UMI hasta el camino que conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar, presenta bajo grado de incisión y forma irregular. Litológicamente se desarrolla sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín. En la Figura 34 se resalta sombreada dicha unidad.

### **5.3.3 Unidad de Peldaño Tectónico PÑT**

Se encuentran en la parte media de la UMI, entre las cotas 1860 msnm y 1872 msnm y corresponde a la expresión geomorfológica denominada “silleta o silla de montar”. Como su nombre lo indica, son geoformas que se caracterizan por presentar dos extremos elevados en cuya mitad se ubica una depresión (como una silla para montar a caballo), este tipo de depresiones son generadas por la presencia de planos de debilidad donde se produce con mayor facilidad la meteorización de una unidad geológica debido a la presencia de estructuras geológicas como lineamientos y fallas. Esta unidad fue cartografiada con la ayuda de fotografías aéreas, cartografía y mapa de pendientes. No se obtuvo una imagen representativa de la misma.





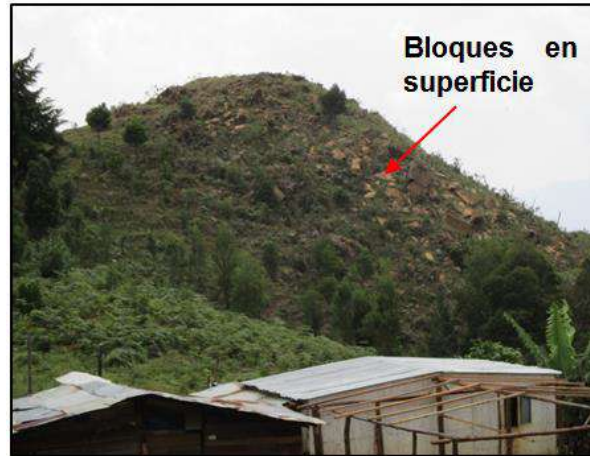
**Figura 34. A) Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA y B) Unidad de Vertiente Suave VS**

#### **5.3.4 Unidad de Picacho P**

Se encuentra en la parte media de la UMI en donde se tienen los nacimientos de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Incluye el Cerro Pan de Azúcar (CPA) y un conjunto de pequeños cerros aislados (Figura 35). Se caracteriza por encontrarse en el rango de pendientes mayores que 30°, son cerros que alcanzan cotas desde 2118 msnm a 2172 msnm, siendo muy distinguibles en el relieve. Presentan formas desde ovaladas, alargadas hasta redondas, sus vertientes son fuertes a escarpadas con topes convexos. Litológicamente se encuentra sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. En esta unidad geomorfológica se desarrollan procesos de inestabilidad como caída de rocas, favorecidos además por procesos de erosión superficial debido al agua de escorrentía.

#### **5.3.5 Unidad de Lomeríos Estrechos LRE**

Se encuentra localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Rafita en las inmediaciones de la UMI del Trece de Noviembre y en la parte alta del Polígono El Faro, sobre la margen derecha de la Quebrada Chorro Hondo. Esta geoforma se caracteriza por presentar topes estrechos subredondeados, con pendientes variables entre 5° y 15° de inclinación y longitudes de hasta 500 m. Sus laderas son cortas, convexas con inclinaciones menores que 15°. De manera general esta geoforma presenta formas alargadas con grado de incisión moderado. Los drenajes presentes en esta unidad son afluentes de la Quebrada La Rafita y Chorro Hondo. Litológicamente esta unidad geomorfológica se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín (Figura 36).



**Figura 35. Unidad de Picacho P**

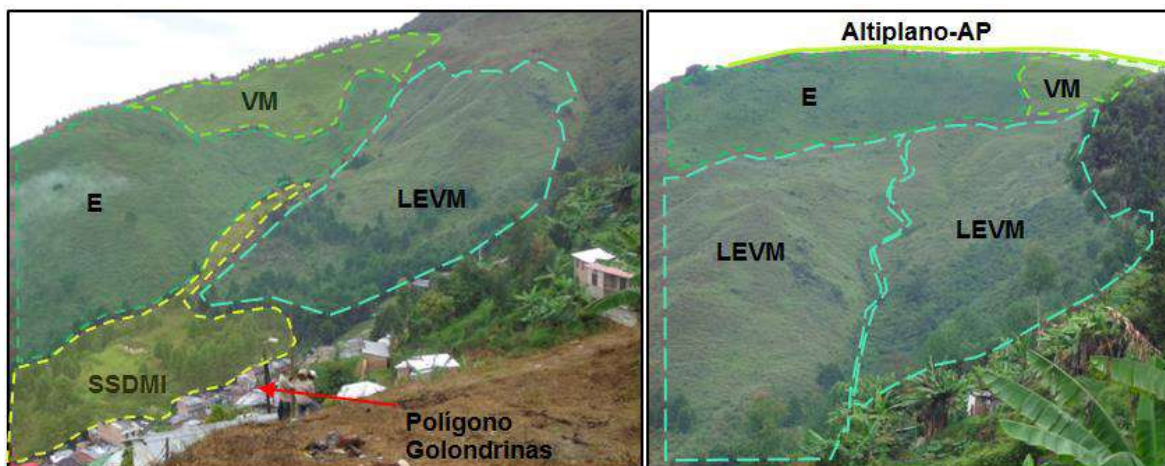


**Figura 36. Unidad de Lomeríos Estrechos LRE**

### **5.3.6 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM**

Se localiza hacia el norte de la UMI, sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca 1. Esta unidad se caracteriza por presentar topes suaves discontinuos (aspecto rugoso) con pendientes menores de 15°, vertientes cóncavas de moderadas a fuertes con pendientes entre 15° y 30°, se encuentra limitada en la parte superior por escarpes y en la parte inferior por superficies modeladas en depósitos. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín, como se ilustra en la Figura 37.





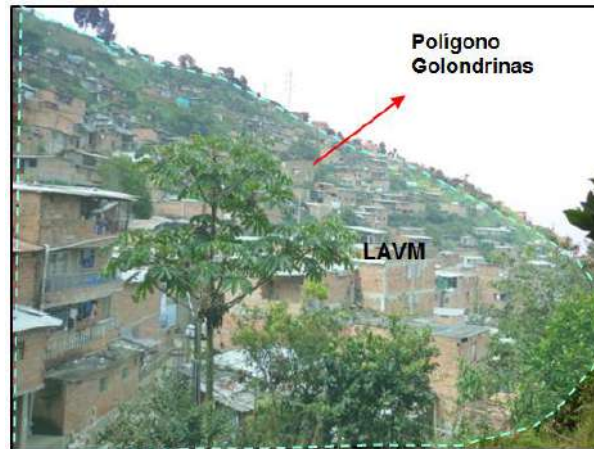
**Figura 37. Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM, Escarpe E, Vertiente Moderada VM y Superficies sobre Depósitos SSDMI**

### **5.3.7 Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM**

Se localiza en la parte baja de la UMI, sobre la margen derecha de la Quebrada La Aguadita entre los Polígonos Golondrinas - El Faro. Limita en la parte superior por la unidad de Vertientes y Lomeríos. Se caracteriza por presentar topos convexos con pendientes entre 15° y 30°, vertientes cortas con pendientes moderadas, presenta forma irregular con moderado grado de incisión. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. En la Figura 38 se resalta con un sombreado claro esta unidad. Esta unidad ocupa la zona sur del Polígono Golondrinas.

### **5.3.8 Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Suaves LAVS**

Se encuentra en los límites con la UMI Trece de Noviembre, delimitada por las unidades de Peldaño Alto, Picacho y Escarpe Largo Semicircular. Esta unidad se caracteriza por presentar topos suaves convexos de 130 m de ancho, con pendientes menores que 15°, laderas con pendientes cortas y moderadas entre 15° y 30° de inclinación. Litológicamente, esta geoforma se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue cartografiada con la ayuda de fotografías aéreas y mapa de pendientes. No fue posible obtener una imagen representativa de la misma.



**Figura 38. Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM**

### **5.3.9 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF**

Se localiza sobre la margen derecha e izquierda de la Quebrada Chorro Hondo 1. Presenta topos estrechos subangulosos con pendientes fuertes entre 15° y 30°. Sus laderas son cortas y escarpadas con pendientes mayores que 30°, de formas rectas. Litológicamente esta geoforma está compuesta por material rocoso de los horizontes IIA y IIB de las Dunitas de Medellín (Figura 39).



**Figura 39. Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF**

### **5.3.10 Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC**

Se encuentra ubicado en el extremo sur del Polígono El Faro, hacia los límites con la UMI del Trece de Noviembre. Conformar una antigua cárcava, la cual se encuentra entre las cotas 1864 msnm y 2022 msnm. Se caracteriza por presentar pendientes muy

escarpadas con ángulos mayores que 30°, desarrolladas sobre material rocoso altamente fracturado de las Dunitas de Medellín. Presenta paredes (frentes) de roca largos de aproximadamente 2000 m de longitud y altura mayor de 100 m (Figura 40), con forma semicircular muy característica, y moderado grado de incisión asociado a la Quebrada La Rafita. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. En esta unidad geomorfológica se desarrollan procesos de inestabilidad como caída de rocas favorecido por procesos de erosión superficial.



**Figura 40. Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC en la parte alta del polígono**

### **5.3.11 Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI**

Esta geoforma presenta varios cuerpos distribuidos en toda la UMI. Corresponden a zonas con pendientes suaves menores de 15° sin incisión, presenta formas variadas desde alargadas hasta ovaladas. Son producto del desprendimiento de materiales provenientes de las vertientes y zonas escarpadas. Se desarrollan sobre flujos de lodos y/o escombros (Figura 41).

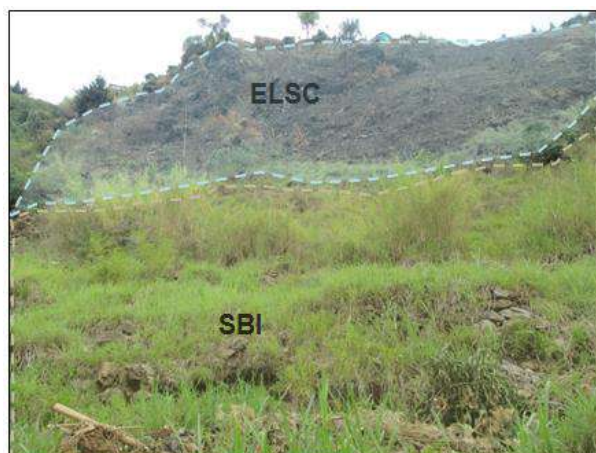
### **5.3.12 Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI**

Localizada en el extremo norte del Polígono Golondrinas, en los límites con la UMI del Trece de Noviembre y sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca 1. Esta geoforma presenta toques suaves con pendientes menores que 5°, con bajo grado de incisión. Es el resultado de la acumulación de fragmentos de roca desprendidos, producto de la inestabilidad (caída de rocas) presente en la parte superior de la unidad geomorfológica denominada como escarpes largos semicirculares (ELSC). Litológicamente, se desarrolla sobre depósitos de deslizamiento y materiales antrópicos asociados a urbanizaciones aledañas (Figura 42).





**Figura 41. Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI**



**Figura 42. Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión y Escarpe Largo Semicircular ELSC**

### **5.3.13 Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI**

Localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Loca 1. Esta geoforma tiene forma alargada cuya longitud en planta alcanza cerca de 400 m, presenta topes suaves con pendientes menores de 15° y laderas cortas moderadamente incisadas. Son el resultado de procesos de inestabilidad generados en la unidad geomorfológica de Escarpes y Vertientes Moderadas. Litológicamente, se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Figura 43).



**Figura 43. Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI**

### **5.3.14 Unidad de Superficie Antrópica SA**

Se encuentra distribuida a lo largo de la UMI, con mayor concentración dentro de los Polígonos El Faro y Golondrinas. Corresponde a superficies explanadas con formas irregulares modificadas antrópicamente. Presenta pendientes suaves, variables entre 0° y 5° de inclinación. Se desarrollan sobre materiales antrópicos como se ilustra en la Figura 44.

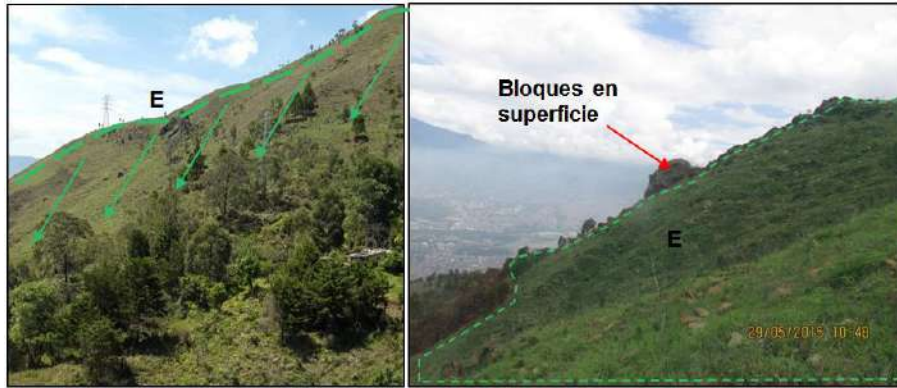
### **5.3.15 Unidad de Escarpe E**

Localizada en el extremo norte de la UMI, sobre las márgenes de las Quebradas La Loca 1 y La Loca 2. Se encuentra limitada por la unidad de Peldaños, Lomos Alargados y Vertientes Moderadas. Son vertientes con superficies rugosas onduladas poco continuas con pendientes mayores de 30°. Sobre esta unidad se tienen bloques en superficie de dunita, los cuales pueden ser removilizadas por agentes erosivos como el agua. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 45). Esta unidad ocupa más del 50% del área del Polígono Golondrinas.



**Figura 44. Unidad de Superficie Antrópica AS**

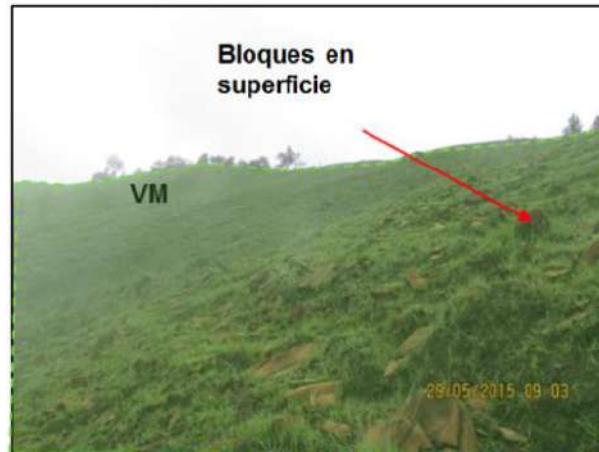




**Figura 45. Vertiente Escarpada VE exhibiendo bloques en superficie**

### 5.3.16 Unidad de Vertiente Moderada VM

Localizada en el extremo norte de la UMI, sobre la margen derecha e izquierda de la Quebrada La Loca 1 y 2 y en la zona centro oriental de la UMI. Se encuentra limitada por la Unidad de Peldaños, Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas y Escarpes como se ilustra en la Figura 46. Esta unidad presenta pendientes moderadas con inclinaciones entre 15° y 30°, irregulares y continuas. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín.



**Figura 46. Unidad de Vertiente Moderada VM con bloques en superficie**

### 5.3.17 Unidad de Vertiente Suave VS

Localizada en la parte media de la UMI, entre las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, limitada en la parte inferior por la Unidad de Escarpe y Peldaño Alto. Se caracteriza por tener pendientes de suaves rectas continuas, como se ilustra en la

Figura 47. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.



Figura 47. Vertiente Suave VS en la parte superior del Polígono Golondrinas

### 5.3.18 Unidad de Dolinas

Las dolinas son depresiones cóncavas formadas por varios procesos tales como colapso de cavernas, piping, subsidencia, disolución y por controles estructurales en la unidad litológica (Figura 48), aunque todos estos procesos en conjunto también dan origen a una dolina (poligenética) (Huggett, 2007).

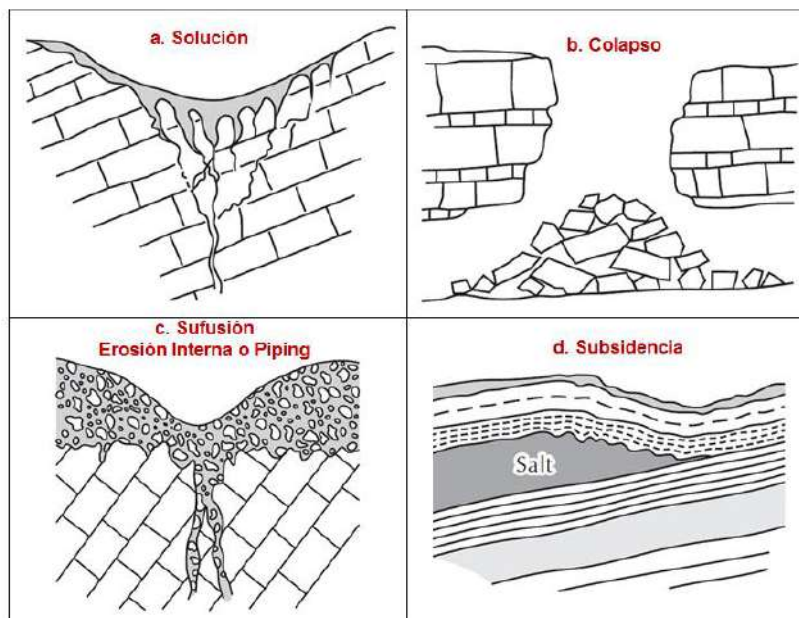


Figura 48. Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007)

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

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

Las opciones a, b y c de la Figura 48, son los procesos de formación que se asocian a las dolinas reportadas en la UMI en estudio. Esto se debe al fuerte control estructural, evidenciado en lineamientos, geoformas de origen estructural tales como peldaños, peldaños tectónicos, patrones de meteorización particulares en la unidad geológica (bloques rocosos en abundante matriz) y estructuras de disolución en la roca como canales en forma de tubos (Figura 49). Estos factores ponen en evidencia la conjugación de procesos que dan origen al paisaje pseudokarstico en las Dunitas de Medellín.



**Figura 49. Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales (Parte alta de la UMI El Faro - Golondrinas)**

En el Mapa 12 se cartografiaron un conjunto de dolinas (Figura 50 y Figura 51), localizadas en la parte alta de la UMI, cuyas dimensiones son aproximadamente 5 m de largo, 4 m de ancho y hasta 1.0 m de profundidad. La dolina reportada en la Figura 51A se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín, en la cual se observa colapso en la superficie y continuación en profundidad con forma de canal por efectos de procesos de erosión (piping-sufusión). En la Figura 51B, la dolina reportada se encuentra



cubierta por vegetación y tiene bloques de Dunita en su interior con diámetros variables entre 0.5 m y 0.7 m.

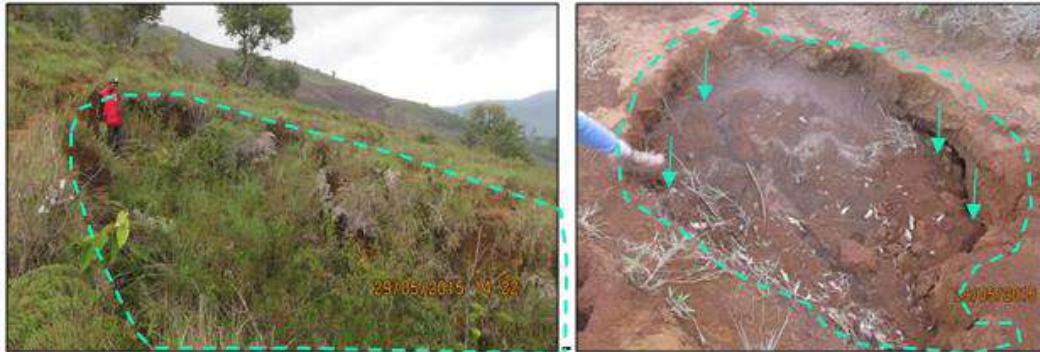


Figura 50. Dolinas por colapso SFJ13-U-EFG

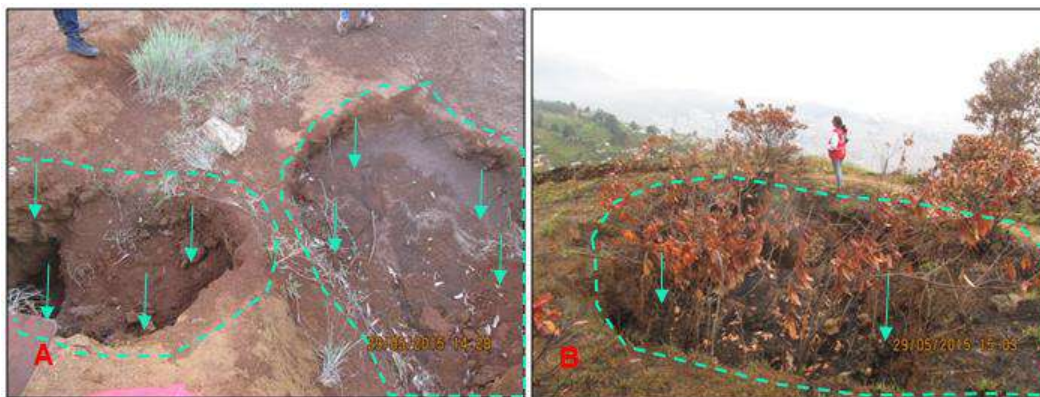




Figura 51. A) Dolina generada por colapso reportada en la Estación de Campo SFJ13-U-EFG y B) Dolina vegetada reportada en la Estación de Campo SFJ14-U-EFG

#### 5.4 MORFODINÁMICA REGIONAL

Debido a las condiciones geomorfológicas y a la ocupación del territorio, los eventos más recurrentes con afectaciones considerables sobre la comunidad, son aquellos generados por las inundaciones y los movimientos en masa, respectivamente. La manifestación u ocurrencia de estos fenómenos coincide con la distribución anual bimodal de las lluvias medidas en la región metropolitana, donde la mayor manifestación de movimientos en masa e inundaciones se presentan en dos picos del año que coinciden con los meses de mayo y octubre. Lo anterior se evidencia en la relación de las condiciones hidrometeorológicas, como factor detonante de los fenómenos naturales que ocurren en el Valle de Aburrá (Aristizábal & Gómez, 2007).

Aunque las inundaciones son los eventos de mayor recurrencia, los movimientos en masa son los que generan mayor afectación, especialmente en pérdida de vidas humanas.



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

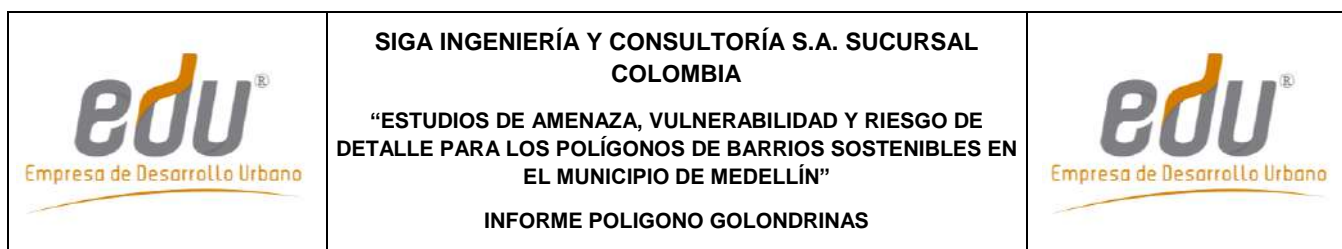
Adicionalmente, aunque las avenidas torrenciales no presentan una alta recurrencia, sus afectaciones en términos de pérdidas humanas es alta, con tendencia a aumentar en las últimas décadas, lo que, muy probablemente, refleja la ocupación de áreas susceptibles a la ocurrencia de este tipo de eventos,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

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

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

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

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

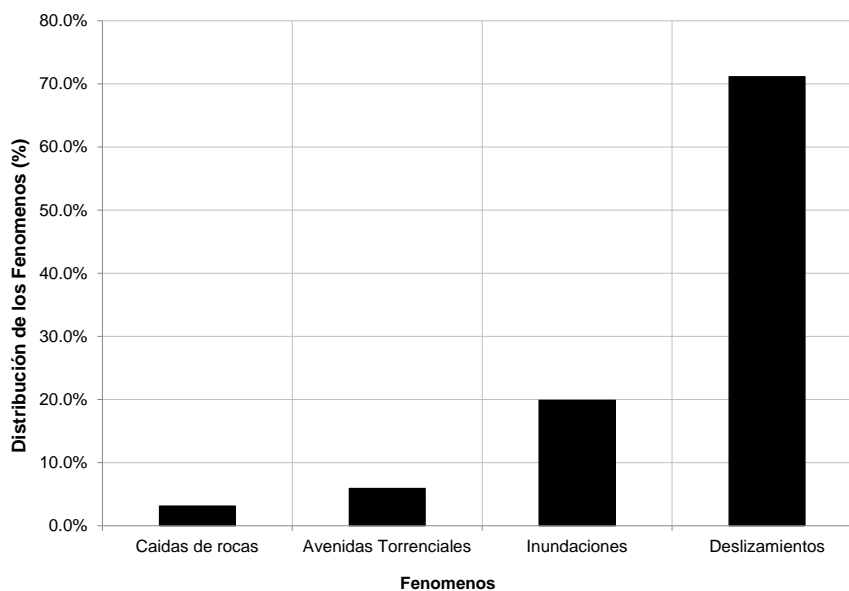


A través de la base de datos DesInventar, se logró consultar que cerca de la zona de estudio se tienen unos 322 registros de eventos que involucran movimientos en masa, avenidas torrenciales, inundaciones y caídas de roca desde 1981 hasta 2006. Estos eventos se reportaron en 12 barrios de la Comuna 8 y la Comuna 3, entre los cuales se encuentran los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de los diferentes eventos que ocurren en cada uno de los 12 barrios que se encuentran cerca de los polígonos. Por su parte la Figura 52 y la Figura 53 presentan un análisis de frecuencia de ocurrencia de los principales fenómenos y cuáles son los barrios más afectados por los mismos.

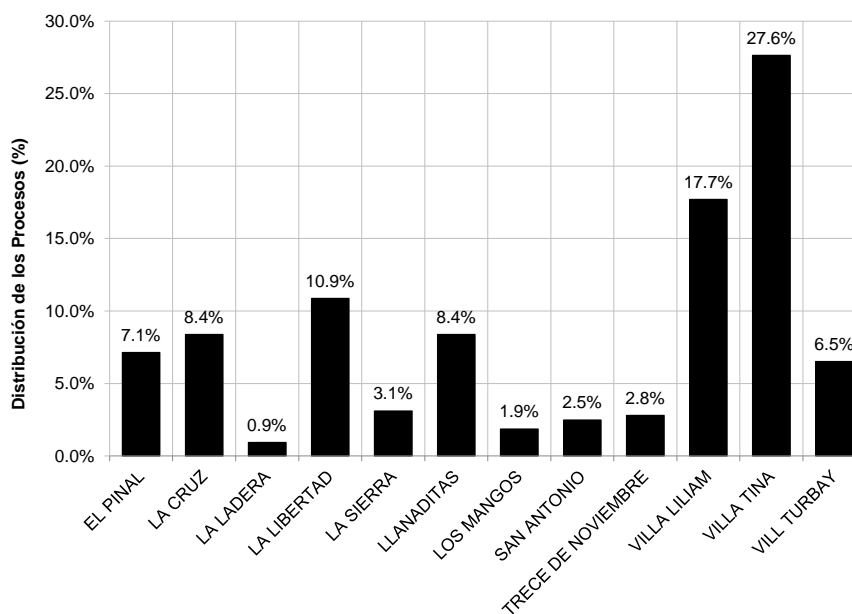
Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes (Figura 52) en la zona de estudio (Figura 53), seguidos de los fenómenos de inundación tal como lo describió Aristizábal & Gómez (2007). Estos fenómenos representan el 70% y el 20% respectivamente, de los registros encontrados en la base de datos de DesInventar. Por otra parte, la Figura 53 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villatina, Villa Liliam y La Libertad. Respecto a los barrios de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles, el barrio más afectado es La Cruz, seguido de Llanaditas donde se localizan los Barrios Golondrinas y El Faro y finalmente el Barrio Villa Turbay.

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

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



**Figura 52. Distribución de los fenómenos**



**Figura 53. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos**

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

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

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

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

También se destaca el movimiento en masa de Villatina, el 27 de septiembre de 1987 (Figura 54). Aunque no se logró determinar con el número exacto de víctimas, se calcula que fueron unas 500 personas, habiéndose rescatado aproximadamente 200 cuerpos, por lo que el sitio se declaró “campo santo”.





**Figura 54. Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987  
(Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987)**

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

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

## **5.5 MORFODINÁMICA LOCAL**

Como parte del análisis morfodinámico de la UMI El Faro-Golondrinas, se llevó a cabo el análisis multitemporal con la fotointerpretación de las 103 fotografías aéreas recopiladas, correspondientes a 13 líneas de vuelo para el período comprendido entre 1959 y 1998 y con escalas variables entre 1:3.200 y 1:21.700.

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

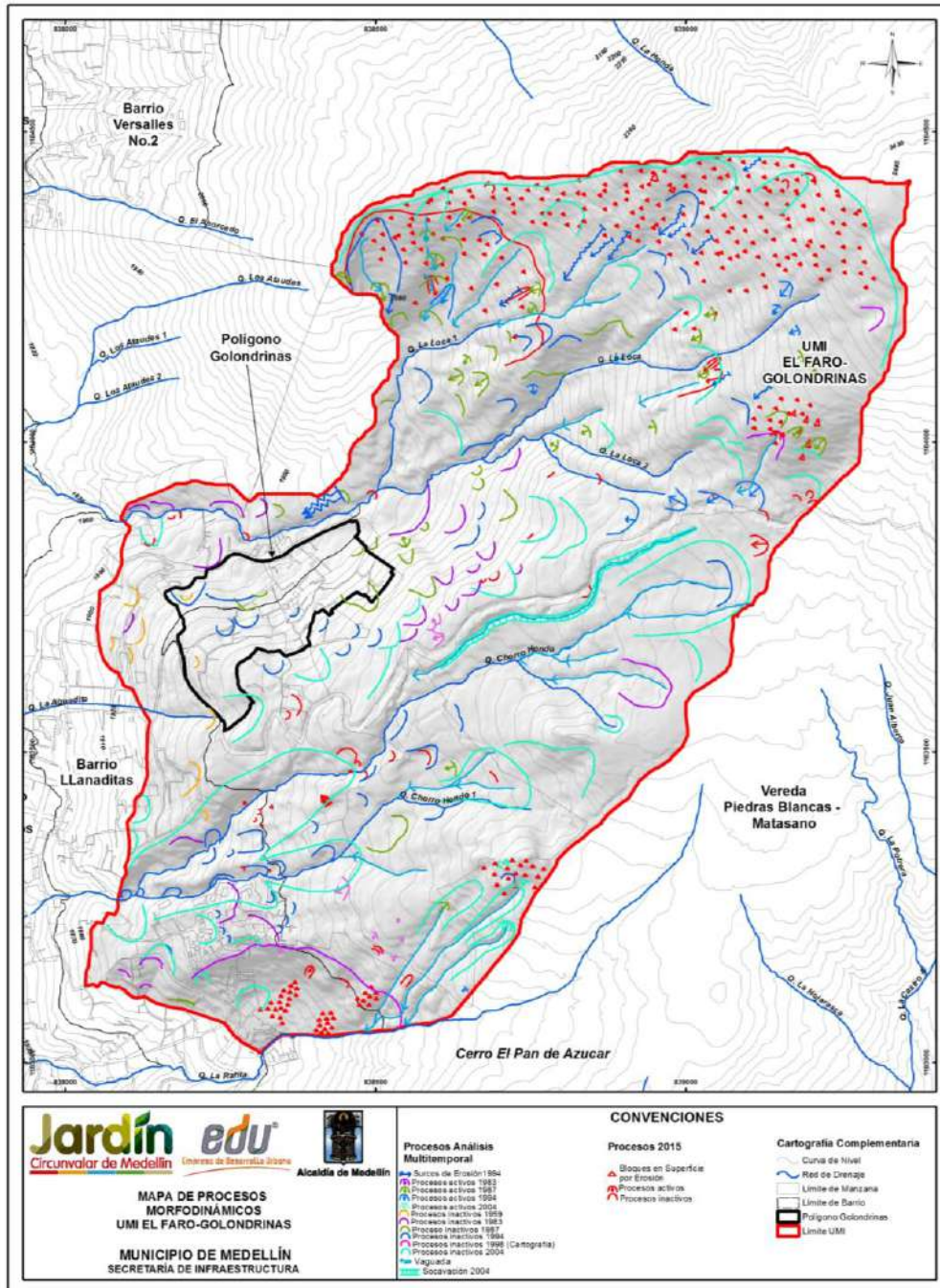
**Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor**

<b>Año</b>	<b>Vuelo</b>	<b>Faja</b>	<b>Fotos</b>	<b>Escala</b>
1959	C-889	3	045-052	1 : 5.000
1976	FD-87	3	29-35	1 : 10.000

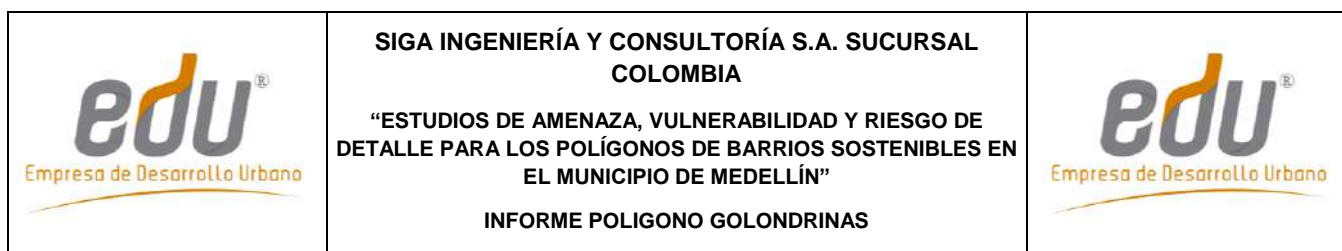
**Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor**

<b>Año</b>	<b>Vuelo</b>	<b>Faja</b>	<b>Fotos</b>	<b>Escala</b>
1981-1983	R-898	1	261-271	1 : 5.160
1985	Geovial-2	6	31-34	1 : 3.200
1987	Geovial-18	19	232-240	1 : 5.300
1987	Geovial-18	20	212-222	1 : 4.600
1987	Geovial-18	21	243-246	1 : 5.200
1994	Geovial 65/3	32	156-160	
1994	Geovial 65/3	33	98-109	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	34	130-141	1 : 5.000
1998	FAL-403	12	114-119	1 : 21.700
1998	FAL-402	2	106-113	1 : 10.700
1998	FAL-401	03-3	144-151	1 : 11.300

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



Mapa 13. Procesos morfodinámicos de UMI El Faro - Golondrinas (11\_GOLProcesosMorfodinamicos\_Medellin\_C y 11\_GOLProcesosMorfodinamicos\_Medellin\_T)



**Tabla 5. Colores definidos para los procesos según año**

<b>Año de Visualización</b>	<b>Color en el Plano</b>
1959	Naranja
1983	Magenta
1987	Verde
1998	Rosado
2004	Azul
2015	Rojo

Los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente activos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y socavación lateral. Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas, así mismo los bloques del macizo que sobresalen en superficie y que se encuentran muy fracturados son propensos a desprenderse.

En la zona de estudio del Proyecto Barrios Sostenibles, los deslizamientos se concentran en mayor proporción en el área comprendida entre la parte media y alta de cada UMI. El mecanismo de falla de estos materiales varía entre superficies de falla planares y/o rotacionales, principalmente activos, con coronas de anchos variables entre 4 m y 70 m y escarpes que pueden llegar a medir hasta 10 m, principalmente sobre los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín. Además, en la UMI se encontraron coronas de deslizamiento tanto activas como inactivas, de 8 m a 10 m de longitud, 4 m a 15 m de ancho y 2 m de escarpe, que se generan sobre el perfil de meteorización de las dunitas. Uno de los deslizamientos activos fue identificado cerca de la Estación de Campo MAD03-U-TN al sur de la UMI, el cual tiene una corona de 15 m de ancho, 30 m de longitud, 5 m de escarpe, obedece a un mecanismo de falla del tipo planar y se genera sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 55). Este proceso no representa ninguna amenaza para el Polígono Golondrinas.





**Figura 55. Deslizamiento activo en Estación de Campo MAD03-U-TN**

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en las unidades geomorfológicas denominadas como Escarpes E y Vertientes Moderadas VM, donde aflora el Horizonte IIA de las Dunitas y se observan pequeños picachos y paredes de roca, ambos fracturados. El fenómeno de inestabilidad es favorecido por tres causas, la primera se atribuye a los procesos de erosión superficial, los cuales moldean la roca generando acanaladuras entre ellas, haciendo que los bloques de roca queden desconfiados y favorezcan la susceptibilidad al desprendimiento (Figura 56). La segunda hace referencia al lavado por agua del suelo residual del Horizonte IIA, haciendo que los bloques de roca queden expuestos y susceptibles a moverse (Figura 57). La tercera causa que incide en la ocurrencia de este fenómeno, se asocia a las estructuras geológicas (diaclasas, zonas de cizalla y foliación) y el fuerte grado de fracturamiento que presenta la roca en la zona de estudio (Figura 56).

Los surcos, las cárcavas y los bloques en superficie por erosión son producto de procesos de erosión superficial eólica y fluvial. Los surcos (Figura 58A) se hallan en la parte alta y media de la UMI, alcanzando longitudes de hasta 20 m y profundidad de 80 cm, generándose sobre el suelo residual de las dunitas. Algunos de los surcos se encontraron con agua y localizados en la parte superior de algunas cicatrices de deslizamiento. Los bloques en superficie se encuentran tanto en pendientes moderadas como en escarpes, siendo estos últimos los más susceptibles a generar caídas de rocas como se observa en la Figura 58B.

Hacia el oeste de la UMI se evidencia una cárcava activa donde se aprecia el grado de erosión que tiene el área de estudio. Esta cárcava tiene pendientes escarpadas y presenta bloques en superficie en toda su extensión, debido al efecto de lavado de suelo que ocasiona el agua de escorrentía. Asimismo, se tienen coronas de deslizamiento activas dentro la misma (Figura 59). Hacia la parte superior de la UMI se tienen pequeñas cárcavas asociadas al inicio de pequeños drenajes.



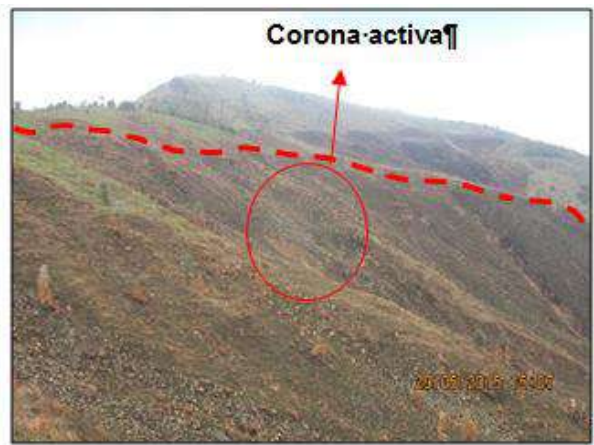
**Figura 56. Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen la caída**



**Figura 57. Frentes de roca inestables**



**Figura 58. (A) Surcos y (B) bloques en superficie en pendientes moderadas**



**Figura 59. Corona activa contenida en cárcava**

En la UMI El Faro - Golondrinas se destacan dos cárcavas activas en las Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG, con coronas de 15 m y 90 m de ancho (Figura 60), 60 m y 80 m de longitud, 8 m y 10 m de escarpe, los cuales obedecen a mecanismos de falla complejos, ya que se encuentran tanto superficies de tipo planar como rotacional y se generan sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. Los escarpes de las coronas evidencian un macizo rocoso fuertemente fracturado, al menos en tres direcciones, donde la roca se encuentra moderadamente meteorizada. En este punto se tiene que la relación suelo/roca varía entre 20/80 y 40/60. Hacia la parte superior de las coronas se encontraron surcos de al menos 40 cm de profundidad y 7 m de longitud, algunos con agua.





**Figura 60. Cárcavas activas ubicadas en la parte superior de la UMI en las Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG**

En cuanto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro - Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad (Figura 61).



**Figura 61. Socavación lateral en la Quebrada Chorro Hondo**



## 6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

### 6.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

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

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

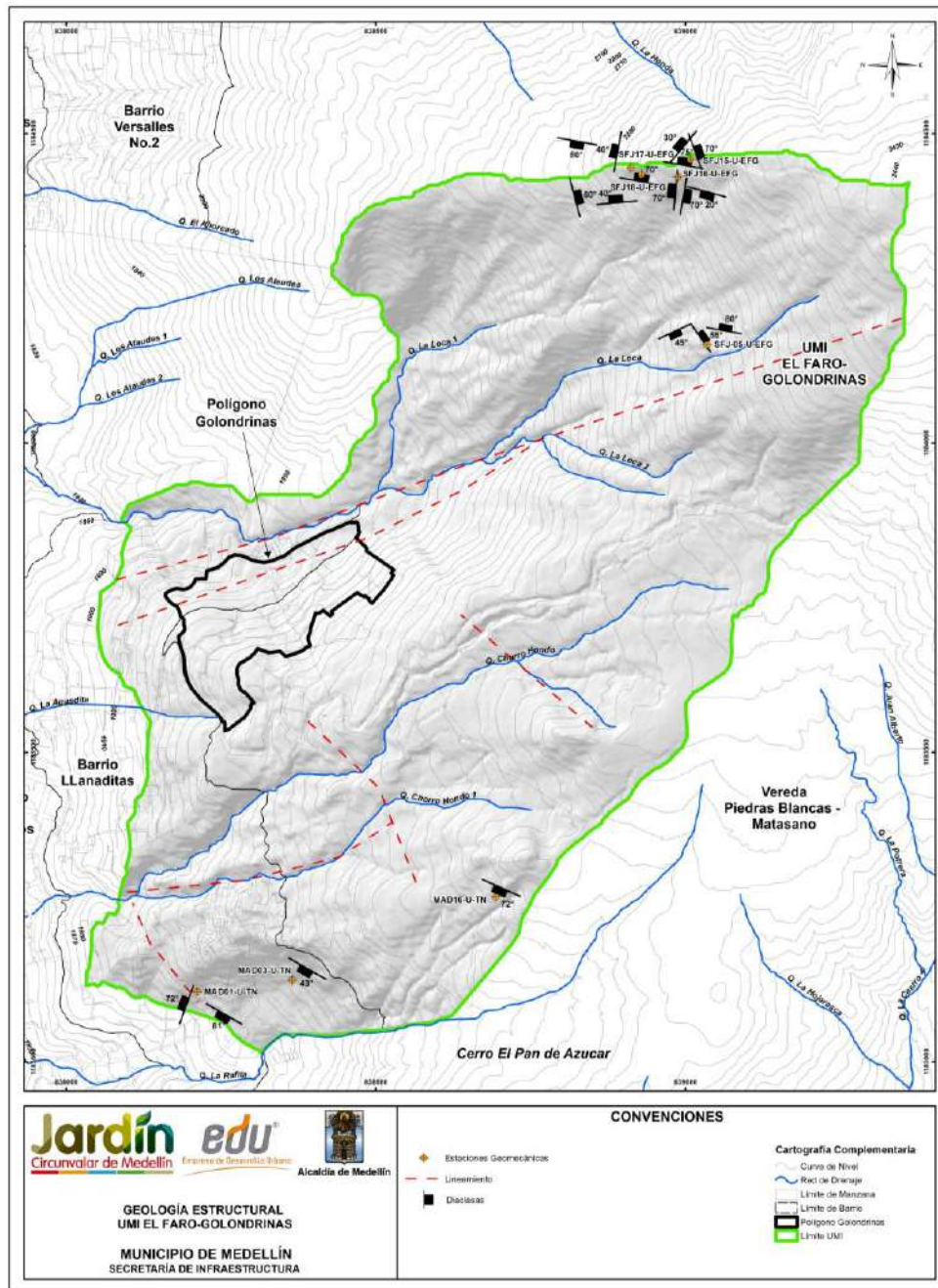
En la zona de estudio, el Consortio Microzonificación (2006) reporta estructuras geológicas para las Dunitas de Medellín, tales como diaclasas, cizallas y fallas, cuyos datos de rumbo/buzamiento fueron tomados en el municipio de Envigado y en el corregimiento de Santa Elena, tal y como se muestra en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

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



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

### 6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la UMI El Faro - Golondrinas se encontraron estructuras tales como lineamientos geológicos, discontinuidades y zonas de cizalla, las cuales se muestran en el Mapa 14.



Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI El Faro - Golondrinas  
(12\_GOLGeologiaEstructural\_Medellin\_C y 12\_GOLGeologiaEstructural\_Medellin\_T)

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

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

A través de los análisis geomorfológicos y fotogeológicos, se encontraron lineamientos con tendencias NE-SW paralelos a la quebrada La Loca y la quebrada Chorro Hondo 1, y otros lineamientos con orientación NW-SE.

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

Para la caracterización de los afloramientos del macizo rocoso evidenciado en la UMI El Faro - Golondrinas, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas en los afloramientos. El análisis de discontinuidades, inició con el levantamiento manual en campo de los planos de discontinuidades. La toma de información se realizó mediante el establecimiento de estaciones geomecánicas en las cuales se hacía la descripción del macizo tomándose las respectivas medidas y características de las discontinuidades. Las estaciones geomecánicas se repartieron a lo largo de la UMI. El levantamiento de campo comprendió la toma de información del macizo rocoso correspondiente a la medida de la orientación de los planos de discontinuidad, la observación y consignación de las características de espaciamiento, continuidad, abertura, relleno, alteración, rugosidad, agua, y la resistencia de las paredes.

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

### **6.2.1 Orientación y buzamiento**

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

En el Mapa 14 también se presenta la localización de las estaciones geomecánicas mostradas en la Tabla 7 donde se realizaron las medidas de discontinuidades. En el Anexo 01 de este informe se presentan los formatos de levantamiento en campo, en los cuales se establecen las características de las discontinuidades medidas en campo.

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

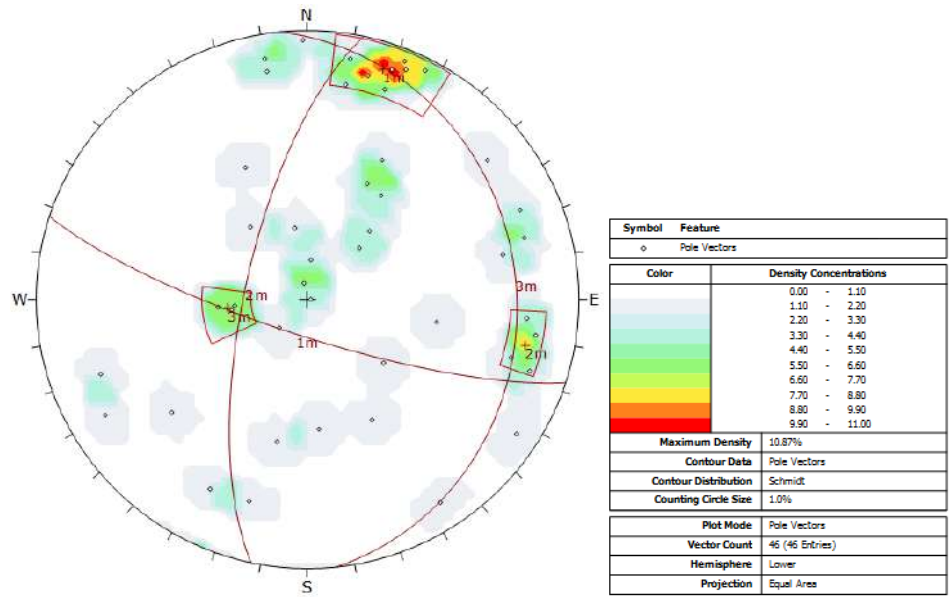
Estación	Coordenadas		Número de Datos
	Norte	Este	
SFJ05-U-EFG	839034	1184158	3
SFJ15-U-EFG	839007	1184458	3
SFJ16-U-EFG	838987	1184429	3
SFJ17-U-EFG	838928	1184433	3
SFJ18-U-EFG	838912	1184444	2
MAD01-U-TN	838211	1183113	11
MAD03-U-TN	838364	1183131	13
MAD-16-U-TN	838693	1183266	9

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

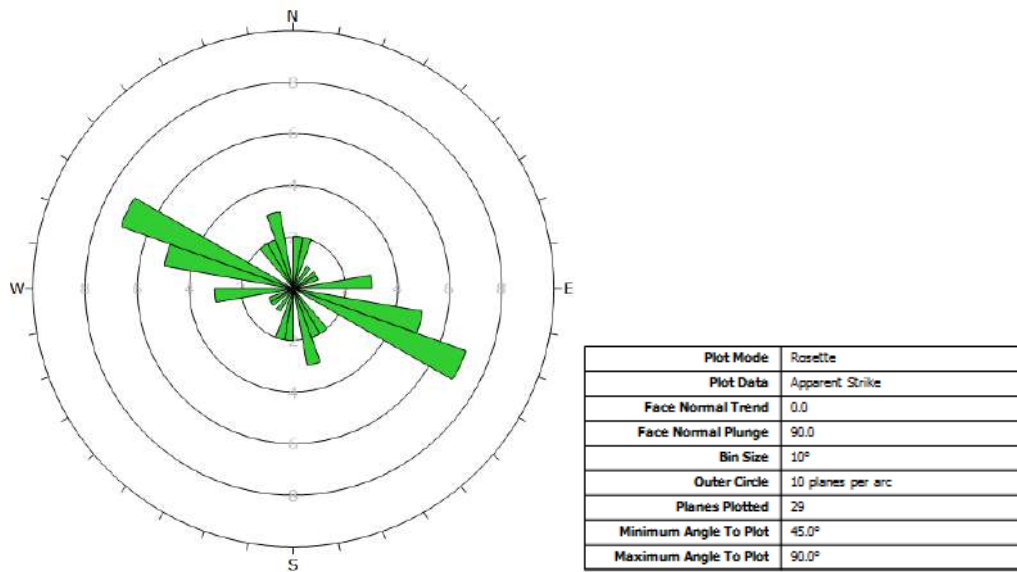
Posteriormente, se hizo un análisis local, analizando cada estación por separado. De esta forma se quiere entender si el patrón de fracturamiento general se puede particularizar por zonas.

La Figura 62 presenta el diagrama de polos y en la Figura 63 el diagrama de rosas, obtenidos con todas las discontinuidades tomadas en las estaciones geomecánicas. Se pueden observar concentraciones de polos que permiten definir, en principio, cuatro tendencias (familias) principales, con las características que se muestran en la Tabla 8.





**Figura 62. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades**

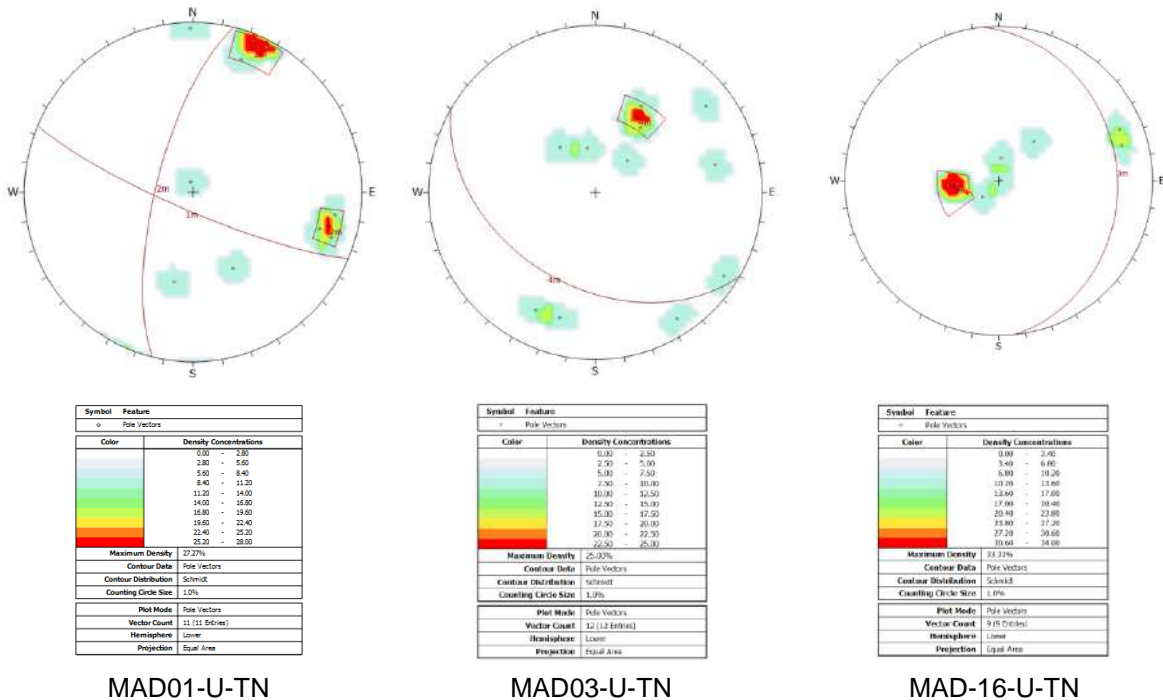


**Figura 63. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades**

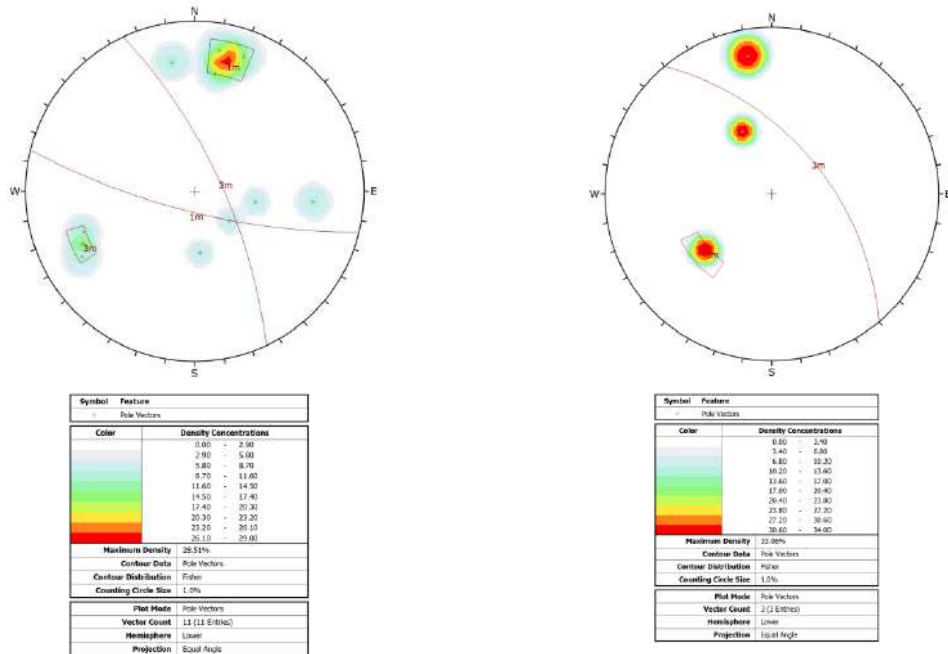
**Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos**

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	79°/198°	N72°W/79°SW	4.4-11
2	71°/282°	N12°E/71°NW	4.4-8.8
3	24°/84°	N66°W/24°NE	4.4-6.6

El análisis local de las discontinuidades consistió en revisar en la red estereográfica los datos levantados en cada una de las estaciones geomecánicas. El objetivo de este análisis es identificar la posible existencia de una tendencia especial en algunas de las familias principales observadas en el análisis general. Los diagramas de polos para las estaciones geomecánicas se muestran en la Figura 64.



**Figura 64. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN**



SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG

SFJ05-U-EFG

**Figura 65. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG y SFJ05-U-EFG**



En general, las estaciones muestran una familia, mientras que la Estación MAD01-U-TN muestra dos familias de discontinuidades. Los diagramas de polos se detallan en la Figura 64 y en la Figura 65.

**Tabla 9. Familias de discontinuidades en la Estación MAD01-U-TN**

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	81/203	N67°W/81°SW	11.2– 28
2	72/284	N14°E/72°NW	11.2– 28

**Tabla 10. Familias de discontinuidades en la Estación MAD03-U-TN**

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
4	43/210	N60°W/43°SW	10 – 25

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

**Tabla 11. Familias de discontinuidades en la Estación MAD16-U-TN**

<b>Familia</b>	<b>Buzamiento/Dirección Buzamiento</b>	<b>Rumbo/Buzamiento</b>	<b>Concentración (%)</b>
3	24/83	N66°W/24°NE	13.6– 34

**Tabla 12. Familias de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG**

<b>Familia</b>	<b>Buzamiento/Dirección Buzamiento</b>	<b>Rumbo/Buzamiento</b>	<b>Concentración (%)</b>
1	76/194	N76°W/76°SW	26.10 – 29
3	72/65	N25°W/72°NE	14.5 – 17.4

Los resultados observados en la Estación de Campo MAD01-U-TN correlacionan muy bien con el patrón de discontinuidades global de la UMI, donde la familia de discontinuidades encontrada tiene orientación similar a la Familia 1 del análisis general.

En las Estaciones MAD01-U-TN y MAD16-U-TN, las Familias 2 y 3 se correlacionan con el patrón de discontinuidades global de la UMI. Además, aparece una Familia 4 en la Estación MAD03-U-TN. Aunque cuentan con pocos datos, han de tenerse en cuenta en el análisis, puesto que fueron discontinuidades identificadas en campo.

Debido a la cantidad de datos en la Estación SFJ05-U-EFG, no se obtienen familias de discontinuidades representativas, pero las discontinuidades se tienen en cuenta en el análisis porque fueron identificadas en campo. Además, se observa que una de las discontinuidades coincide con la orientación de la Familia 3.

En las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG, las Familias 1 y 3 se correlacionan con las familias de discontinuidades del análisis global.

Los resultados obtenidos en el análisis general y local indican que la UMI El Faro - Golondrinas tiene tres tendencias de discontinuidades, de las cuales una se considera familia principal (Familia 1) y las otras dos secundarias (Familias 2 y 3). La Familia 1 (N72°W/79°SW), es semejante a los lineamientos trazados a lo largo de la zona de estudio, presentando una tendencia NW, la cual se asocia regionalmente a la falla Santa Elena muestra la tendencia principal para esta UMI. Las Familias 2 y 3 del análisis local, se correlacionan de forma directa con las estructuras geológicas reportadas a escala local, por ello, se asumen como discontinuidades de las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN.



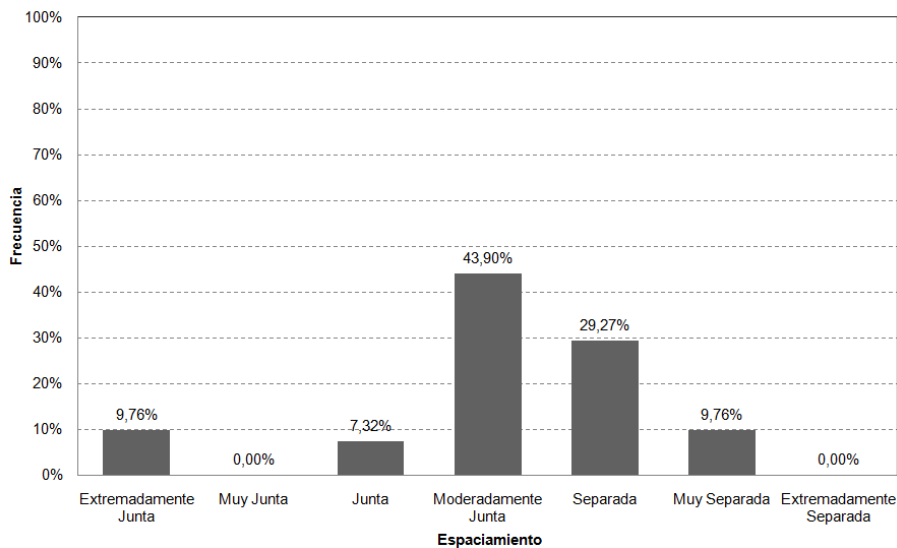
### 6.2.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad en una misma familia. Influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques. Los rangos empleados para la categorización de esta propiedad son los indicados a continuación en la Tabla 13.

**Tabla 13. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades**

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

En la Figura 66 se presentan los respectivos resultados obtenidos. En los levantamientos realizados predominan discontinuidades entre moderadamente juntas y separadas las cuales acaparan el 73% de la totalidad de los levantamientos.



**Figura 66. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades**

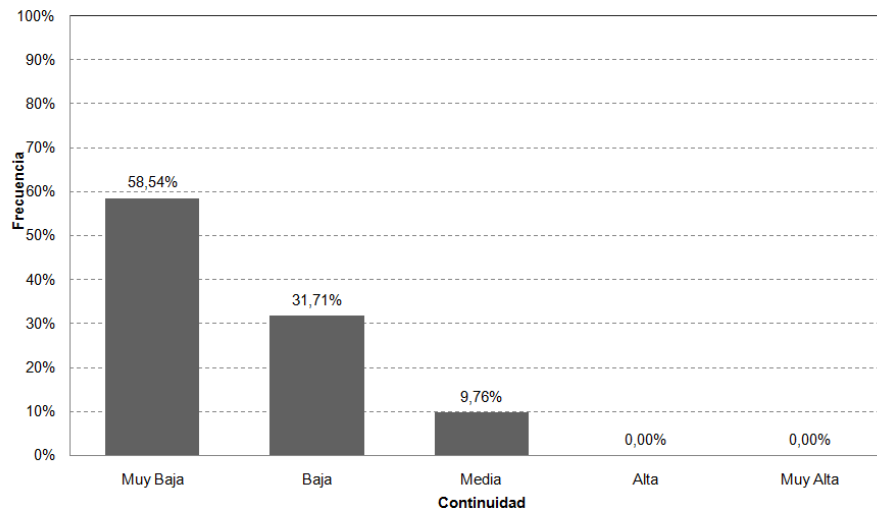
### 6.2.3 Continuidad

Se trata de la extensión del plano de discontinuidad en el rumbo. Los rangos para la categorización de esta propiedad son los mostrados en la Tabla 14.

**Tabla 14. Descripción de la continuidad de las discontinuidades**

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

Se obtuvieron finalmente los resultados que se muestran en la Figura 67. En términos de la continuidad, el 58.54% de las discontinuidades levantadas presentaron una continuidad muy baja la cual corresponde a planos con longitudes de hasta 1.0 m. El 41.46% restante presentaron continuidades bajas y medias, es decir entre 1.0 m a 10 m.



**Figura 67. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades**

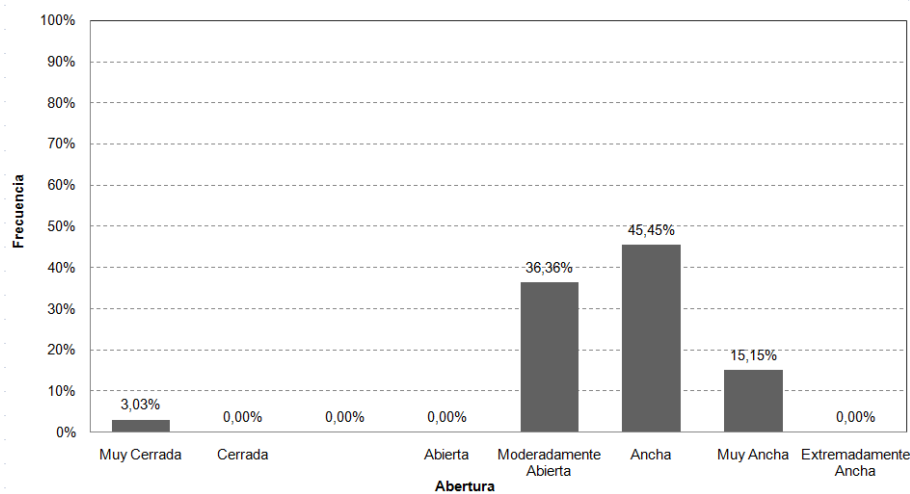
### 6.2.4 Abertura

Corresponde a la distancia perpendicular al buzamiento que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede tener grandes cambios a lo largo del macizo rocoso. Los rangos para esta clasificación son los mostrados a continuación en la Tabla 15.

**Tabla 15. Descripción de la abertura de las discontinuidades**

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

Con base en los en los rangos de la Tabla 15, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 68. Las discontinuidades se presentaron predominantemente ancha ya sea variando entre parcialmente o extremadamente abiertas, esto equivale a tener discontinuidades con aberturas entre 0.25 mm hasta 100 cm. Los procesos que más favorecen la abertura de estos planos se asocian a la meteorización y disolución en la roca que amplían la zona discontinua.



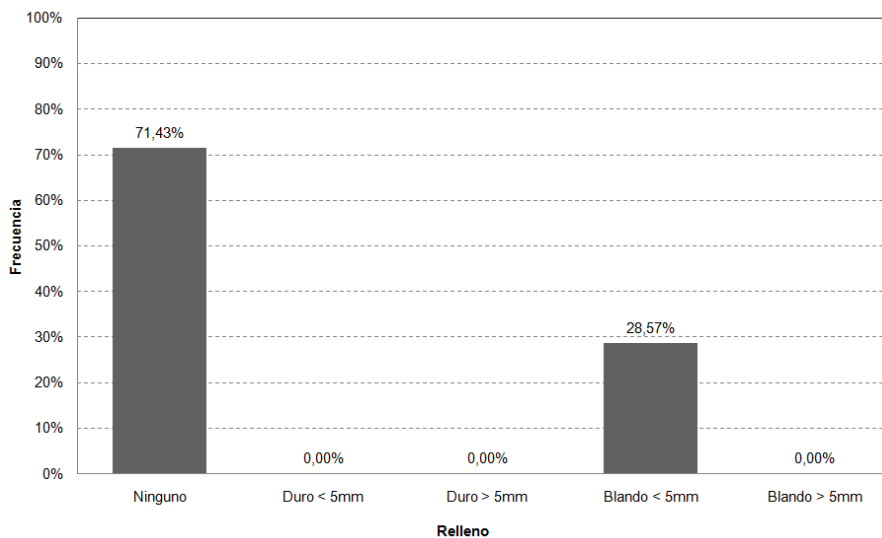
**Figura 68. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades**

### 6.2.5 Relleno

En ocasiones, en las discontinuidades puede aparecer relleno de materiales blandos arcillosos o con materiales rocosos de naturaleza distinta a la de las paredes. Las

propiedades físicas y mecánicas del relleno pueden ser variables y controlan el comportamiento de la discontinuidad. Los rangos de esta característica van desde ninguno, hasta duro de más o menos que 5 mm y blando de más o menos que 5 mm.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 69. En lo que respecta al relleno, las discontinuidades conformada por el 71.45%, no presentan ningún tipo de relleno al interior de la abertura, mientras el 28.57% restante de las discontinuidades presentan relleno generalmente con un material limoso u arcilloso muy húmedo y plástico que debe ser producto de la meteorización y precipitación del suelo.



**Figura 69. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades**

### 6.2.6 Alteración

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

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 70. La discontinuidades levantadas en cada una de las estaciones geomecánicas mostraron un nivel entre ligeramente alterada y muy alterada.

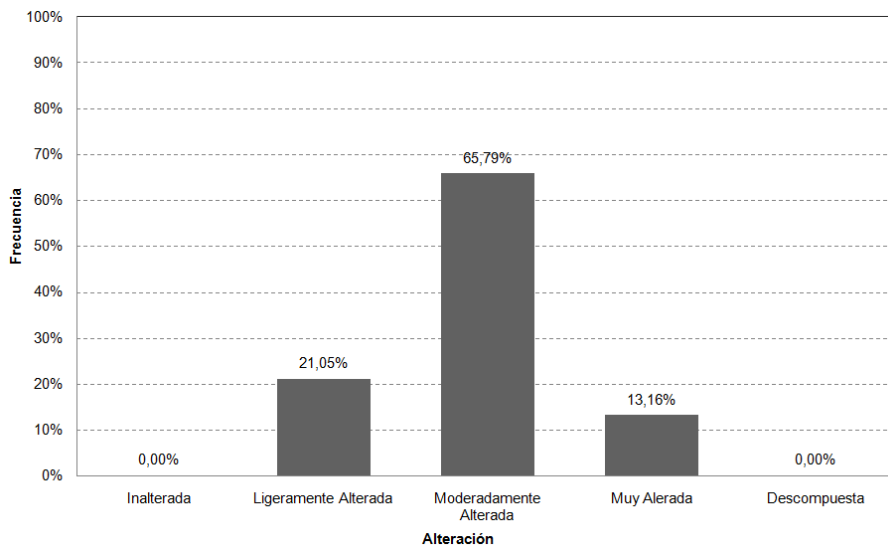
### 6.2.7 Rugosidad

Esta propiedad determina la resistencia al corte de la discontinuidad. A mayor rugosidad, mayor es la resistencia. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. La rugosidad de las discontinuidades se calificó según dos escalas diferentes, como se

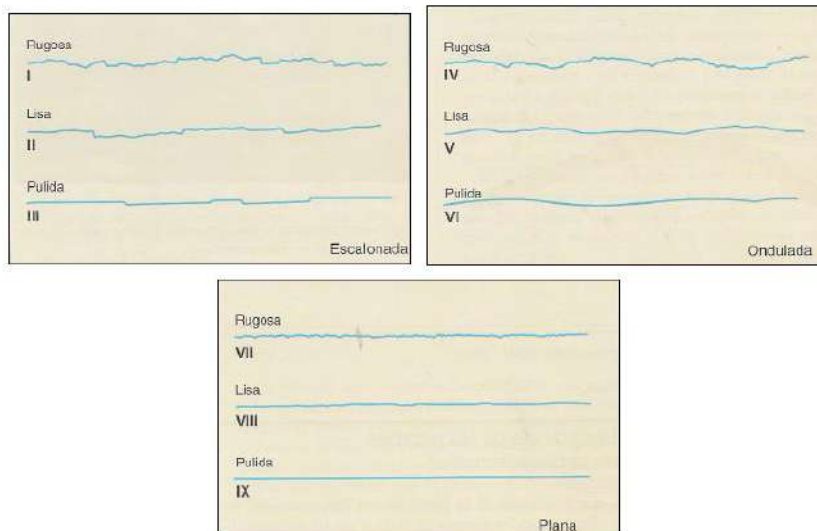


muestra en la Figura 71. Primero la escala decimétrica o métrica, la cual puede ser escalonada, ondulada o plana. Luego se juzgó la escala centimétrica o milimétrica que da lugar a discontinuidades rugosas, lisas o planas.

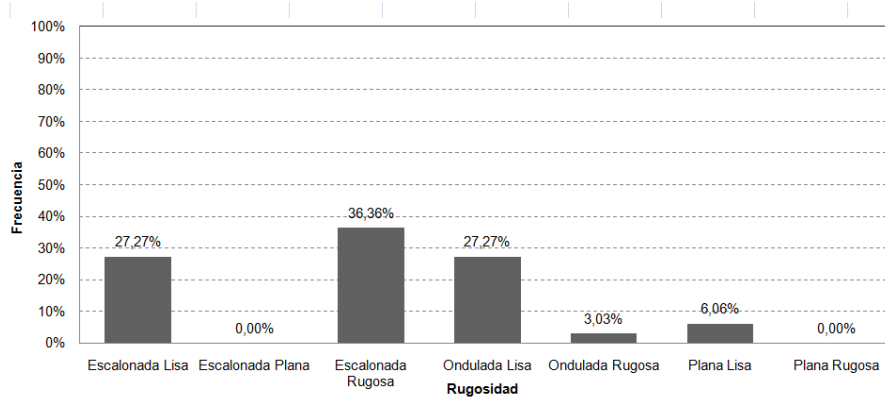
Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 72. En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentaron predominantemente escalonadas con un 63.63%, ondulada con un 30.3% y plana con un 6.06%. Entre los tres tipos se resalta que la mayoría de las discontinuidades se presentan lisas.



**Figura 70. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades**



**Figura 71. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002)**

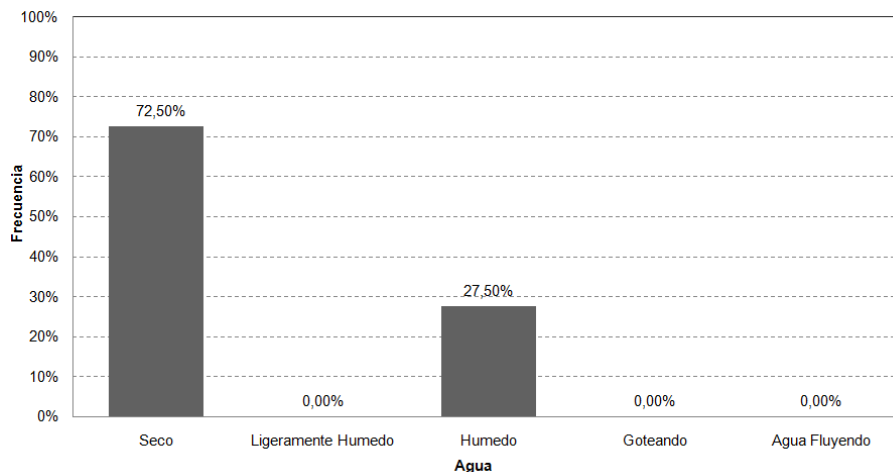


**Figura 72. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades**

### 6.2.8 Agua

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

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 73. Desde el punto de vista de las condiciones de humedad identificadas en las discontinuidades, la mayoría de las mismas presentaron condiciones secas y húmedas.

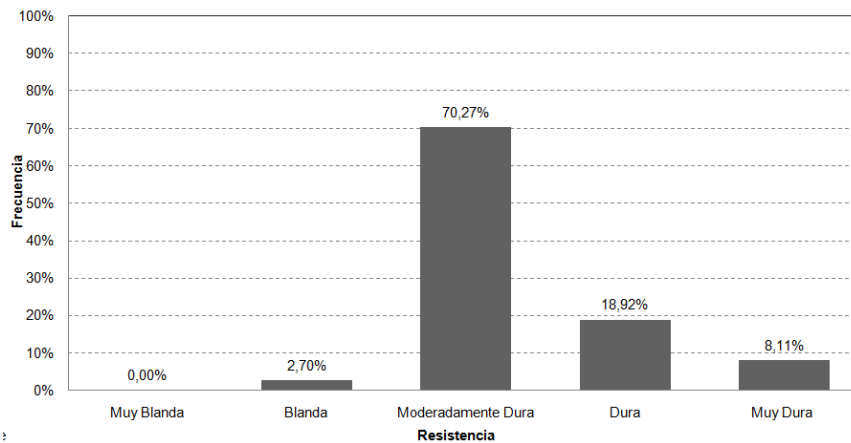


**Figura 73. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades**

### 6.2.9 Resistencia de las paredes

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

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 74. Desde el punto de vista de la resistencia, el material observado en campo presenta una resistencia moderadamente dura a muy dura con un porcentaje del 97.3%, mientras sólo el 2.7% se presenta blanda.



**Figura 74. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades**

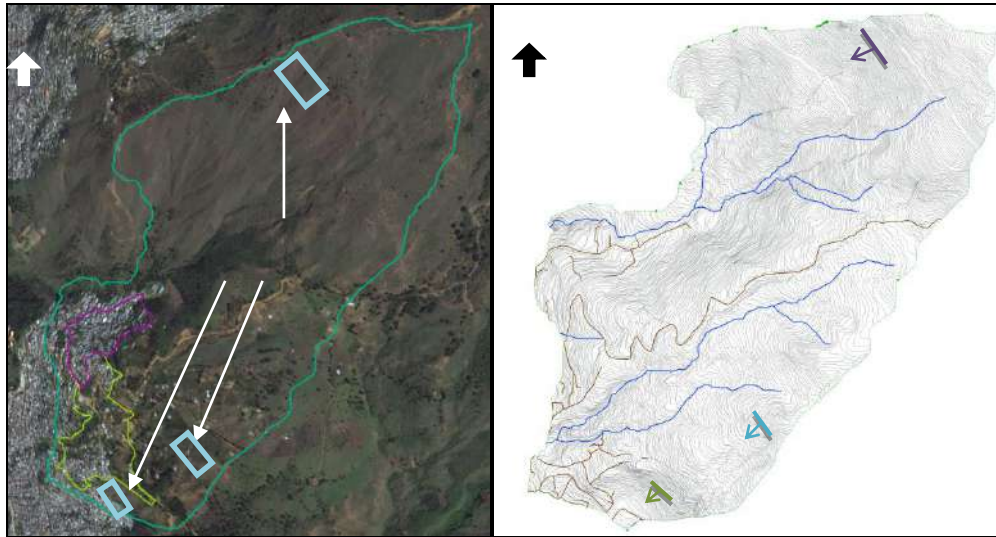
### 6.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En este numeral se presenta el análisis cinemático basado en la geología estructural presentada anteriormente. Este análisis se llevó a cabo para tres secciones cerca de las cuales se tomaron datos estructurales o se observaron escarpes en roca, localizados, como se muestra en la Figura 75 y en la Tabla 16.

En primer lugar, se determinó la dirección y buzamiento de las secciones analizadas y, además, se determinó el ángulo de fricción de las discontinuidades de acuerdo con lo observado en campo. A partir de las características de relleno y alteración de las discontinuidades se definió un ángulo de fricción de 25° considerando que es el límite inferior, según la clasificación de Barton et al. (1974), para un índice de alteración de las discontinuidades (Ja) de 2, es decir, para “planos de discontinuidades ligeramente alterados que presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.”.

Con los datos de las secciones y el ángulo de fricción de las discontinuidades, se llevó a cabo el análisis cinemático haciendo uso del Software Dips de Rocscience, el cual permite analizar fallas planares, por cuña, por volcamiento flexural y por volcamiento directo, entregando gráficamente la zona crítica para cada una de estas fallas, así como la

probabilidad de falla de cada mecanismo, de acuerdo con el número de elementos críticos en comparación con el número total de elementos.



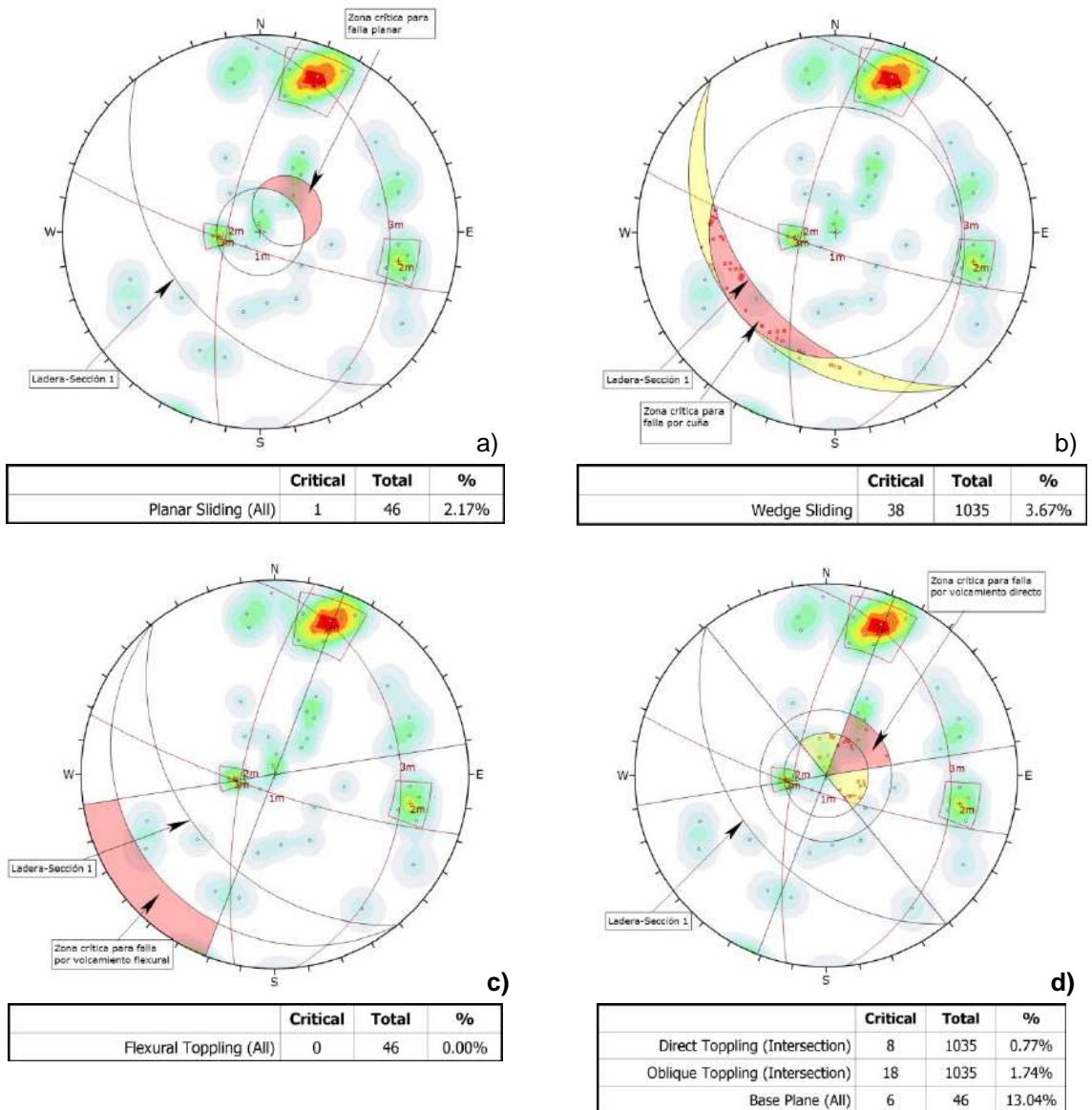
**Figura 75. Secciones analizadas en la UMI El Faro-Golondrinas**

**Tabla 16. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas**

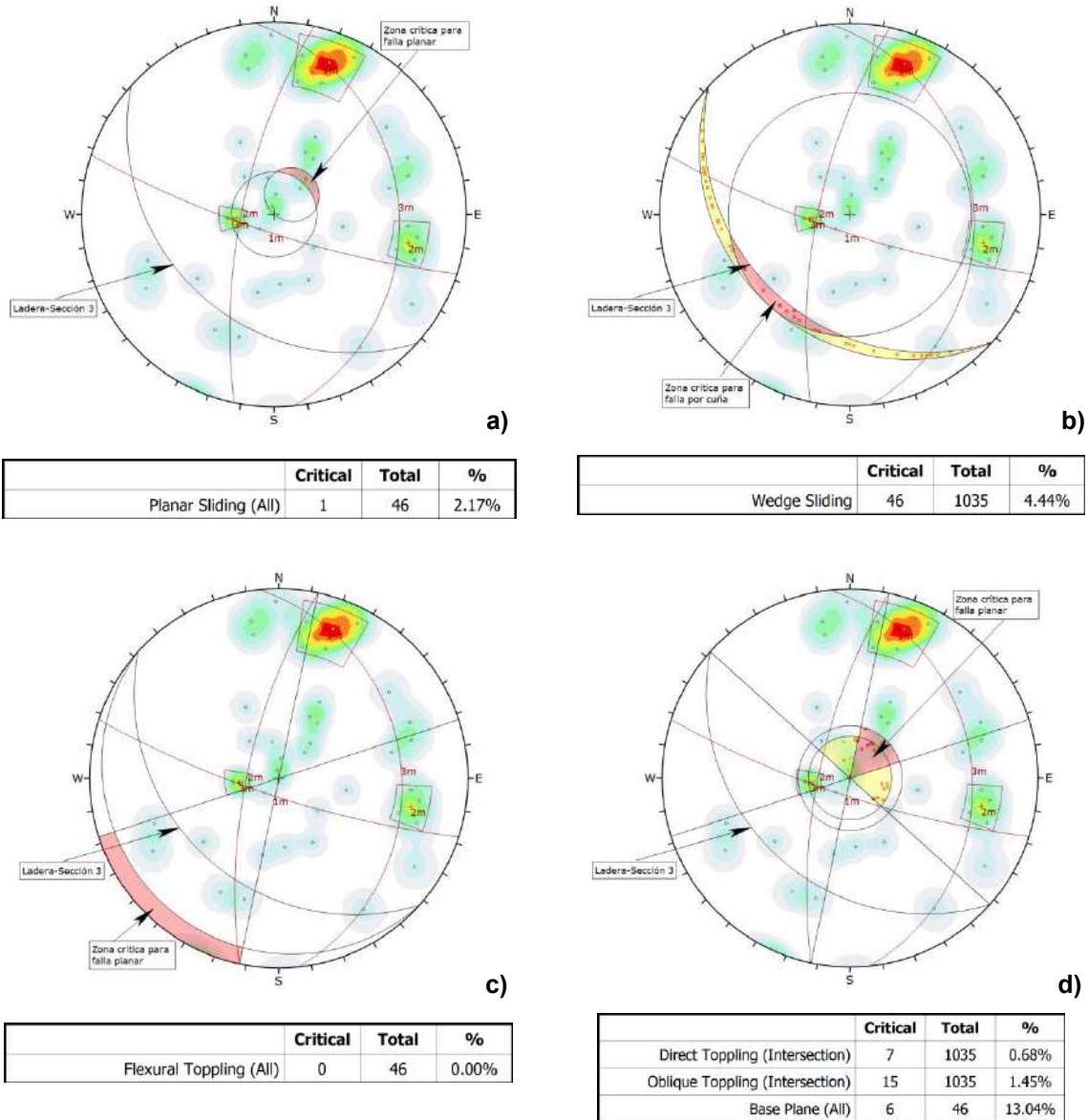
Sección	Buzamiento	Dirección del Buzamiento
1	38°	231°
2	36°	235°
3	31°	222°

Como se observa en la Tabla 16, las tres secciones escogidas tienen orientaciones similares, en la Sección 1 es de N39°W/38°SW), en la Sección 2 es de N35°W/36°SW y en la Sección 3 es de N48°W/31°SW. Por la similitud demostrada, se realizará un sólo análisis para las Secciones 1 y 2. Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran en la Figura 76 y en la Figura 77, mientras que los resultados numéricos se presentan en la Tabla 17. En las observaciones de la tabla se incluyen las probabilidades de falla para las familias más críticas de cada mecanismo.







**Figura 76. Análisis cinemático Secciones 1 y 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo**



**Figura 77. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo**

**Tabla 17. Resumen resultados análisis cinemático**

Sección	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base	Observaciones
1 y 2	2,17%	3,67%	0,00%	0,77%	1,74%	13,04%	No se encontraron familias críticas para los mecanismos de falla.
3	2,17%	4,44%	0,00%	0,68%	1,45%	13,04%	No se encontraron familias críticas para los mecanismos de falla.

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

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis cinemático de la UMI (Tabla 17) se puede concluir que no hay un mecanismo con probabilidad de falla mayor a 20%. El mecanismo de falla con mayor probabilidad es el volcamiento (mecanismo por la base) con un 13% en todas las secciones. El volcamiento flexural tiene un 0% de probabilidad de ocurrencia. En las secciones analizadas se presenta intersección entre las Familias 1 y 3, aunque la dirección de la línea de intersección es igual a la dirección de buzamiento del talud, no se favorece la formación de cuñas debido a que la inclinación de esta intersección no es menor que el buzamiento del talud. El porcentaje de probabilidad de falla por cuña es aproximadamente 4% en todas las secciones.

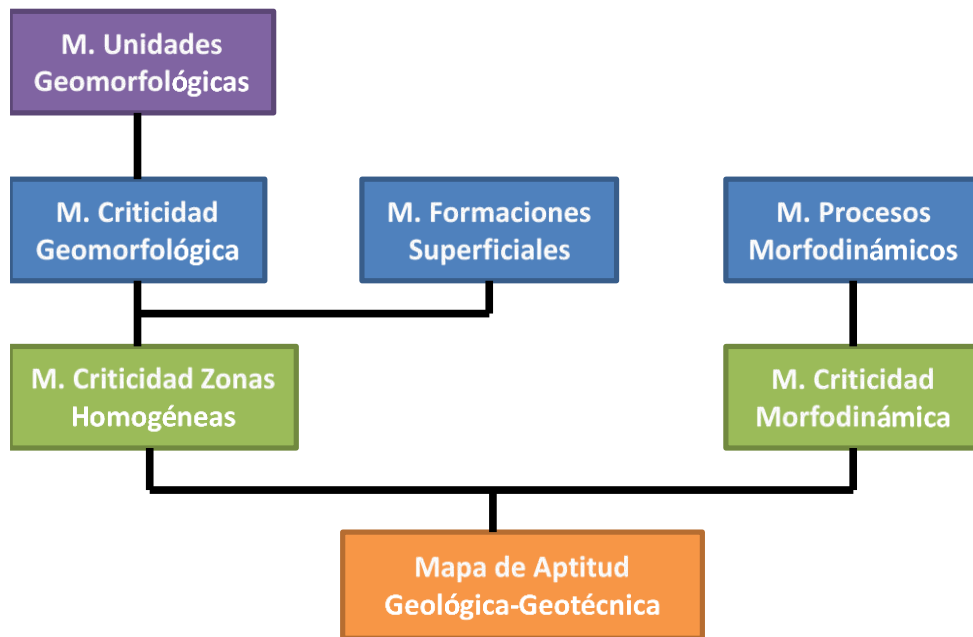
## 7. EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA

### 7.1 ASPECTOS GENERALES

Basados en el Código de Laderas del AMVA (2012), una vez ejecutados los estudios geológicos y geomorfológicos para la UMI de estudio, se procedió a la realización del mapa de zonificación de la aptitud geológica de la UMI El Faro-Golondrinas.

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

A continuación se describe la metodología implementada, la cual se resume además en la Figura 78.



**Figura 78. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica**

Como se observa en la Figura 78, la metodología lleva finalmente a la generación de tres mapas importantes, el de criticidad de zonas homogéneas, a partir del mapa de criticidad geomorfológica y del mapa de formaciones superficiales, el de criticidad morfodinámica y el de zonificación de la aptitud geológica.



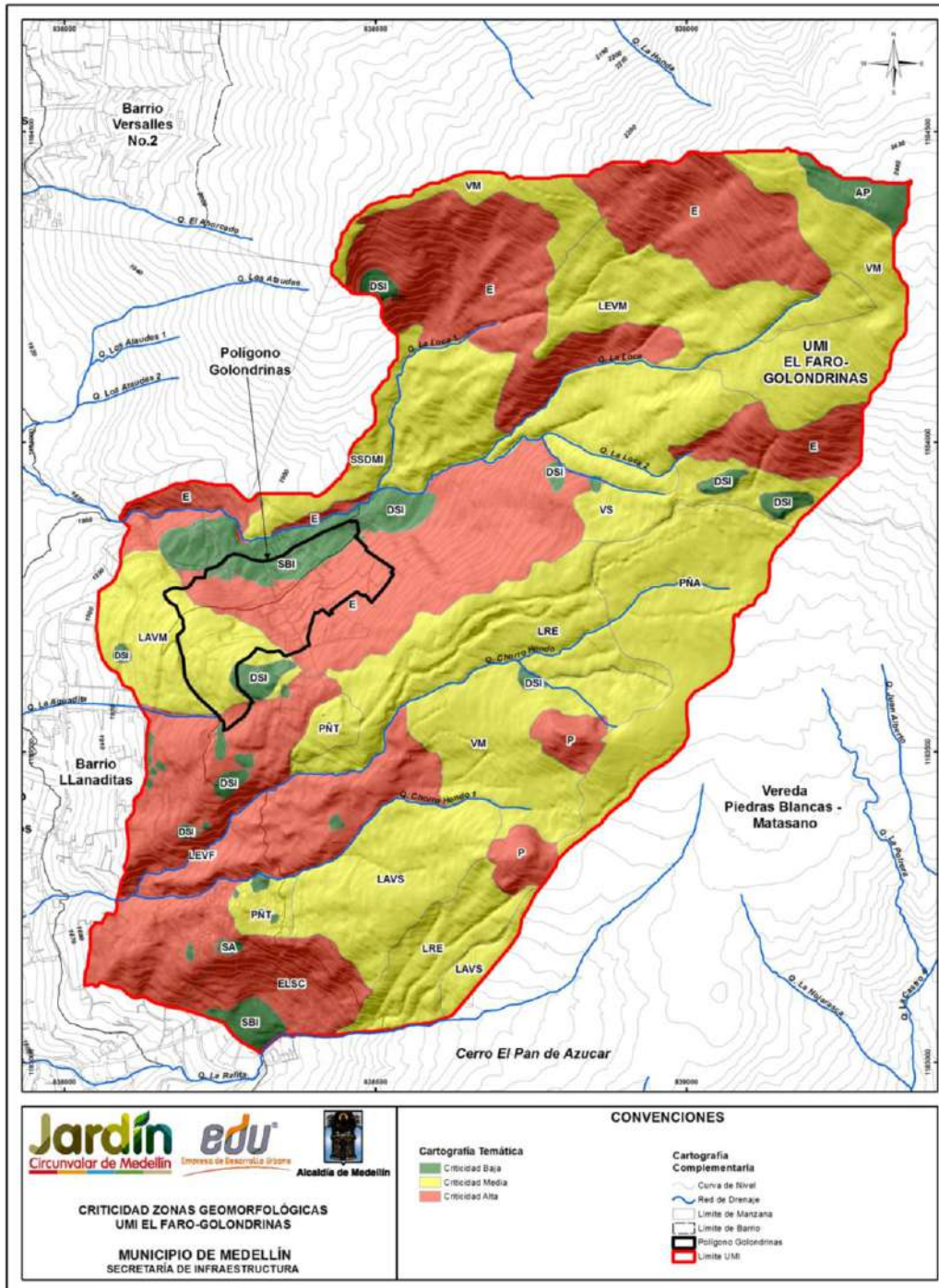
## 7.2 MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS

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

Para cada unidad geomorfológica se asigna un valor de criticidad según la pendiente y la geoforma asociada (Tabla 18). Se da un valor cualitativo entre alto, medio y bajo, equivalente a un valor de peso en una escala numérica de 1 a 3 y a colores de verde, amarillo y rojo. El color verde es para el Nivel 1 (Bajo), el amarillo para el Nivel 2 (Moderado) y el rojo para el Nivel 3 (Alto). En el Mapa 15 se muestra el análisis de la criticidad geomorfológica obtenido para la UMI El Faro-Golondrinas.

**Tabla 18. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas**

<b>Unidad Geomorfológica</b>	<b>Nivel de Criticidad</b>
Altiplano	1
Depósitos Sin Incisión	1
Escarpe	3
Escarpe Largo Semicircular	3
Lomeríos estrechos	2
Lomo Amplio con Vertientes Suaves	2
Lomo Amplio con Vertientes Moderadas	2
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas	2
Peldaño Alto	2
Peldaño Tectónico	2
Picacho	3
Superficie Antrópica	1
Superficies con Baja Incisión	1
Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	2
Vertiente Moderada	2
Vertiente Suave	2



**Mapa 15. Criticidad geomorfológica UMI El Faro - Golondrinas (GOLCriticidadZonasGeomorfologicas\_Medellin\_C)**

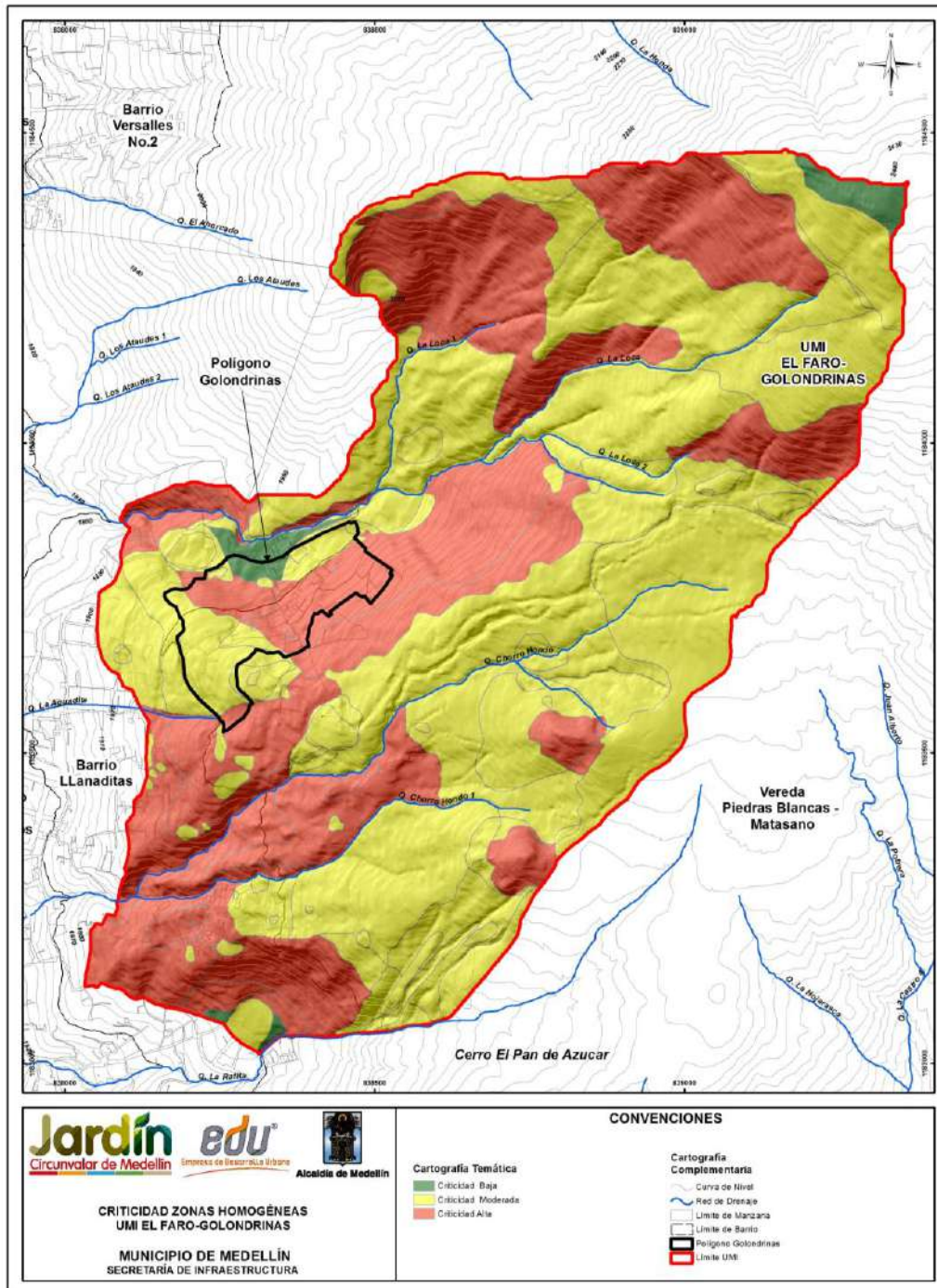
Posteriormente, se evalúa el mapa de criticidad geomorfológica en función de las formaciones superficiales, según las características de cada material. A partir de lo anterior, se obtiene la criticidad de las zonas homogéneas utilizando las combinaciones que se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas**

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

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





Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI El Faro - Golondrinas  
(GOLCriticidadZonasHomogeneas\_Medellin\_C)

### 7.3 MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA

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

Para la definición del mapa de densidad de procesos morfodinámicos, se debió determinar la unidad de cálculo del terreno (UCT). Esta se definió de acuerdo con la recomendación planteada en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015) del Servicio Geológico Colombiano (SGC). La UCT definida fue de 400 m<sup>2</sup> (malla de 20 m x 20 m), ya que la escala de trabajo es 1:2.000.

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

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

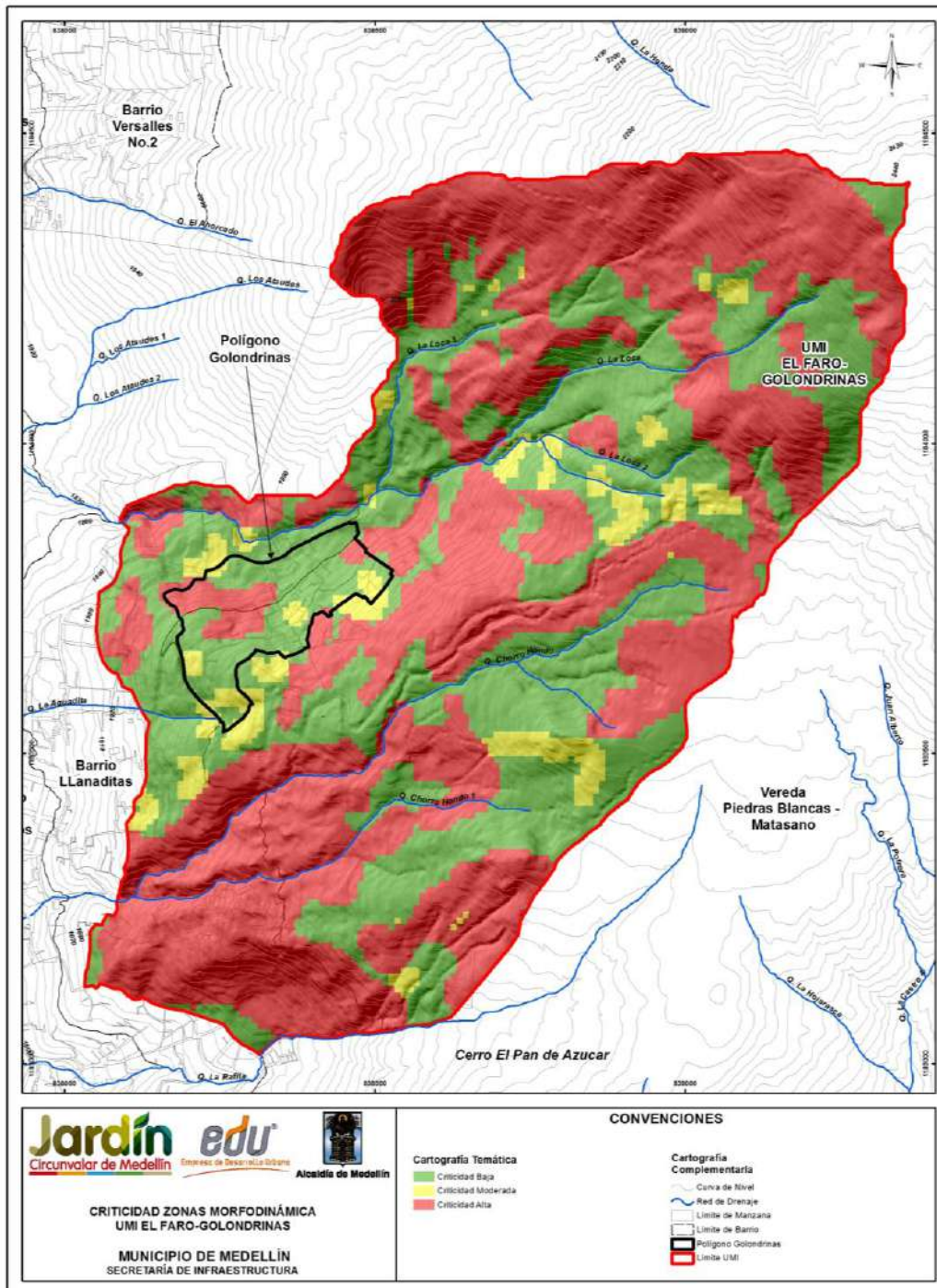
Luego de lo anterior, se hizo una zonificación de la zona de estudio de acuerdo con el grado de actividad de los procesos morfodinámicos, dividiéndose estos en activos e inactivos. Finalmente, se llevó a cabo la integración de los resultados y la clasificación de la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica, de acuerdo con los criterios de decisión que se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20. Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica**



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

Una vez obtenido el mapa con la metodología planteada, se hicieron ajustes en la criticidad de las zonas, de acuerdo con lo observado en campo (método holístico). En el Mapa 17 se presenta la criticidad morfodinámica de la UMI El Faro-Golondrinas obtenido con la metodología descrita anteriormente, en donde verde corresponde al Nivel 1 (bajo), amarillo al Nivel 2 (moderado) y rojo al Nivel 3 (alto).





**Mapa 17. Criticidad morfodinámica UMI El Faro - Golondrinas (GOLCriticidadMorfodinamica\_Medellin\_C)**

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

#### 7.4 MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA

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

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

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



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

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

En el Mapa 18 se presenta la aptitud geológica y geotécnica de la UMI El Faro - Golondrinas obtenido con la metodología descrita anteriormente.



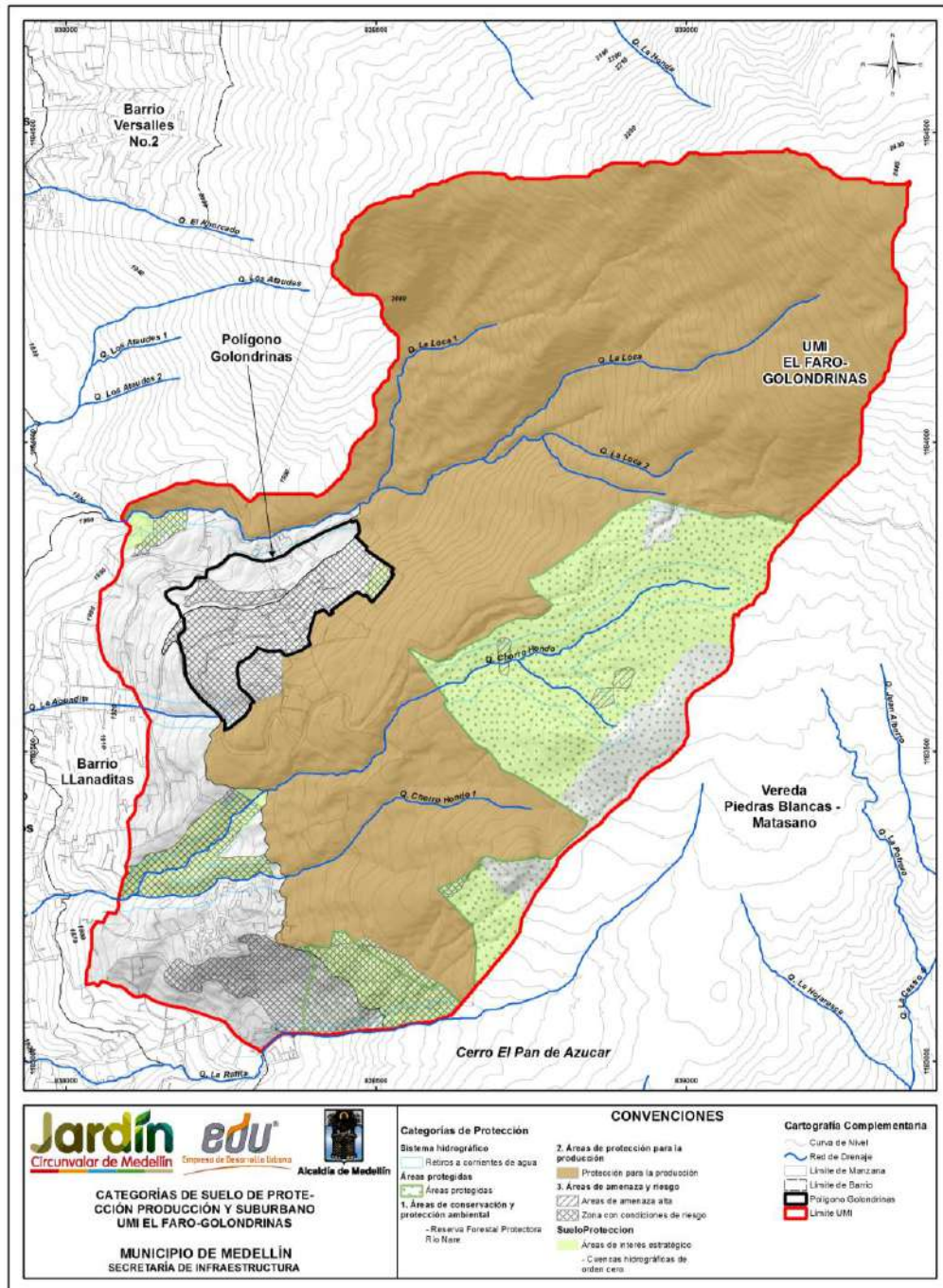


	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

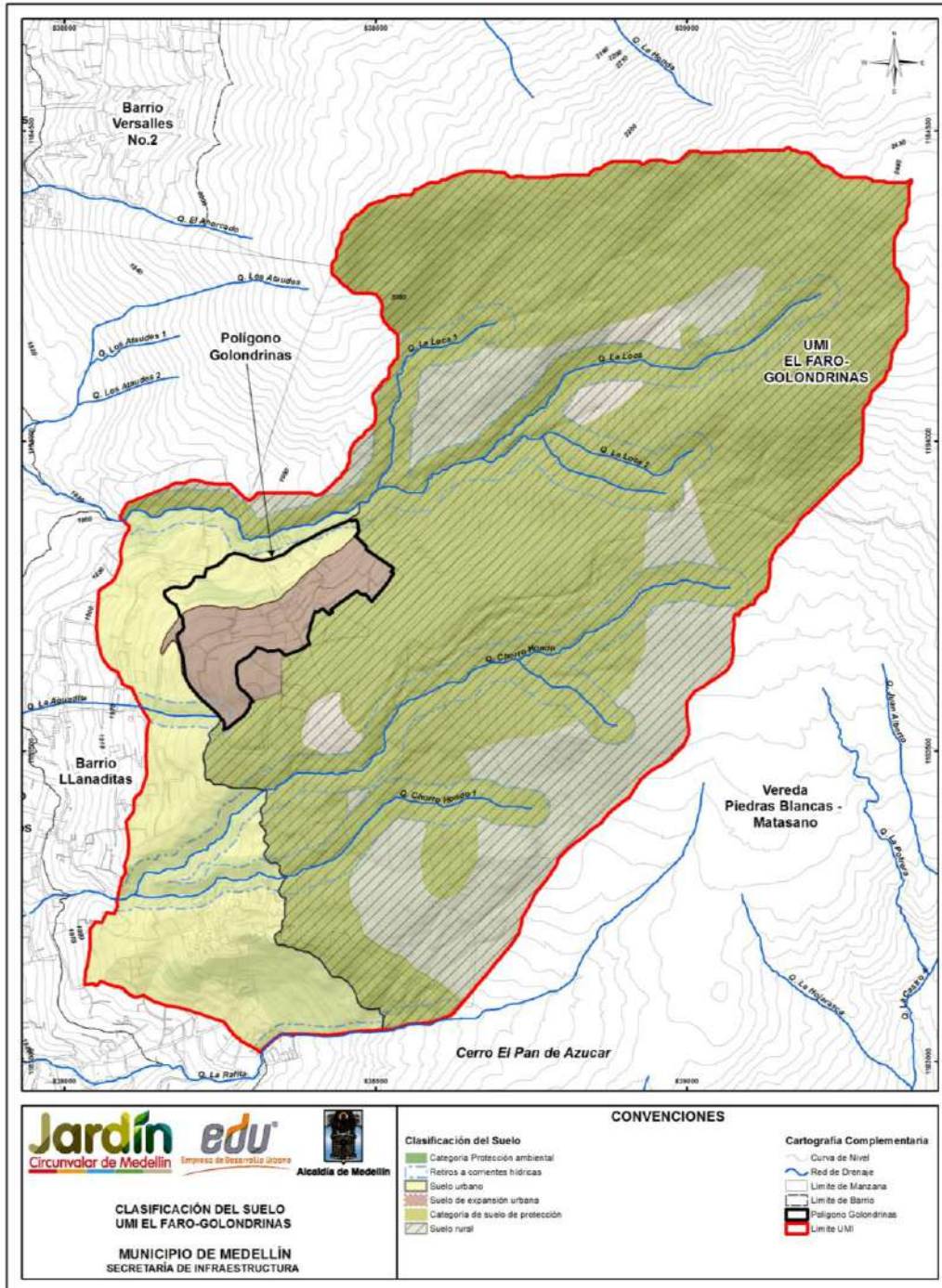
Este mapa obtenido está refinado con base en lo observado en campo y teniendo en cuenta las áreas que por norma tengan restricción, como lo son los retiros de las quebradas según las especificaciones del POT del municipio de Medellín. Además, se delimitaron otros retiros de quebradas que no han sido reportados en el Mapa de Estructura Ecológica del Acuerdo 48 de 2014, debido a la escala de trabajo.

- ✓ Las zonas aptas son las de menor ocurrencia en la UMI El Faro - Golondrinas. Se restringen a dos áreas menores, una en el extremo norte de la UMI y otra en la zona occidental, esta última ubicada en el extremo del Polígono Golondrinas.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones moderadas se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. La zona sur y norte del Polígono Golondrinas están clasificadas con esta aptitud, catalogando cerca del 40% del área total del polígono.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones altas se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. Al interior del Polígono Golondrinas se encuentra una franja central que clasifica cerca del 40% del polígono en esta categoría.
- ✓ Las zonas no aptas se distribuyen a lo largo de toda la UMI. Con esta clasificación se tienen áreas en la zona central y en áreas separadas del límite oriental del polígono en estudio.
- ✓ Las zonas no aptas por normatividad se encuentran en la parte oriental de la UMI y en franjas dispuestas a lo largo de los drenajes que la atraviesan. Estas zonas corresponden a la Reserva Forestal Protectora Río Nare y retiros de las quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, definidas por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014, como se identifica en el Mapa 19 y en el Mapa 20. Las quebradas La Loca, La Loca 1 y La Loca 2 tienen retiros de 60 m.
- ✓ En general la proporción de las zonas aptas con restricciones moderadas, aptas con restricciones altas, no aptas y no aptas por normatividad es similar en toda la UMI. Al interior del Polígono Golondrinas dominan las zonas aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones altas.







Mapa 19. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)  
(15\_GOLCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano\_Medellin\_C y  
15\_GOLCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano\_Medellin\_T)



Mapa 20. Clasificación del suelo (POT, 2014)  
(14\_GOLClasificaciondelSuelo\_Medellin\_C y 14\_GOLClasificaciondelSuelo\_Medellin\_T)



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

## **8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS**

### **8.1 ASPECTOS GENERALES**

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

En otras investigaciones (Hoyos, 2000) ha sido postulada la existencia de dos sistemas hidrogeológicos separados que descargan en el Valle de Aburrá (VA). El primero y más elevado, con su zona de recarga en el Planalto de Santa Elena (PSE), descarga en la parte alta de las laderas orientales del Valle de Aburrá. El segundo, cuya área de recarga se encuentra en el Valle de San Nicolás (VSN), descarga en la parte inferior de esas mismas laderas. En la Figura 79 pueden apreciarse las posiciones relativas de los Valles de San Nicolás a 2150 msnm y de Aburrá a 1550 msnm. Entre ambos valles se encuentra el Planalto de Santa Elena a 2550 msnm, con alturas máximas mayores que 2650 m. Los polígonos correspondientes al Proyecto Barrios Sostenibles se encuentran ubicados entre el Planalto de Santa Elena y el Valle de Aburrá.

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

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

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



**Figura 79. Localización esquemática de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)**

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

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



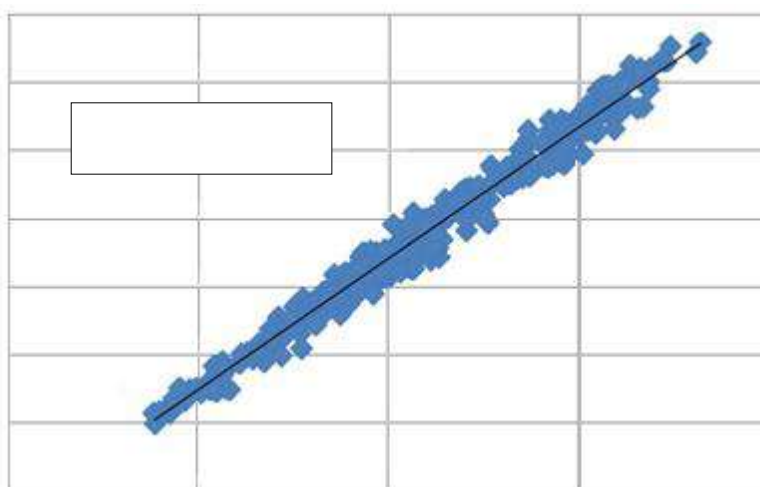
## 8.2 LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG

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

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

La Figura 80 ilustra la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia con base en 654 datos generados en todo el país, la cual se ajusta a la expresión:

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





**Figura 80. Recta Meteórica para Colombia**

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada en la Figura 80 por estar basada en un mayor número de datos.

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

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

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

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

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

La variación en la composición isotópica depende de las condiciones de evaporación y de condensación de las masas de agua en la hidrosfera, lo cual implica que ella depende básicamente de las condiciones de presión y temperatura del ambiente en que ocurre la evaporación o la condensación. Esta condición hace que en los análisis de hidrología isotópica sea necesario contar con muestras de agua lluvia representativas de períodos suficientemente largos que permitan suponer que ellas corresponden a las condiciones ambientales medias del sitio de muestreo. En este caso, los muestreadores de agua lluvia fueron instalados durante un período de tres meses que incluyó los meses de abril de 2015 a junio del mismo año. La toma de muestras se realizó mediante la instalación de pluviómetros artesanales que permitían el ingreso del agua lluvia evitando la evaporación en el tiempo (Figura 81). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

Específicamente en la Tabla 21 y en la Tabla 22 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 82 muestra gráficamente la relación Deuterio : Oxígeno 18 de estas muestras, diferenciando las aguas lluvias de las aguas de manantiales. Se puede observar que la relación Deuterio : Oxígeno 18 de las muestras colectadas en desarrollo de este proyecto se ajusta a la Recta Meteorica de Colombia, tratándose de una recta cuya pendiente es cercana a 8, lo que permite reconocer las muestras tomadas en manantiales como agua lluvia infiltrada (Figura 80 vs. Figura 82). La diferencia en el término independiente de la ecuación puede responder a condiciones meteorológicas particulares del área donde fueron tomadas las muestras.

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

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



Muestra EDU-02 Santa Elena R





Muestra EDU-06 CAI Torres

**Figura 81. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio**

**Tabla 21. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio**

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

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

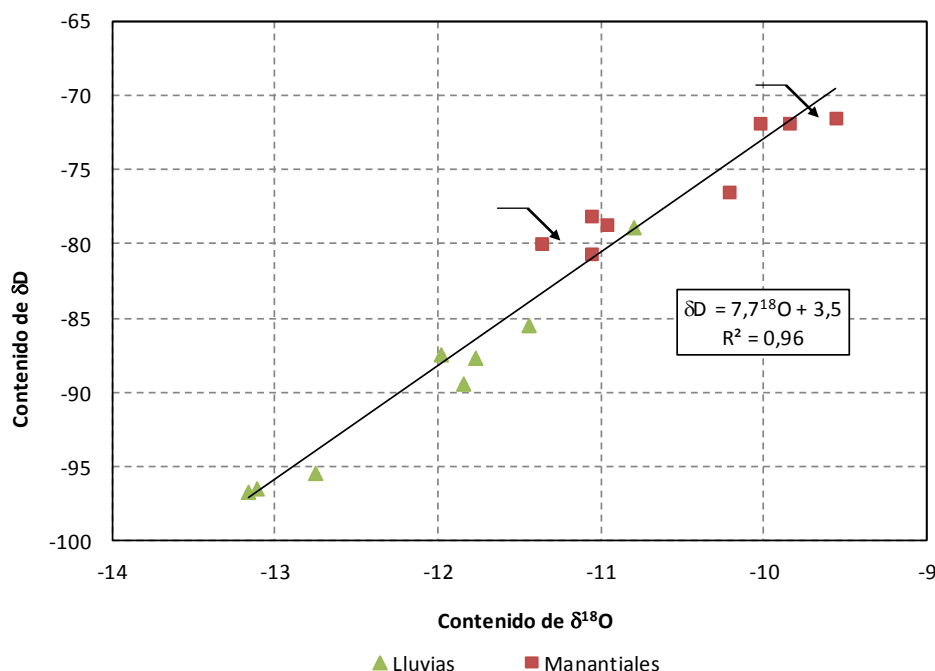
**Tabla 21. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio**

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

**Tabla 22. Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá**

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







**Figura 82. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental**

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

### 8.3 EL GRADIENTE OROGRÁFICO

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

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

La evaluación, identificación y valoración de esta función permite determinar un gradiente orográfico de contenido isotópico en el agua lluvia, información clave para determinar las zonas de recarga. En la Figura 83 y la Figura 84 se encuentran estas funciones para Colombia, con información desde el nivel del mar hasta el Parque Los Nevados (Rodríguez, 1990).

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

La evidencia isotópica, presentada de manera general para Colombia puede confirmarse para la vertiente oriental del Valle de Aburrá y para el área de interés de este proyecto, con los resultados obtenidos de los análisis isotópicos realizados para el presente informe que fueron presentados en la Tabla 22 y complementados con los de la Tabla 23. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 85 y Figura 86.

**Tabla 23. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá**

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰ $\delta$ D	‰ $\delta$ O18	Observaciones
OMO16	15/04/13	840101.30	1188537.29	2160	-83.3	-11.32	Altos de Oriente Tejas Arriba
OPB03	23/04/14	837340.15	1186344.78	1655	-79.1	-10.83	Qda. La Bermejala en estiaje
OPB05	26/05/14	837340.15	1186344.78	1655	-82.6	-11.53	Escorrentía en cuenca de Qda. La Bermejala
OPB06	16/05/14	839988.94	1189044.63	2060	-78.8	-10.77	Manantial
MAP11	21/06/14	837235.7	1186381.95	1630	-79.5	-10.96	Pozo

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

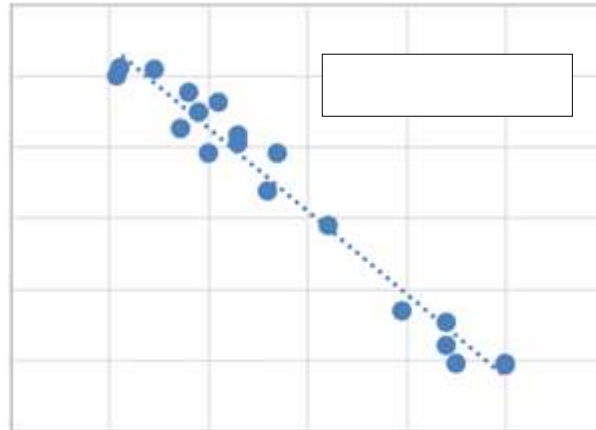


Figura 83. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

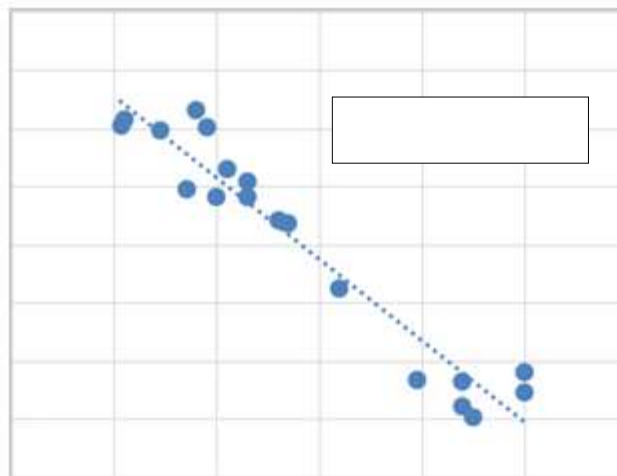
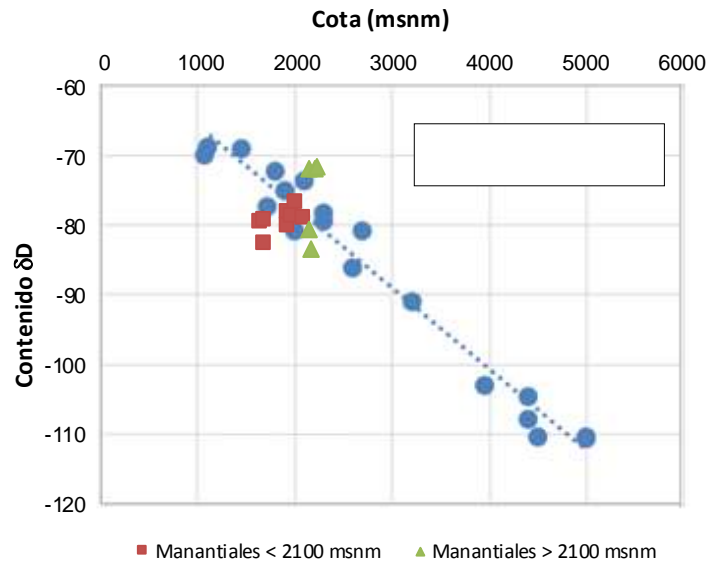
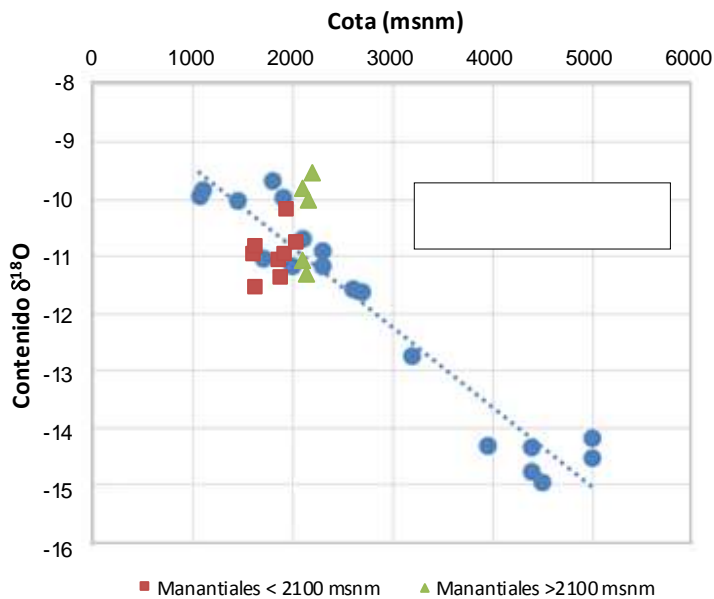


Figura 84. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia



**Figura 85. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental**

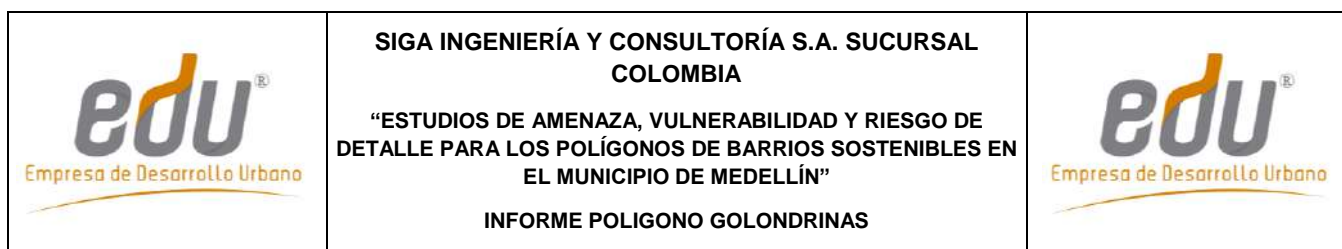


**Figura 86. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental**

#### 8.4 EL GRADIENTE NULO

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





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

En la Tabla 24 se encuentran los datos de contenidos isotópicos de agua de otras muestras de manantiales y quebradas utilizadas en otras investigaciones del autor que se viene citando en este capítulo.

**Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás**

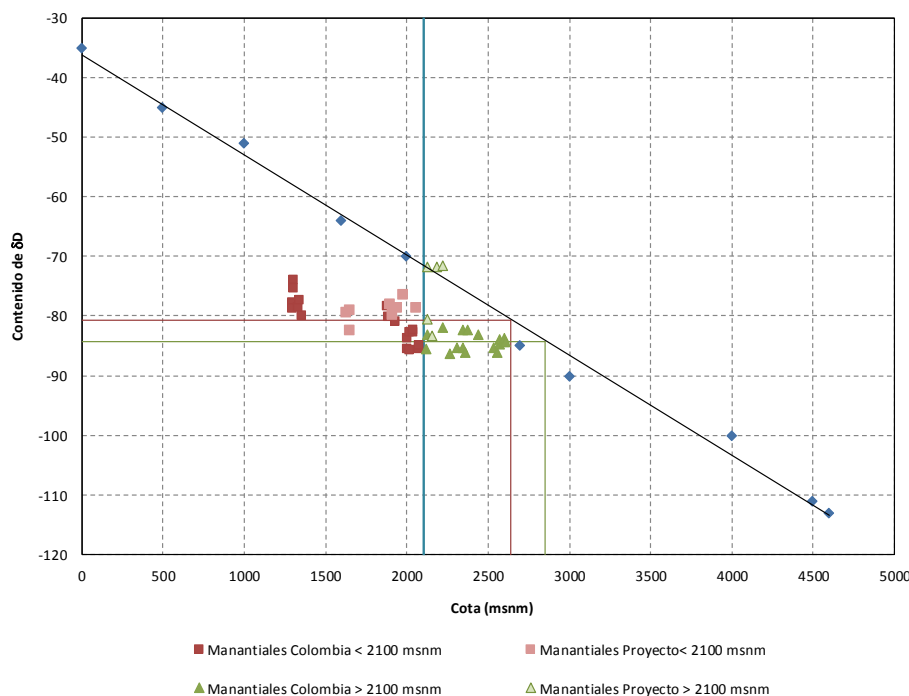
Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
TAO-01	06/09/12	842599.43	1178844.76	2540	-85.3	-11.71	Quebrada Santa Elena
TAO-02	06/09/12	841909.11	1179439.69	2445	-83.1	-11.63	Sede Mediagua CORANTIOQUIA
TAO-03	06/09/12	841952.29	1179485.66	2350	-85.4	-11.87	Fuente surgente en el camino Santa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

**Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás**

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

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

En la Figura 87 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 24 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 22. Se ha consolidado entonces la información obtenida en diferentes investigaciones en el Valle de Aburrá para poder hacer la discriminación del flujo de aguas subterráneas hacia el Valle de Aburrá procedente del Planalto de Santa Elena y del Valle de San Nicolás. En este gráfico puede apreciarse que los contenidos isotópicos del agua de los manantiales se agrupan en dos conjuntos bien definidos: uno por encima de la cota 2100 msnm y otro por debajo de esta cota. Los manantiales que se encuentran en cotas inferiores a 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -80 por mil, en tanto que los manantiales que se encuentran en cotas mayores que 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -83 por mil.





**Figura 87. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)**

La diferenciación mencionada indica que los manantiales ubicados por encima de la cota 2100 msnm y tienen su zona de recarga en una zona más alta que la de los manantiales ubicados por debajo de esta cota. La Figura 87 muestra los dos conjuntos de manantiales bien definidos, con sus límites en la cota 2100 msnm y en el  $\delta D = -81$ . Se indican además las cotas correspondientes a las fuentes de alimentación de cada conjunto de manantiales según el ajuste lineal empleado.

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

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

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

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

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

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

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

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

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



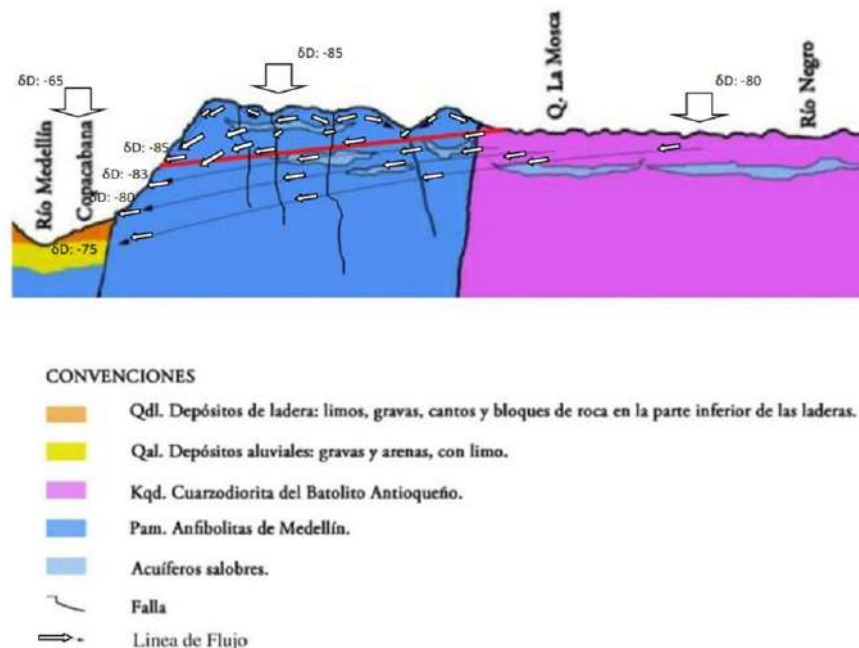
## 8.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La información disponible permite presentar un modelo conceptual del sistema hidrogeológico que comprende el Planalto de Santa Elena, el Valle de San Nicolás y la vertiente nororiental del Valle de Aburrá, cuya ilustración de encuentra en la Figura 88. Los límites del sistema pueden definirse por las vaguadas de los Ríos Negro y Medellín, las Quebradas Santa Elena, Yarumal y La Mosca.



### 8.5.1 Zonas de recarga

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

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



**Figura 88. Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá**

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

### **8.5.2 Caracterización del acuífero**

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

### **8.5.3 Flujo regional y flujo local**



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

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

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

### **8.5.4 Zonas de descarga**

La descarga de agua subterránea tiene lugar a lo largo y ancho de la vertiente. No se cuenta con un inventario de manantiales sistemático en el Valle del Aburrá que permita

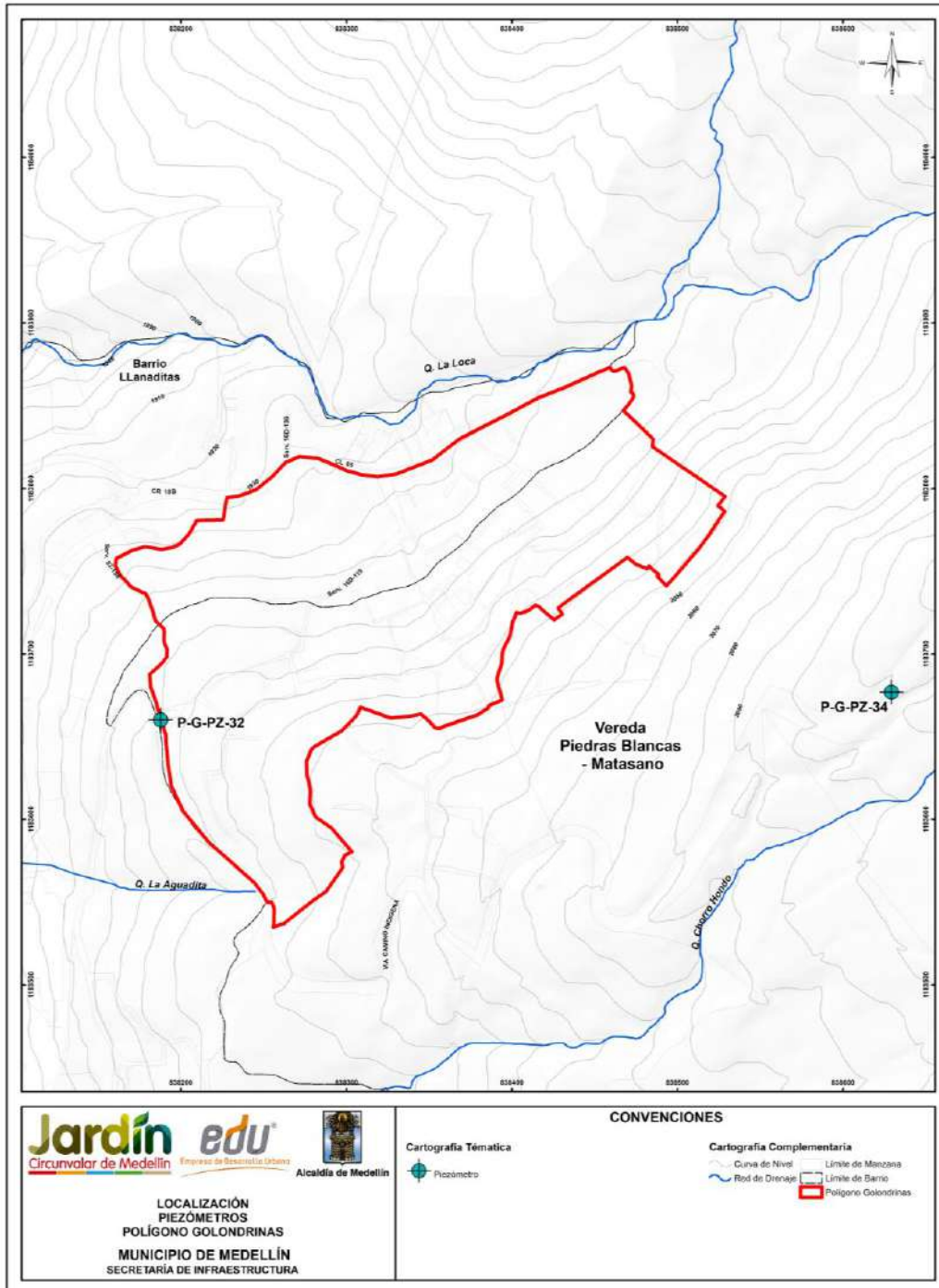
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

presentar un patrón de descarga del agua subterránea y su relación con los rasgos estructurales que la controlan. Puede postularse que, si se mantienen iguales las condiciones estructurales, la densidad de afloramientos aumenta a medida que se descende en la ladera, y que en la misma faja altitudinal la densidad de manantiales es función de la densidad de diaclasamiento y el máximo está asociado a las zonas de falla.

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

## **8.6 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA**

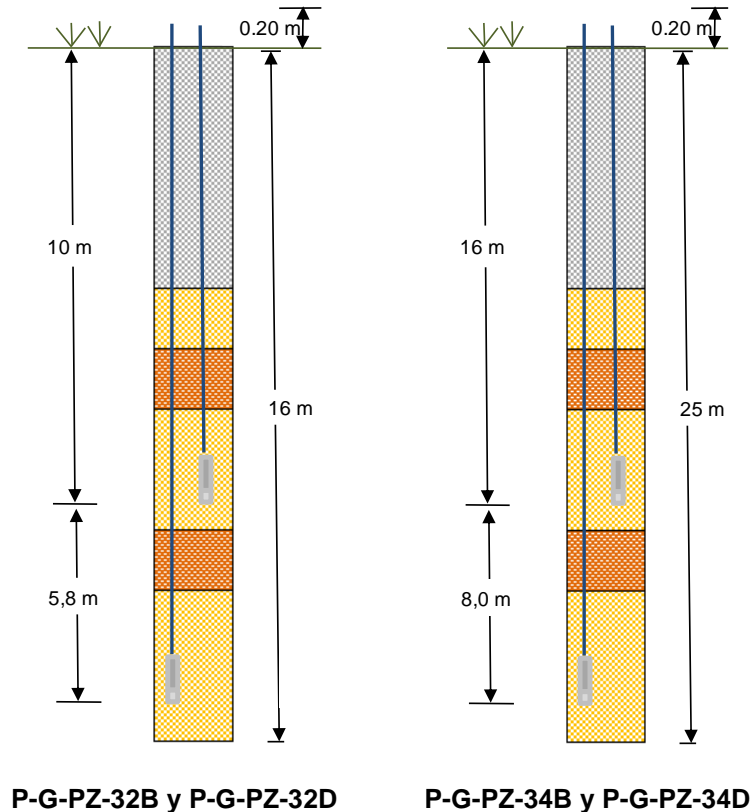
Con el fin de determinar las condiciones de flujo en los polígonos en estudio del Proyecto Barrios Sostenibles se instalaron piezómetros de alambre vibrátil. Los piezómetros fueron localizados en las Perforaciones P-G-PR-32 y P-G-PR-34 realizadas en el Polígono Golondrinas (Mapa 21).



Mapa 21. Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil  
(GOLInstrumentacion\_Medellin\_C)



Los piezómetros instalados fueron denominados como Piezómetros P-G-PZ-32B, P-G-PZ-32D, P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D, como se muestra en la Figura 89.



**Figura 89. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil**

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

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

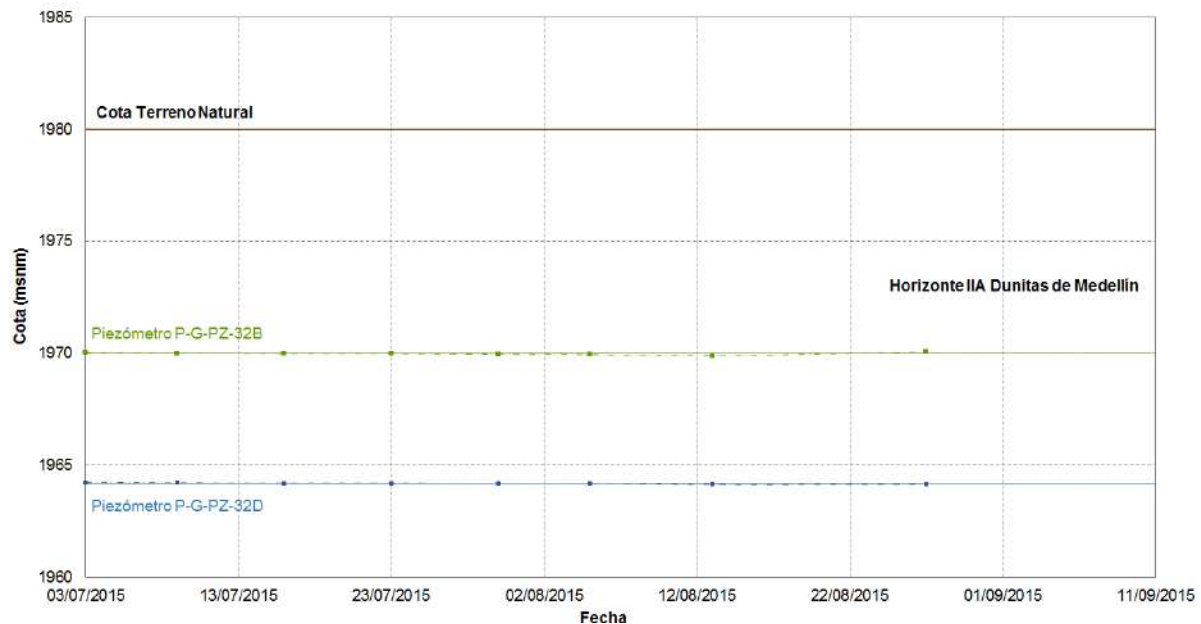
$$H = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

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

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

### 8.6.1 Piezómetros P-G-PZ-32B y P-G-PZ-32D

La Figura 90 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-G-PZ-32B y P-G-PZ-32D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

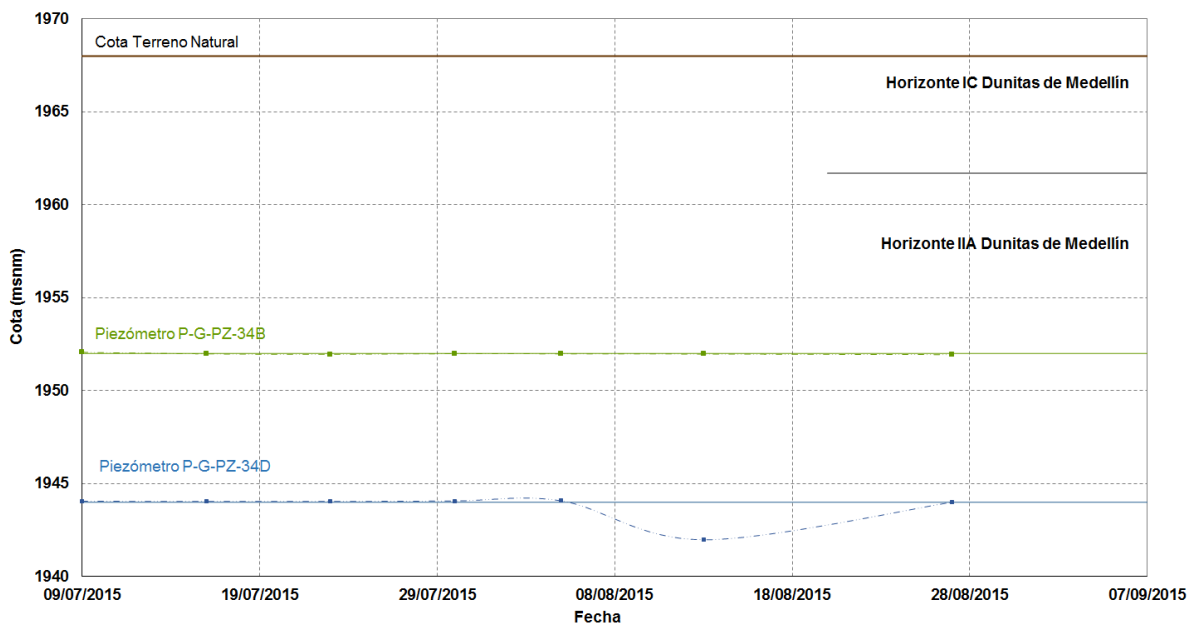


**Figura 90. Cotaciones piezométricas en Piezómetros P-G-PZ-32B y P-G-PZ-32D**

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-G-PR-32, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

### 8.6.2 Piezómetros P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D

La Figura 91 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los Piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.



**Figura 91. Cotas piezométricas en Piezómetros P-G-PZ-34B y P-G-PZ-34D**

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-G-PR-34, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

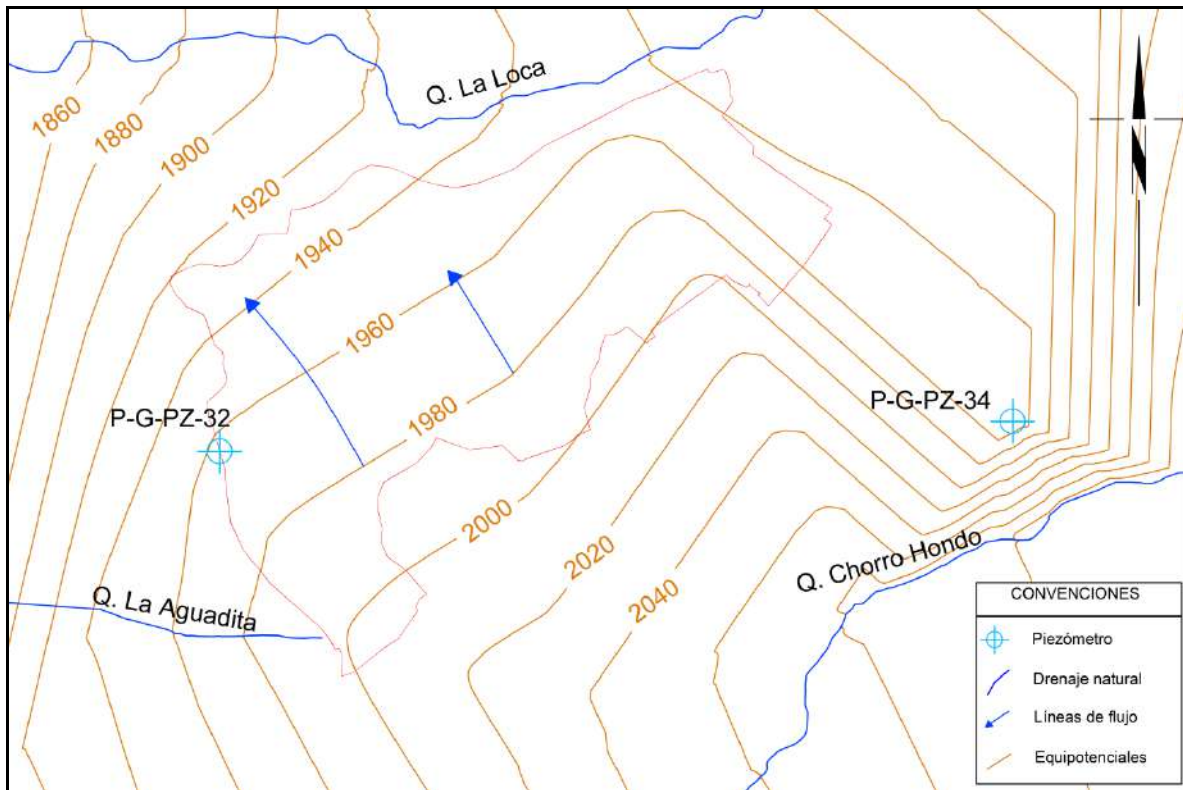
### 8.6.3 Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto

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

La instrumentación instalada en la UMI El Faro - Golondrinas, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, no parece haber ayudado a ratificar estas

afirmaciones. Los piezómetros no interceptaron el flujo subterráneo regional y tampoco el flujo local.

Las condiciones de flujo del agua subterránea en el Polígono Golondrinas pueden ser esquematizadas en la red de flujo que se presenta en la Figura 92.





**Figura 92. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono Golondrinas**

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

## 8.7 AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Algunos movimientos en masa en laderas de alta montaña, pueden ser explicados como un proceso de falla progresiva en razón de las condiciones hidrogeológicas particulares del medio en el que el regolito limoso de baja permeabilidad constituye el sello o acuícludo del acuífero confinado formado por el basamento rocoso. La presión hidrostática en el



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

techo del basamento puede alcanzar una magnitud capaz de fracturar el manto de regolito, lo que inicia un proceso de falla progresiva.



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

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

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

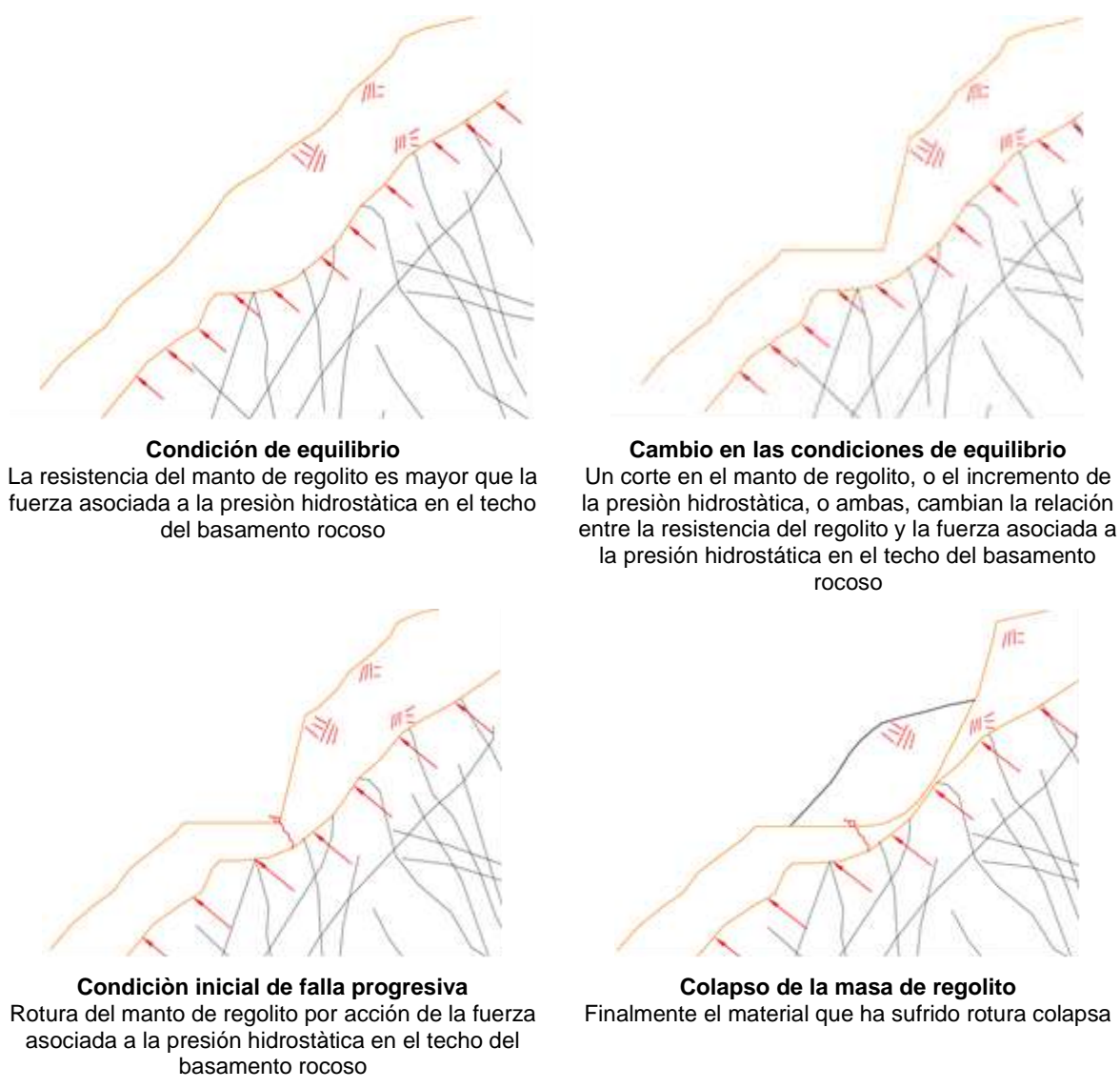
A partir de estas consideraciones, puede proponerse como mecanismo de falla un proceso falla progresiva (Skempton, 1964) que puede presentarse donde un manto de regolito con baja permeabilidad suprayace al basamento rocoso, de manera que este constituye un acuífero confinado en cuyo techo el agua puede encontrarse a presión mayor que la presión atmosférica. El mecanismo de falla es ilustrado en Figura 93 y en la Figura 94. Dicho mecanismo puede ser descrito en términos de los eventos enumerados y descritos a continuación:

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

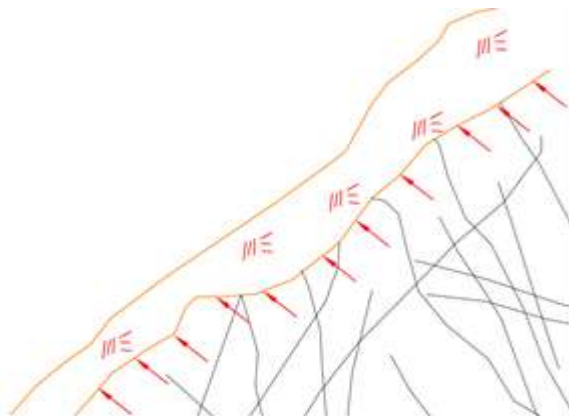
	<p style="text-align: center;"><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p style="text-align: center;"><b>INFORME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

- ✓ Colapso de la masa de suelo. La geometría de la superficie de deslizamiento puede ser esferoidal, poliédrica o en cuña, dependiendo de las condiciones particulares del terreno.

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



**Figura 93. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica**



**Condición de equilibrio**

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



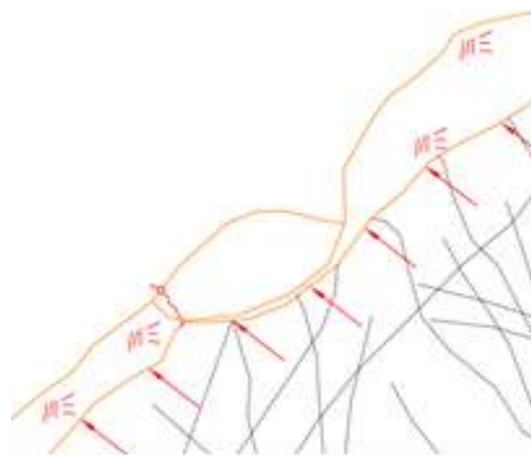
**Cambio en las condiciones de equilibrio**

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



**Condición inicial de falla progresiva**

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



**Colapso de la masa de regolito**

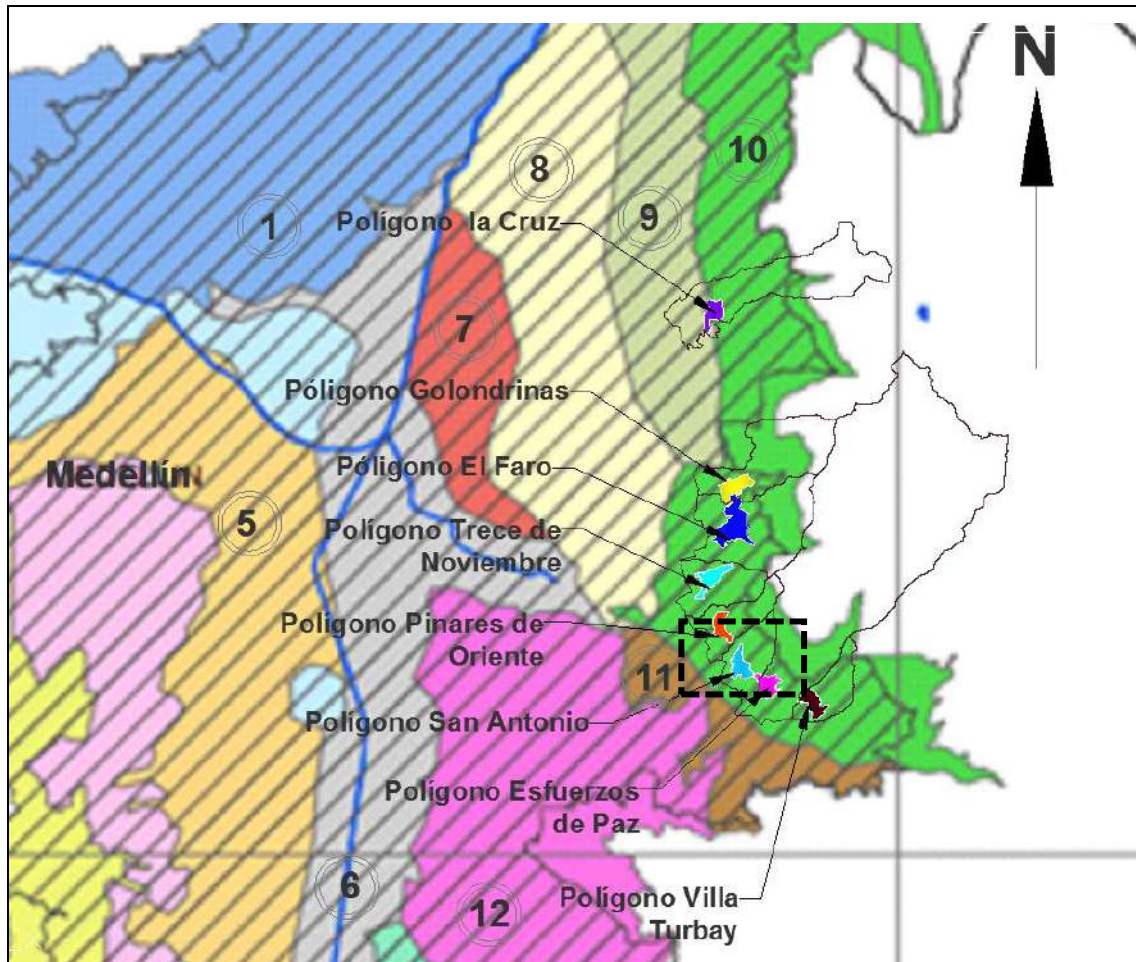
Finalmente el material que ha sufrido rotura colapsa

**Figura 94. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica**





## 9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 95 presenta el mapa de zonas homogéneas de la Microzonificación Sísmica de Medellín y sobre este se han superpuesto los respectivos polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, destacándose en este caso en particular el Polígono Golondrinas.



**Figura 95. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)**

Se puede observar que desde el punto de vista de la sismica, los Polígonos El Faro, Golondrinas, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay con sus respectivas UMI, que hacen parte del proyecto de Barrios Sostenibles y que son objeto de estudio, se encuentran localizados según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (MZSM, 1999) sobre la Zona Homogénea 10, la cual corresponde a los suelos residuales de las Dunitas de la parte alta.

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

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

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

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

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

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

En el Numeral 4.2 se presentan los perfiles geológico-geotécnicos generales determinados con base en la exploración disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo. En la UMI en estudio, las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e).

La Tabla 25 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). Así las cosas, se puede establecer que el perfil geológico general de la UMI El Faro-Golondrinas se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

**Tabla 25. Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10**

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



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

El coeficiente espectral para la Zona Homogénea 10 para el sismo de diseño corresponde a 0.38g la aceleración de la gravedad el cual corresponde a un sismo de diseño para periodo de retorno de 475 años (Tabla 26).

**Tabla 26. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños**

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

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

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

## **10. ASPECTOS GEOTÉCNICOS**

### **10.1 SONDEOS EXPLORATORIOS**

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

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

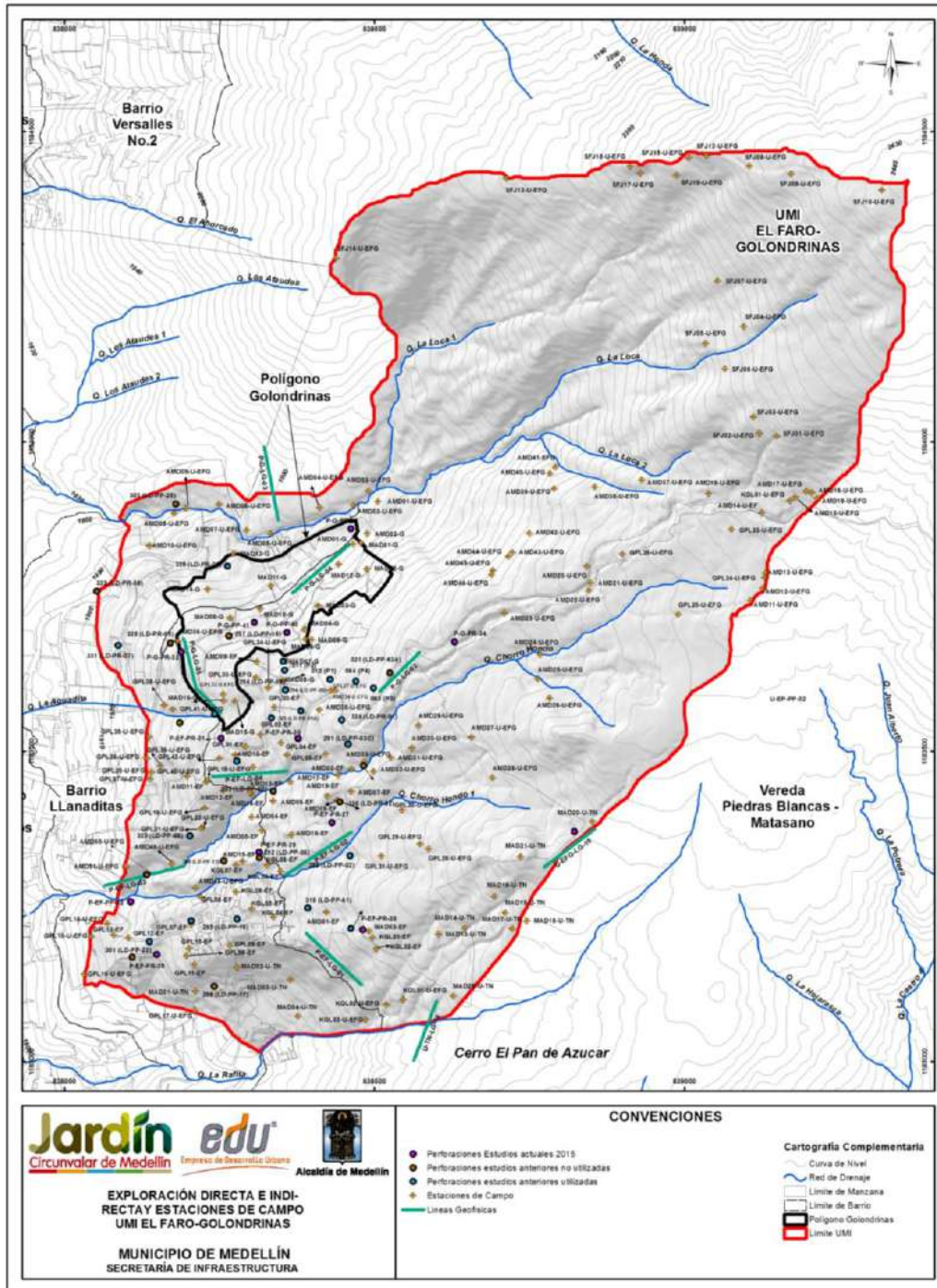
#### **10.1.1 Perforaciones**

En la UMI El Faro - Golondrinas se realizaron en total nueve perforaciones a rotación, seis dentro del Polígono El Faro correspondientes a las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-1 y P-EF-PR-39 y tres dentro del Polígono Golondrinas correspondientes a las Perforaciones P-G-PR-32, P-G-PR-33, P-G-PR-34. Además se realizaron cuatro perforaciones a percusión denominadas P-EF-PP-42, P-G-PP-40, P-G-PP-41 y U-EFG-PP-01 (Mapa 22).



Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI, también fue considerada la información obtenida de veintiuna perforaciones realizadas en estudios anteriores por DEACIVIL (2014), INTEINSA (2013) e INTEINSA (2011). Las perforaciones correspondientes a cada estudio son presentadas en la Tabla 27. En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el proyecto y los de estudios anteriores que fueron considerados.

En la Tabla 27 se presenta la profundidad alcanzada, el nivel freático, la cota del terreno y las coordenadas de cada una de las perforaciones tenidas en cuenta en el presente estudio.





**Mapa 22. Localización de la exploración directa e indirecta  
(13\_GOLExploracion\_Medellin\_C y 13\_GOLExploracion\_Medellin\_T)**

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

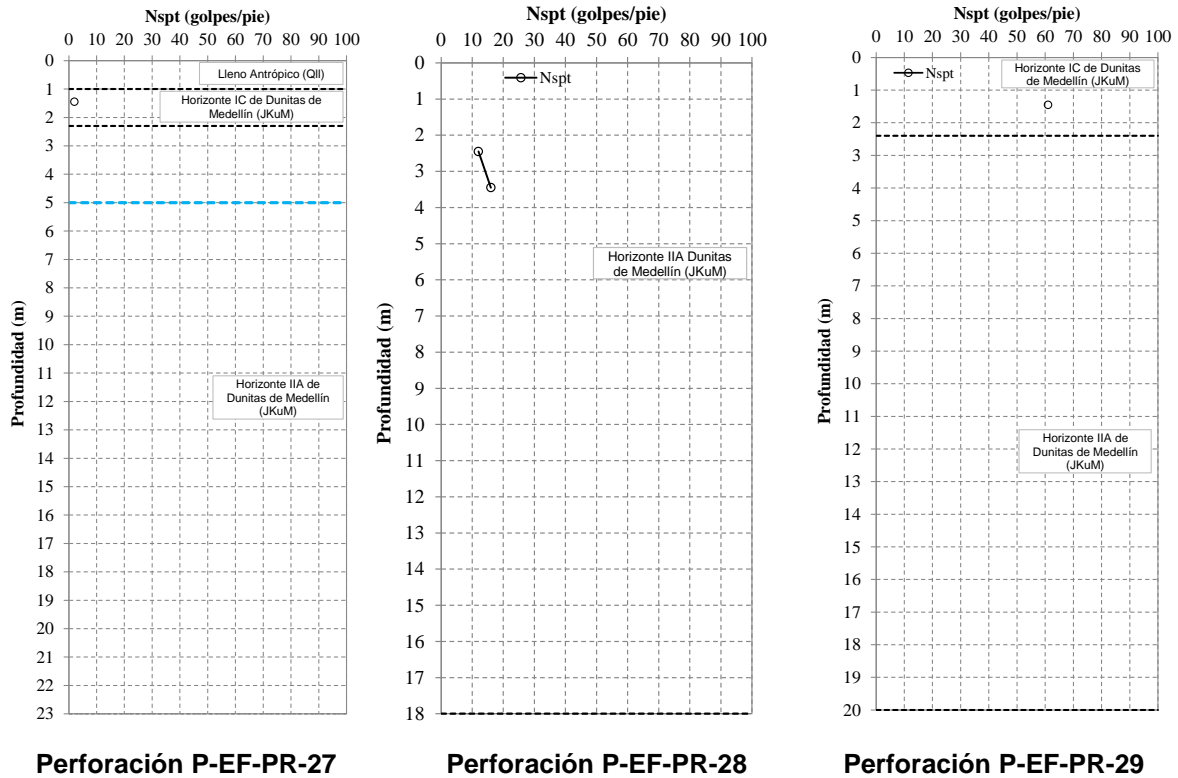
**Tabla 27. Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas**

Perforación		Prof. (m)	Prof. N.F. (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
Proyecto (2015)	P-G-PR-32	16.00	Seco	1980.0	838187.818	1183660.241
	P-G-PR-33	20.00	1.8	1968.8	838462.019	1183859.503
	P-G-PR-34	25.00	Seco	2110.1	838629.341	1183676.936
	P-G-PP-40	8.45	Seco	2002.1	838359.258	1183691.822
	P-G-PP-41	4.45	Seco	1986.0	838306.508	1183708.042
	U-EFG-PP-01	12.45	Seco	2130.2	838822.871	1183370.963
	P-EF-PR-27	20.00	Seco	2042.9	838431.626	1183385.327
	P-EF-PR-28	18.00	Seco	1917.4	838148.541	1183172.383
	P-EF-PR-29	23.00	Seco	1997.3	838313.829	1183336.827
	P-EF-PR-30	17.50	Seco	2044.8	838376.892	1183520.794
	P-EF-PR-31	20.00	Seco	2005.7	838253.132	1183521.491
	P-EF-PR-39	15.00	Seco	2049.5	838481.372	1183212.538
	P-EF-PP-42	6.45	Seco	1895.9	838106.506	1183257.500
Inteinsa (2011)	10 (P1)	8.45	Seco	2041.3	838354.913	1183630.695
	11 (P2)	7.45	Seco	2034.5	838352.918	1183645.409
Inteinsa (2013)	61 (P1)	12.00	9.0	2058.3	838428.194	1183616.366
	62 (P2)	15.50	9.0	2069.3	838470.284	1183613.348
	63 (P3)	19.00	12.0	2079.0	838498.647	1183602.264
Deacivil (2014)	288 (LD-PP-01)	7.45	Seco	2043.6	838462.390	1183214.075
	289 (LD-PP-02)	6.45	Seco	2038.0	838460.894	1183331.497
	291 (LD-PP-03C)	6.30	Seco	2065.0	838457.494	1183511.462
	294 (LD-PP-08)	9.45	Seco	2038.3	838356.839	1183599.165
	295 (LD-PP-12)	6.45	Seco	1980.1	838278.938	1183229.876
	299 (LD-PP-18)	6.15	Seco	1955.0	838203.993	1183226.368

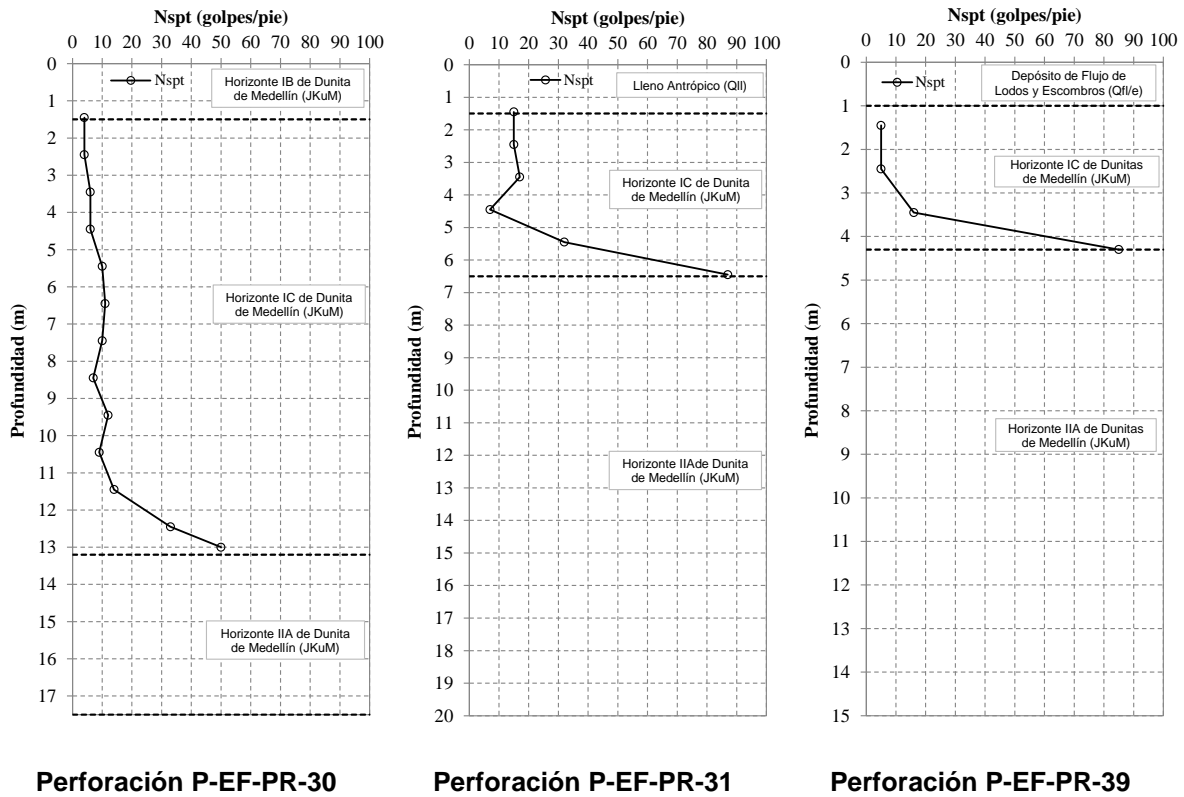
**Tabla 27. Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas**

	<b>Perforación</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Prof. N.F. (m)</b>	<b>Cota Terreno</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>
<b>Deacivil (2014)</b>	301 (LD-PP-22)	5.30	Seco	1920.0	838137.200	1183193.596
	319 (LD-PP-61)	5.45	Seco	2014.5	838392.446	1183247.653
	322 (LD-PP-64)	10.30	Seco	2071.9	838447.398	1183550.882
	323 (LD-PP-66)	6.45	Seco	1965.7	838202.406	1183363.352
	324 (LD-PR-01)	20.00	7.0	2050.7	838381.879	1183565.451
	325 (LD-PR-01A)	20.00	10.0	2031.4	838333.859	1183554.074
	326 (LD-PR-02)	20.00	15.0	2011.6	838278.006	1183484.461
	327 (LD-PR-03)	20.00	Seco	1996.5	838242.208	1183560.406
	328 (LD-PR-04)	25.00	7.5	1938.1	838263.330	1183798.988
	331 (LD-PR-07)	18.00	Seco	1926.6	838086.199	1183670.606

De la Figura 96 a la Figura 106 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos. Se exceptúan las Perforaciones P-G-PR-32 y 328 (LD-PR-04) en las que no se realizó el ensayo de penetración estándar. Adicionalmente, se ha incluido en las figuras la estratigrafía y la profundidad del nivel freático donde fue detectado.

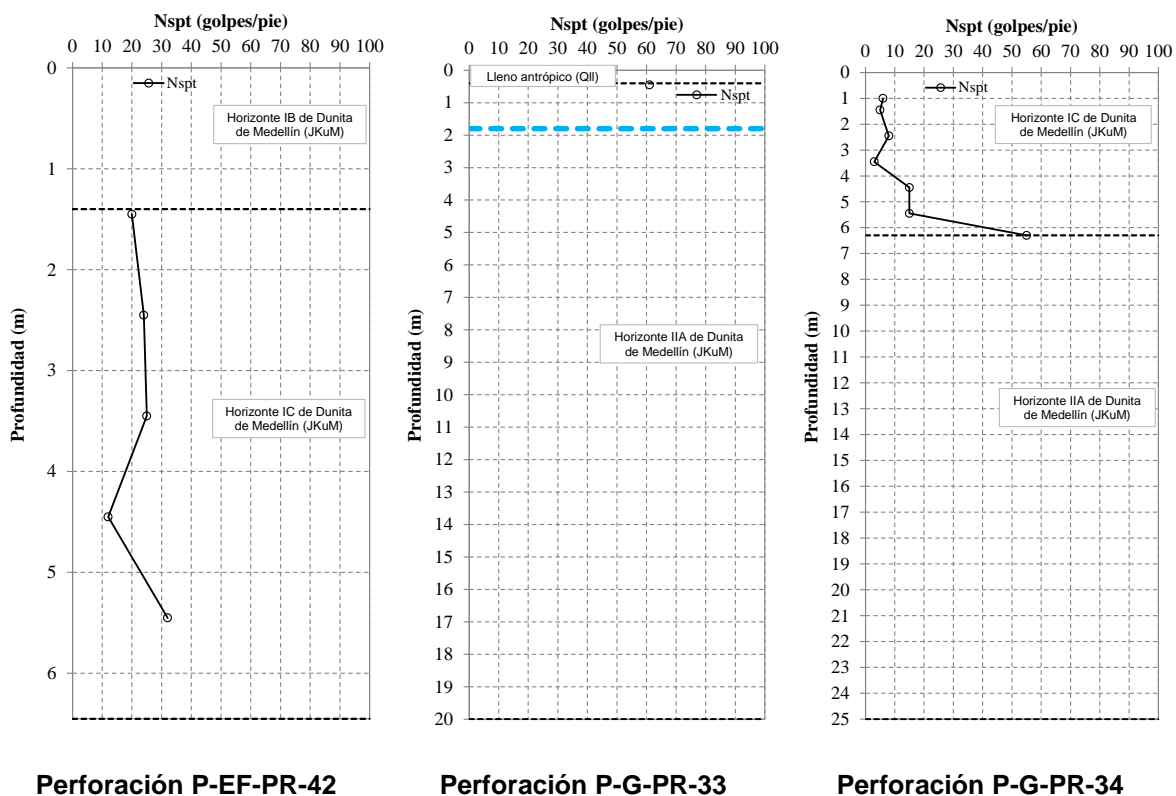


**Figura 96. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro – Golondrinas**

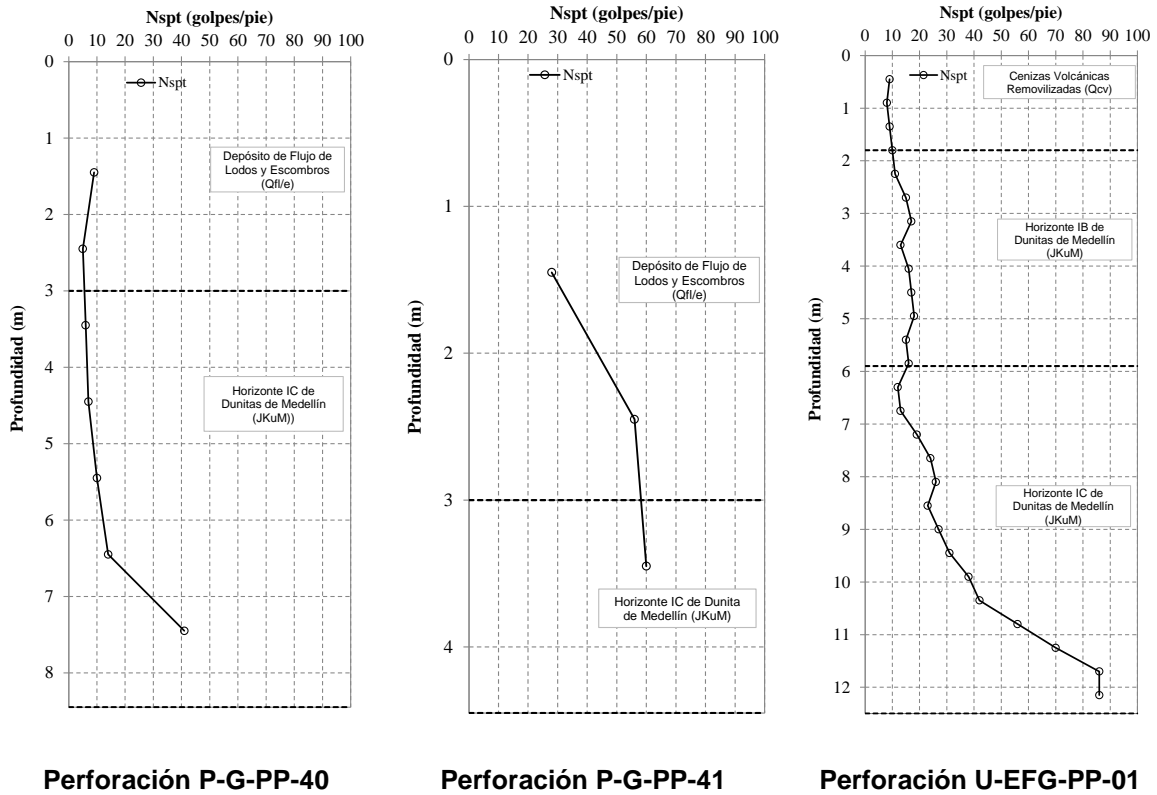


**Figura 97. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)**



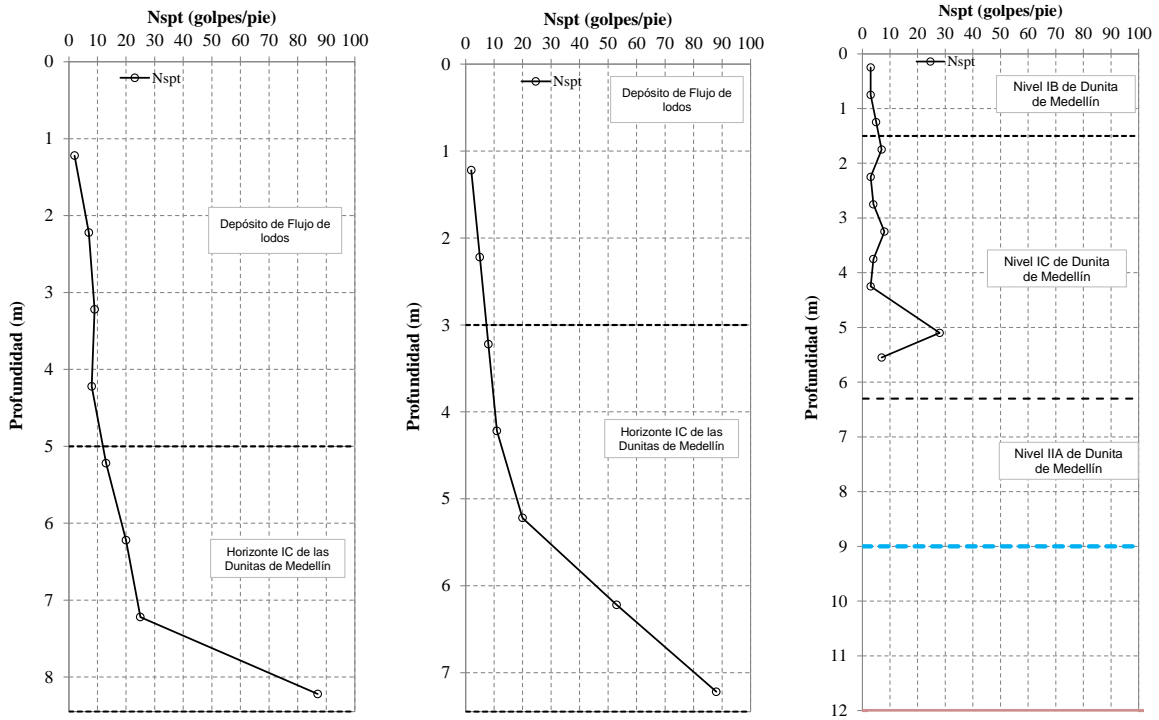


**Figura 98. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)**



**Perforación P-G-PP-40                      Perforación P-G-PP-41                      Perforación U-EFG-PP-01**

**Figura 99. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)**

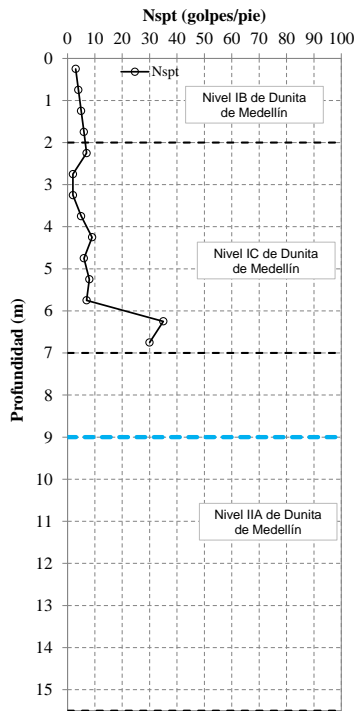


Perforación 10 (P1)

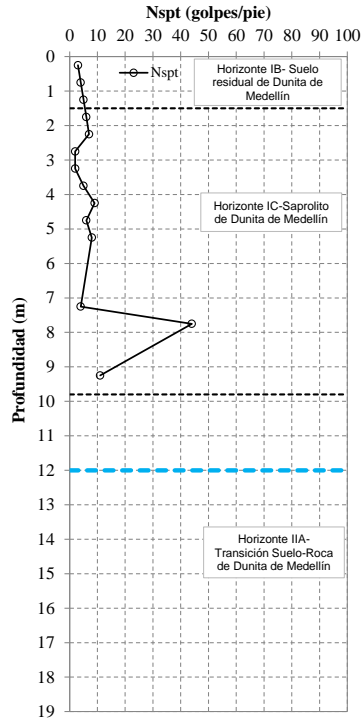
Perforación 11 (P2)

Perforación 61 (P1)

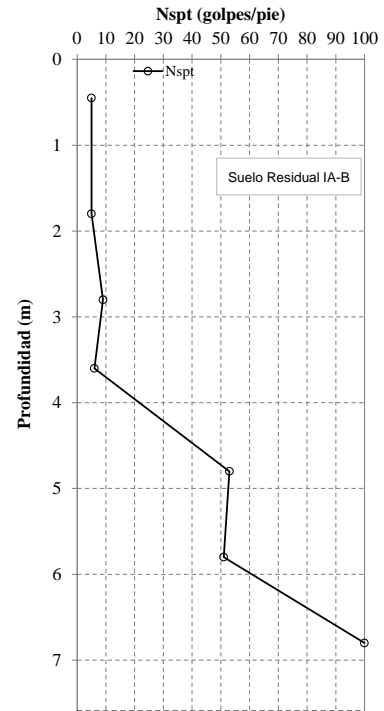
Figura 100. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 62 (P2)

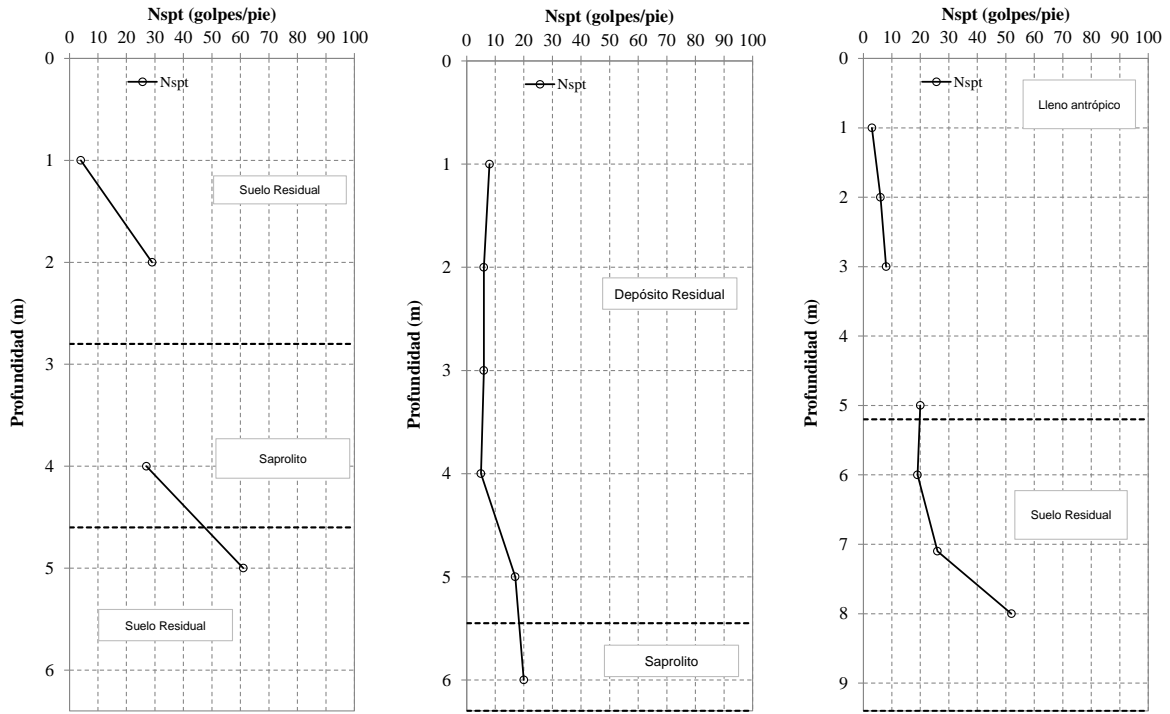


Perforación 63 (P3)



Perforación 288 (LD-PP-01)

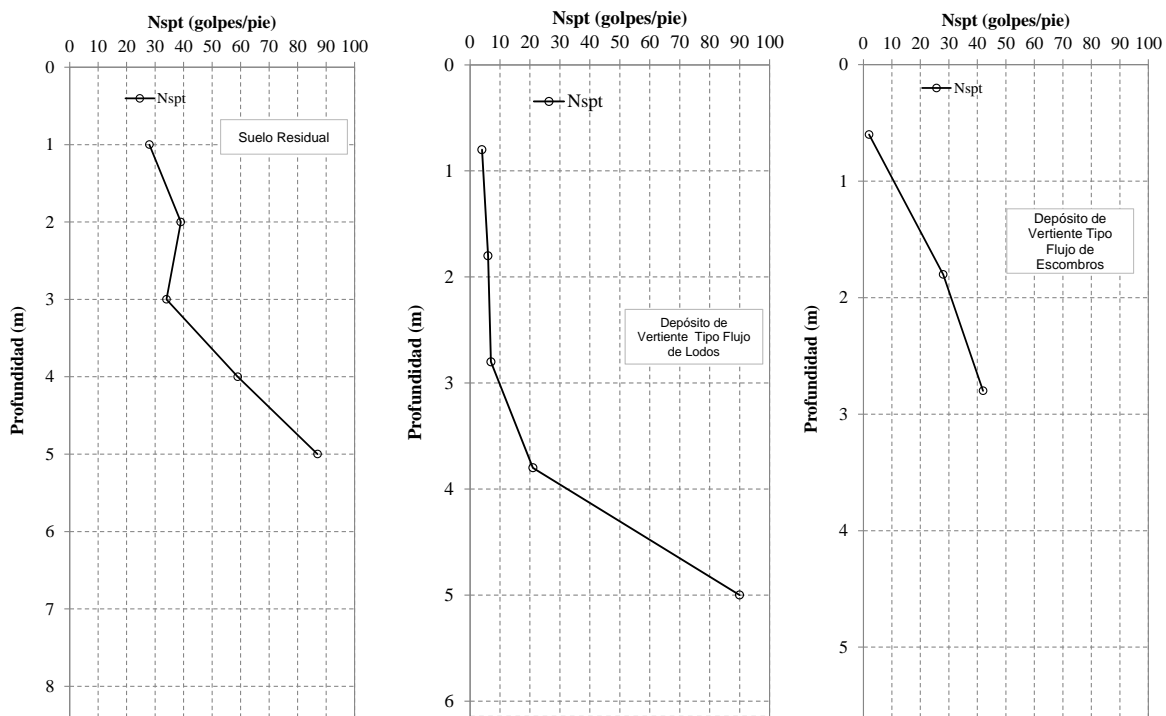
Figura 101. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 289 (LD-PP-02)    Perforación 291 (LD-PP-03C)    Perforación 294 (LD-PP-08)

Figura 102. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



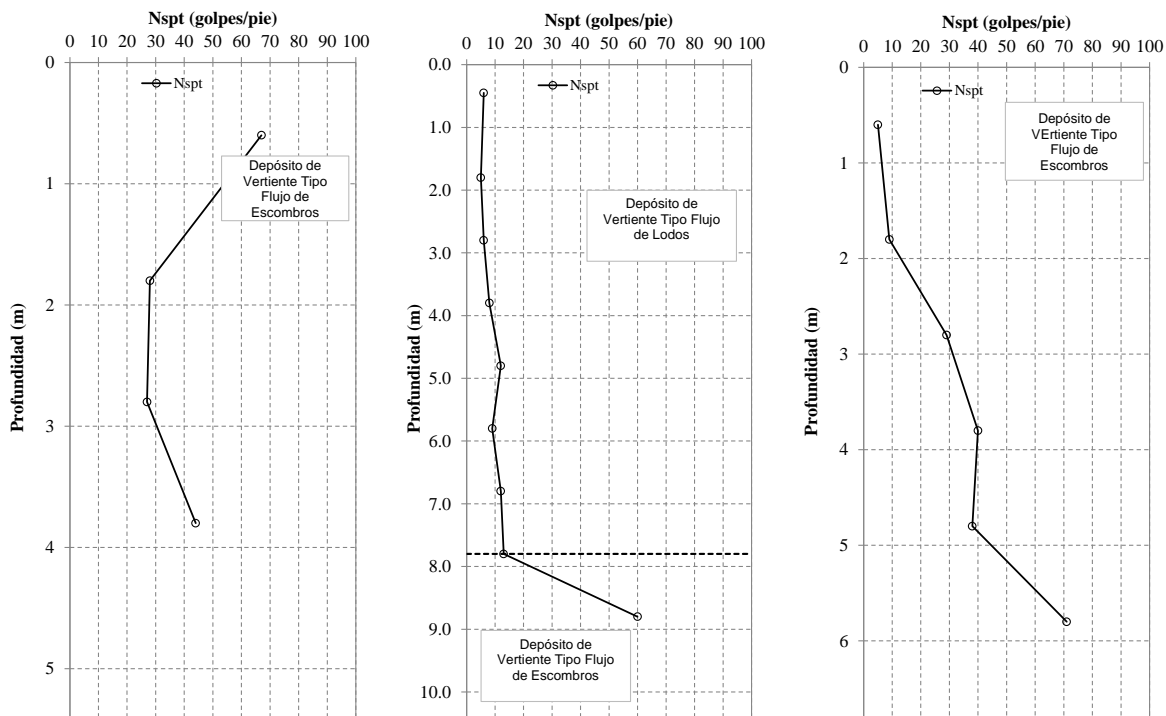


Perforación 295 (LD-PP-12)

Perforación 299 (LD-PP-18)

Perforación 301 (LD-PP-22)

Figura 103. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)

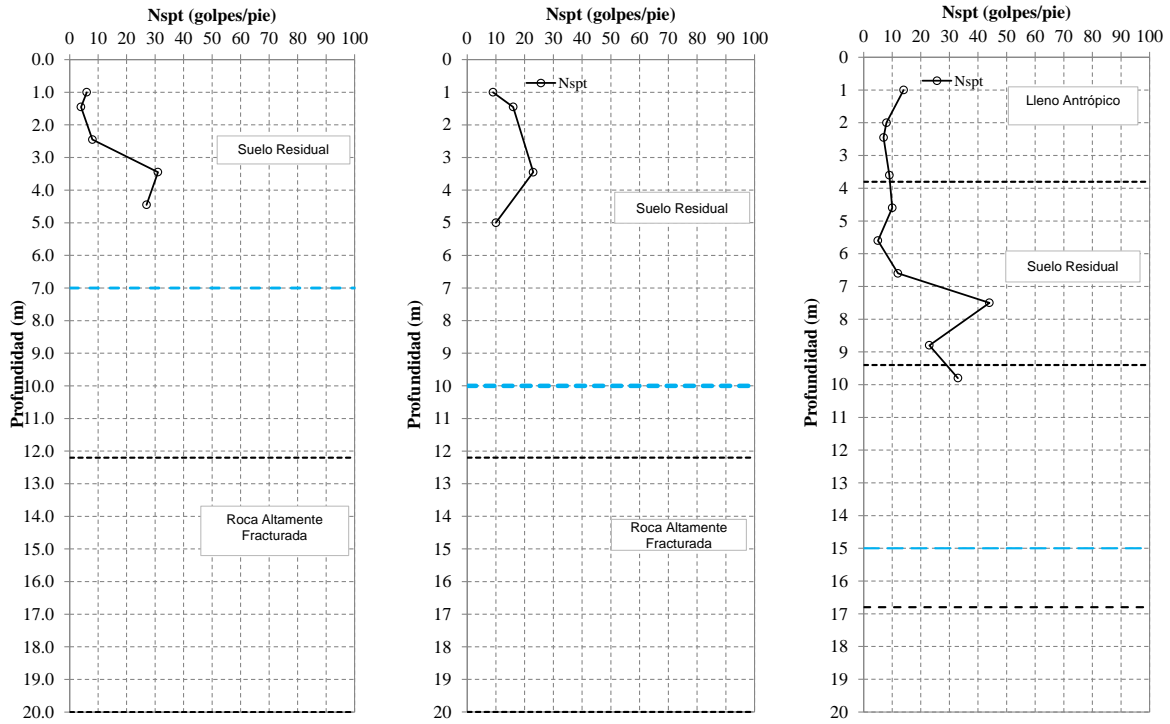


Perforación 319 (LD-PP-61)

Perforación 322 (LD-PP-64)

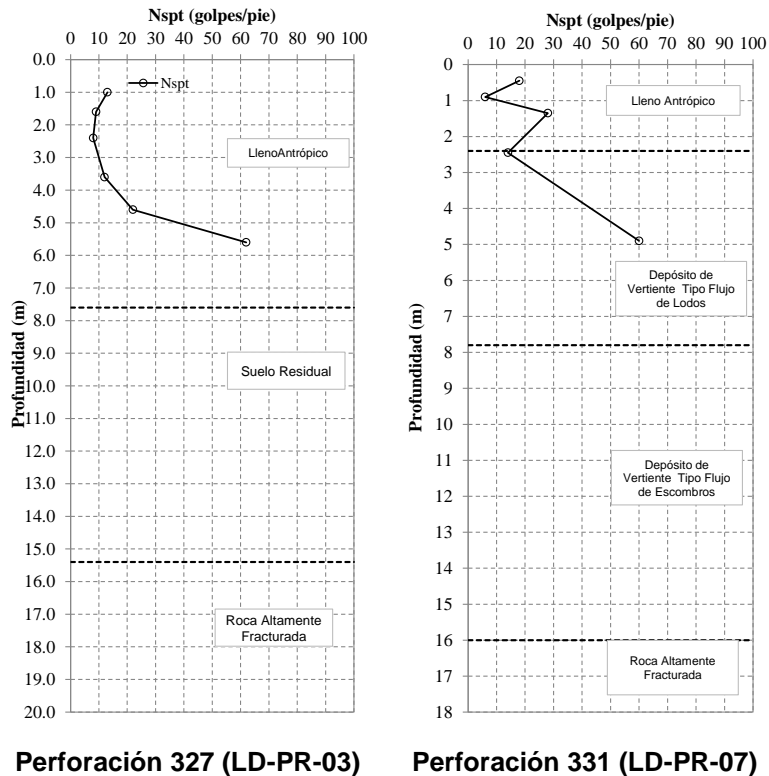
Perforación 323 (LD-PP-66)

Figura 104. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



**Perforación 324 (LD-PR-01)    Perforación 325 (LD-PR-01A)    Perforación 326 (LD-PR-02)**

**Figura 105. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)**





**Figura 106. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)**

De acuerdo con las perforaciones realizadas y consultadas, en la UMI se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 5 m y 30 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.0 m y 11.0 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-31, P-G-PR-33, 294 (LD-PP-08), 326(LD-PR-02), 327 (LD-PR-03), 328 (LD-PR-04) y 331 (LD-PR-07), suprayaciendo los suelos residuales de la Dunita de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 3 golpes/pie y 28 golpes/pie e incluso en la Perforación 327 (LD-PR-03), se obtuvo 62 golpes/pie.

En la Perforación U-EFG-PP-01 fue identificado un cuerpo de ceniza volcánica removilizada y/o in situ de 1.8 m de espesor. Este material presenta resistencias a la penetración estándar promedio de 9 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Estos depósitos fueron identificados en las Perforaciones P-EF-PR-39, P-G-PR-40, P-G-PR-41, 10 (P1), 11 (P2), 291 (LD-PP-03C), 299 (LD-PP-18), 301 (LD-PP-22), 319 (LD-PP-61), 322 (LD-PP-64), 323 (LD-PP-66),

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

331 (LD-PR-07). La resistencia a la penetración varía considerablemente entre 4 golpes/pie y 90 golpes/pie, entre la superficie y 26.0 m de profundidad.

La Dunita de Medellín fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Se halla en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-31, P-EF-PR-39, P-EF-PR-42, U-EFG-PP-01, P-G-PR-33, P-G-PR-34, P-G-PR-40, P-G-PR-41, 10 (P1), 11 (P2), 61 (P1), 62 (P2) y 63 (P3). En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos, milonitas, salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunita cizallada. Las resistencias a la penetración estándar también mejoran notablemente con la profundidad, presentando resistencias del orden de 3 golpes/pie y 87 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-42 y P-G-PR-34.

### **10.1.2 Líneas geofísicas**

En la UMI El Faro – Golondrinas se ejecutaron nueve líneas geofísicas, denominadas P-EF-LG-01, P-EF-LG-02, P-EF-LG-03, P-EF-LG-04, P-G-LG-01, P-G-LG-02, P-G-LG-03, P-G-LG-04 y U-EFG-LG-10. Adicionalmente se utilizó la Línea Geofísica U-TN-LG-14 realizada en la UMI Trece de Noviembre, para complementar el análisis geológico geotécnico. En cada una se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor) y la localización en planta se muestra en el Mapa 22.

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

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

En la Tabla 28 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los Ensayos ReMi ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

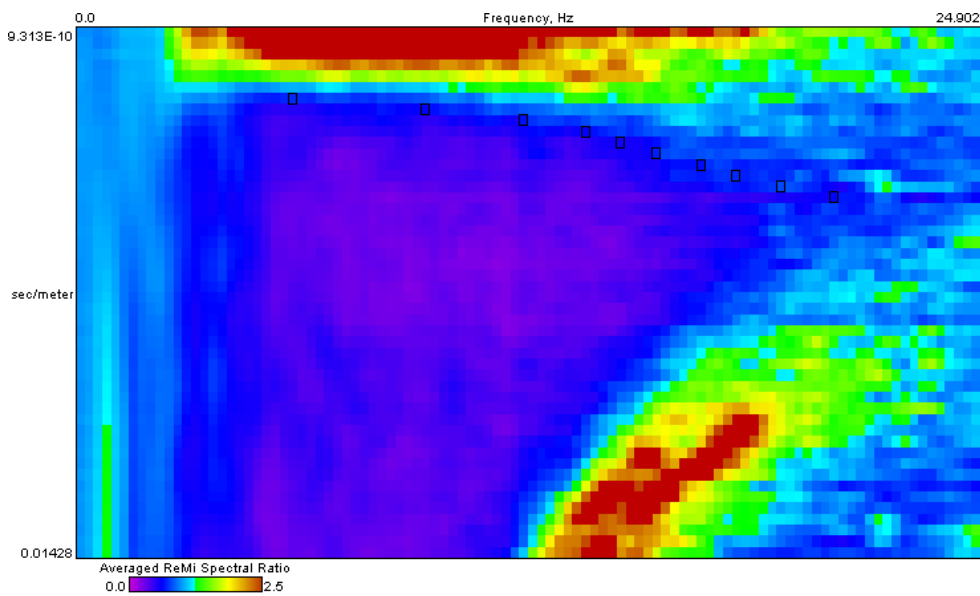


**Tabla 28. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI El Faro - Golondrinas**

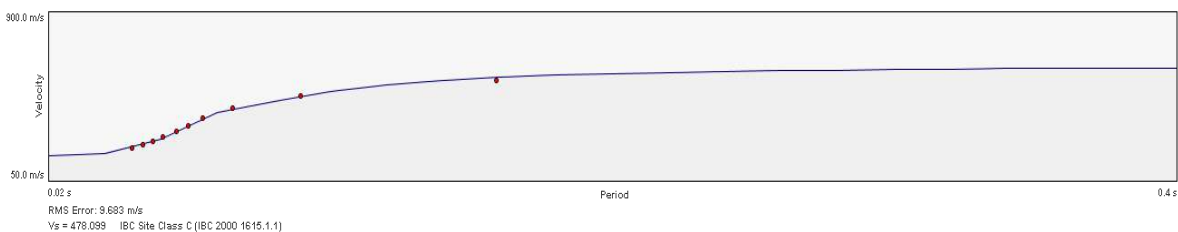
Nomenclatura	Coordenada Inicial		Cota Inicial	Coordenada Final		Cota Final
	Este	Norte		Este	Norte	
P-EF-LG-01	838479	1183124	2015.7	838390	1183207	2013.7
P-EF-LG-02	838463	1183370	2044.6	838357	1183301	2003.2
P-EF-LG-03	838065	1183284	1889.1	838192	1183315	1936.1
P-EF-LG-04	838359	1183468	2025.0	838238	1183459	2002.8
P-G-LG-01	838192	1183682	1982.0	838252	1183563	1999.4
P-G-LG-02	838573	1183660	2098.8	838509	1183597	2082.2
P-G-LG-03	838345	1183873	1947.2	838322	1183991	1950.0
P-G-LG-04	838368	1183756	1976.6	838460	1183834	1971.9
U-EFG-LG-10	838855	1183374	2135.0	838774	1183313	2141.6
U-TN-LG-14	838600	1183097	2046.4	838564	1183002	2026.7

En la Figura 107 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 108 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 109 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 110 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-01 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 201.9 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.0 m hasta los 10.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 576 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 10.2 m hasta los 22.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 654 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca.
- ✓ Una última capa desde los 22.0 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 711 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.



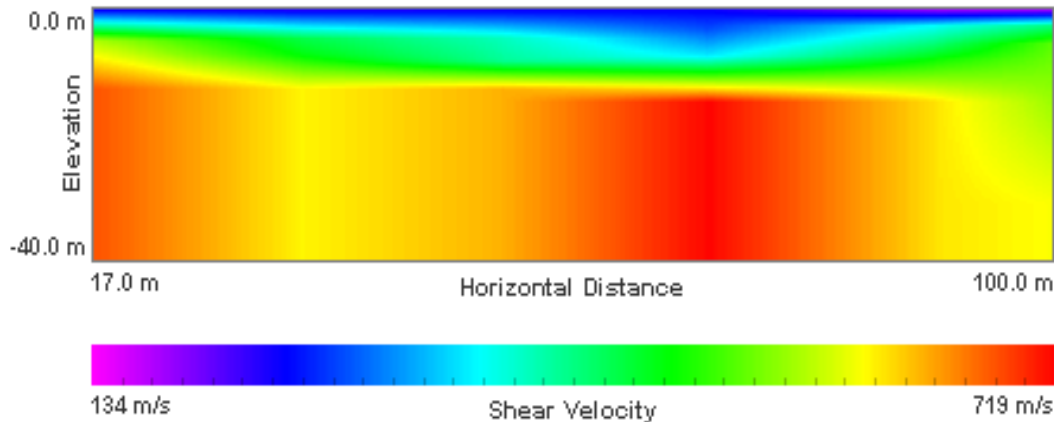
**Figura 107. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-01**



**Figura 108. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-01**

	Density	Shear Velocity
5.0 m	1.8 g/cc	201.941 m/s
10.2 m	1.8 g/cc	576.149 m/s
22.0 m	1.8 g/cc	654.29 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	710.725 m/s

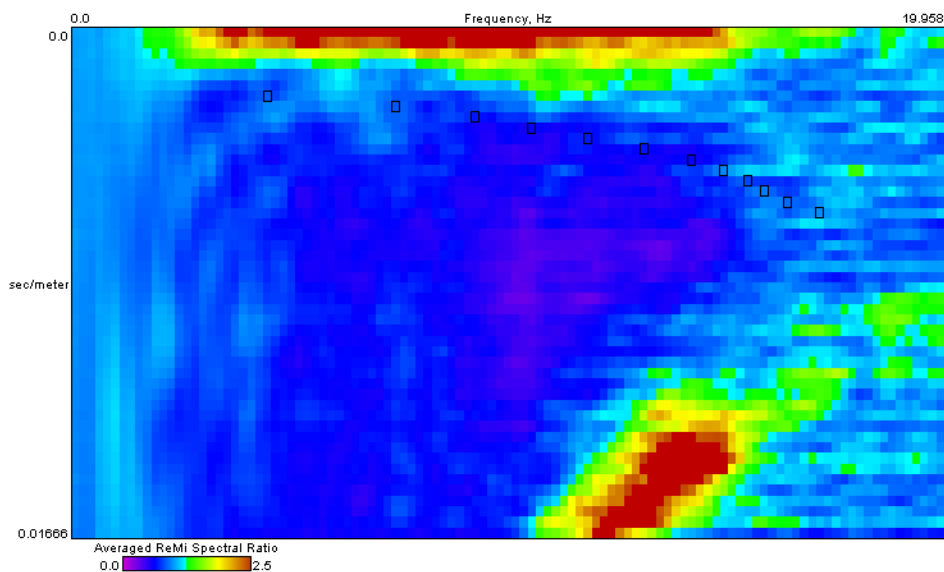
**Figura 109. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01**



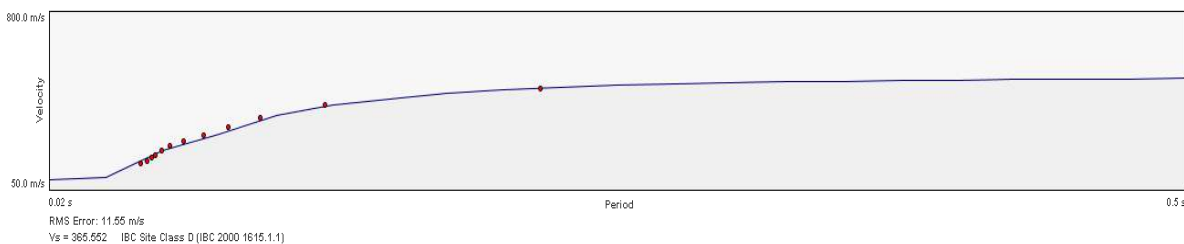
**Figura 110. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01**

En la Figura 111 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 112 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 113 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 114 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-02 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 110 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 7.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 468 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 7.0 m hasta los 30.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 479 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 30.2 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 602 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.



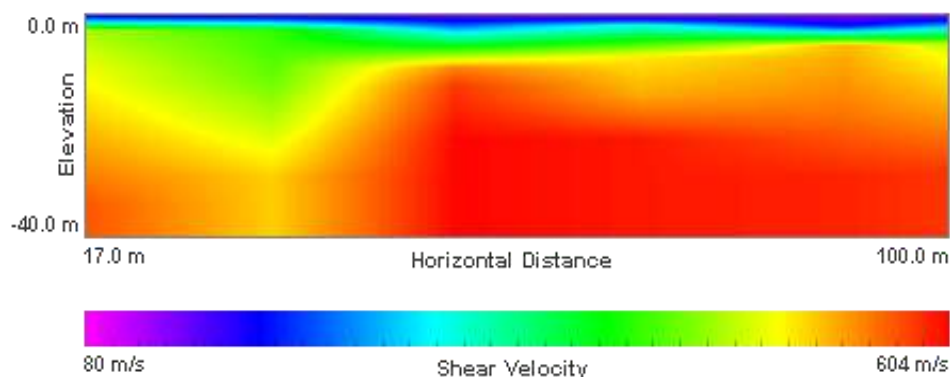
**Figura 111. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-02**



**Figura 112. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-02**

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	119.755 m/s
7.0 m	1.8 g/cc	468.284 m/s
30.2 m	1.8 g/cc	479.009 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	601.583 m/s

**Figura 113. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02**

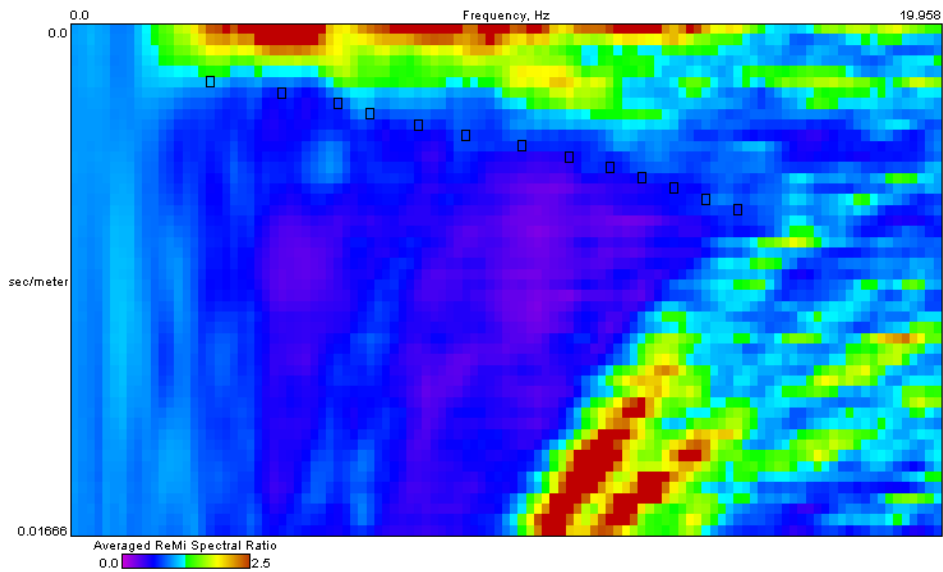


**Figura 114. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02**

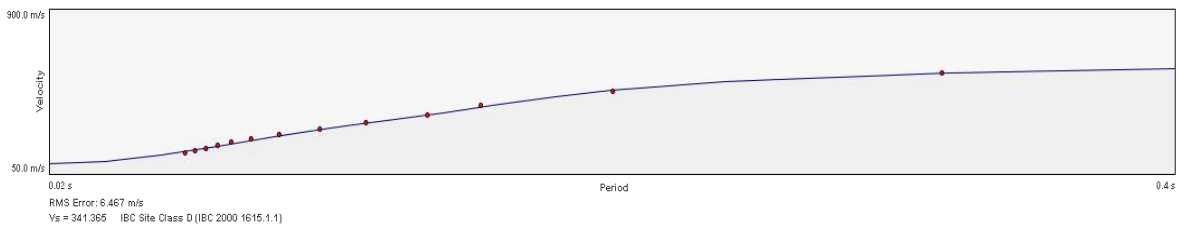
En la Figura 115 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 116 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 117 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 118 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-03 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 125 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 8.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 258 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.8 m hasta los 24.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 482 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 24.8 m hasta los 31.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 548 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 31.0 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 738 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.





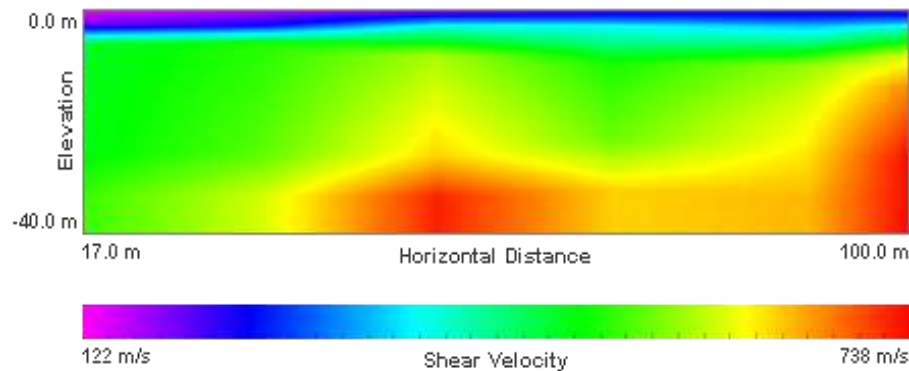
**Figura 115. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-03**



**Figura 116. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-03**

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	124.668 m/s
8.8 m	1.8 g/cc	257.508 m/s
24.8 m	1.8 g/cc	482.38 m/s
31.0 m	1.8 g/cc	548.366 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	737.64 m/s

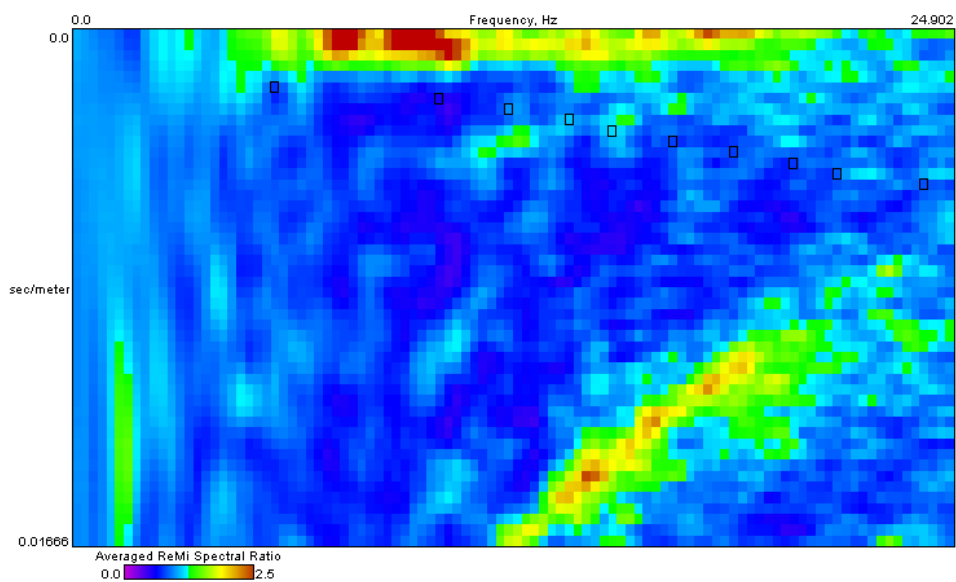
**Figura 117. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03**



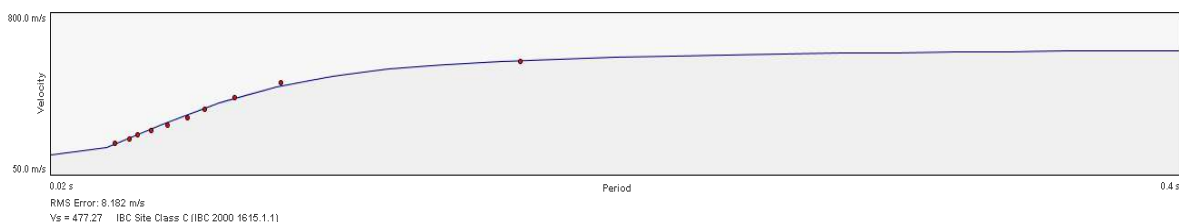
**Figura 118. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03**

En la Figura 119 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 120 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 121 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 122 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-04 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 163 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 7.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 333 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 7.2 m hasta los 12.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 669 m/s, la cual corresponde a suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 12.4 m hasta los 31.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 713 m/s, la cual corresponde a suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 31.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 713 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.



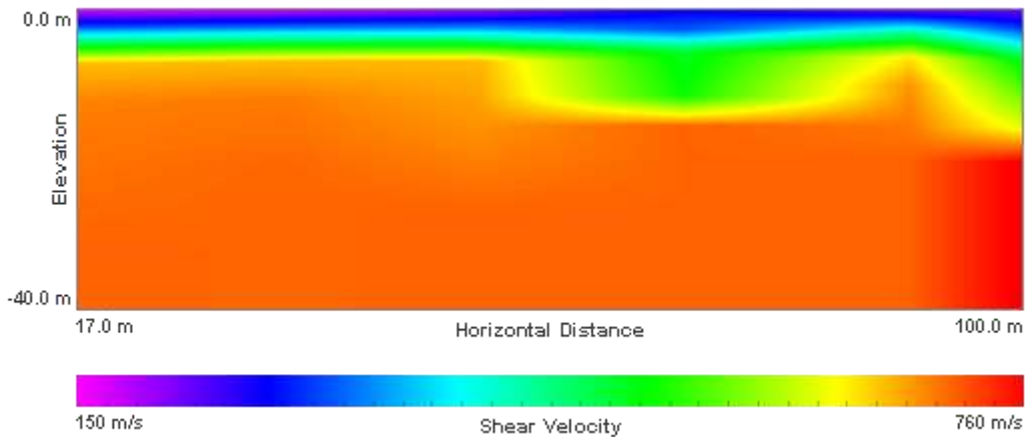
**Figura 119. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-04**



**Figura 120. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-04**

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	167.615 m/s
7.2 m	1.8 g/cc	332.686 m/s
12.4 m	1.8 g/cc	668.999 m/s
31.6 m	1.8 g/cc	705.005 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	712.666 m/s

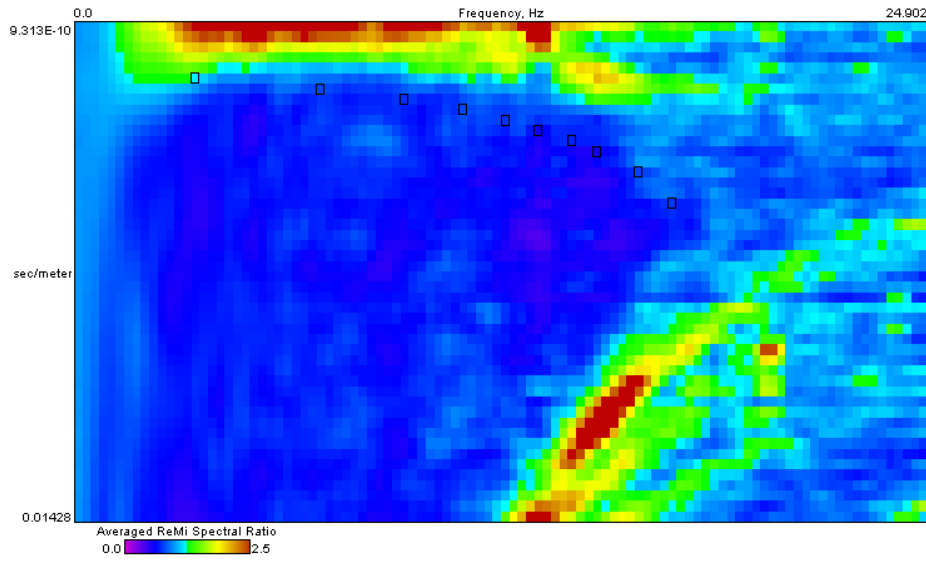
**Figura 121. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04**



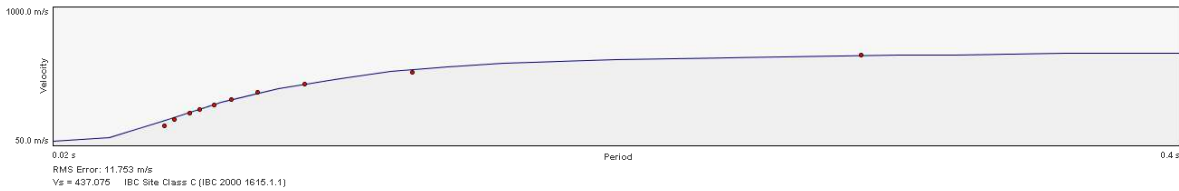
**Figura 122. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04**

En la Figura 123 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 124, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 125 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 126 se presenta la tomografía obtenida para la Línea P-EF-LG-01 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

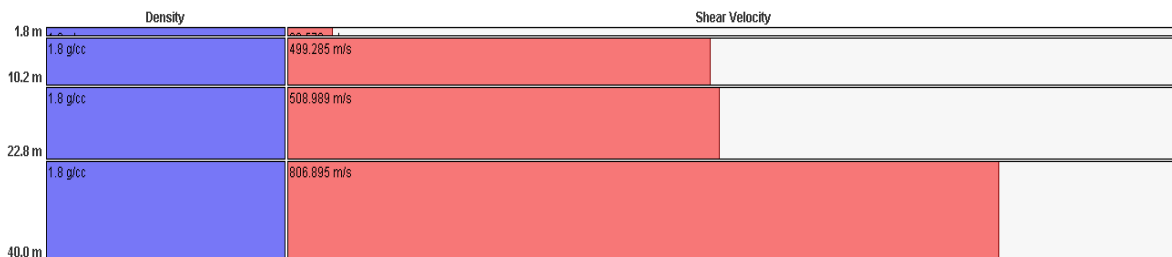
- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 1.8 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 97 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 1.8 m y 10.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 499 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 10.2 m y 22.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 509 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia densa o como roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde los 22.8 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 807 m/s, la cual puede definirse como roca.



**Figura 123. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01**

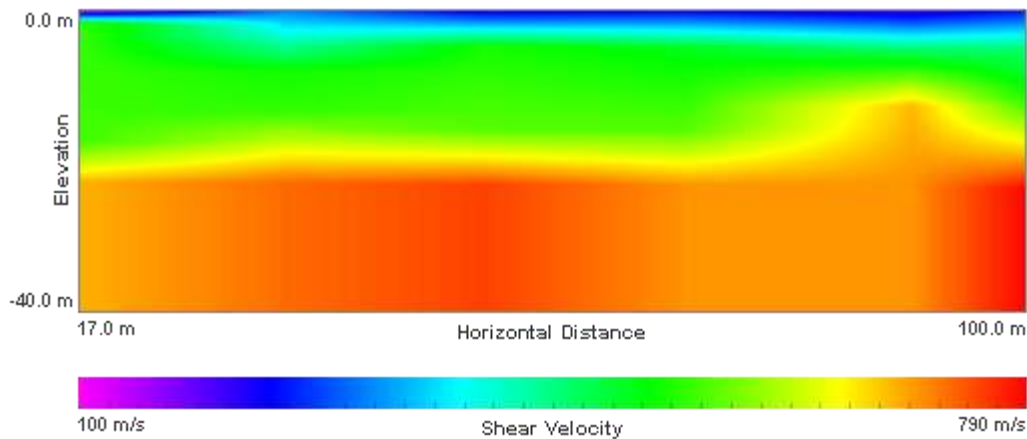


**Figura 124. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01**



**Figura 125. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01**

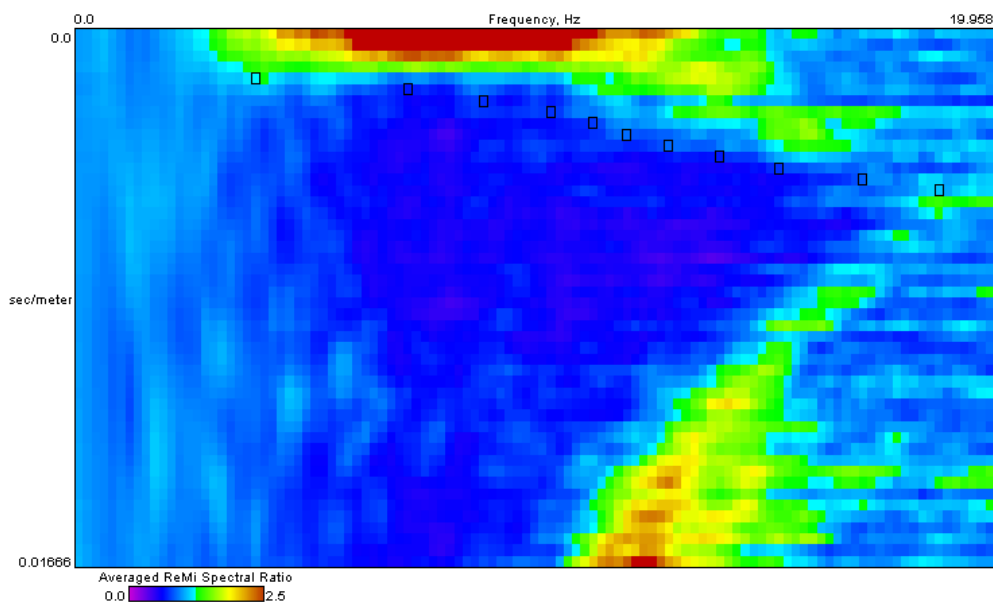




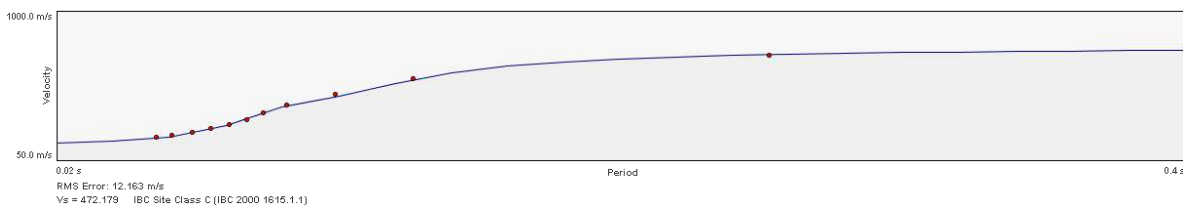
**Figura 126. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01**

En la Figura 127 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 128 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 129 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 130 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-02 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 184 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.6 m hasta los 8.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 248 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.0 m hasta los 12.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 746 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una siguiente capa desde los 12.2 m hasta los 20.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 822 m/s, la cual puede definirse como roca.
- ✓ Una capa más profunda desde 20.2 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 864 m/s, la cual puede definirse como roca.



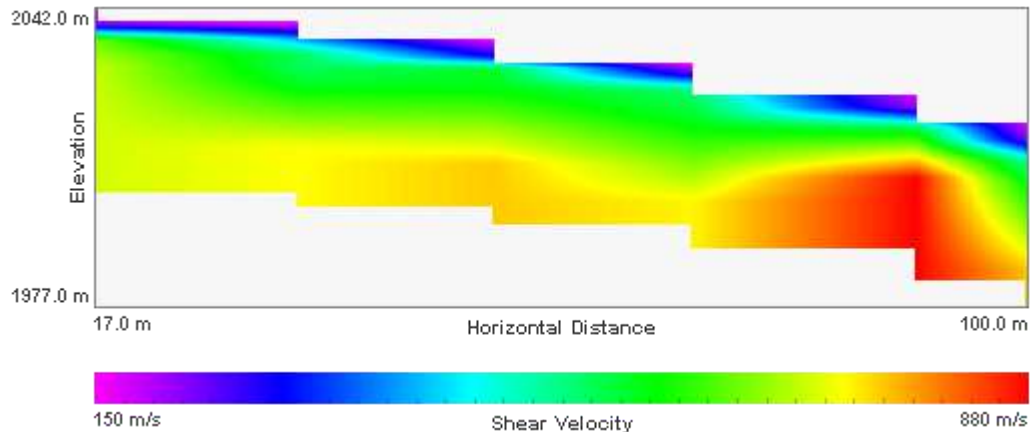
**Figura 127. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-02**



**Figura 128. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-02**

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.8 g/cc	183.934 m/s
8.0 m	1.8 g/cc	248.306 m/s
12.2 m	1.8 g/cc	745.628 m/s
20.2 m	1.8 g/cc	822.459 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	863.989 m/s

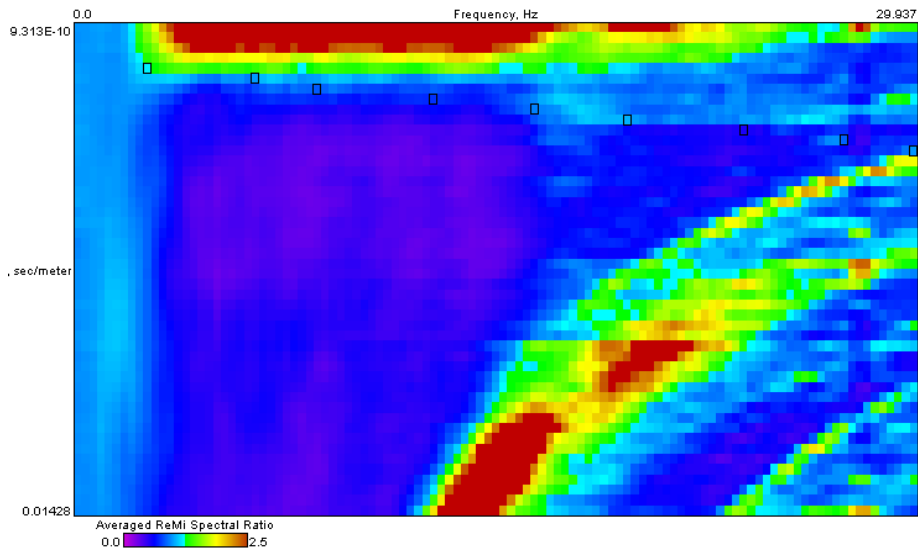
**Figura 129. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02**



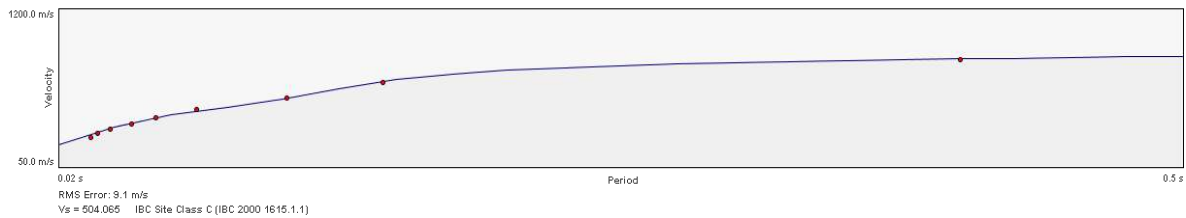
**Figura 130. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02**

En la Figura 131 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 132 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 133 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 134 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-03 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 239 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa entre los 3.6 m y 9.60 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 518 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una tercera capa entre los 9.60 m y los 24.4 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 604 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre los 24.4 m y los 33.0 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 655 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 33.0 m en adelante de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S superior a 1009 m/s, la cual corresponde a roca.



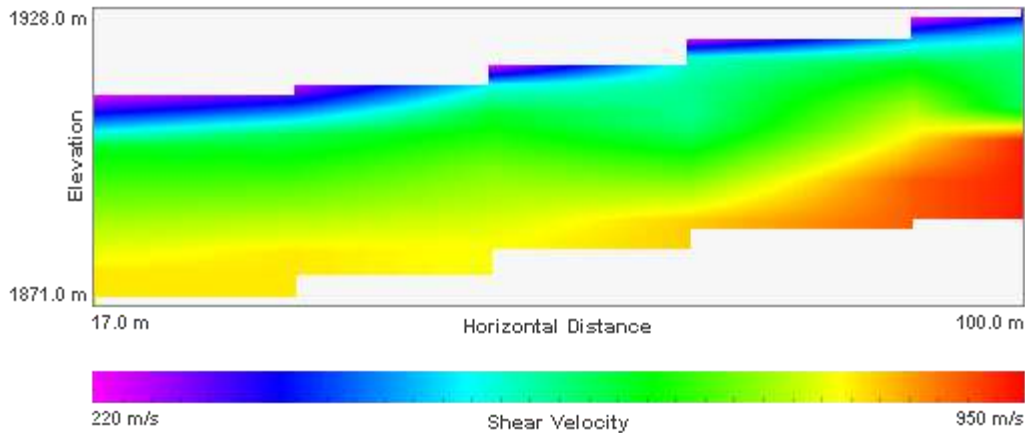
**Figura 131. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-03**



**Figura 132. Dispersión y ajuste para la Línea P—EF-LG-03**

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.8 g/cc	238.525 m/s
9.6 m	1.8 g/cc	517.541 m/s
24.4 m	1.8 g/cc	604.262 m/s
33.0 m	1.8 g/cc	654.536 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	1008.962 m/s

**Figura 133. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03**

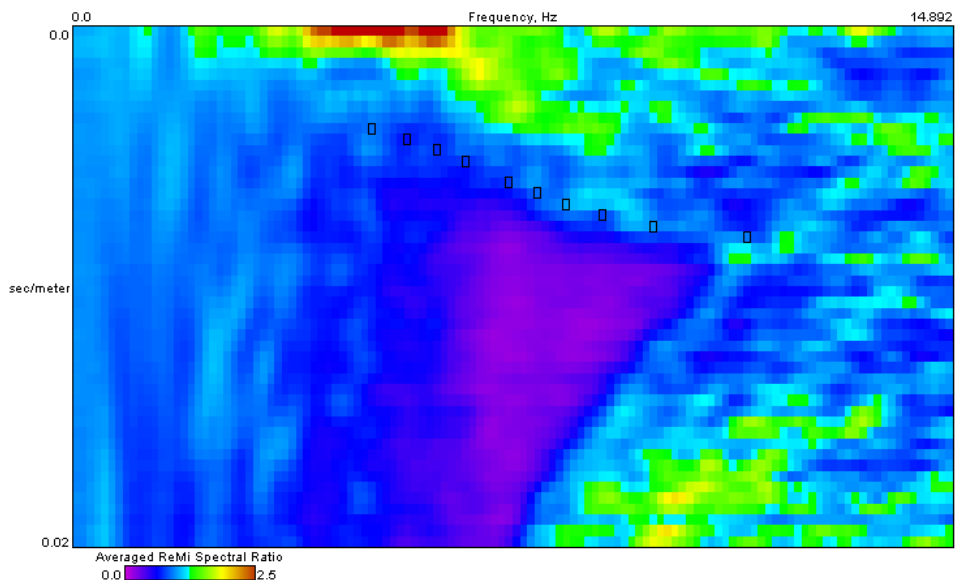


**Figura 134. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03**

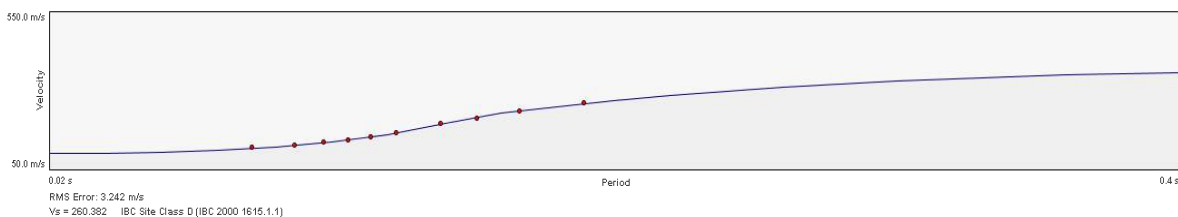
En la Figura 135 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 136 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 137 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 138 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-04 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 116 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m hasta los 10.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 186 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una última capa desde los 10.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 445 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

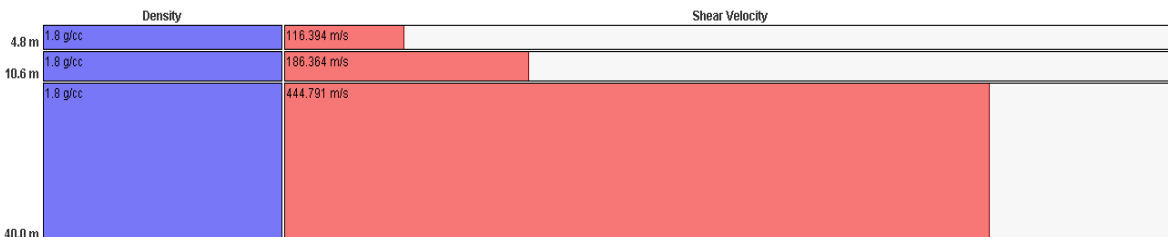




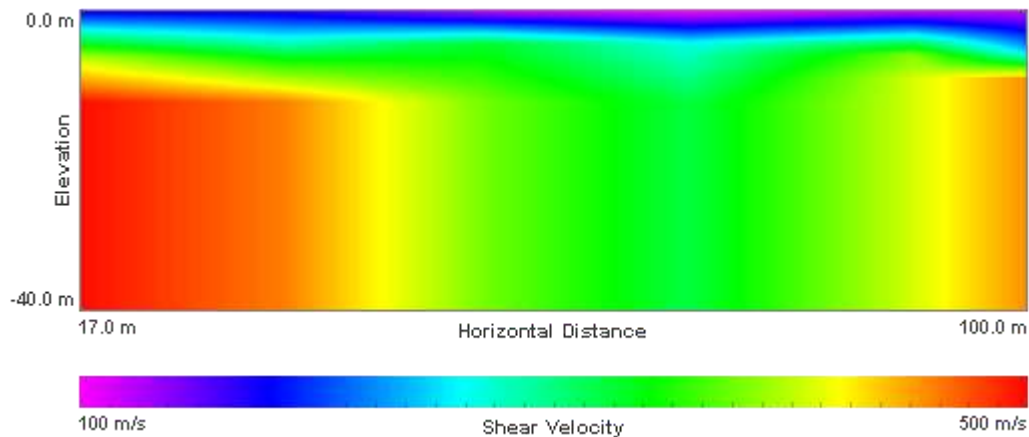
**Figura 135. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-04**



**Figura 136. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-04**



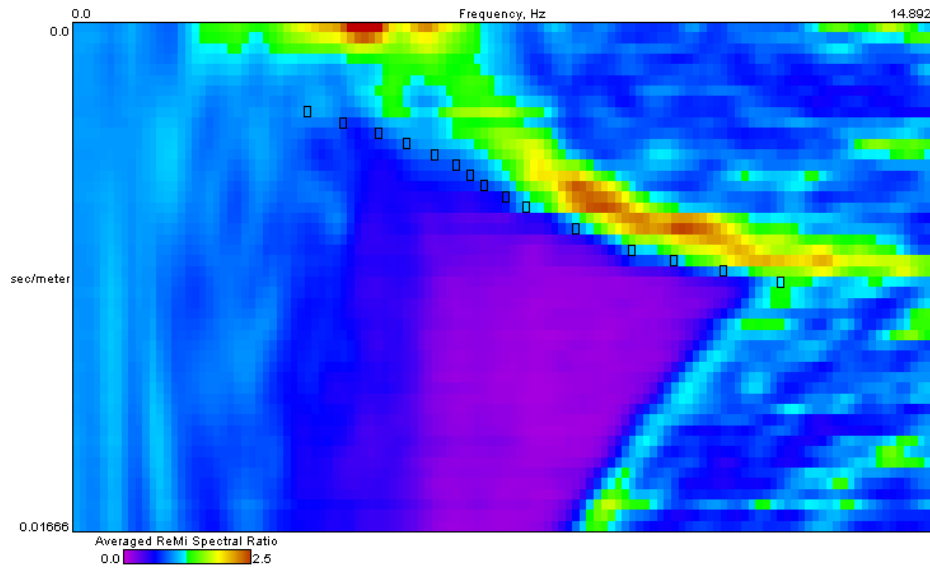
**Figura 137. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04**



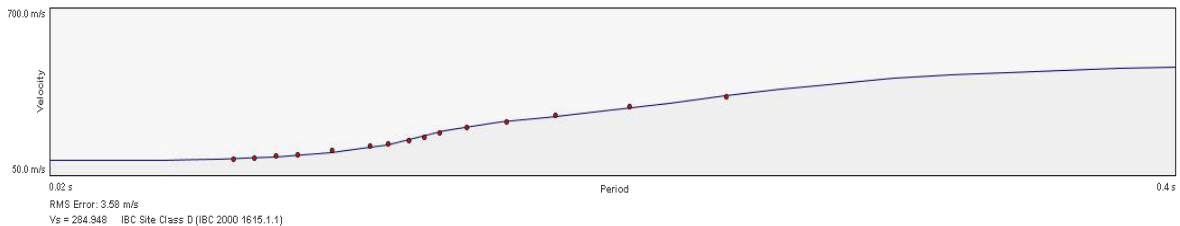
**Figura 138. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04**

En la Figura 139 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-EFG-LG-10. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 140 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 141 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 124 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.2 m hasta los 9.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 181 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 9.2 m hasta los 12.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 284 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa más profunda desde 12.2 m hasta los 16.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 512 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 16.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 586 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.



**Figura 139. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10**



**Figura 140. Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10**

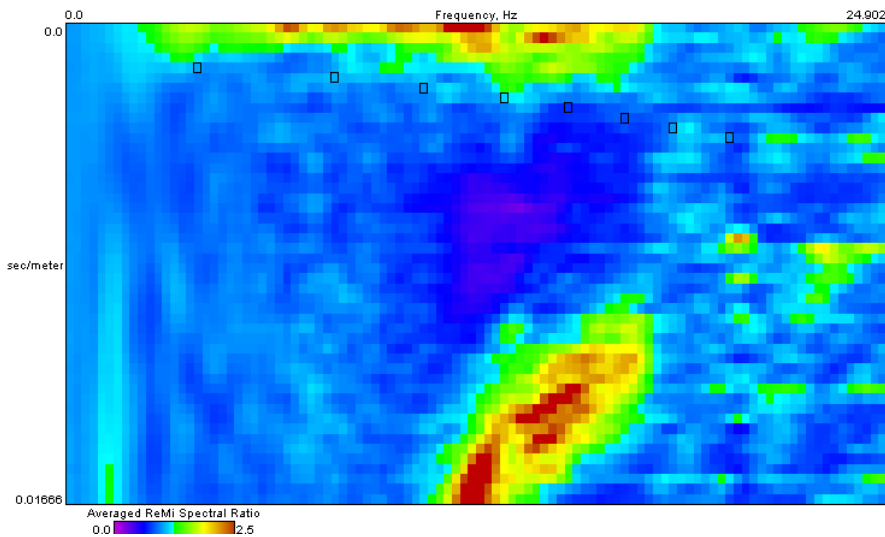
	Density	Shear Velocity
5.2 m	1.8 g/cc	123.698 m/s
9.2 m	1.8 g/cc	181.461 m/s
12.2 m	1.8 g/cc	283.708 m/s
16.8 m	1.8 g/cc	512.104 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	586.466 m/s

**Figura 141. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10**

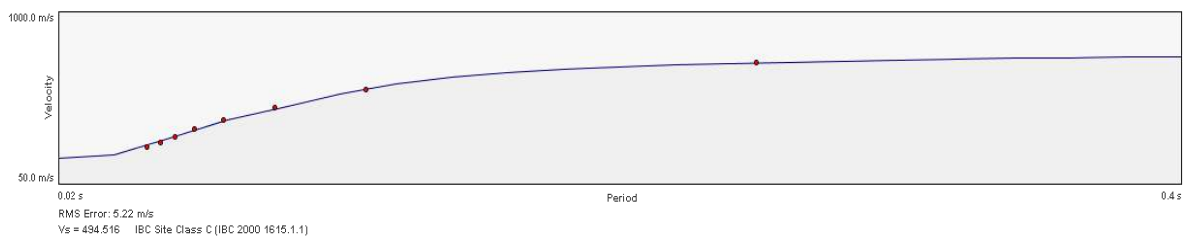
En la Figura 142 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-TN-LG-14. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 143 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 144 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 145 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-TN-LG-14

en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

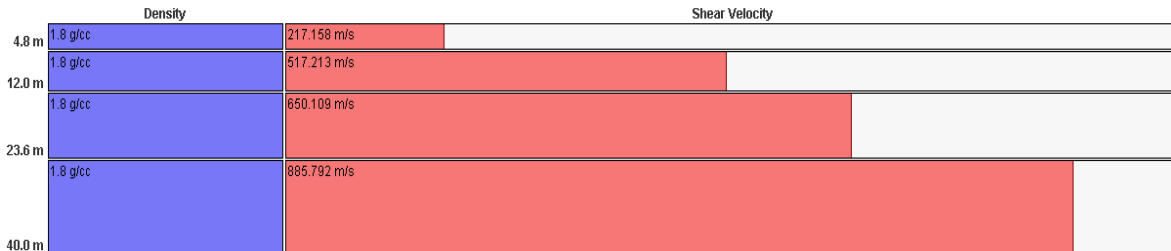
- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 217 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m hasta los 12.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 517 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 12.0 m hasta los 23.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 650 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 23.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 886 m/s, la cual puede definirse como roca.



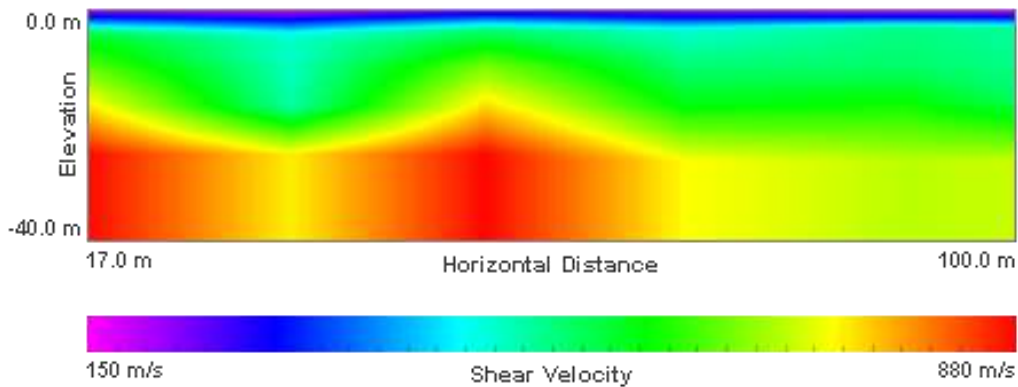
**Figura 142. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14**



**Figura 143. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14**



**Figura 144. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14**



**Figura 145. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14**

## 10.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

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

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

La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales, no obstante esta se concentró principalmente en la



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

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

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

### 10.2.1 Ensayos de clasificación

La Tabla 29 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 30 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

**Tabla 29. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio**

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
U-EFG-PP-01	M2-M3	0.50-1.40	Cenizas volcánicas removilizadas	128.20				0.00	42.00	58.00	ML
P-G-PP-40	M2	2.00 - 2.45	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	49.50	56.00	11.00	0.59	7.00	28.00	65.00	MH
P-G-PP-41	M1	1.00 - 1.45	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	19.10	43.00	10.00	2.39	44.00	27.00	29.00	GM
P-G-PR-34	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	61.10	83.00	11.00	1.99	0.00	7.00	93.00	MH
P-G-PR-34	M4	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	87.30	81.00	22.00	-0.29	0.00	11.00	89.00	MH
P-G-PR-34	M6	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	44.50	57.00	10.00	1.25	9.00	22.00	69.00	MH

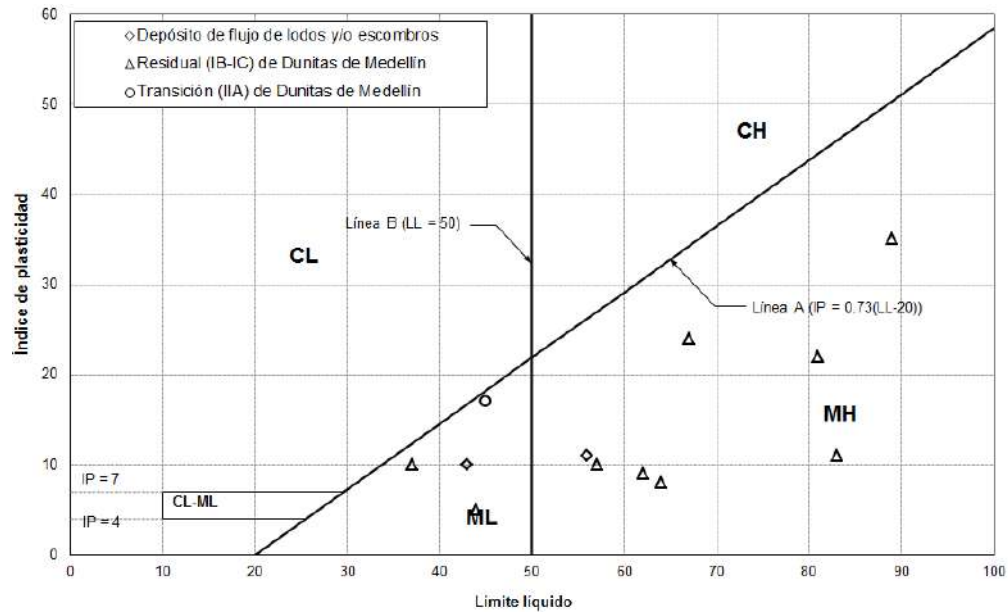
**Tabla 29. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio**

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-G-PP-40	M4	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	75.70	89.00	35.00	0.38	0.00	14.00	86.00	MH
P-G-PP-40	M6	6.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.90	67.00	24.00	1.46	14.00	24.00	61.00	MH
P-G-PP-41	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	10.80	37.00	10.00	2.62	56.00	32.00	12.00	GM
U-EFG-PP-01	M9-M10	3.60-4.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	57.50	64.00	8.00	0.81	3.00	11.00	86.00	MH
U-EFG-PP-01	M19-M20	8.10-9.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	78.90	62.00	9.00	-1.88	0.00	14.00	86.00	MH
U-EFG-PP-01	M27-M28	11.70-12.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	35.20	44.00	5.00	1.76	48.00	24.00	28.00	GM
P-G-PR-33	M1-M3	0.00 - 2.20	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	8.60	45.00	17.00	2.14	61.00	29.00	10.00	GP-GM

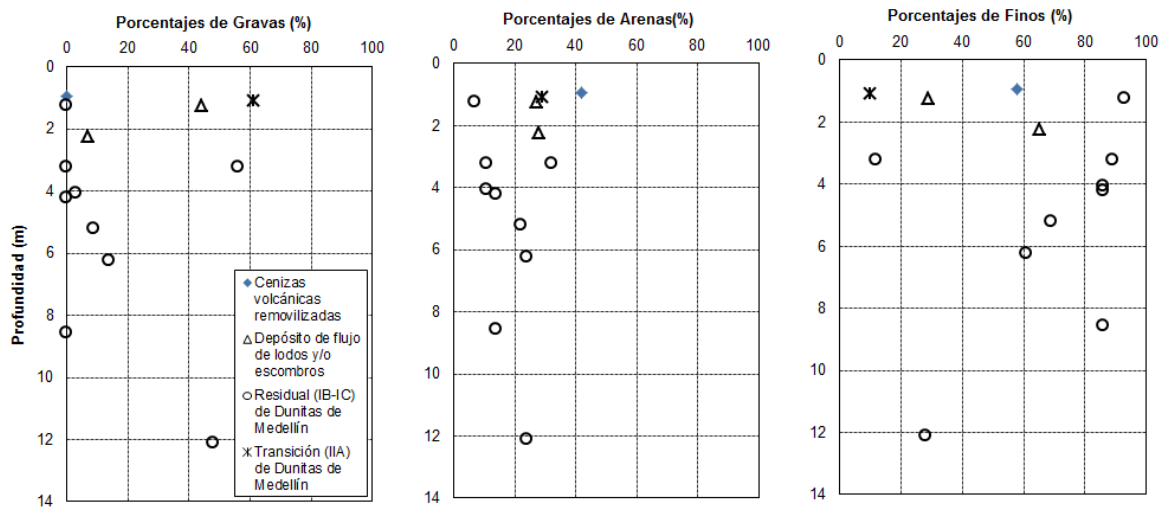
**Tabla 30. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas**

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	G <sub>s</sub>	e	S [%]
U-EFG-PP-01	M2-M3	0.50-1.40	Cenizas volcánicas removilizadas	128.20	2.54	3.31	98.45
P-G-PR-34	M4	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	87.30	3.17	2.81	98.60

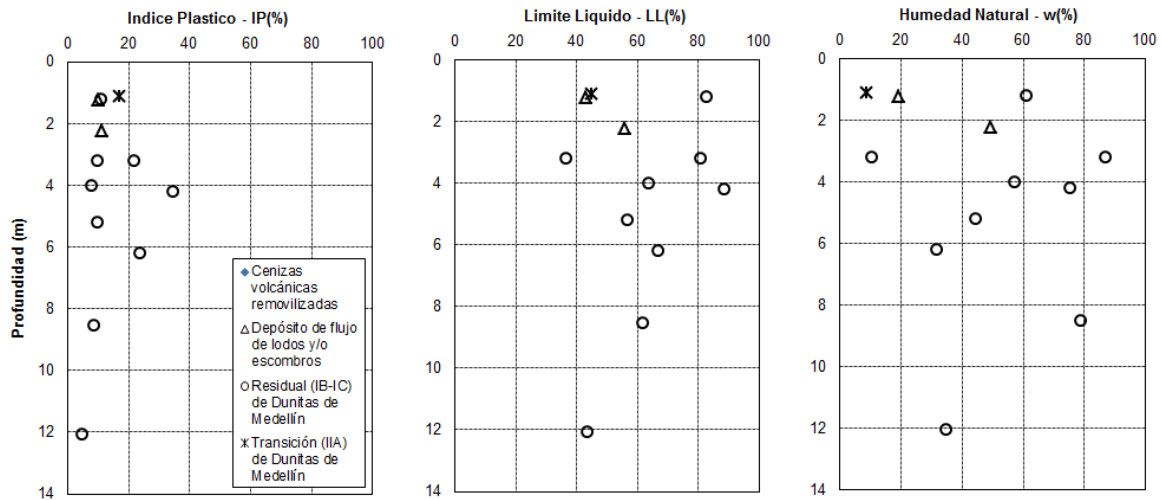
Para el análisis de esta información se trazaron las gráficas que se presentan en la Figura 146 hasta la Figura 149. El conjunto de gráficas mencionado muestra la clasificación de la fracción fina de los materiales en la Carta de Plasticidad de Casagrande, la variación en profundidad de la distribución granulométrica de las muestras, así como de la consistencia, relación de vacíos y saturación.



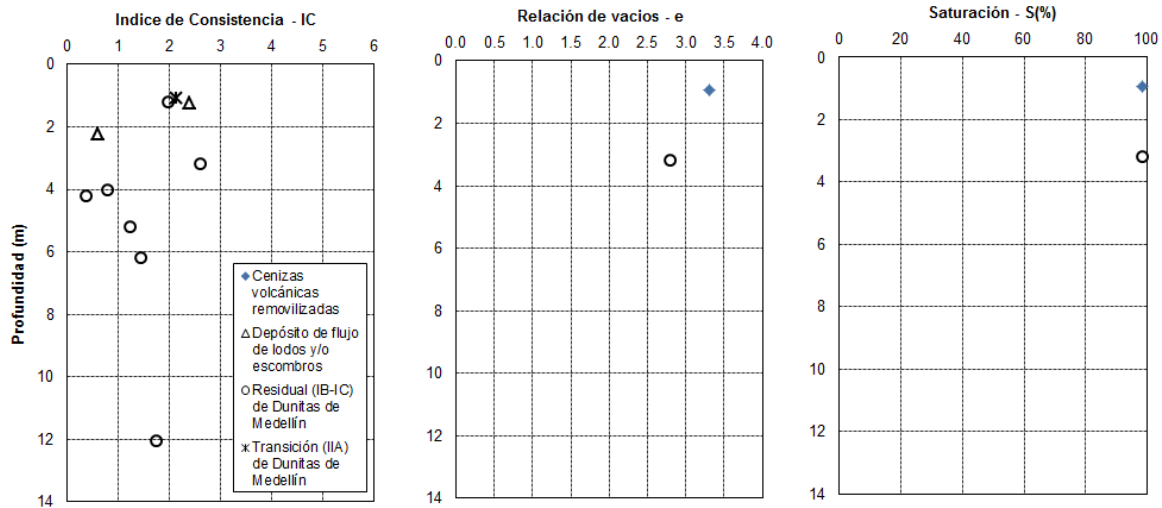
**Figura 146. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande**



**Figura 147. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad**





**Figura 148. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.**



**Figura 149. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad**

Los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y escombros encontrados en la zona presentaron humedades entre 19% y 50% con porcentajes de finos que van desde 29% a 65%, porcentajes de arenas de 27% y porcentajes de gravas entre 7% a 44%. El límite líquido varió entre 43 a 56 mientras que el índice de plasticidad fue de 11. Estos materiales se clasificaron como Limos de alta plasticidad y gravas limosas según la Clasificación Unificada de los Suelos (USCS).

De las muestras recuperadas solo se realizó un ensayo de las cenizas volcánicas removilizadas, que se clasifican según la Clasificación Unificada de los Suelos (USCS)

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

como un limo de baja plasticidad ML. La gravedad específica es 2.5. Por su parte la relación de vacíos es 3.3 y la saturación 98%.

En los suelos residuales (IB-IC) de Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido hasta de 93%, 7% a 32% de arenas y 0% a 56% de gravas. La fracción fina de las muestras presentó límites líquidos superiores a 50 (derecha de la línea B) con valores de hasta 89, límites de plasticidad entre 27 y 72, e índices de plasticidad hasta de 35 (debajo de la línea A). De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron principalmente como limos de alta plasticidad (MH), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, no obstante también se encontraron gravas limosas (GM). De las muestras recuperadas de este material se realizó un ensayo de gravedad específica, el cual dio como resultado 3.2, por lo que se puede inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, la relación de vacíos es 2.8, mostrando que se tienen materiales porosos con saturación de 98%. La consistencia es blanda a dura.

### **10.2.2 Ensayos de resistencia al corte**



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

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

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

- ✓ La Muestra P-G-PR-34-M2, a 2.2 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra P-G-PP-40-M3, a 3.2 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra G2-M1, a 2.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG1-M1, a 1.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG2-M1, a 2.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.



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

- ✓ La Muestra UEFG3-M1, a 3.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG4-M1, tomada en superficie en un estrato de lleno antrópico.
- ✓ La Muestra UEFG5-M1, tomada en superficie en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG6-M1, tomada en superficie en un horizonte IIA de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG7-M1, a 3.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra UEFG8-M1, tomada en superficie en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.

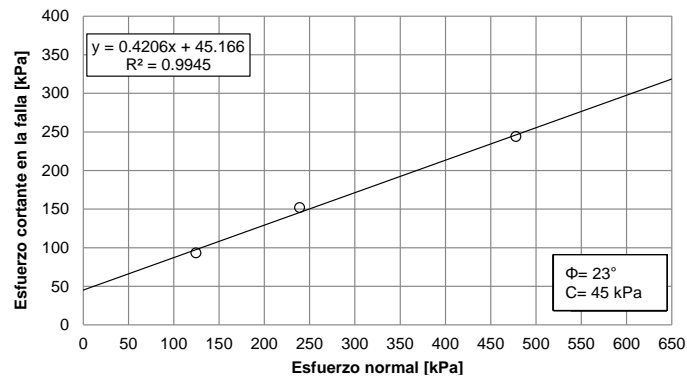
En la Tabla 31 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 150 a Figura 160 se presentan las envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras del Polígono Golondrinas.

**Tabla 31. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas**

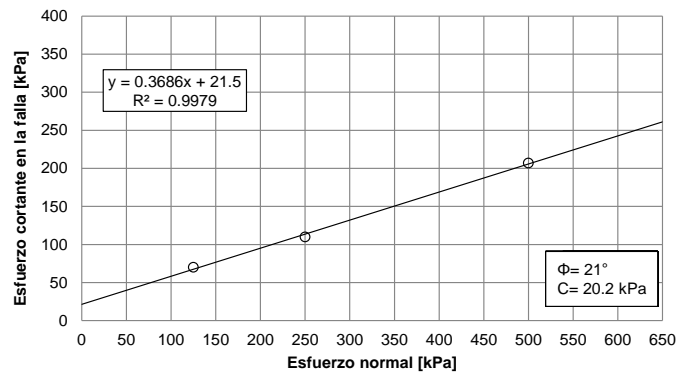
Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Gs	e	S [%]	c' [kPa]	$\phi'$ [°]
P-G-PR-34-M1	2.20	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	60.1	15.3	9.6	3.25	2.20	83.30	45.00	23.00
P-G-PP-40-M3	3.50	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	52.9	14.5	10.0	3.20	2.32	73.00	22.00	21.00
G2-M1	2.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	46.8	14.3	9.7	3.23	2.03	67.20	19.00	20.00
UEFG1-M1	1.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	52.4	14.9	9.7	2.98	2.00	78.00	27.00	21.00
UEFG2-M1	2.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	53.4	15.1	9.8	3.05	2.04	80.00	10.00	25.00
UEFG3-M1	3.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	45.6	16.9	11.6	3.16	1.68	86.00	30.00	23.00
UEFG4-M1	0.00	Lleno antrópico	55.5	14.8	9.5	2.88	1.97	80.00	35.00	25.00
UEFG5-M1	0.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	41.9	17.0	11.9	3.22	1.64	82.00	33.00	25.00

**Tabla 31. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas**

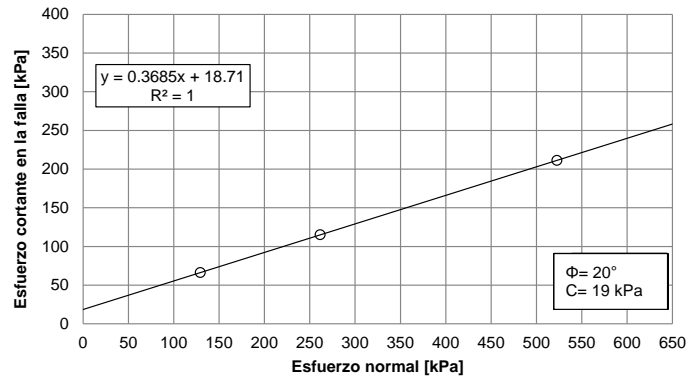
Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Gs	e	S [%]	c' [kPa]	$\phi'$ [°]
UEFG6-M1	0.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	34.2	17.0	12.7	3.16	1.44	75.00	45.00	23.00
UEFG7-M1	3.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	39.2	14.7	10.6	2.92	1.71	67.00	46.00	27.00
UEFG8-M1	0.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	40.0	16.0	13.3	2.98	1.19	51.00	48.00	18.00



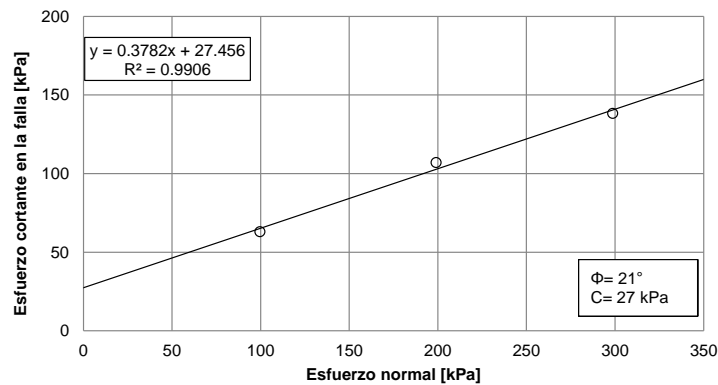
**Figura 150. Resultados corte directo Muestra P-G-PR-34-M2 a 2.2 m de profundidad**



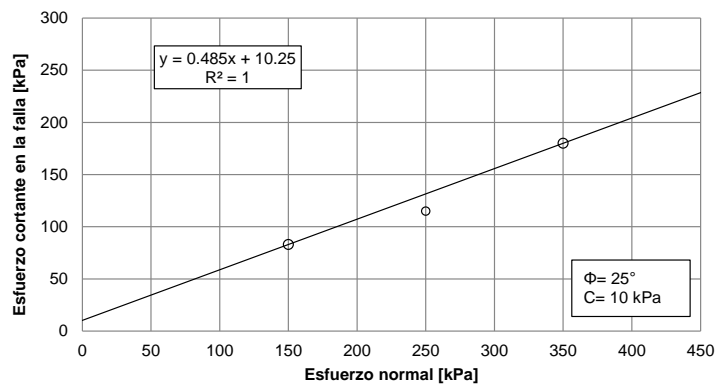
**Figura 151. Resultados corte directo Muestra P-G-PP-40-M3 a 3.2 m de profundidad**



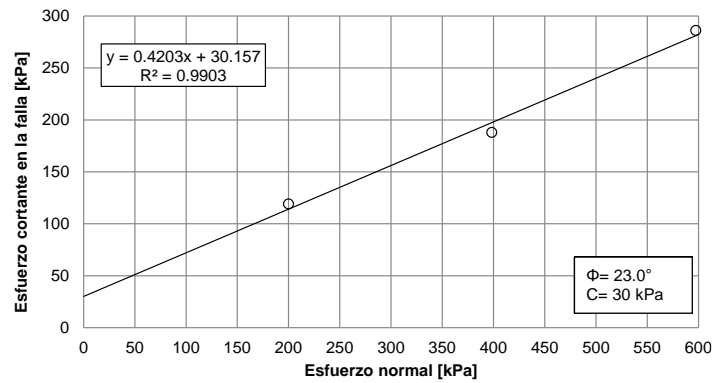
**Figura 152. Resultados corte directo Muestra G2-M1 a 2.0 m de profundidad**



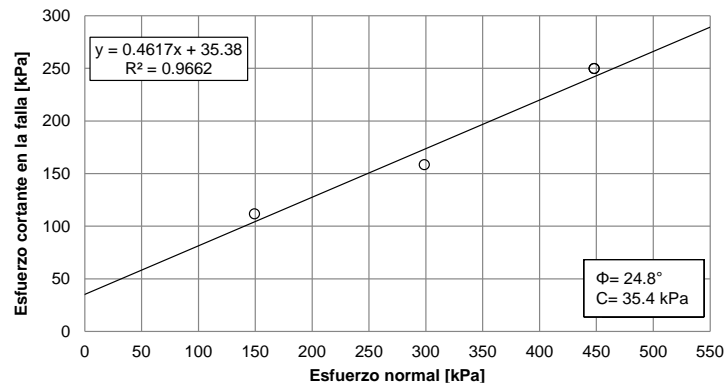
**Figura 153. Resultados corte directo Muestra UEFG1-M1 a 1.0 m de profundidad**



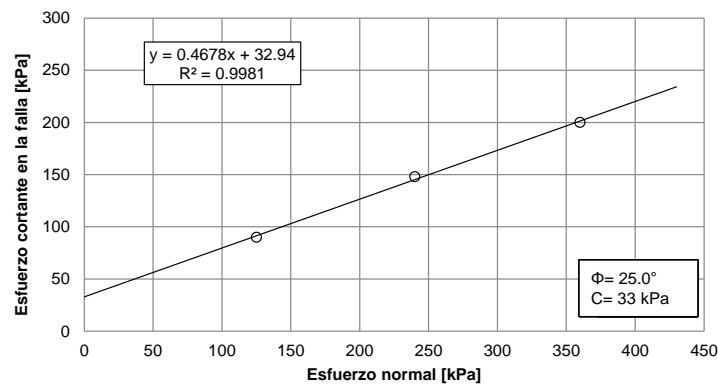
**Figura 154. Resultados corte directo Muestra UEFG2-M1 a 2.0 m de profundidad**



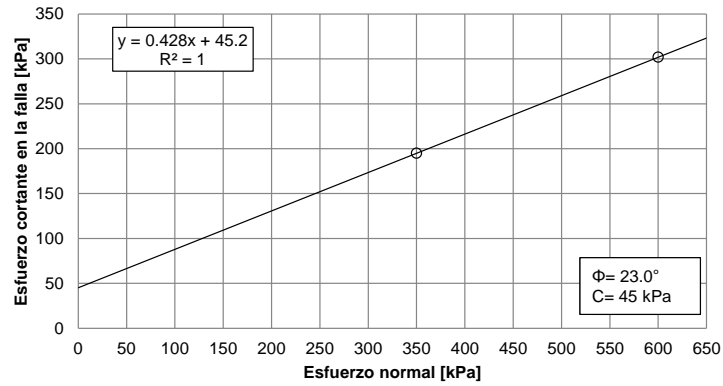
**Figura 155. Resultados corte directo Muestra UEFG3-M1 a 3.0 m de profundidad**



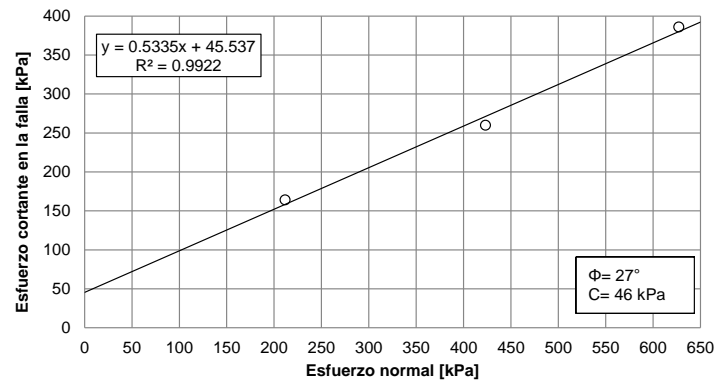
**Figura 156. Resultados corte directo Muestra UEFG4-M1 a 0 m de profundidad**



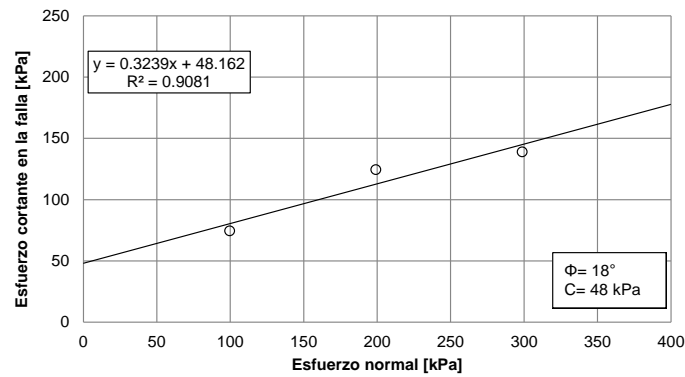
**Figura 157. Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad**



**Figura 158. Resultados corte directo Muestra UEFG6-M1 a 0 m de profundidad**





**Figura 159. Resultados corte directo Muestra UEFG7-M1 a 3.0 m de profundidad**



**Figura 160. Resultados corte directo Muestra UEFG8-M1 a 0 m de profundidad**



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

### **10.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES**

#### **10.3.1 Aspectos generales**

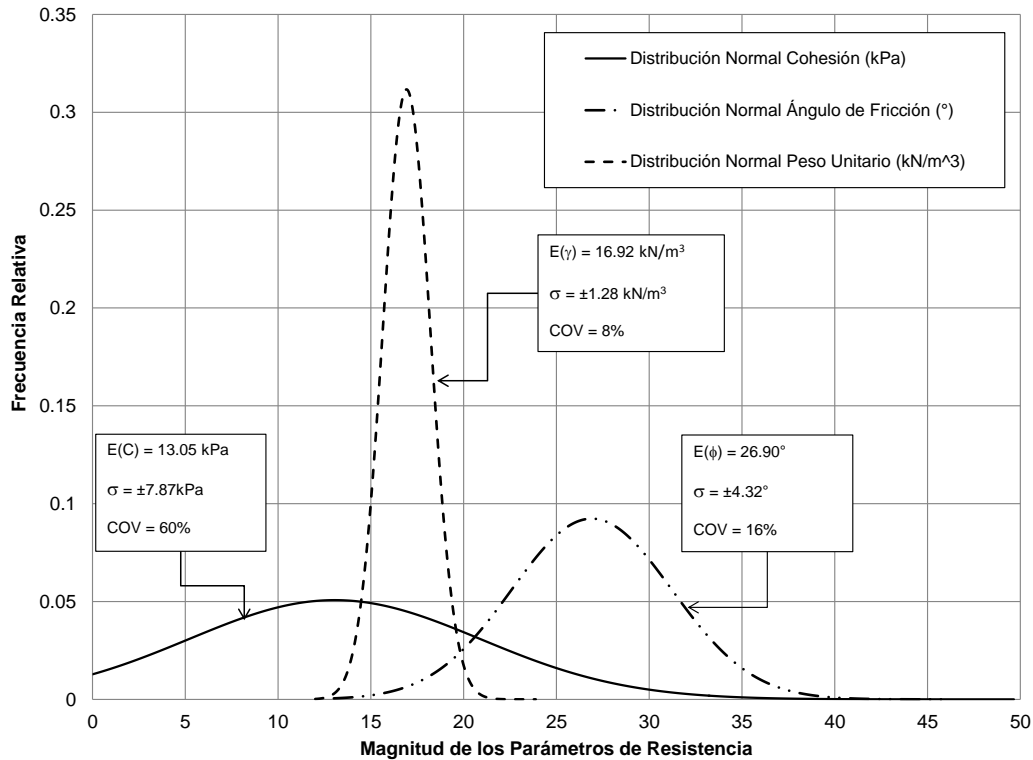
Como parte de este estudio, fueron recopilados todos los ensayos de resistencia al corte realizados en la zona de interés, efectuados por las empresas DEACIVIL y CONSULCIVIL. Además, se utilizaron los ensayos de resistencia al corte ejecutados por INTEINSA en proyectos cercanos a la zona de estudio y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

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

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

#### **10.3.2 Lleno antrópico**

El análisis de los parámetros de resistencia al corte, obtenidos a partir de los ensayos de corte directo recopilados para el lleno antrópico, se presenta en la Figura 162.



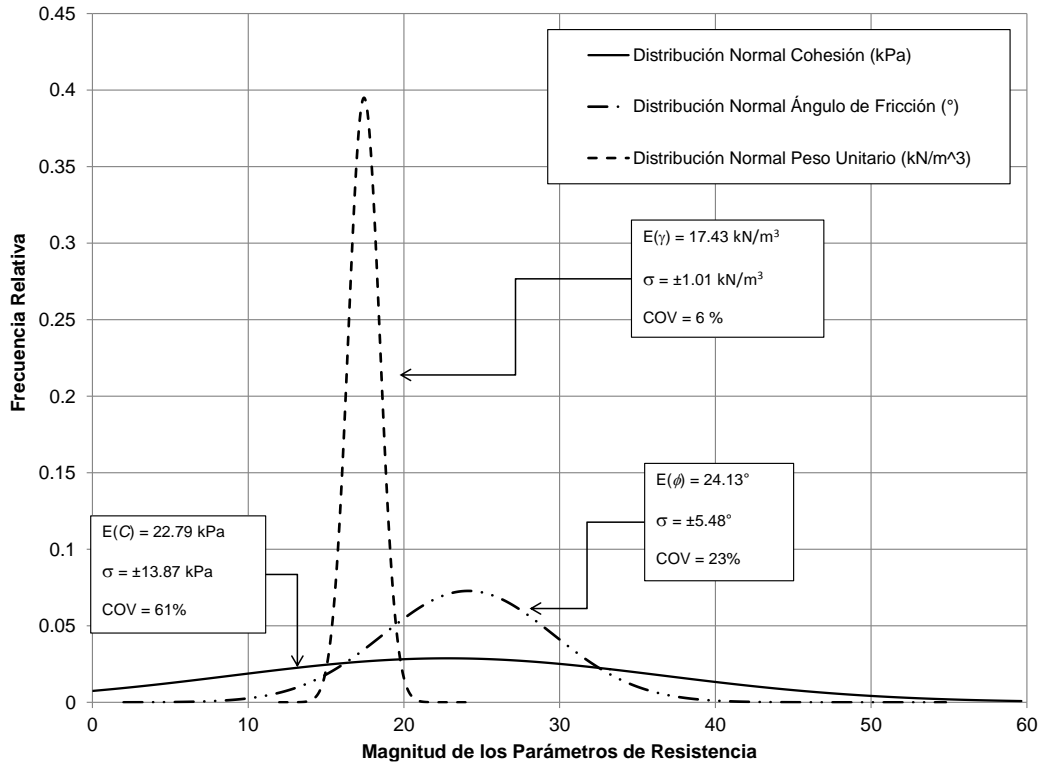
**Figura 161. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico**

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

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

### 10.3.3 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros



El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros se presenta en la Figura 162.



**Figura 162. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente**

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

- ✓ La cohesión presenta una media de 22.79 kPa con una desviación estándar asociada de ±13.87 kPa. El coeficiente de variación es de 61%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 24.13° y una desviación estándar de ±5.48°, además de presentar un coeficiente de variación de 23%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 37° aproximadamente.

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

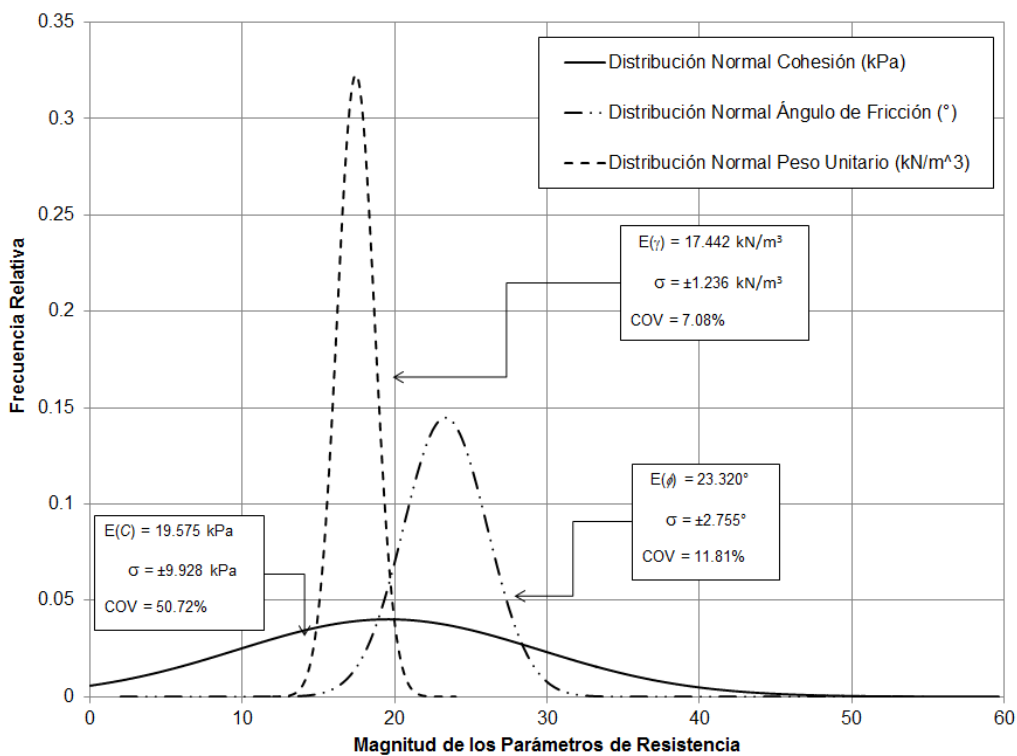
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de  $17.43 \text{ kN/m}^3$  con una desviación estándar asociada de  $\pm 1.01 \text{ kN/m}^3$ . El coeficiente de variación para este parámetro es de 6%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde  $15 \text{ kN/m}^3$  hasta  $22 \text{ kN/m}^3$ .

#### **10.3.4 Depósitos coluviales**

Debido a la naturaleza de este material y que no se cuenta con ensayos de resistencia al corte, se asumen los parámetros similares a los de los depósitos de flujo de lodos. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de flujo de lodos, que se asumirá de forma conservadora para el depósito coluvial, se presenta en la Figura 162.

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

- ✓ La cohesión presenta una media de  $19.575 \text{ kPa}$  con una desviación estándar asociada de  $\pm 9.928 \text{ kPa}$ . El coeficiente de variación es de 50.72%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde  $0 \text{ kPa}$  hasta  $50 \text{ kPa}$ .
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de  $23.320^\circ$  y una desviación estándar de  $\pm 2.755^\circ$ , además de presentar un coeficiente de variación de 11.81%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde  $10^\circ$  hasta  $40^\circ$  aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de  $17.442 \text{ kN/m}^3$  con una desviación estándar asociada de  $\pm 1.236 \text{ kN/m}^3$ . El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.08%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde  $15 \text{ kN/m}^3$  hasta  $22 \text{ kN/m}^3$ .

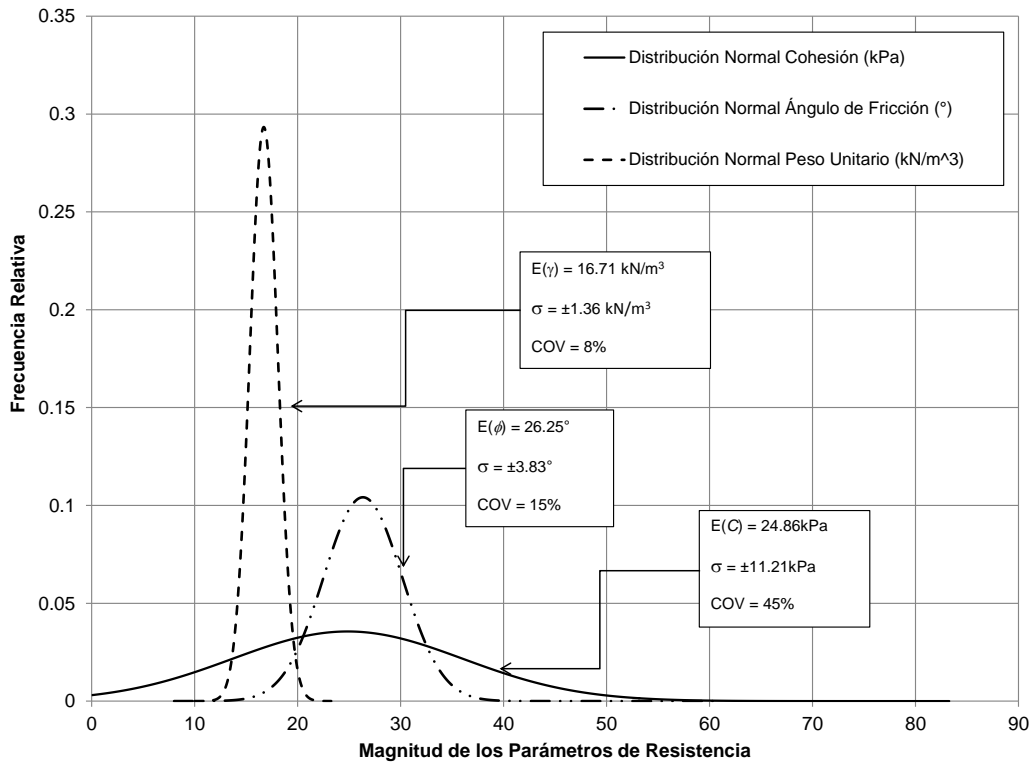


**Figura 163. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos**

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

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el Residual de la Dunita de Medellín se presenta en la Figura 164.





**Figura 164. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas**

En el caso del residual de la Dunita de Medellín los parámetros se tornan cohesivos, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 24.86 kPa con una desviación estándar asociada a  $\pm 11.21$  kPa. Para la cohesión se obtuvo un coeficiente de variación de 45%, que corresponde a la variabilidad más alta respecto a la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. La forma de la función de distribución para este material abarca magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de  $26.25^\circ$  y una desviación estándar de  $\pm 3.83^\circ$ . El ángulo de fricción interna presenta un coeficiente de variación de 14.15%. La forma de la función de distribución abarca magnitudes del ángulo de fricción que van desde  $18^\circ$  hasta  $36^\circ$  aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del residual de la Dunita de Medellín presentó una media de 16.7 kN/m<sup>3</sup> con una desviación estándar asociada de  $\pm 1.43$  kN/m<sup>3</sup>. El coeficiente de variación para este parámetro es de 9%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m<sup>3</sup> hasta 21 kN/m<sup>3</sup>.

### 10.3.6 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte



En la Tabla 32 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

**Tabla 32. Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales**

Material	c' (kPa)			$\phi'$ (°)			$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		
	$\mu$	$\delta$	COV (%)	$\mu$	$\delta$	COV (%)	$\mu$	$\delta$	COV (%)
Lleno antrópico	13.05	7.87	60	26.90	4.32	16	16.92	1.28	8
Depósito de flujo de lodos y/o escombros	22.79	13.87	61	24.13	3.65	23	17.43	1.01	6
Depósito coluvial	19.57	9.93	51	23.32	2.75	11.81	17.44	1.24	7
Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	24.86	11.21	45	26.25	3.81	15	16.71	1.36	8

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

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

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

## **11. ASPECTOS HIDROLÓGICOS**

### **11.1 GENERALIDADES**

La zona completa de estudio, que comprende la parte alta de las Comunas 3 y 8 de la ciudad de Medellín, se caracteriza por ser cruzada por un sistema de drenaje natural que corre de manera general de oriente a occidente y que alimenta la Quebrada Santa Elena y finalmente al Río Medellín. La dinámica natural de este sistema de drenaje podría constituir una fuente de amenaza para la mancha urbana que se ha desarrollado y expandido en las últimas décadas, dado que gran parte de ese desarrollo se ha realizado con asentamientos bastante cercanos a los cauces y a las corrientes naturales. Esta dinámica de las corrientes naturales es función de las características del clima, en particular del régimen de lluvias de la zona, y de las características geológicas y geomorfológicas del terreno.

En este capítulo se describe y caracteriza desde el punto de vista hidrológico la cuenca de drenaje natural que tiene influencia sobre el Polígono Golondrinas, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la Unidad Morfodinámica Independiente Golondrinas. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la estimación de los caudales máximos del cauce.

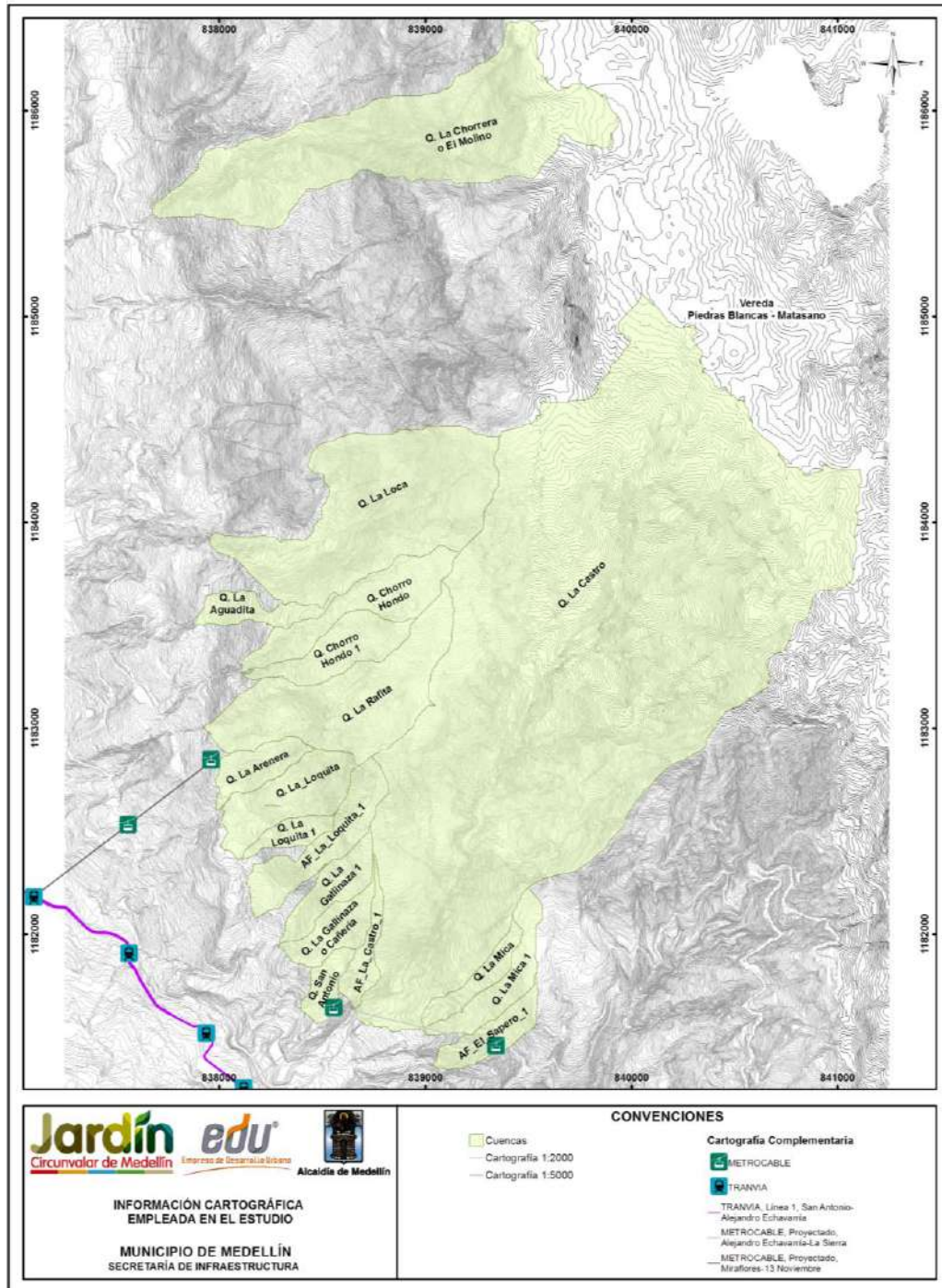
### **11.2 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA**

Como parte importante del desarrollo del presente estudio de riesgo se realizó un proceso de recopilación de información secundaria que es fundamental para los análisis hidrológicos e hidráulicos, así como para la evaluación de la amenaza y el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

En primer lugar, se realizó la recopilación de la información cartográfica, que sirvió como punto de partida para la delimitación y caracterización geomorfológica de las cuencas. Dentro de esta información se recopiló lo siguiente:

- ✓ Cartografía del Proyecto SIGAME (1998) del Valle de Aburrá en escala 1:5000 y 1:2000 para zonas rurales y para zonas urbanas respectivamente.
- ✓ Ortofoto de la zona del proyecto suministrada por la Empresa de Desarrollo Urbano (Realizada en 2010).
- ✓ Fotografías satelitales tomadas del software Google Earth.

Las zonas cubiertas por cada una de las cartografías empleadas en el estudio se pueden observar en el Mapa 23. Se tiene que para 16 de las 18 cuencas estudiadas en el Proyecto Barrios Sostenibles la cartografía con escala 1:2000 cubre totalmente el área comprendida por cada una. En el caso de las cuencas de las Quebradas La Chorrera o El Molino y la Quebrada La Castro se debió complementar la información cartográfica de escala 1:2000 con la correspondiente a una escala 1:5000. El tamaño del pixel utilizado para la delimitación de la cuenca es de 2.0 m, acorde con la escala de trabajo.



Mapa 23. Información cartográfica empleada en el estudio  
(GOLInformacionCartograficaEmpleadaEnEstudio\_Medellin\_C)

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

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

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

Como insumo importante para este estudio, la Empresa de Desarrollo Urbano suministró estudios previos relacionados con hidrología e hidráulica en algunos de los cauces que son objeto del presente estudio. Los estudios suministrados por la EDU corresponden a los siguientes:

- ✓ Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano. Realizado por INGEOCILCON (2014)
- ✓ Revisión de la información de los estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto cinturón verde metropolitano tramo 1 sector cerro Pan de Azúcar camino de la vida. Realizado por CONCAVAS (2013).

En los primeros estudios, realizados por INGEOCILCON, se encuentran los análisis hidrológicos e hidráulicos para 17 quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas 17 corrientes, hay cuatro quebradas que intervienen en los polígonos objeto de este estudio. Estas quebradas son Chorro Hondo, La Loca, El Molino y La Aguadita.

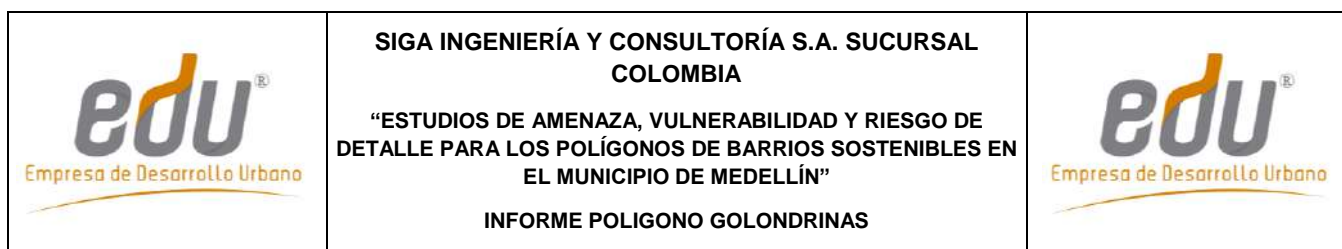
En los estudios realizados por CONCAVAS, se encuentran los estudios hidrológicos e hidráulicos para 6 quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas seis corrientes hay cuatro quebradas que intervienen en los polígonos objeto de este estudio. Estas quebradas son La Loquita, La Arenera, San Antonio y La Rafita.

De esta manera, de cada una de las corrientes mencionadas se tiene un estudio hidráulico e hidrológico realizado por INGEOCILCON o por CONCAVAS, en puntos que a pesar de no coincidir precisamente con los puntos de interés para este proyecto, se tuvieron en cuenta como punto de referencia. Del componente hidrológico se destaca la regionalización hecha por INGEOCILCON a partir de los resultados obtenidos para las 17 cuencas mediante el método racional para la estimación de caudales máximos.

### **11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN**

En la zona de estudio o cerca de ella se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). Entre todas estas estaciones,





las de mayor interés para éste proyecto corresponden a aquellas que son operadas por EPM dado que cuentan actualmente con un periodo de registro que supera los 40 años, y porque presentan mayor certidumbre en registros de corto tiempo por contar con equipos tipo pluviógrafo. Por su parte, las estaciones del IDEAM son de tipo pluviómetro y únicamente registran lluvias en 24 horas. Las estaciones del SIATA presentan información pluviográfica, pero adolecen de un amplio periodo de registros, ya que fueron instaladas en una fecha igual o posterior al año 2010. Sin embargo, la información confiable y disponible del SIATA permitió comparar y validar algunas intensidades de diseño en la zona publicadas por EPM para diferentes duraciones y periodos de retorno.

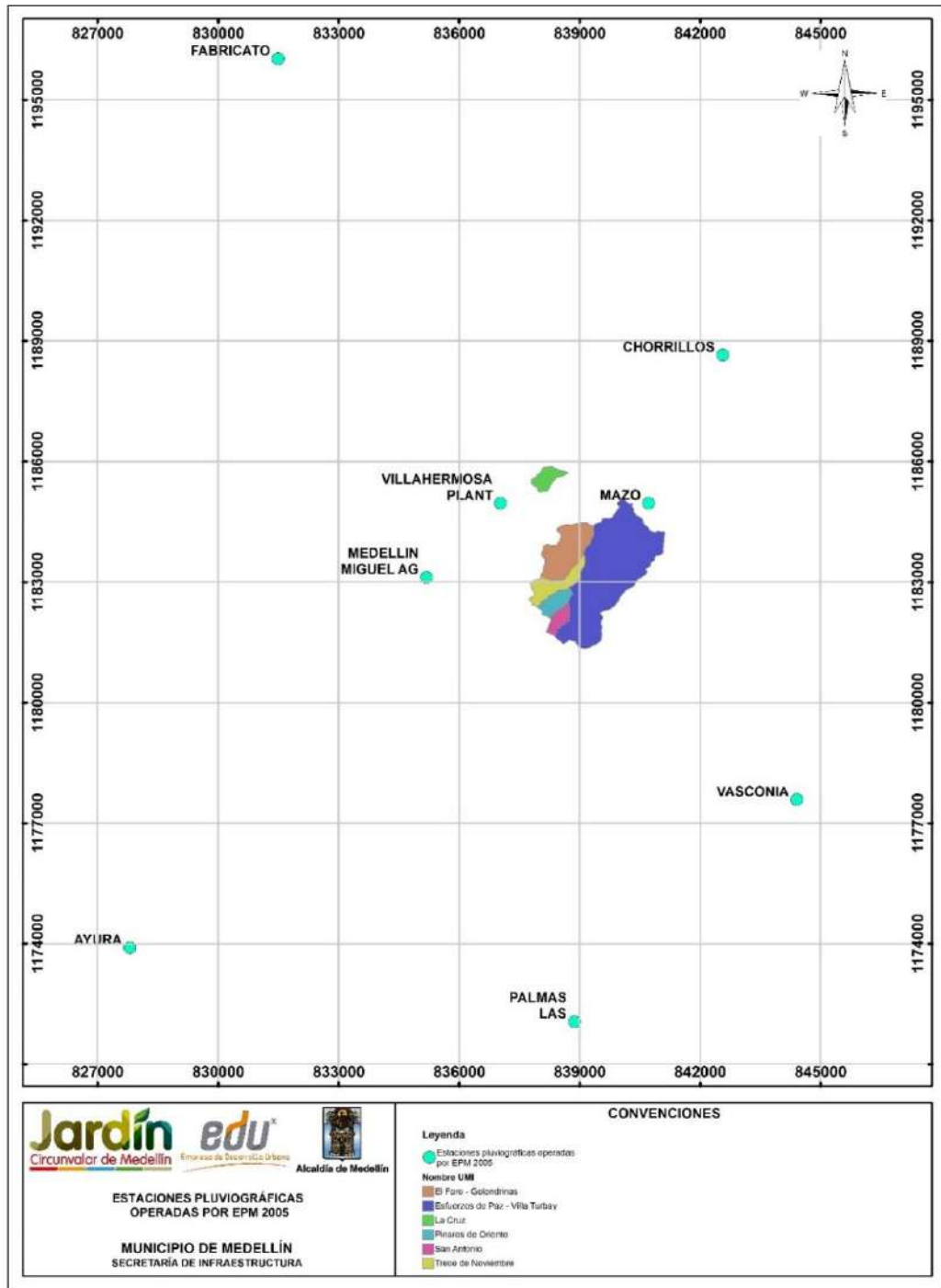
Así las cosas, para la obtención de las intensidades de la lluvia de diseño fueron consideradas las estaciones operadas por EPM y cuya información de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración fue publicada en la Revista Hidrometeorológica de dicha entidad en el año 2005.

En la Tabla 33 se presenta un listado de las estaciones consideradas y en el Mapa 24 se muestra la ubicación de estas con respecto a la zona de estudio.

**Tabla 33. Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual**

CÓDIGO	ESTACIÓN	CATEGORÍA	FECHA INICIO	REGISTRO HASTA	ENTIDAD	ELEVACIÓN	MUNICIPIO	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)
27010930	AYURA	PG	15/02/1972	2011	EEPP	1770	ENVIGADO	1835.5
27010350	CHORRILLOS	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2353	MEDELLIN	1748.3
27010370	FABRICATO	PG	15/09/1949	2013	EEPP	2422	BELLO	1754.6
27010340	MAZO	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2455	MEDELLIN	1801.3
27010470	MEDELLIN MIGUEL AG	PG	15/06/1954	2013	EEPP	1549	MEDELLIN	1409.9
23080230	PALMAS LAS	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2495	RETIRO	2000.2
23080240	VASCONIA	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2510	RIONEGRO	2190.6
27010450	VILLAHERMOSA PLANT	PG	15/07/1948	2011	EEPP	1690	MEDELLIN	1582.4

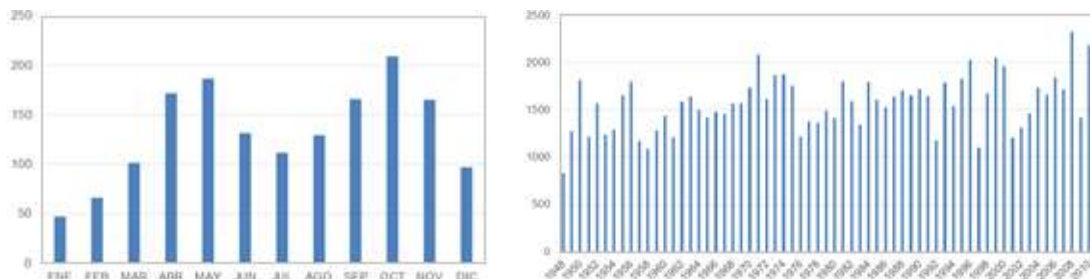
A partir de la información de las estaciones pluviográficas de EPM se realizó un análisis de la distribución anual de la lluvia y del registro histórico anual de precipitaciones. La precipitación media multianual de la zona de estudio se estimó mediante una interpolación con el método del inverso cuadrado de la distancia a partir de las precipitaciones medias multianuales de las estaciones (Tabla 33). En el Anexo 3 (Figura 1) se muestra el mapa con la variación de la precipitación media multianual.



### 11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 165 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Planta Villa Hermosa para el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica de la derecha de la Figura 165 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la estación Planta Villa Hermosa en el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que la precipitación máxima histórica (2349 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el Fenómeno La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.



**Figura 165. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa**

### 11.3.2 Estación Mazo

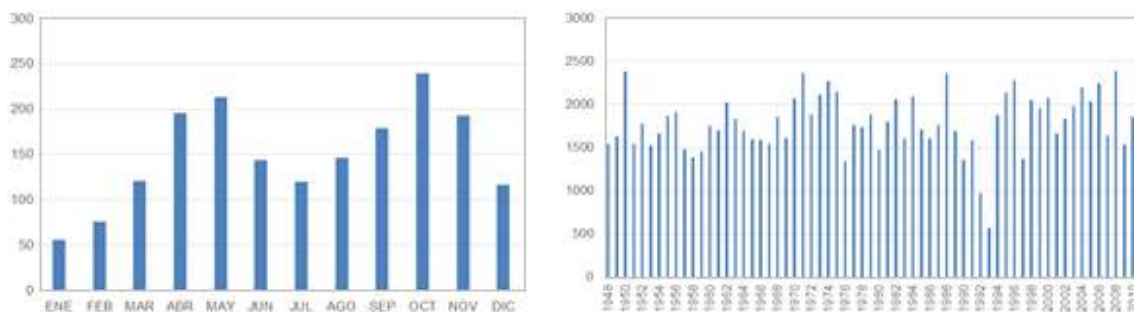
En la gráfica a la izquierda de la Figura 166 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Mazo para el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 166 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la estación Mazo en el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2509 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el fenómeno de La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

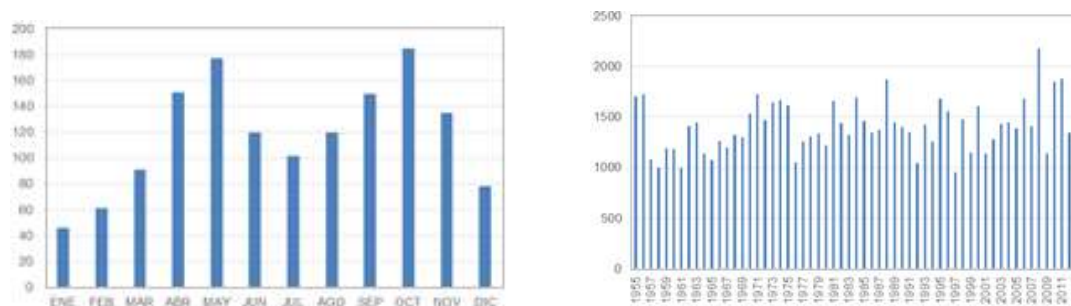
### 11.3.3 Estación Miguel de Aguinaga

En la gráfica a la derecha de la Figura 167 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Miguel de Aguinaga para el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 167 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la estación Miguel de Aguinaga en el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2180 mm) se presentó en el año de 2008. Al revisar los registros del índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el fenómeno de La Niña.

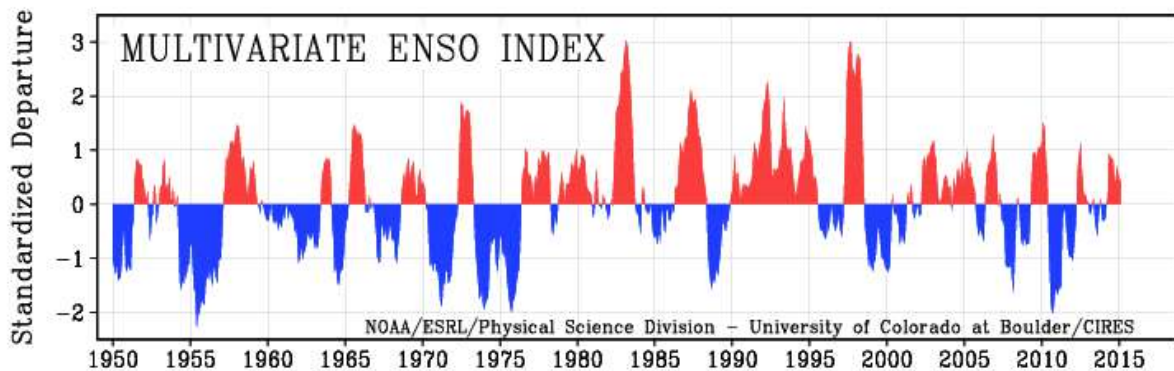


**Figura 166. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo**



**Figura 167. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga**

A partir del análisis de las estaciones citadas, puede concluirse que zona de estudio actúa un régimen de precipitaciones bimodal con dos periodos de lluvias fuertes que van de abril a junio y de septiembre a noviembre.



**Figura 168. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)**

#### **11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS**

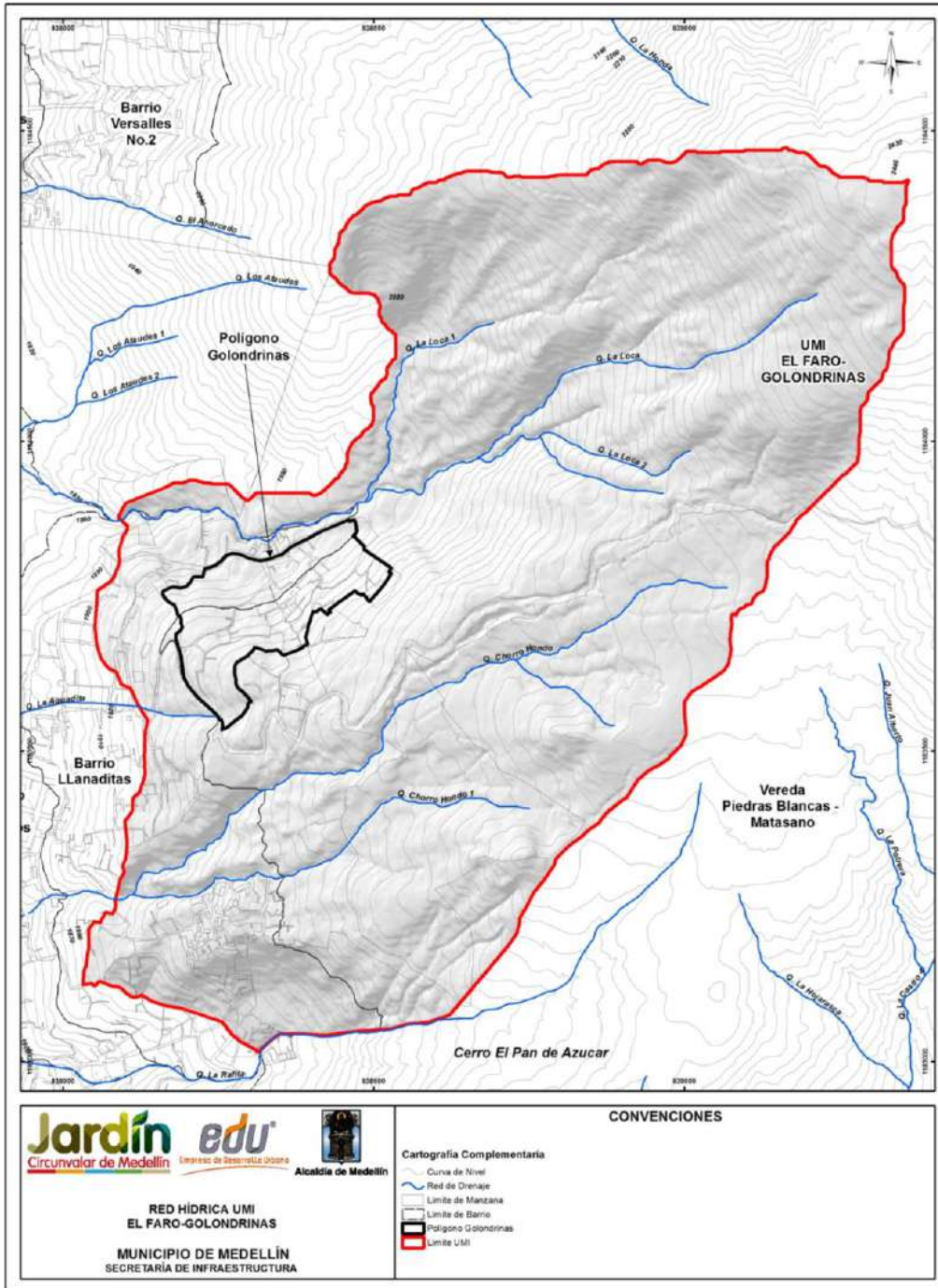
En el Mapa 25 se presenta la red hídrica de la UMI El Faro-Golondrinas y en el Mapa 26 se presenta esta misma red de drenaje de la zona de estudio con las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el Polígono Golondrinas.

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

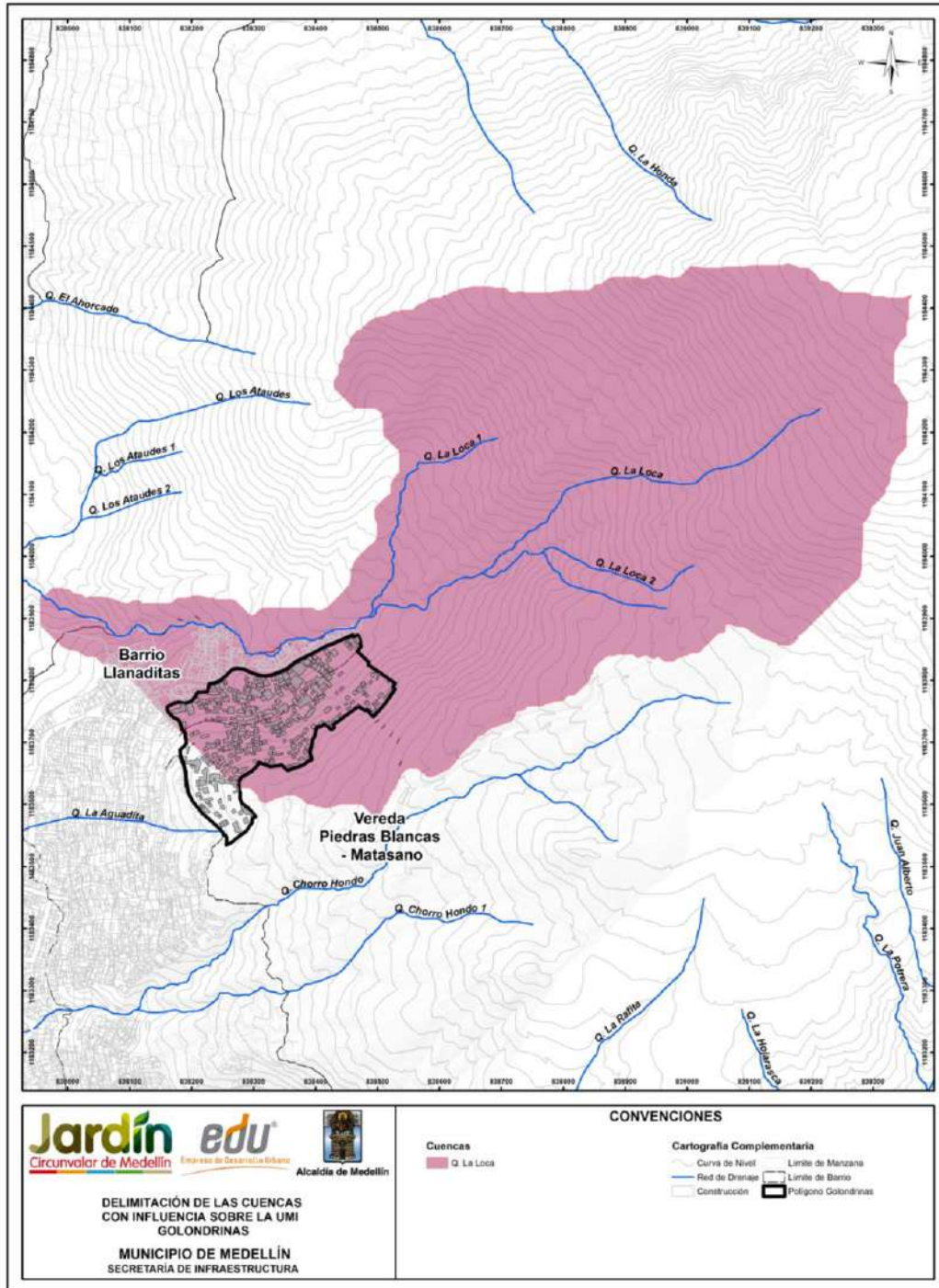
En particular, para el Polígono y para la UMI El Faro - Golondrinas, la corriente natural que tiene influencia corresponde a la Quebrada La Loca, la cual corre por el costado norte del polígono.

A partir del Modelo Digital de Elevación del Terreno y de la red de drenaje trazada, se delimitó la cuenca que tiene influencia sobre el Polígono Golondrinas, la cual fue nombrada de acuerdo con la corriente a la cual pertenecen. El punto de delimitación de la cuenca corresponde al punto más bajo de la corriente al interior de la UMI.





**Mapa 25. Red hídrica en la UMI El Faro - Golondrinas**  
 (20\_GOLRedHidricaUMI\_Medellin\_C y 20\_GOLRedHidricaUMI\_Medellin\_T)



Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre el Polígono Golondrinas (GOLDelimitacionCuencasUMI\_Medellin\_C)

A partir del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno, de la red de drenaje y del trazado de la cuenca se hizo una caracterización morfométrica de cada una de ellas. En la Tabla 35 se presentan los parámetros morfométricos de la cuenca. El tamaño del pixel del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno es de 2.0 m de lado, el cual es suficiente para delimitar con detalle las pequeñas cuencas del proyecto.

**Tabla 34. Coordenadas de los puntos de salida del flujo en la cuenca**

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	X	Y
17	Golondrinas	Q. La Loca	837957.23	1183937.37

**Tabla 35. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Golondrinas**

Cuenca	Area (m <sup>2</sup> )	Pendiente media de la cuenca (%)	Perímetro (m)	Altura media de la cuenca (msnm)	Cota max cuenca (msnm)	Cota min cuenca (msnm)	Longitud de la cuenca (m)	Ancho de la cuenca (m)	Longitud del cauce (m)	Pendiente del cauce (%)
Q. La Loca	653280.6	55.6%	4266.0	2141.8	2,444	1,807	1,486	440	1,744	35.0%

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

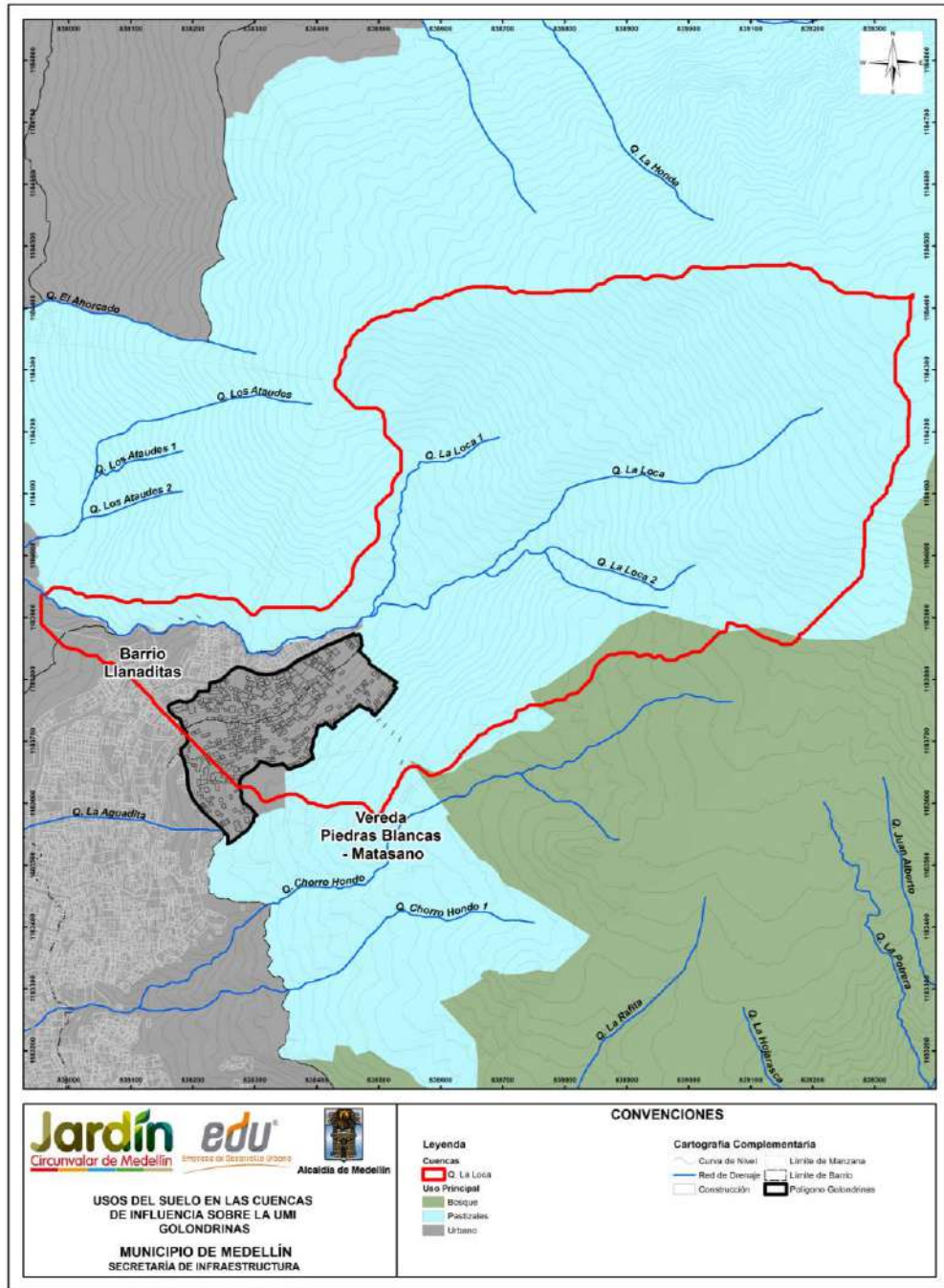
#### 11.4.1 Usos del suelo

Para la asignación de los usos del suelo al interior de cada una de las cuencas con fines de modelación hidrológica, se empleó la información correspondientes a usos del suelo definidos para la UMI El Faro - Golondrinas como es indicada en el POT (2014) y la cual se presenta en el Mapa 3, el Mapa 4, el Mapa 18 y el Mapa 19. Esta información es retomada en este apartado en el Mapa 27, en el cual se ha realizado una reclasificación en términos de los tipos de coberturas o usos del suelo con fines del cálculo hidrológico. La Tabla 36 se muestra un resumen para la cuenca.

Adicionalmente, se realizó una comparación de los usos del suelo indicados en el POT (2014) con respecto de los observados en la ortofoto (2010). Pudo constatar que en la zona rural existen algunas diferencias de asignación al uso del suelo entre la ortofoto (2010) y el POT (2014), pero todas las fuentes coinciden en la asignación de la zona urbana. A pesar de lo primero, los coeficientes de escorrentía (Ce) que se asignan a partir de una o de la otra fuente no varían significativamente debido a la semejanza entre los valores recomendados por Chow et al (1994) para zonas no desarrolladas cuando la pendiente del terreno es superior al 7%.

Las áreas de las zonas urbanas se encuentran localizadas en la parte baja de cada cuenca, teniéndose en algunas de estas un alto grado de intervención antrópica que han modificado las condiciones naturales de escorrentía superficial.





Mapa 27. Usos del suelo en las cuencas de influencia sobre la UMI El Faro - Golondrinas  
Modificado del POT (2014)  
(GOLUsosSuelosCuencasUMI\_Medellin\_C)

**Tabla 36. Usos del suelo en las cuencas de influencia en Golondrinas**

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Forestal productivo	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. La Loca	86%	0%	2%	12%

### 11.4.2 Tiempos de concentración

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

En la Tabla 37 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 38 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono Golondrinas.

**Tabla 37. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración**

Método	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L}{S_0}\right)^{0.77}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (m) So: Pendiente del canal en (m/m)
Temez	$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S_0}\right)^{0.75}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (%)
Johnstone y Cross	$T_c = 5 \times \left(\frac{L}{S_0}\right)^{0.5}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) So: Pendiente del canal (millas/pies)
Federal Aviation Agency (F.A.A)	$T_c = \frac{(1.1 - C) \times L^{0.5}}{S^{0.333}}$	Tc: Tiempo de concentración (minutos) L: Longitud del cauce principal (m) S: Pendiente del canal en (m/m) C: Coeficiente de escorrentía
Pilgrim	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km <sup>2</sup> )
Clark	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km <sup>2</sup> )
California Culvert Practice	$T_c = \left(\frac{11.9 \times L^3}{H}\right)^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) H: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (pies)
Passini I	$T_c = \frac{0.108 \times (A \times L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) S: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m) A: Área de la microcuenca (km <sup>2</sup> )
California Culvert USBR	$T_c = 0.066 \times \left(\frac{L}{S}\right)^{0.77}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m/m)
Giandotti	$T_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times L}{25.3 \times \sqrt{L \times S_0}}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) A: Área de la microcuenca (km <sup>2</sup> ) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (m)

**Tabla 38. Tiempos de concentración calculados para las cuencas**

Nombre cuenca	Tiempo de concentración (min)										Desv. Est.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Promedio	Tc tomado
	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrim	Clark	California Culvert Practice	Passini I	California USBR	Giandotti	Promedio					
Q. La Loca	9.15	14.03	25.41	38.79	21.31	7.48	11.44	9.10	17.75	17.16	10.12	27.28	7.05	14.46	14.46



Para determinar el tiempo de concentración se hizo un promedio descartando los tiempos extremos que generan un gran salto en la media y la desviación estándar, siendo tomado un Tc igual a cinco minutos en los casos en que se obtiene un tiempo menor a este.

## 11.5 CAUDALES MÁXIMOS

### 11.5.1 Intensidades de Diseño

Las intensidades de diseño se tomaron a partir de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) publicadas por EPM (2005) para las estaciones pluviográficas operadas por esta entidad y que se ubican en la zona. Las curvas IDF presentan una ecuación de la forma:

$$I = C \cdot (D + H)^M$$

Dónde I es la intensidad en mm/h y D es la duración de la precipitación en minutos. C, H y M son parámetros empíricos cuyos valores se presentan en la Tabla 39 para cada estación y periodo de retorno.

**Tabla 39. Valores de los Parámetros C, H y M para las Curvas IDF de las Estaciones EPM (2005)**

ESTACIÓN	PARÁMETRO	TR 2.33	TR 10	TR 50	TR 100
Palmas	C	10721.0	4404.8	2821.9	2903.2
	H	39	20	11	10
	M	-1.2205	-1.0062	-0.8815	-0.8721
Miguel de Aguinaga	C	11762.0	24290.0	39903.0	48618.0
	H	40	43	45	46
	M	-1.2843	-1.3586	-1.4053	-1.4253
Ayurá	C	4238.2	9852.6	16776.0	19876.0
	H	23	22	22	22
	M	-1.0826	-1.1821	-1.237	-1.2526
Chorrillos	C	6256.7	2779.1	3297.3	3448.0
	H	35	15	12	11
	M	-1.1469	-0.9509	-0.942	-0.9352
Mazo	C	37203.0	8937.9	8366.3	9065.6
	H	60	26	19	18
	M	-1.4366	-1.1534	-1.1058	-1.1069
Planta Villahermosa	C	4722.3	3483.1	3487.6	3491.6
	H	24	16	13	12
	M	-1.1075	-0.9946	-0.9511	-0.9353
Vasconia	C	3565.7	3587.9	4339.8	4984.9
	H	17	10	8	8
	M	-1.0225	-0.9653	-0.956	-0.9662
Fabricato	C	1751.8	2023.3	2388.4	2757.4
	H	21	13	10	10
	M	-0.8895	-0.8519	-0.8338	-0.8437

A partir de las intensidades puntuales se determinó la intensidad media de la lluvia para cada cuenca. Esto se realizó mediante un proceso de interpolación en el espacio de las intensidades puntuales. El método empleado es el del Inverso del cuadrado de la

distancia (IDW). Los pesos asignados a cada estación en este proceso se presentan en el Anexo 4 (Tabla 1).

Finalmente, en la Tabla 40 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono Golondrinas.

**Tabla 40. Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca**

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Loca	78.8	118.4	156.8	173.1

### 11.5.2 Método Racional

Este método es uno de los de mayor empleo debido a su sencillez. Presenta validez para para cuencas de área pequeña, inferior a 3 km<sup>2</sup>, ya que uno de sus supuestos es que la intensidad de la precipitación es uniforme sobre toda la cuenca. Este método también supone que la intensidad de la precipitación, permanece constante durante un tiempo mayor o igual al tiempo de concentración de la cuenca. Dadas las características de las cuencas en estudio, con áreas inferiores a 1 km<sup>2</sup>, los resultados de este método serán válidos en ellas.

Según este método el caudal está dado por la siguiente ecuación, donde *Q* es el caudal máximo (m<sup>3</sup>/s), *C* es el coeficiente de escorrentía, *i* es la intensidad de la lluvia (mm/h) y *A* es el área de la microcuenca (ha).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

El Método Racional para la estimación de caudales considera un coeficiente de escorrentía superficial, el cual es la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido. Este coeficiente tiene una naturaleza variable ya que depende de parámetros morfométricos de la cuenca y las características mismas de la lluvia. Entre los factores referentes a la cuenca se encuentran el área, la pendiente, la forma y el uso del suelo. Los factores propios de la lluvia son la intensidad, duración y distribución espacial sobre la zona. Debido a la variación de los factores anteriormente mencionados la determinación del coeficiente de escorrentía se hace compleja ya que este no debe considerarse como una constante, pero en algunos casos prácticos se hace razonable el uso de coeficientes constantes obtenidos mediante procesos experimentales.

Para determinar los coeficientes de escorrentía se hace uso de los coeficientes propuestos por Ven Te Chow (1994), los cuales dependen del periodo de retorno, el uso del suelo, y la pendiente de la cuenca. Estos coeficientes de escorrentía de referencia se presentan en el Anexo 04 (Tabla 2), de los cuales se emplearon los correspondientes a uso residencial tipo concreto/techo, y a áreas no desarrolladas para pendientes superiores al 7% de acuerdo con la topografía de la zona.

Finalmente, los coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca se presentan en la Tabla 41.

**Tabla 41. Coeficientes de escorrentía calculados para la cuenca**

Nombre cuenca	Coeficiente de escorrentía (Adimensional)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Loca	0.43	0.49	0.56	0.59

### 11.5.3 Hidrogramas sintéticos

Dentro de las metodologías propuestas se tienen las de Williams y Hann, Snyder, y la del Soil Conservation Service (S.C.S). Estas metodologías plantean la construcción de un hidrograma unitario cuya forma está en función de características físicas de la cuenca de acuerdo a los parámetros de cada modelo. A partir de estos hidrogramas unitarios y la tormenta de diseño se obtiene el caudal máximo relacionando estos dos elementos mediante una convolución matemática, operación a través de la cual se obtienen los hidrogramas de escorrentía directa. Aunque en particular para las cuencas del Polígono Golondrinas no fueron empleados los métodos de los hidrogramas unitarios, por el pequeño tamaño de las cuencas, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los modelos de las metodologías empleadas.



#### 11.5.3.1 Método de Williams y Hann

J. R. Williams y R. W. Hann propusieron en la década de los 70 un modelo para calcular el hidrograma unitario de una cuenca. El modelo emplea las principales características geomorfológicas de la cuenca y las representa mediante dos parámetros,  $K$  y  $T_p$ , constante de recesión y tiempo al pico respectivamente, parámetros que fueron obtenidos mediante una regresión sobre una muestra de 34 cuencas ubicadas en los Estados Unidos, la cuales tienen áreas que varían entre 0,5 y 25 millas cuadradas. Las expresiones empleadas para calcular estos parámetros son las siguientes:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 11.5.3.2 Método de SCS

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS) desarrolló un Hidrograma Unitario Adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas, correspondientes a microcuencas de diversos tamaños y ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos.

El Hidrograma Unitario adimensional curvilíneo del S.C.S puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular equivalente, con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en el lado creciente del Hidrograma.



El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$U_p = \frac{484 * A_c}{T_p}$$

En donde  $U_p$  es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario,  $A_c$  es el área de la microcuenca en millas cuadradas y  $T_p$  es el tiempo al pico en horas.

El SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago,  $T_R$  y el tiempo de concentración,  $T_C$ , como:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$T = 0.133T_C$$

### 11.5.3.3 Tormenta de diseño e intensidad de la precipitación

A partir de la información de las curvas IDF de las estaciones a considerar se determinó la intensidad de la lluvia para cada cuenca, considerando una duración igual al tiempo de concentración, y empleando el método de inverso del cuadrado de la distancia (IDW).

Los modelos de hidrogramas unitarios requieren hietogramas de precipitación efectiva para cada periodo de retorno considerado. La tormenta de diseño se consideró con una duración igual al tiempo de concentración de cada microcuenca.

Con el fin de hacer una distribución temporal de la lluvia se emplearon las relaciones de distribución temporal de la lluvia propuestas por Huff en 1976 (Chow et al, 1994). Huff desarrolló esta distribución para diferentes patrones de precipitaciones (grupos de probabilidad), desde los patrones de lluvia más severas (I cuartil), hasta los más suaves (IV cuartil). Se empleó la distribución correspondiente al primer cuartil con una probabilidad de excedencia del 50%.

### 11.5.3.4 Pérdidas hidrológicas

Para simular las pérdidas de precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por interceptación en la vegetación, almacenamiento en depósitos del suelo y por infiltración, se usó el método del número de curva. Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y relaciona la lluvia total y la lluvia



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

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

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

Donde,  $P_e$  es la precipitación efectiva en pulgadas,  $P$  es la precipitación media en pulgadas,  $S$  es la retención potencial máxima del suelo e  $I_a$  es la retención mínima que equivale al 20% de la retención máxima.

### 11.5.3.5 Estimación del Número de Curva

El número de curva depende del tipo del suelo, del tipo de tratamiento superficial que esté presente, de su condición hidrológica y de las condiciones de humedad antecedente la cual puede relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores.

La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos: AMC-I: Para suelos secos, AMC-II: Para suelo intermedios y AMC-III: Para suelos húmedos. Para estimar los caudales máximos se considera la condición de humedad antecedente III (AMC III) dado que se asumen condiciones de humedad altas (similares a las generadas por las temporadas de invierno).

El tipo y las características de los materiales que conforman el suelo también inciden en la cantidad de precipitación que se infiltre en ellos. Para tener esto en cuenta, los suelos se pueden clasificar en los siguientes grupos hidrológicos:

Grupo de Suelo A. Alta infiltración (baja escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas cubiertos con vegetación (bosque o rastrojo alto) con grado de meteorización 30/50 según Brand (1988) y con discontinuidades en la matriz de suelo producto del proceso de descomposición de la roca. Las estructuras heredadas funcionan como canales de flujo principales. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a 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 varía entre un 5 y 15%.

Grupo de Suelo D. Muy poca infiltración (alta escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyo grado de meteorización varía entre 50/90 y en donde la pendiente media excede 15%. El tipo de vegetación en este grupo no es de mayor importancia ya que el fuerte gradiente topográfico impide la recarga de los acuíferos en la zona, generando por el contrario un flujo hipodérmico hasta aflorar nuevamente en superficie y hacer parte del agua que se aporta al canal principal de la microcuenca.

De acuerdo con las características geológicas de la zona estudiada, se determinó que los suelos presentes allí pertenecen al grupo hidrológico C.

En el Anexo 04 (Tabla 3) se muestran los diferentes números de curva para cada una de las coberturas vegetales (o usos del suelo) y para cada uno de los grupos hidrológicos del suelo.

Para determinar el número de curva afectado por la condición de humedad antecedente III, se utilizó la siguiente expresión:

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

Donde  $CN(III)$  es el Número de curva equivalente para las condiciones de humedades AMC-III y  $CN$  es el Número de curva para condiciones antecedentes de humedad AMC-II.



Según la distribución de los usos y el grupo hidrológico del suelo en las cuencas estudiadas se estimó un número de curva mediante un promedio ponderado por áreas.

#### 11.5.4 Regionalización de caudales

Después de determinar los caudales asociados a los diferentes periodos retorno para cada cuenca estudiada, se realizó a partir de estos una regresión de tipo potencial entre esta variable y el área. De esta manera se obtiene una expresión regionalizada que permite estimar los caudales máximos en función del área de la cuenca considerada. La expresión es de la siguiente forma:

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

Las cuencas consideradas para el análisis de regionalización corresponden a todas las que componen los ocho polígonos de estudio en el presente contrato. Es decir, se consideraron las cuencas de las Quebradas Chorro Hondo, San Antonio, La Rafita, La Arenera, La Gallinaza, La Loquita, El Molino, entre otras. En la Tabla 42 se pueden observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.

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

Dado de que las cuencas tienen áreas pequeñas se decide adoptar el método racional puesto que las hipótesis de esta metodología se cumplen en las cuencas consideradas. Los parámetros morfométricos de cada cuenca y los parámetros empleados para el cálculo del caudal por el método racional se muestran en el Anexo 05.

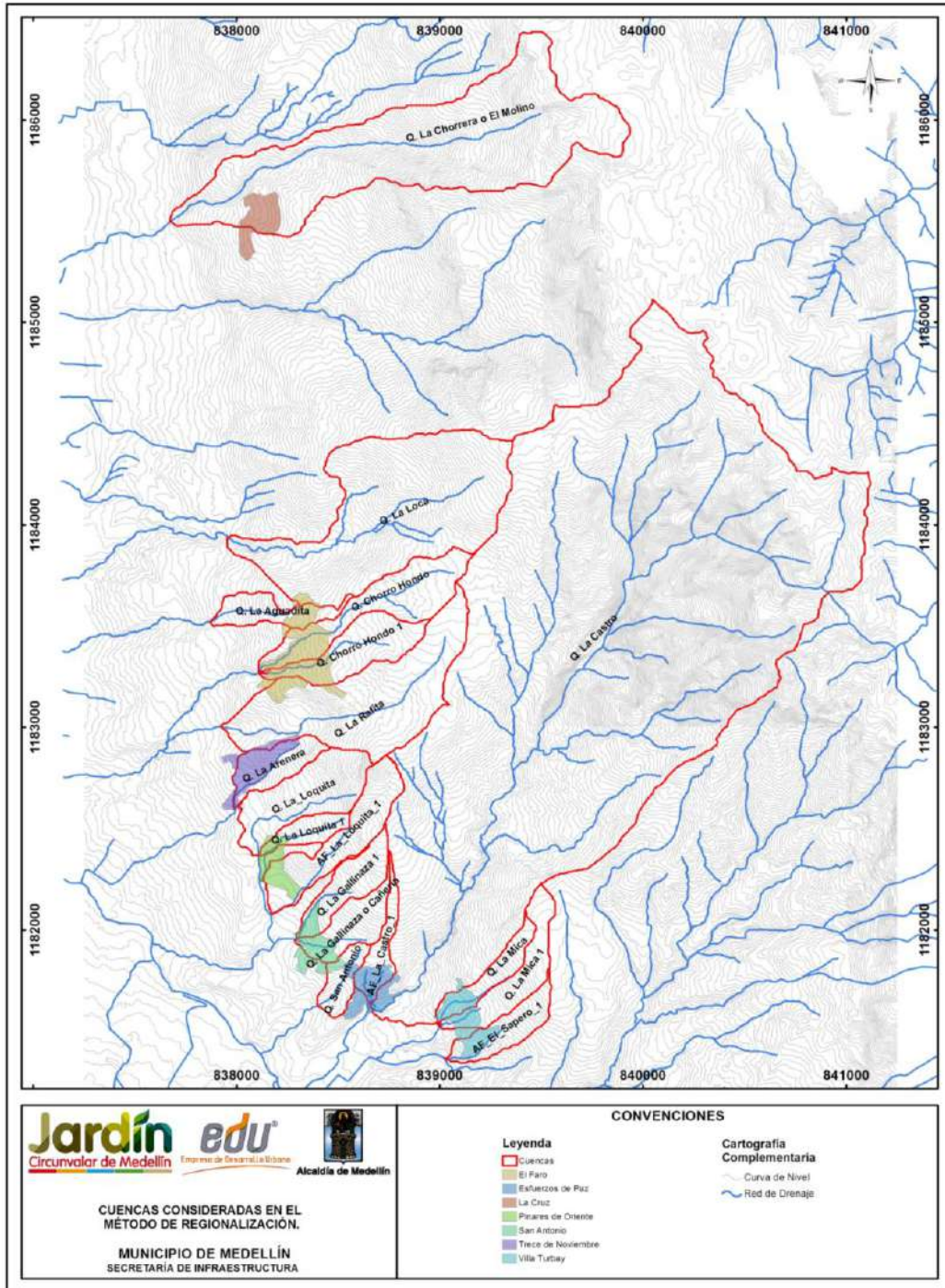
En la Tabla 42 y en el Mapa 28 se muestran las cuencas tenidas en cuenta para la regionalización. A partir de la regionalización hecha, se obtuvieron los Parámetros  $\alpha$  y  $\theta$  para cada periodo de retorno considerado, los cuales se muestran en la Tabla 43 junto con el coeficiente de correlación.

**Tabla 42. Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización**

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	ESTE	NORTE
1	Villa_Turbay	AF_El_Sapero_1	839027.36	1181360.25
2	Villa_Turbay	Q. La Mica	839003.36	1181520.59
3	Villa_Turbay	Q. La Mica 1	839003.36	1181520.59
4	Esfuerzos_de_Paz	Q. La Castro	838659.35	1181629.17
5	Esfuerzos_de_Paz	AF_La_Castro_1	838656.25	1181636.64
6	Esfuerzos_de_Paz	Q. San Antonio	838398.21	1181624.18
7	San_Antonio	Q. La Gallinaza o Cañería	838282.50	1181960.14
8	San_Antonio	Q. Gallinaza 1	838288.67	1181970.14
9	Pinares_de_Oriente	AF_La_Loquita_1	838172.89	1182080.72
10	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita 1	838110.36	1182364.25
11	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita	838108.32	1182367.83
12	Trece_de_Noviembre	Q. La Arenera	837992.14	1182599.25
13	Trece_de_Noviembre	Q. La Rafita	837922.50	1183003.64
14	EL_Faro	Q. Chorro Hondo 1	838112.50	1183265.64
15	EL_Faro	Q. Chorro Hondo	838110.50	1183269.64
16	EL_Faro	Q. La Aguadita	837868.50	1183519.64
17	Golondrinas	Q. La Loca	837957.23	1183937.37
18	La_Cruz	Q. La Chorrera o El Molino	837673.50	1185498.10



**Tabla 43. Resultados de regionalización de caudales máximos**

Parámetro	Coeficientes de Regionalización			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
$\alpha$	7.95	13.43	20.35	24.00
$\theta$	0.78	0.75	0.74	0.74
R2	0.96	0.96	0.96	0.97



Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización  
(GOLCuencasParaMetodoRegionalizacion\_Medellin\_C)



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

### 11.5.5 Resumen de caudales

Los caudales calculados para la cuenca, para cada periodo de retorno y para cada método empleado se presentan de la Tabla 44 a la Tabla 47. Dado que el tamaño de las cuencas en estudio es inferior a 1 km<sup>2</sup>, los resultados que se seleccionan para el análisis de la amenaza y el riesgo corresponden a los del Método Racional. Para estas cuencas pequeñas se cumplen satisfactoriamente las hipótesis de esta metodología. Por su parte, las metodologías de hidrógrafas unitarias cuentan con aceptación en cuencas de varios kilómetros cuadrados de área, y por ello se descartan sus resultados.

**Tabla 44. Resumen de caudales máximos para TR 2.33 Años**

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Loca	8.19	5.87	6.08	6.20	5.03	5.71

**Tabla 45. Resumen de caudales máximos para TR 10 Años**

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Loca	15.93	11.47	11.66	10.46	8.49	9.74

**Tabla 46. Resumen de caudales máximos para TR 50 Años**

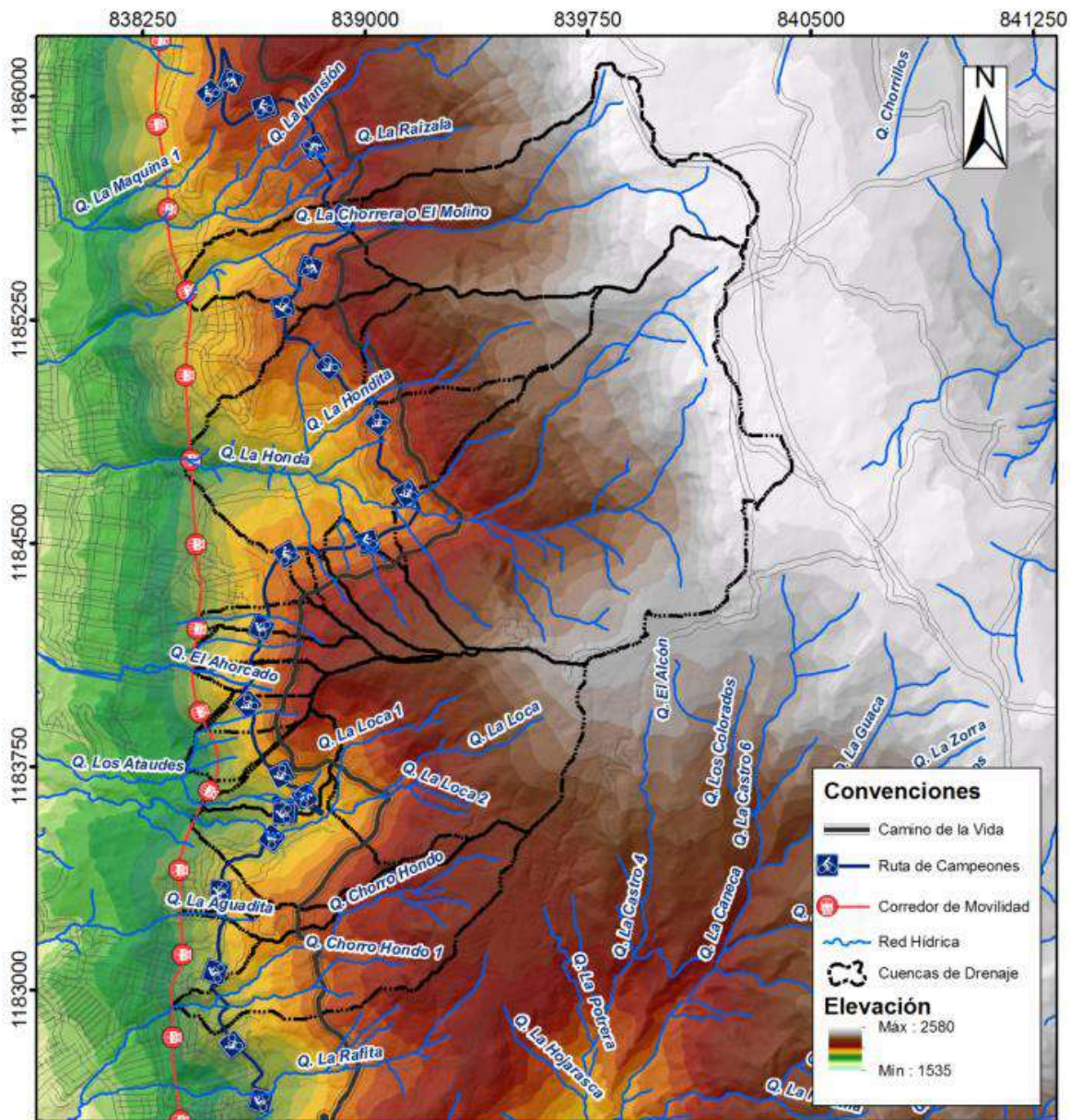
CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Loca	24.00	17.35	17.61	15.93	13.01	14.82

**Tabla 47. Resumen de caudales máximos para TR 100 Años**

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Loca	27.50	19.90	20.19	18.60	15.25	17.50

Las cuencas consideradas por INGEOCILCON para construir la regionalización, se muestran en la Figura 169.





**Figura 169. Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILCON (2014) (Fuente: Documento “Anexo C. Parámetros Regionalización Hidrología - Norte\_Ene\_2015”)**

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

## **12. ASPECTOS HIDRÁULICOS**

En este capítulo se describe y caracteriza desde el punto de vista hidráulico el sistema de drenaje natural que tiene influencia sobre el Polígono Golondrinas. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la evaluación hidráulica de los mismos.

### **12.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA**

Para el desarrollo del presente capítulo se empleó como información de referencia los estudios hidráulicos suministrados por la Empresa de Desarrollo Urbano que fueron ejecutados por INGEOCILCON (2014).

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



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

### **12.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES**

En el Numeral 5.4 se describió detalladamente lo relacionado con la morfodinámica regional de la zona de estudio y en el Numeral 5.5 lo correspondiente a la morfodinámica local. Dentro de este último, se establece que en lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro-Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI El Faro-Golondrinas (dinámica fluvial), con la intención adicional de llevar a cabo los análisis hidrológicos e hidráulicos necesarios para la evaluación de los riesgos por inundación y avenidas torrenciales, se presenta en este numeral una descripción detallada del drenaje asociado al Polígono Golondrinas, la Quebrada La Loca (Mapa 29).

La Quebrada La Loca se encuentra ubicada en la zona centro oriental del Valle de Aburrá, en la ciudad de Medellín. A lo largo del tramo recorrido, que comprende una longitud total de 430 m, el cauce presenta un ancho que varía entre 1.0 m y 3.0 m y una pendiente que varía entre el 14% y 42% (Perfil de Figura 1 en Anexo 05). Este drenaje cruza de oriente a occidente por el costado norte del polígono.

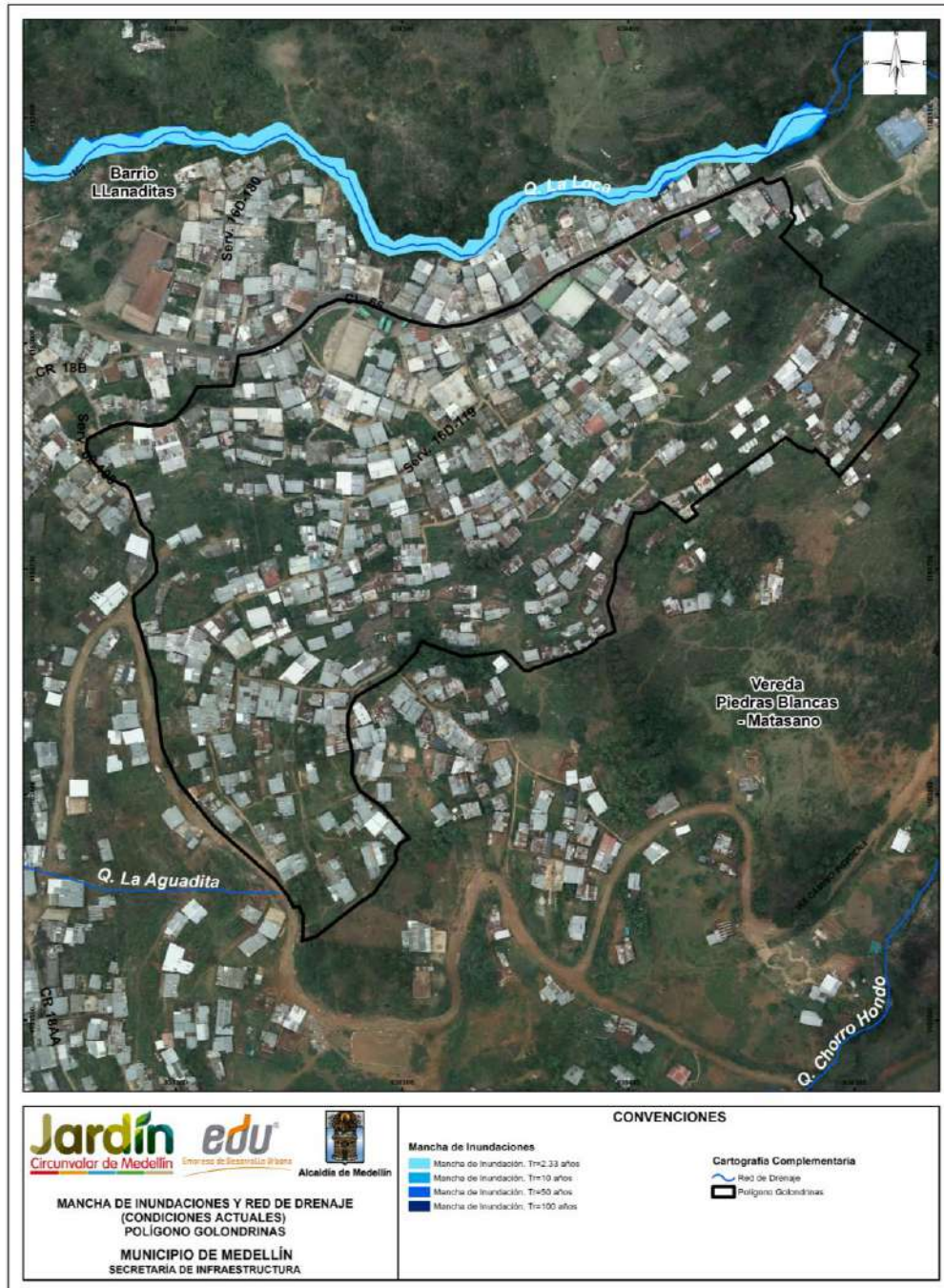
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

La siguiente descripción se realiza desde aguas arriba en el punto (838485.84E, 1183901.89N) hacia aguas abajo hasta el punto (838036.38E, 1183902.24N), donde se encontraron las siguientes características del lecho y las márgenes:

El punto de inicio se encuentra en la confluencia de un drenaje afluente de la Quebrada La Loca, como se observa en la Figura 170, a partir de la cual se tiene un drenaje conformado por bolos de roca, en una zona encañonada, debido al lavado del material del suelo predomina la roca sobre su matriz.

Durante las visitas realizadas a la Quebrada La Loca no se observó flujo alguno a través de su cauce, situación que puede ser evidenciada en la Figura 170. Adicionalmente, se observaron dos tuberías en el cauce, una de descarga de aguas residuales y la otra de conducción de aguas captadas desde la quebrada en un punto aguas arriba del polígono (Figura 171).





Mapa 29. Localización drenajes cercanos al Polígono Golondrinas y mancha de inundación para los diferentes periodos de retorno Quebrada La Loca (GOLManchasDrenajeCondiActuales\_Medellin\_C)



**Figura 170. Confluencia de drenaje a la Quebrada La Loca**



**Figura 171. Tuberías de descarga y conducción de agua**

En la parte media del recorrido ya se empiezan a observar tramos de la quebrada con escombros, basuras y comienza la presencia de aguas residuales, producto de los vertimientos que llegan a la quebrada como se puede ver en la Figura 172.



**Figura 172. Basuras en el cauce y columnas de apoyo para viviendas**

En la zona también existen descargas de aguas residuales controladas por las redes de alcantarillado mediante sistemas de canal escalonado, como se observa en la Figura 173.



El Polígono Golondrinas se encuentra sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca, a más de 10 m de distancia respecto al cauce. En esta margen, pero fuera del polígono de estudio, se evidencia una fuerte invasión de las viviendas en el lecho de la misma que cambian las márgenes naturales de la quebrada por muros divisorios, generando estrechamientos o ensanchamientos en la sección del flujo (Figura 174).

En la parte baja del recorrido se observa depositación de material en las márgenes, acompañados de escombros producto de los terraceos para las construcciones de viviendas, las cuales al no ser controladas podrían ocasionar obstrucciones en los cauces (Figura 175).



**Figura 173. Descarga de aguas residuales a la Quebrada la Loca**

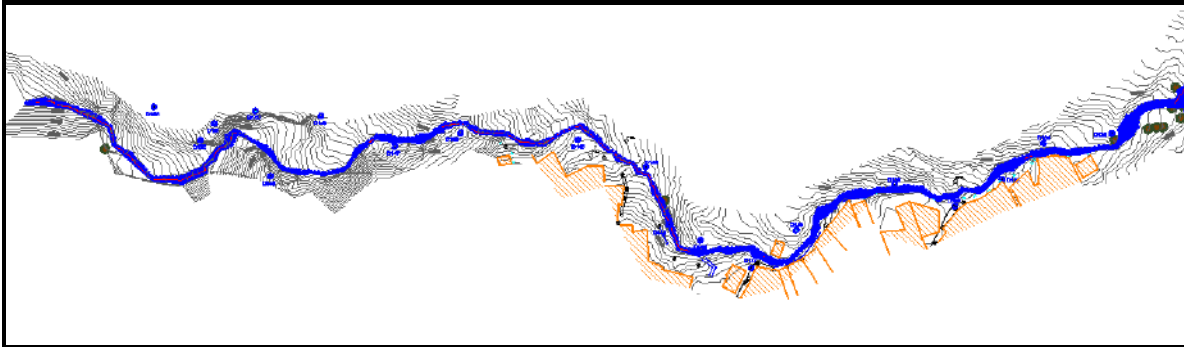


**Figura 174. Invasión del cauce de la Quebrada La Loca con muros**



**Figura 175. Deposición de material en las márgenes de la Quebrada La Loca**

De acuerdo con la geometría del cauce, en especial por su patrón de alineamiento, se puede establecer que la Quebrada la Loca presenta sinuosidad baja ( $S=1,17$ ), en general con curvas de radio mediano (de 15 m a 30 m) entre tramos rectos con longitud variable (entre 10 m y 25 m). En la Figura 176, se muestra una imagen de la quebrada en la zona de estudio, la cual permite verificar lo anotado.



**Figura 176. Vista en planta Quebrada La Loca (sin escala)**

Debido a que en el tramo de estudio de la quebrada presenta variaciones en las láminas de flujo (según el régimen de caudales) y modifica a largo plazo la pendiente por la dinámica en el transporte de sedimentos, podría afirmarse que ésta posee dos grados de libertad, descartándose procesos puntuales de erosión que no modifican el trazado de la quebrada.

El lecho del cauce está conformado por diversos materiales a lo largo del tramo analizado, desde suelos residuales de las Dunitas de Medellín, hasta depósitos de flujos de lodos y escombros hacia sus márgenes.

De acuerdo con la clasificación de Rosgen, y tomando los materiales predominantes en el cauce, la Quebrada La Loca puede catalogarse como de Tipo A6a+.

### **12.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES**

Una vez estimados los caudales máximos para el cauce principal que tienen influencia sobre el Polígono Golondrinas, se procedió a realizar el modelo hidráulico, cuyo objetivo es transitar los caudales máximos a través del cauce y calcular diferentes variables de flujo, entre ellas, la velocidad y la profundidad, a partir de las cuales se delimitarán finalmente las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno y los cuales servirán como punto de partida para la calificación de la amenaza.

Para llevar a cabo el tránsito de las crecientes en los cauces se empleó el software FLO-2D PRO de FLO-2D Software INC, que permite analizar el flujo en las laderas, además del flujo en los cauces.

#### **12.3.1 Descripción del Modelo FLO-2D**

A través de los modelos de tipo unidimensional no es posible obtener una buena precisión al simular los flujos que ocurren en las laderas cuando se presenten vertimientos o derrames por incapacidad del cauce o por falla de una determinada estructura. Para considerar estas situaciones, se empleó el Modelo FLO-2D, de tipo bidimensional en laderas, conservativo del volumen, que resuelve la ecuación de cantidad de movimiento incluyendo componentes de la onda cinemática, la onda difusiva y la onda dinámica. El

Modelo FLO-2D permite además modelar flujo en cauces y canales, en laderas y calles y permite incluir estructuras hidráulicas, obstrucciones, edificaciones, entre otros. Como información de entrada, el FLO-2D requiere de información topográfica, información de rugosidades de la superficie, información de lluvia o de caudales de entrada al sistema, secciones transversales al cauce y curvas de descarga de las estructuras hidráulicas.

FLO-2D es un modelo de diferencias finitas que emplea una malla uniforme de elementos cuadrados, para los cuales se tienen ocho direcciones posibles para el flujo. En esencia, es un modelo de volumen finito, que rastrea la distribución del volumen en todo el dominio con la finalidad de representar el movimiento de la onda de flujo. Para cada paso de tiempo, el modelo calcula el caudal que fluye en todas las ocho direcciones posibles de cada elemento de la malla garantizando la conservación del momentum, a partir de la siguiente ecuación:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \left(\frac{V_x}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right) - \left(\frac{1}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial t}\right)$$

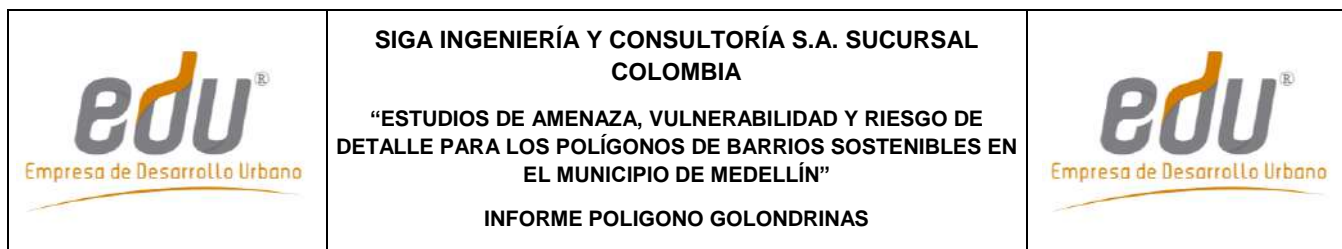
Donde  $S_o$  representa la pendiente del cauce,  $\partial h/\partial x$  representa el gradiente de presión,  $(V_x/g)(\partial V_x/\partial x)$  representa la aceleración convectiva y  $(1/g)(\partial V_x/\partial t)$  representa la aceleración local.

Dentro de las hipótesis y limitaciones que plantea el modelo FLO2D se encuentran las siguientes:

- ✓ La elevación, la rugosidad y la profundidad de flujo están representadas y son uniformes al interior de cada celda que compone el dominio del modelo.
- ✓ Flujo permanente para cada paso de tiempo.
- ✓ Flujo unidimensional al interior de los canales. En ellos no se consideran corrientes secundarias ni la distribución vertical de velocidades.

### 12.3.2 Caudales empleados en la modelación

Para el análisis hidráulico de inundaciones se han empleado los caudales de aguas claras estimados en el apartado 11.5 de hidrología por el método racional (Tabla 44 a Tabla 47). Para el análisis hidráulico de avenidas torrenciales se han tomado los caudales de aguas claras incrementados en un 40% de acuerdo con lo indicado en el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 (AMVA). En el Numeral 15.3 se describe con mayor detalle elementos adicionales considerados en la metodología empleada para el análisis hidráulico de las avenidas torrenciales así como los resultados obtenidos para este tipo de eventos. Finalmente, en la Tabla 48 se presenta el resumen de caudales empleados en las modelaciones hidráulicas.



**Tabla 48. Resumen de caudales empleados en la modelación hidráulica**

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

### 12.3.3 Información topográfica

La información topográfica que se ingresó al Modelo FLO-2D corresponde al modelo digital del terreno generado a partir de la información topográfica de los polígonos y de los cauces. Adicionalmente, la geometría de los canales fue definida por secciones transversales, tomadas en forma perpendicular a la dirección de las líneas del flujo.

### 12.3.4 Tamaño de la malla

Para la selección del tamaño de la malla se partió de la siguiente relación entre el caudal pico  $Q_{pico}$  y el área de la celda  $A_{celda}$  recomendada por FLO2D para garantizar eficiencia en el proceso de modelación:

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

Esta relación implica tamaños de celda entre 1.38 m y 2.4 m de lado para los caudales de diseño. Para garantizar un equilibrio entre una buena representatividad y un buen detalle en los resultados del modelo se empleó un tamaño de celda de 1.0 m de lado.

### 12.3.5 Condiciones de frontera

En el FLO-2D es posible trabajar con precipitaciones o con caudales como elemento de entrada al modelo. En el primer caso, el software modela procesos lluvia escorrentía para obtener los caudales en todos los puntos de la malla. En el segundo caso los caudales se ingresan de manera puntual en cualquier celda del modelo.

En este caso se ingresaron los caudales directamente en los puntos de interés de los cauces mediante una hidrógrafa triangular con caudal pico igual al caudal de diseño seleccionado (en éste caso el del método racional). El tiempo base del hidrograma se estableció de manera que el área bajo el hidrograma sea consistente con el volumen de escorrentía directa en la cuenca. La forma triangular del hidrograma fue seleccionada dado que se aproxima bien a las hidrógrafas reales en ambientes urbanos y es la forma base para la generación de hidrógrafas sintéticas como las del Soil Conservation Service.



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

### 12.3.6 Condiciones iniciales

Dadas las características efímeras del cauce del polígono en estudio, se consideraron láminas de flujo nulas como condiciones iniciales, es decir, se partió de condiciones secas en todo el dominio del modelo.

### 12.3.7 Condiciones de estabilidad numérica

El Modelo FLO-2D está sujeto a criterios estrictos de estabilidad numérica que se garantizan manteniendo pequeños intervalos o pasos de tiempo en la solución de las ecuaciones diferenciales para cada elemento de la malla del modelo. El modelo busca que el paso de tiempo empleado sea adecuado para que se cumplan los siguientes criterios de estabilidad:

- ✓ Criterio del cambio de volumen (o de profundidad) en una celda entre cada paso de tiempo.
- ✓ Criterio de estabilidad de la onda dinámica que relaciona el paso de tiempo con el caudal específico para el canal, la pendiente del canal y el tamaño de los elementos del dominio computacional.
- ✓ Criterio de Número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) que relaciona el paso de tiempo con las velocidades de la onda simulada y el tamaño de los elementos del dominio computacional. Este es el criterio que recomienda FLO-2D con un valor de 0.6 para el número CFL y que por tanto fue adoptado en la modelación.

### 12.3.8 Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning,  $n$ , para el cauce natural, se tomó con base en la comparación directa del material que conforma el lecho, las laderas del canal, la configuración del cauce, entre otros, con los valores propuestos en Ven Te Chow (1994). A su vez, los coeficientes de rugosidad de Manning empleados en las planicies de inundación se tomaron a partir de los valores recomendados en FLO-2D (2010) según el tipo de cobertura los cuales corresponden a los recomendados por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (1997). En el Anexo 05 (Tabla 1) se presentan los coeficientes de rugosidad base así como el mapa de coeficientes empleados para los cauces y zonas de inundación modeladas.

### 12.3.9 Estructuras hidráulicas

En el Polígono Golondrinas, específicamente en el tramo analizado de la quebrada La Loca, no existen estructuras hidráulicas que puedan alterar las condiciones hidráulicas del flujo. De acuerdo con los resultados del estudio tampoco se requiere proyectar estructuras para mitigación de riesgo por inundaciones o avenidas torrenciales.

### 12.3.10 Resultados en la Quebrada La Loca (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Loca se presentan en el Mapa 30, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados.

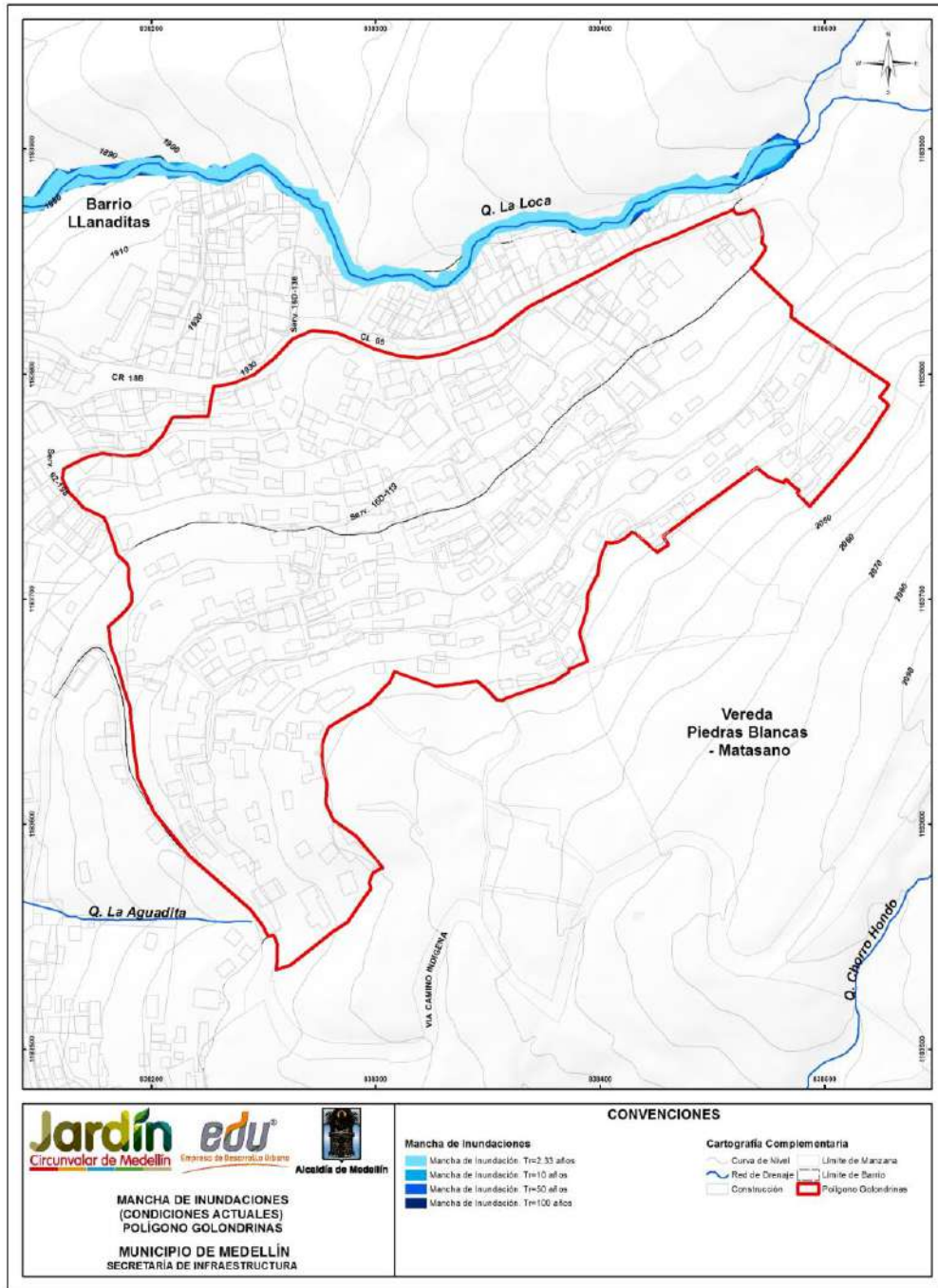
Estos resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo, de manera que se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones reales del sitio.

Se observa que para la Quebrada La Loca no se presentan vertimientos hacia el polígono Golondrinas para ningún período de retorno. Las profundidades máximas varían entre 0.36 m y 3.09 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.57 m y 3.96 m para 100 años de periodo de retorno. La velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 1.98 m/s y 15.05 m/s y entre 2.55 m/s y 17.80 m/s para un periodo de retorno de 100 años (Tabla 49).



**Tabla 49. Velocidades y profundidades máximas de flujo en la Qda. La Loca. Condiciones actuales**

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.36	3.09	0.45	3.14	0.55	3.71	0.57	3.96
Profundidad Llanura (m)	0.00	1.86	0.00	1.17	0.00	1.65	0.00	1.70
Velocidad Canal (m/s)	1.98	15.05	2.20	16.37	2.44	17.10	2.55	17.80
Velocidad Llanura (m/s)	0.00	2.03	0.00	2.60	0.01	3.23	0.00	3.99

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



**Mapa 30. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales para el Polígono Golondrina (21\_GOLManchalnundaciones\_Medellin\_C y 21\_GOLManchalnundaciones\_Medellin\_T)**

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

## **13. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA**

### **13.1 METODOLOGÍA**

#### **13.1.1 Objetivo y aspectos generales**

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

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



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

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

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

#### **13.1.2 Escenarios de análisis**

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

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

### **13.1.2.1 Escenario 1**

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

Considerando los hallazgos encontrados a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas dado que la presencia del nivel freático apenas se reportó en una perforación de las trece consideradas.

### **13.1.2.2 Escenario 2**

El segundo escenario corresponde a las condiciones normales de lluvia y también a las extremas de dicha variables. No obstante, en el caso particular de la UMI objeto de este estudio, la zona presenta varias características que conllevan a considerar a la lluvia como un elemento de poca relevancia en la detonación de movimientos en masa.



Inicialmente es importante considerar que las condiciones freáticas de la zona, según los registros de perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, muestran una zona seca.

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI El Faro - Golondrinas se presentan pendientes en el terreno mayores que 30° y la presencia de dos drenajes naturales que funcionan como sistemas de canalización de las aguas de escorrentía. Los análisis de infiltración/escorrentía mostrados en el Capítulo 11, muestran coeficientes de escorrentía de 43% para el caso de las lluvias más probables (TR 2.33 años) y de 59% para el caso de las lluvias más críticas (TR 100 años). El tiempo de concentración promedio asociado a estas condiciones de pendiente son de 14.5 min, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

En cuanto a los usos del suelo, la UMI El Faro - Golondrinas se caracteriza por poseer aproximadamente un 84% en uso forestal y el otro 16% en uso urbano.

Finalmente, se tiene lo que corresponde a las características físicas e hidráulicas de los materiales en superficie. Los suelos encontrados en la superficie de la UMI, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) donde sus índices de plasticidad no superan 35, los límites líquidos superiores a 50 y los porcentajes de saturación del 98%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes de permeabilidad a través de ensayos de laboratorio de consolidación, realizados sobre algunas muestras de la zona arrojaron valores no menores de  $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ , lo que hace que se trate de materiales altamente impermeables. En este sentido vale la pena retomar lo anotado en el Numeral 8.5 y en particular en el Numeral 8.5.2 con respecto al regolito de la zona de estudio.



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

Teniendo en cuenta los anteriores argumentos, se considera improbable la creación de frentes húmedos superficialmente por efectos de infiltración, o el ascenso de niveles freáticos subterráneos que puedan afectar la estabilidad de las laderas.

### **13.1.2.3 Escenario 3**

El tercer escenario corresponde al sismo al que podrá estar expuesta el área de estudio, esto de acuerdo con la normativa en el Área Metropolitana de Valle de Aburrá. Para este caso se consideraron los criterios establecidos en el Capítulo 9, donde se establece la aplicación de un coeficiente espectral horizontal de 0.25g correspondiente 2/3 del coeficiente espectral máximo de diseño igual a 0.38 para un periodo de retorno de 475 años.

El análisis de probabilidad de falla contempla entonces el análisis considerando el sismo de 0.25g para 475 años, luego se encontrará la probabilidad de falla anual que será dividiendo la probabilidad de falla del análisis anterior por el periodo de retorno de 475 y finalmente la probabilidad de falla anual será llevada a una probabilidad de falla a 50 años a través de una función exponencial de probabilidad.

### **13.1.2.4 Escenario 4**

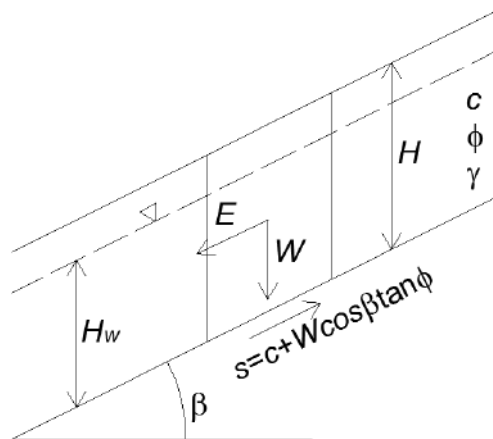
El cuarto y último escenario corresponde a la situación generada por el cambio de la aptitud del uso (licencia de urbanización, parcelación, construcción de nuevas obras de urbanismo, y plan de construcciones más probables). Se tendrán en cuenta para cada caso cortes, excavaciones, rellenos, sobrecargas, modificaciones del drenaje, entre otros.

Estos análisis de estabilidad se realizan mediante análisis bidimensionales en las zonas donde se tengan proyectadas las obras del Proyecto Barrios Sostenibles y sus respectivas obras de mitigación una vez identificado el riesgo.

### **13.1.3 Cálculo de los factores de seguridad**

El análisis de amenaza por movimientos en masa, considera la evaluación de los factores de seguridad de las laderas.

Los análisis de estabilidad se desarrollaron mediante teorías de equilibrio límite. Fenómenos de inestabilidad ocurridos en la zona y la hipótesis de la poca presencia de espesores de suelo en las zonas de alta pendiente, direccionan a un mecanismo de falla planar. Para esto, se utilizó entonces la Teoría de Taylor (1948), conocida como la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 177).



**Figura 177. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar**

Para condiciones estáticas normales, la teoría del talud infinito se determina con base en la siguiente expresión:



$$FS_{estático} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta \sin \beta}$$

Para condiciones seudoestáticas normales, la teoría del talud infinito puede ser expresada como:

$$FS_{dinámico} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)}$$

Es así como para los análisis de estabilidad, el factor de seguridad está en función del espesor de la capa de suelo ( $H$ ), la posición del nivel freático ( $H_w$ ), la inclinación o pendiente de la ladera ( $\beta$ ) y los parámetros de resistencia al cortante de los materiales, expresados estos últimos a través del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), la cohesión ( $c$ ) y el peso unitario ( $\gamma$ ). En el caso del análisis seudoestático está en función adicional de la aceleración crítica horizontal ( $A_h$ ).

En cuanto al espesor de la capa de suelo ( $H$ ), vale la pena explicar la forma en que fue determinado. Como se presentó en el Capítulo 4 de este informe, la unidad geológica predominante en la zona de estudio corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. Considerando entonces las diferentes formaciones geológicas de la zona, se establecieron varios perfiles geológico geotécnicos que atraviesan la UMI El Faro - Golondrinas de un extremo al otro. Con estos perfiles, se pudo correlacionar y conformar un modelo tridimensional de espesores a través de superficies de cada uno de los materiales de suelo. Dichas

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

superficies fueron empleadas para programar con Herramientas SIG la forma en que debía entenderse el espesor H y los correspondientes parámetros de resistencia al corte  $\gamma$ ,  $c$  y  $\phi$ . Dicha herramienta hizo diferentes modelaciones del factor de seguridad con diferentes valores de H, variando desde 0 m hasta 10 m obteniéndose el mínimo factor de seguridad. Finalmente, es importante aclarar que el valor máximo considerado de 10 m corresponde a lo registrado históricamente en la zona, con procesos morfodinámicos cuyo espesor máximo comprometido es menor que 10 m.

La expresión que acaba de presentarse para condiciones pseudoestáticas normales viene fundamentada por la teoría propuesta por Newmark (1965) para estimar el desplazamiento permanente generado por un movimiento sísmico en presas de tierra.

Vega (2013) resume la metodología de Newmark (1965) como un procedimiento donde se modela el talud como un bloque rígido de suelo que puede deslizarse a lo largo de un plano situado en su base bajo cierto grado de inclinación. El análisis de estabilidad con talud infinito es el método más común para modelar fenómenos de inestabilidad en un marco de escala de cuenca. Se basa en una geometría de deslizamiento de tierra simplificado, que asume una superficie de deslizamiento planar en una pendiente planar infinitamente extendida, tanto lateral como longitudinalmente. El análisis supone que la superficie de deslizamiento es paralelo a la superficie del suelo y coincidente con un sustrato impermeable. Este método analítico permite estimar las deformaciones de taludes y laderas ante la acción sísmica, y corresponde a un modelo simplificado en que el suelo se asume con respuesta rígida-plástica. Así mismo, se asume que el suelo no sufre deformaciones hasta cierto valor crítico de la fuerza solicitante y cuando ésta es superada se deforma plásticamente. Irregularidades en la pata y la cresta de la ladera pueden ser ignoradas y las propiedades del suelo y las presiones de poro en cualquier distancia dada por debajo de la superficie del suelo se suponen constantes (Graham 1984).

La fuerza crítica se asocia a una aceleración crítica ( $A_h$ ) de la masa potencialmente deslizante y mientras las aceleraciones sean inferiores a esta, no se producen deformaciones debido a su comportamiento rígido. Cuando  $A_h$  es excedida, la masa se deforma irreversiblemente. Así mismo, la exactitud relativa de este método depende de la suposición de conducta rígida-plástica, pero el resto de problemas geotécnicos, derivados del análisis de las posibles superficies de falla y de las propiedades del material, está reunido en el factor de seguridad (FS). Es decir, es de aplicación general en cuanto a la geotecnia. Este método es aplicado cuando el bloque de masa de suelo se desliza en forma traslacional, pero con algunas modificaciones puede aplicarse a deslizamientos rotacionales.

Según Figueras et al. (2005), el análisis de Newmark, se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace más de 15 años y recientemente se ha calibrado y comparado en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico.

### 13.1.4 Cálculo de la probabilidad de falla

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

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

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

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

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

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

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

$$M = R - C$$

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

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

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

Donde  $\mu_R$  y  $\mu_C$  son las medias o esperanzas de la resistencia y la carga respectivamente,  $\sigma_R$  y  $\sigma_C$  son las desviaciones estándar de la resistencia y la carga respectivamente, elevadas al cuadrado, estas últimas correspondiendo a la  $Var(R)$  y la  $Var(C)$  respectivamente. Finalmente,  $\rho_{RC}$  es el coeficiente de correlación entre la carga y la resistencia.

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

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

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

<b>Caso Estático</b>	<b>Caso Seudoestático</b>
Media de la resistencia	Media de la resistencia
$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$	$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$
Media de la carga	Media de la carga
$\mu_C = \gamma H \cos \beta \sin \beta$	$\mu_C = \gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)$

Para determinar las varianzas de la resistencia y de la carga (desviaciones estándar al cuadrado) de una variable definida por varias variables aleatorias  $X_i$ , en este caso la cohesión (c) y el ángulo de fricción ( $\phi$ ) se hace:

$$\sigma_{R,C}^2 = Var(R, C) = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot Var(X_i)$$

Luego entonces la varianza de la carga (C) y de la resistencia (R) se expresa en el caso estático como:



<b>Caso Estático</b>	<b>Caso Seudoestático</b>
Varianza de la resistencia  $\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$	Varianza de la resistencia  $\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$
Varianza de la carga  $\sigma_C^2 = 0$	Varianza de la carga  $\sigma_C^2 = 0$

En la varianza de la carga para ambos casos, este valor es cero, dado que dentro de él no se contempla ninguna variable aleatoria.

La probabilidad de falla,  $p_f$ , o la probabilidad que el factor de seguridad sea inferior a 1.0 se puede determinar mediante la expresión:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta)$$

Donde  $\Phi(\beta)$  es la función de distribución de probabilidad normal acumulada evaluada en el punto  $\beta$  que corresponde a la confiabilidad.



Finalmente, el resultado esperado es que en cada condición se tenga un valor del factor de seguridad con una probabilidad de falla o de ocurrencia. El siguiente paso corresponde a la agregación de dichas probabilidades y factores de seguridad empleando el teorema de probabilidad total.

$$P_{total} = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \dots \cup P_n$$

Donde  $P_1, P_2, P_3, P_n$  son un grupo de eventos mutuamente exclusivos que pueden corresponder por ejemplo, a la probabilidad de falla asociada al analizar las condiciones actuales del talud, o la probabilidad de falla en condiciones de nivel freático extremo o incluso, a la probabilidad de falla cuando ocurre el sismo.

### 13.1.5 Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para Van Westen & Terlien (1996), la mayoría de los modelos deterministas son específicos del sitio y no tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada. Los modelos que tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada se denominan "modelos distribuidos". Ahora bien, los modelos distribuidos deterministas, requieren mapas donde se tenga la distribución espacial de los datos de entrada. La aplicación de modelos deterministas para la zonificación de la amenaza al deslizamiento en áreas extensas, no ha llegado a un desarrollo más amplio, debido a la variabilidad regional de variables geotécnicas como la cohesión, ángulo de fricción interna, el espesor de las capas, o profundidad del nivel freático. Por otra parte, el cálculo de los factores de seguridad en zonas más extensas, implica una cantidad

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

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

Actualmente, sólo el uso de modelos deterministas resulta en mapas reales de peligro, de acuerdo con la definición de Varnes (1984): “la amenaza significa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un plazo determinado de tiempo y dentro de una zona determinada”. Los modelos deterministas, junto con la información de magnitud/frecuencia de eventos detonantes como las lluvias o los terremotos, hacen posible derivar una probabilidad de falla, que puede ser utilizado en estudios de riesgo.

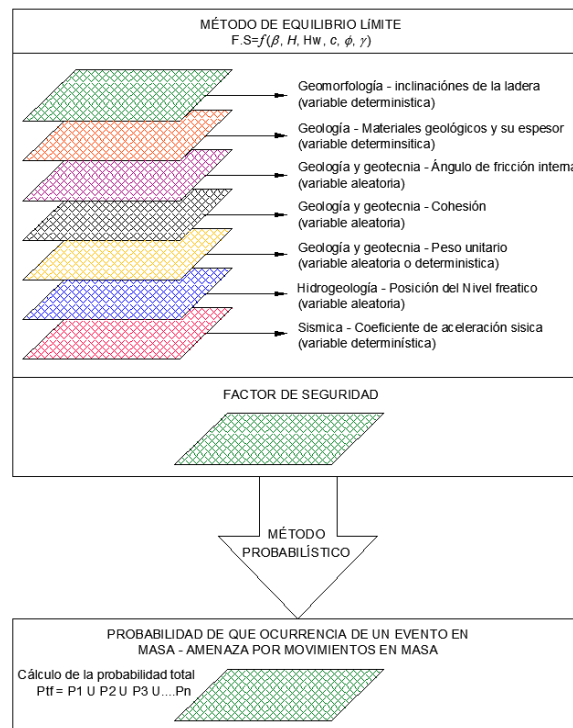
Cualquier estudio de riesgo requiere de la información espacial de la superficie de la zona de estudio, sus características topográficas, la geología, la hidrología y los usos del suelo, entre otros. Para gestionar todo este volumen de información, se requiere disponer de Sistemas de Información Geográfica, ya que estas herramientas permiten administrar tal volumen de datos, de manera rápida y detallada, y permiten además la presentación gráfica de resultados. En la actualidad, la integración en un SIG con modelos matemáticos facilita procesos de simulación, y acelera el análisis espacial de las variables y de los parámetros requeridos (Vega, 2013). Estas herramientas permiten centralizar e integrar información normalmente dispersa en diferentes formatos, al igual que ofrece sistemas dinámicos de información, puesto que los datos pueden ser actualizados periódicamente para producir nueva información de acuerdo con las necesidades de diferentes aplicaciones y usuarios.

El uso de las herramientas SIG posibilitó en este caso efectuar evaluaciones multi amenazas, permitiendo combinar eficientemente varios conjuntos de datos espaciales en modelos y escenarios para diferentes grados de amenazas. En el caso de los movimientos en masa, la herramienta SIG facilita la obtención de los parámetros morfométricos necesarios para realizar estudios de deslizamientos superficiales mediante técnicas multivariantes, así como la evaluación de las condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, y las condiciones de movilidad del desplazamiento. (Lantada, 2007).

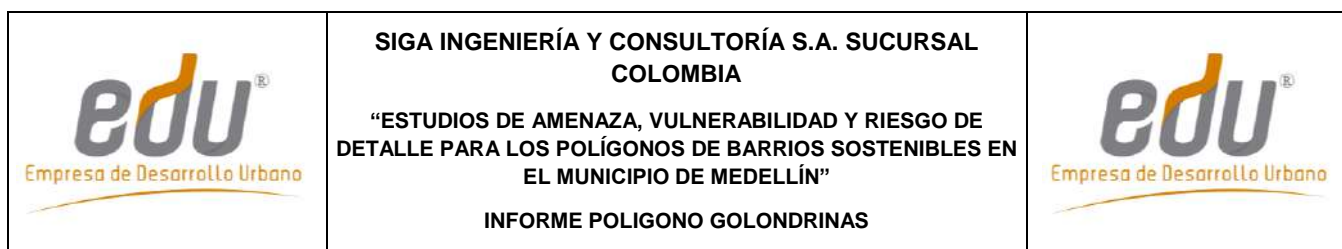
Según Xie et al. (2003), el cálculo de la estabilidad para la evaluación deslizamiento de tierra se puede realizar dentro o fuera del SIG. Si se realizan los cálculos fuera del SIG, este sólo se utilizaría como una base de datos espacial para almacenar, visualizar y actualizar los datos de entrada. La principal ventaja de este enfoque es que los modelos externos existentes pueden utilizarse sin perder tiempo en la programación de los algoritmos de modelo en el SIG. Una desventaja de hacer cálculos de los modelos fuera de los SIG, es la complicación causada por la conversión de datos hacia y desde modelos externos. La conversión de datos puede ser un problema importante porque la mayoría de los programas tienen su propio formato de datos, o en el caso más desfavorable, algunos tienen módulos de entrada especiales que sólo permiten el ingreso de datos de forma manual aumentando el tiempo de procesamiento y la probabilidad del error. Otra desventaja del uso de modelos externos es la representación de los resultados de los cálculos del modelo, que normalmente no se distribuyen espacialmente, en forma de mapas en un SIG. Para superar el problema de la conversión de datos, los cálculos del

modelo deterministas pueden ser realizados dentro del SIG. La desventaja de este enfoque es, sin embargo, que sólo modelos simples se puede aplicar fácilmente debido a las limitaciones con respecto a la utilización de algoritmos complejos, procedimientos de iteración y la tercera dimensión en el GIS convencional, de dos dimensiones. Xie et al. (2003) cita algunos trabajos utilizando la teoría de talud infinito, que permiten el cálculo del factor de seguridad para cada pixel individual, a través de la implementación del SIG (Aleotti & Chowdhury, 1999; Anbalagan, 1992; Carrara, 1995; Dai & Lee, 2001).

Según Van Westen & Terlien (1995), la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 177) es el método más adecuado para el uso de modelos deterministas en un entorno SIG citando trabajos como los de Ward et al. (1982) y Brass et al. (1989). Esta teoría, es el único modelo que calcula inestabilidad de la ladera sobre una base de pixel, y por lo tanto es muy adecuado para ser utilizado en un SIG. El modelo de pendiente infinita unidimensional describe la estabilidad de taludes en la forma más simple. Su limitante radica en que sólo podría ser aplicable para el cálculo de superficies de falla planares. La estabilidad de taludes se calcula para los píxeles en un mapa, utilizando la información combinada de varios mapas de entrada, tales como la pendiente del terreno, el espesor del suelo, la resistencia del suelo, y la profundidad del nivel freático. Los cálculos para cada píxel individual resultarán en valores del factor de seguridad, que pueden utilizarse para crear un mapa de amenaza (Figura 178).



**Figura 178. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa**



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

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

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

### **13.1.6 Criterios para calificar la amenaza**



La Ficha Técnica del Proyecto Barrios Sostenibles estableció unos criterios para juzgar el factor de seguridad y la probabilidad de falla que definen la amenaza por movimientos en masa.

No obstante, esta oficina consideró que en el caso de los criterios de factor de seguridad, los mismos son estrictos y se alejan de las recomendaciones establecidas por algunas referencias de gran aceptación científica como lo son el Control Geotécnico de Hong Kong (GEO), el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Por lo anterior, se consideró la propuesta de rangos de factor de seguridad mostrado en la Tabla 50. En la Tabla 51 se presentan los rangos en términos de probabilidad de falla expuestos por la ficha técnica mencionada, considerando que estos se aplican para un periodo proyectado de 50 años.

**Tabla 50. Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad**

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

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

**Tabla 51. Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años**

<b>Nivel de Amenaza</b>	<b>Probabilidad de Falla (%P.F)</b>
Bajo	0.00% a 3.20%
Media	3.20% a 5.50%
Alto	>5.50%

Estos deslizamientos o procesos son difíciles de modelar con una metodología regionalizable. Así pues, se partió de los resultados de la estimación de la socavación en los cauces y se evaluaron los factores de seguridad a través de análisis de estabilidad convencionales bidimensionales. Los análisis se realizaron de forma local, sobre las secciones donde se manifiesten las mayores afectaciones por efectos de la dinámica fluvial.



### **13.2 RESULTADOS**

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

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas se puede ver que en la mayor parte del Polígono Golondrinas predominan valores altos de FS, por encima de 1.5. En general, sobre el costado occidental y en una pequeña área en el centro del polígono, se presentan FS menores o iguales que 1.2, coincidiendo con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años.
- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones pseudoestáticas, representativo del escenario con sismo, se puede ver que la mayor parte del Polígono Golondrinas presenta valores de FS menores o igual a 1.2. Algunas de las zonas con bajos factores de seguridad coinciden con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años. Vale la pena aclarar que un valor que podría considerarse aceptable de FS pseudoestático es mayor de 1.1, de tal manera que los factores de seguridad considerados bajos realmente alcanzan en algunos puntos valores que pudieran ser aceptables.

En el Mapa 33 se muestran los resultados de los análisis de probabilidad de falla considerando las variaciones en los parámetros de resistencia al corte. Posteriormente, se evaluó la probabilidad de falla considerando el efecto del sismo, con la actuación de un sismo de magnitud 0.25g que equivale a 2/3 de 0.38g para el cual se tiene un periodo de retorno de 475 años (Mapa 34). Para efectos de encontrar la probabilidad de falla a 50 años de proyección, se procedió a analizar el efecto del sismo dividiendo los resultados obtenidos en el Mapa 34 por el respectivo periodo de retorno de 475 años (Mapa 35). Finalmente, en el Mapa 36 se presenta la zonificación de la amenaza total considerando



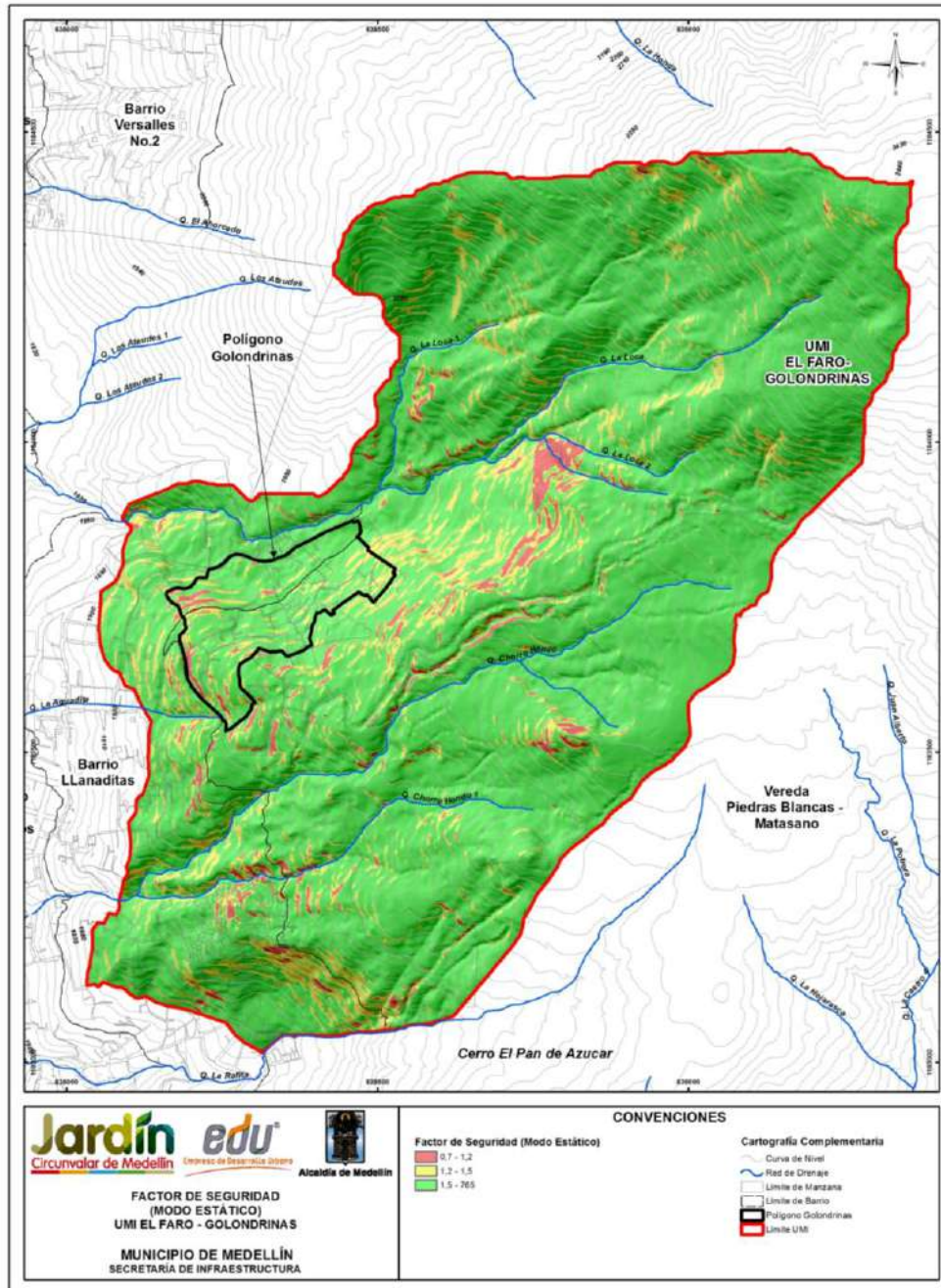
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte evaluado en el análisis del Mapa 33 y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. Se puede establecer que se obtienen zonas en los tres grados de amenaza considerados, baja (probabilidad de falla menor o igual que el 3.2%), media (probabilidad de falla entre el 3.2% y el 5.5%) y alta (probabilidad de falla mayor que el 5.5%). Las áreas con probabilidad de falla baja predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI.

La Figura 179 muestra un esquema de la localización de los principales focos de inestabilidad localizados al interior y en la parte alta del polígono, según la zonificación de la amenaza presentada en el Mapa 36. Estos son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda.

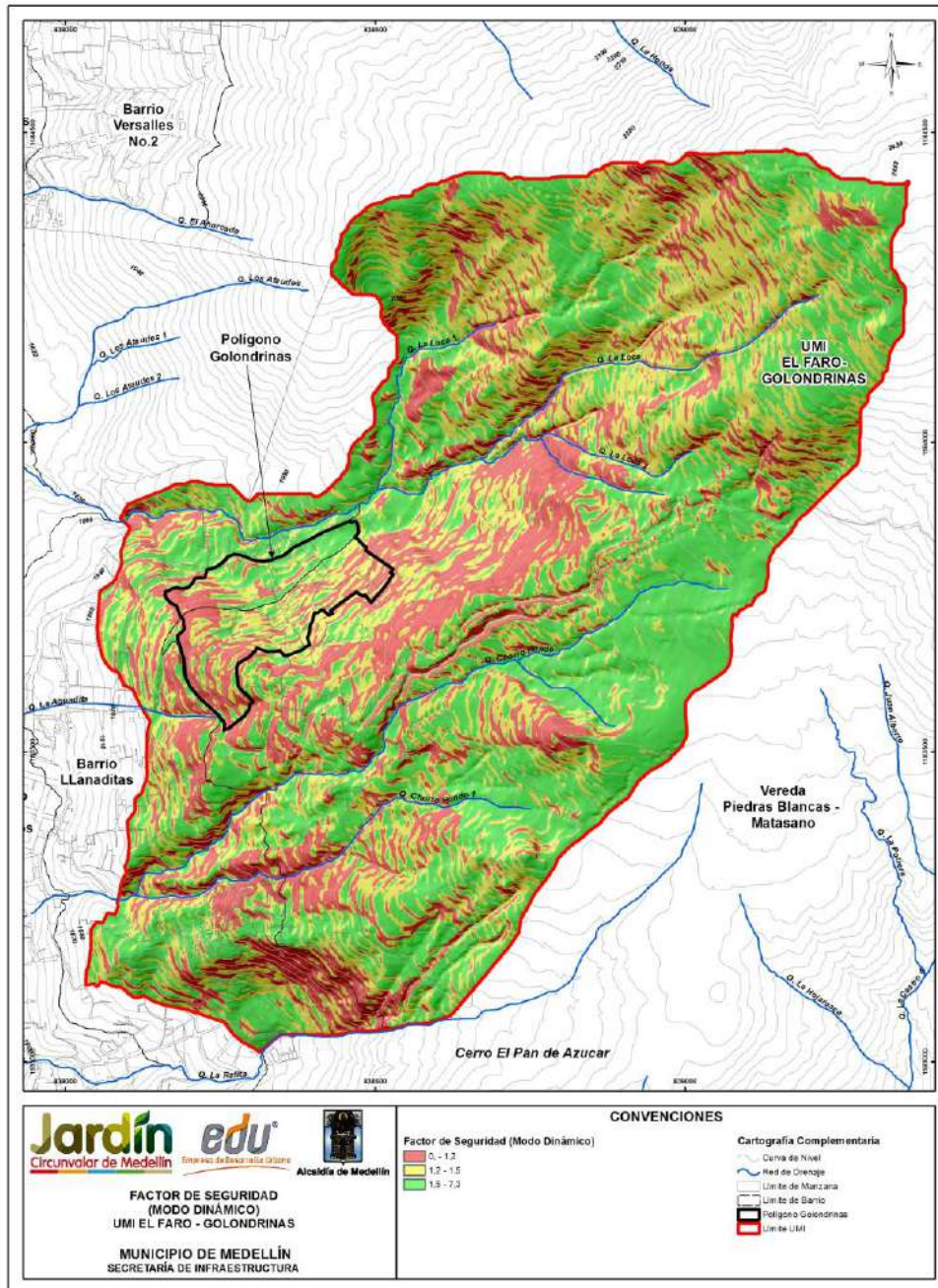
Considerándose que el Mapa 36 es el principal producto de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se pueden hacer las siguientes anotaciones con respecto a estos focos de mayor inestabilidad:

- ✓ Se tiene un primer conjunto de focos localizados por fuera del Polígono Golondrinas, en la ladera ubicada al costado noroccidental del mismo. En el Mapa 36 se trata principalmente de los identificados como Focos 5, 23, 24 y 25. Son sitios potencialmente inestables, ubicados en una ladera no urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el saprolito de las Dunitas de Medellín. En la zona se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La potencial inestabilidad se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas.
- ✓ Al interior del Polígono Golondrinas se pueden citar principalmente los Focos 26, 27 y 28. De estos focos, el de mayor afectación resulta ser el Foco 28, con una probabilidad de falla del orden del 9.8%. Se localiza al interior del polígono afectando un total de dos viviendas, desarrollándose sobre saprolito de la Dunita de Medellín en una zona urbanizada. En la zona también se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos.

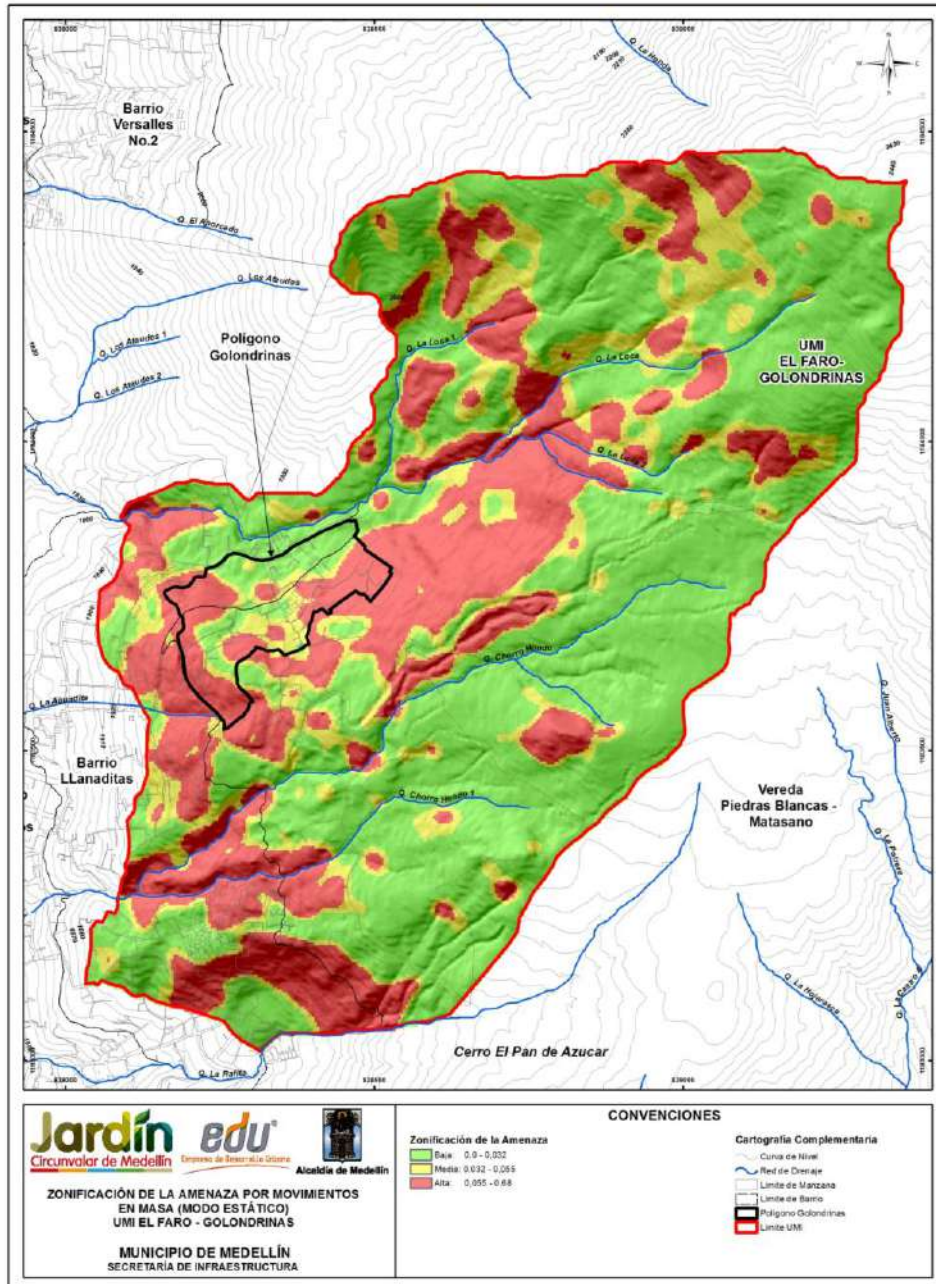


Mapa 31. Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones estáticas  
(GOLFactorSeguridadEstaticoUMI\_Medellin\_C)



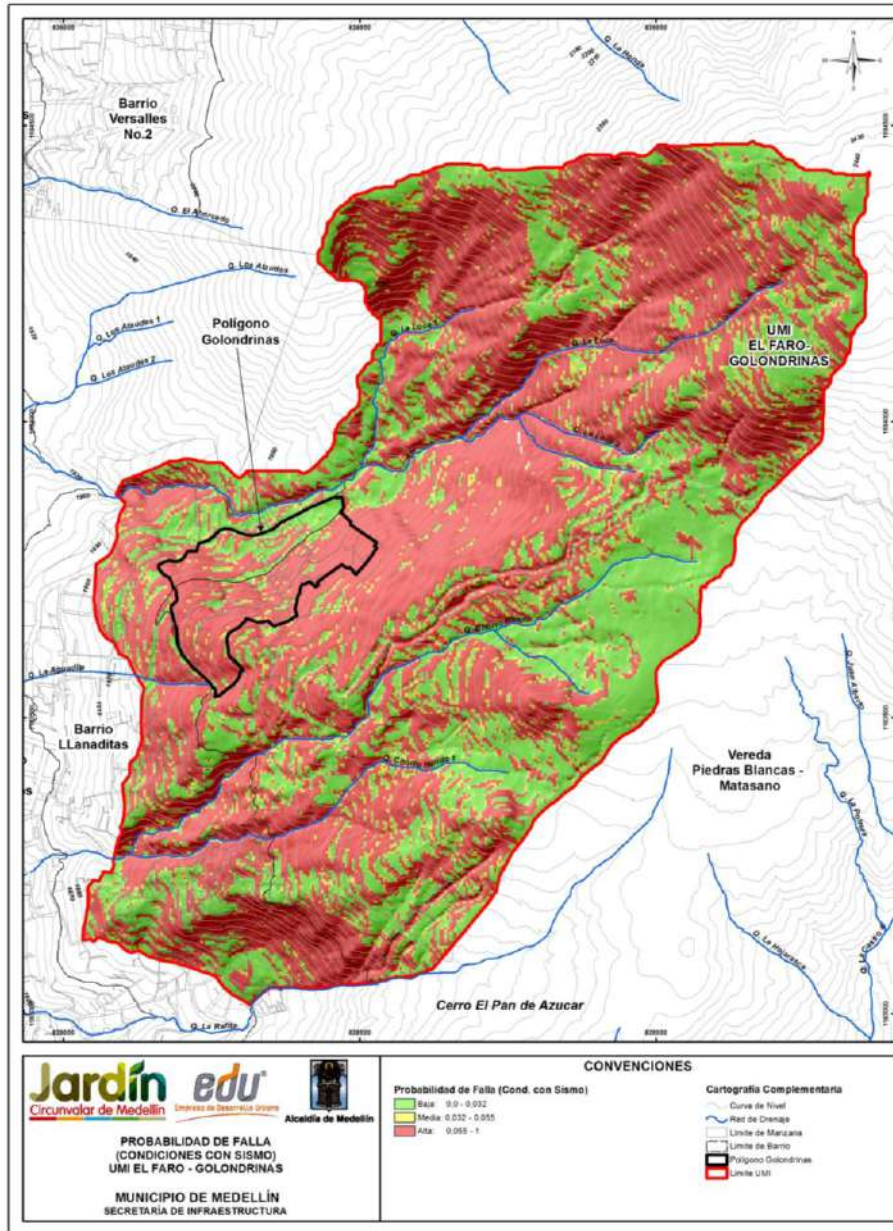


Mapa 32. Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones seudo-estáticas con sismo de 0.25g (GOLFactorSeguridadDinamicoUMI\_Medellin\_C)



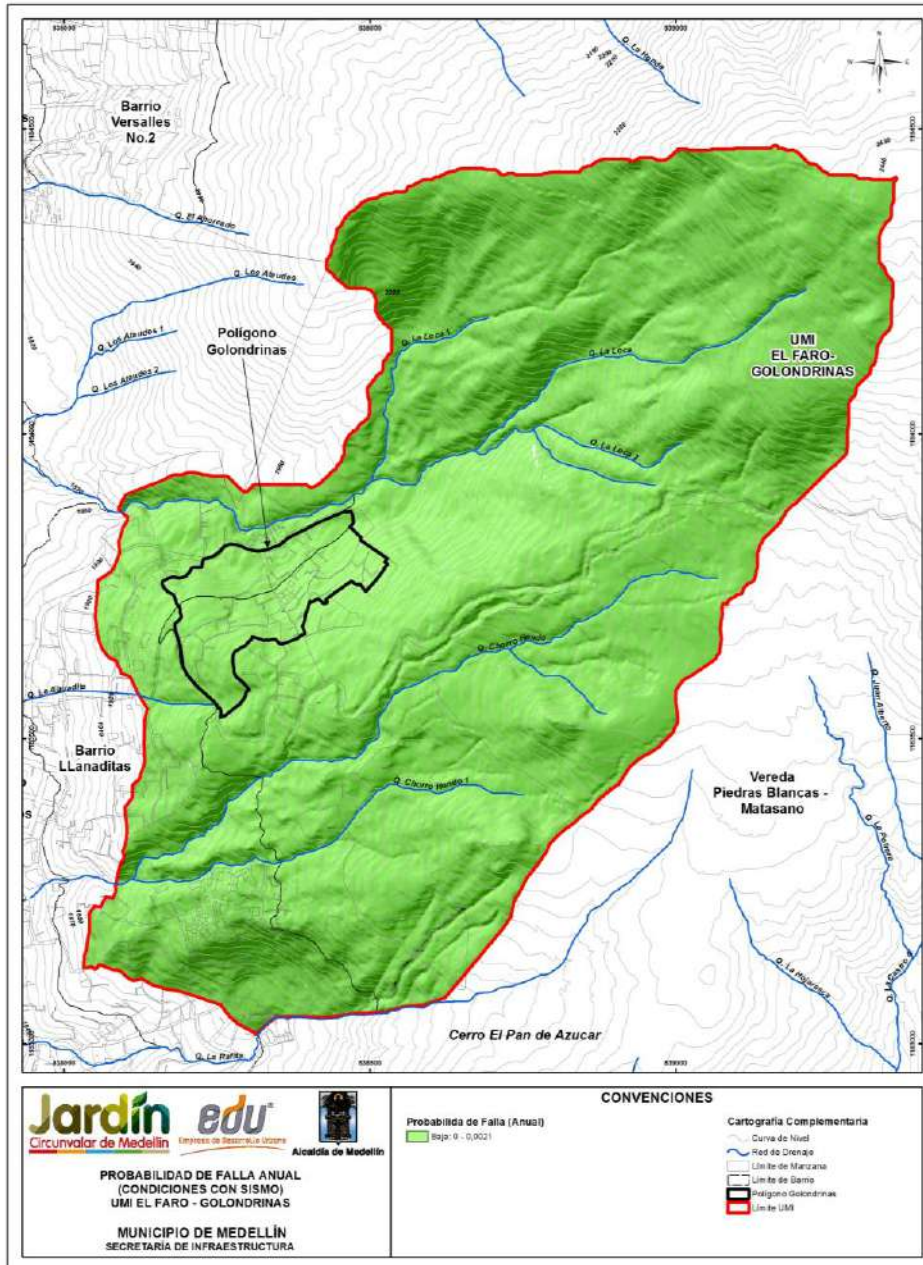
Mapa 33. Análisis de probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones actuales y naturales  
(GOLProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI\_Medellin\_C)



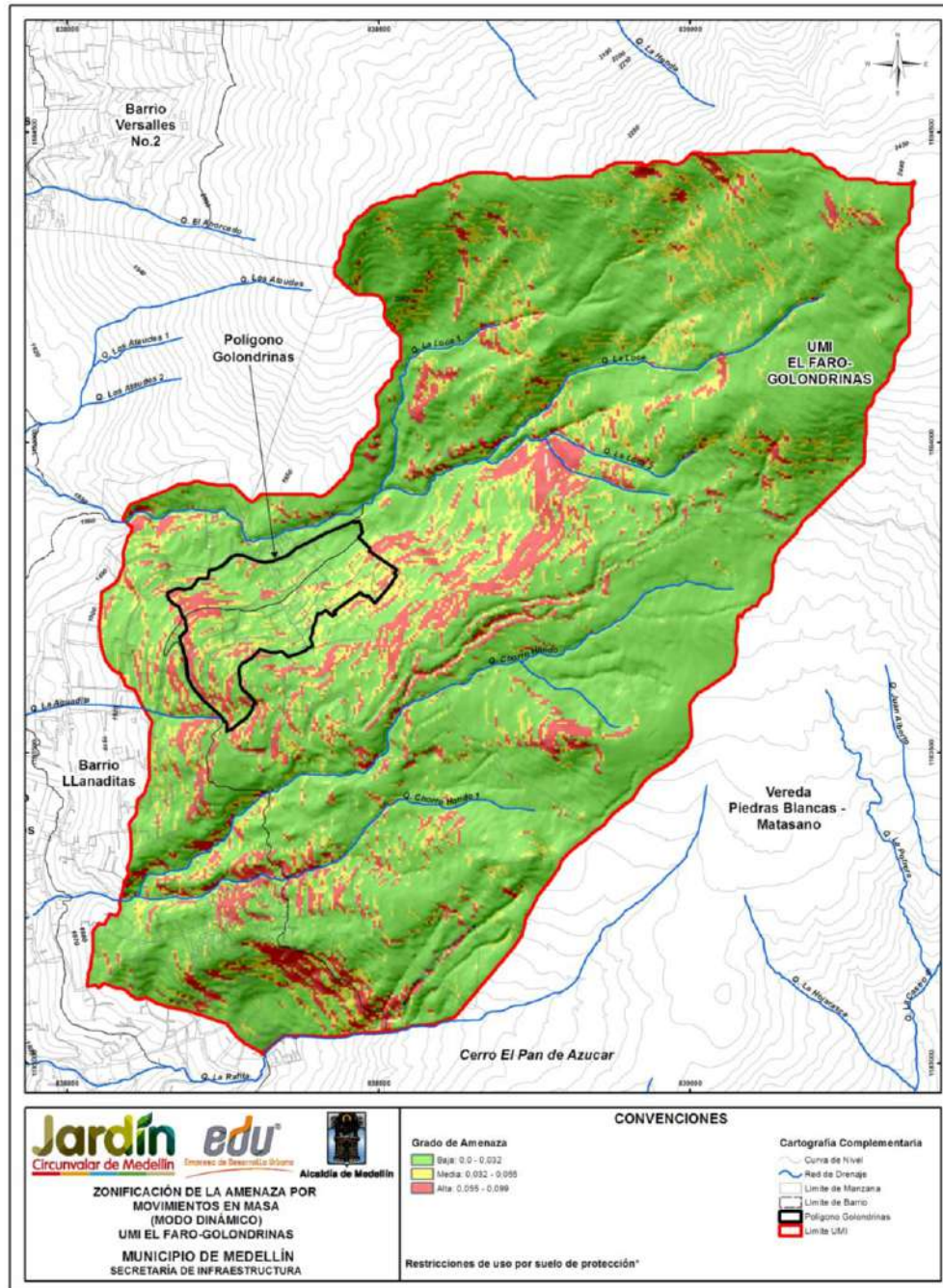


**Mapa 34. Análisis de probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones seudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (GOLProbabilidadFallaTotalUMI\_Medellin\_C)**



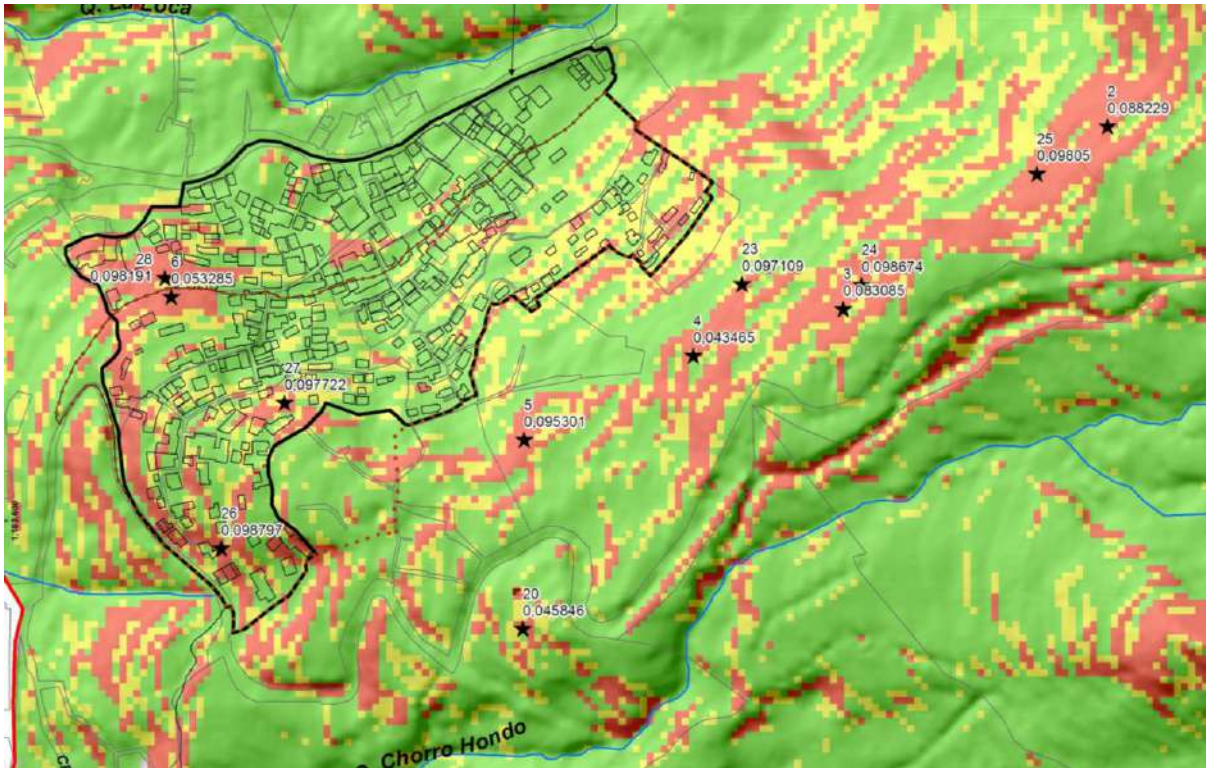


Mapa 35. Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones seudo-estático con un sismo 0.25g (GOLProbabilidadFallaAnualUMI\_Medellin\_C)



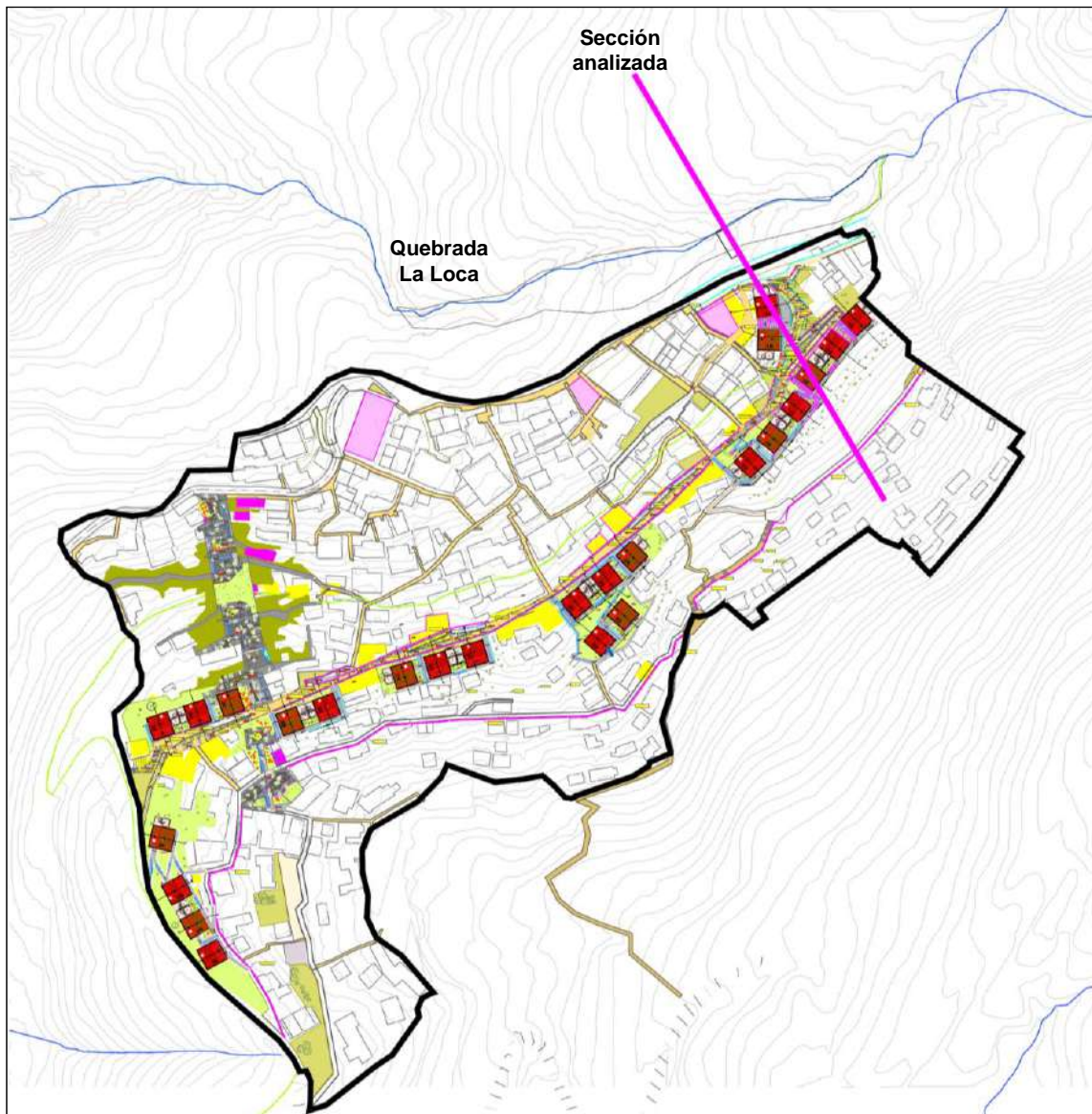
Mapa 36. Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (19\_GOLAmenazaMovimientosenMasa\_Medellin\_C y 19\_GOLAmenazaMovimientosenMasa\_Medellin\_T)





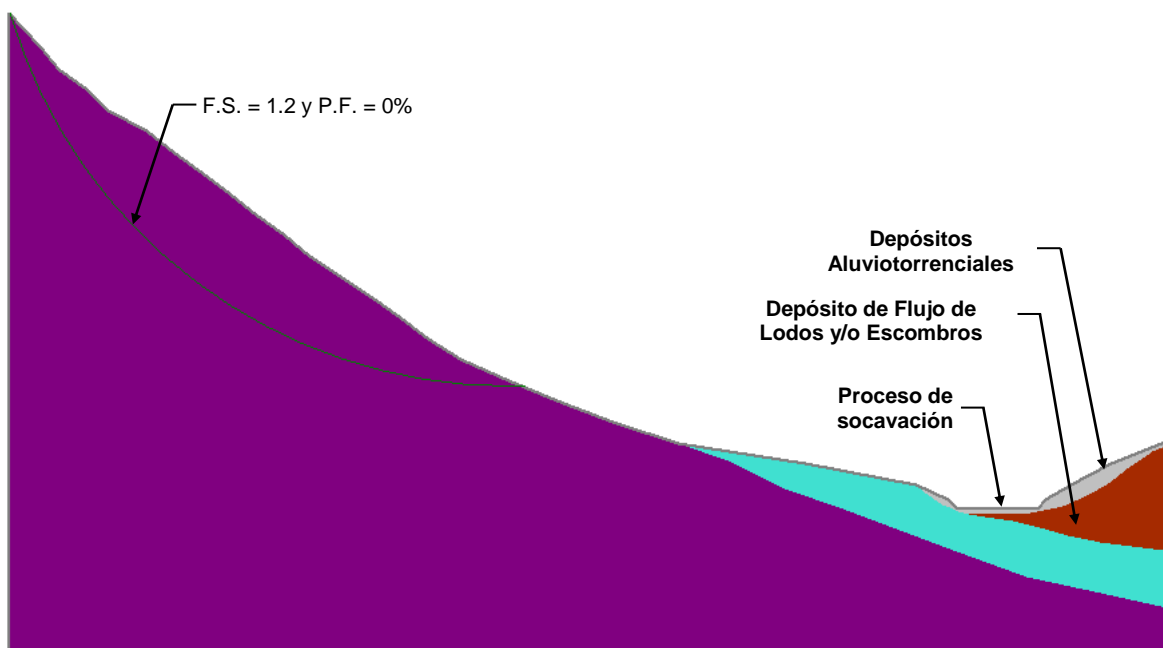
**Figura 179. Esquema con localización de los focos de inestabilidad que afectan el Polígono Golondrinas**

Dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa, se tuvo en cuenta el efecto de los procesos de socavación en los cauces que pudieran desestabilizar las laderas adyacentes luego de sufrir una pérdida de masa por dichos procesos. La socavación general en los cauces naturales se estimó a partir de los resultados de la modelación hidráulica para un periodo de retorno de 100 años como se presenta en el Anexo 05. La Figura 180 muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó el valor máximo de socavación.



**Figura 180. Esquema de localización en planta de la sección analizada**



El perfil mencionado, fue analizado teniendo en cuenta el proceso de socavación y la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. La Figura 181 exhibe los resultados del análisis de estabilidad efectuado. El valor de probabilidad de falla incluida en cada figura hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años.



**Figura 181. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Loca**

En el perfil se observa un factor de seguridad de 1.2 y una probabilidad de falla de 0%. Estos resultados se consideran dentro del rango de amenaza baja y ratifican que el proceso de socavación no implica ninguna afectación en la estabilidad de la ladera.



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

## **14. AMENAZA POR INUNDACIONES**

### **14.1 ASPECTOS GENERALES**

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (Flórez y Suavita, 1997; INETER y COSUDE, 2005, en AMVA et al, 2010)

Es importante aclarar que dentro del término inundaciones caben dos tipos de fenómenos diferenciados por la velocidad de ascenso de los niveles de agua. El primero corresponde a inundaciones lentas que son características de las zonas asociadas a llanuras aluviales donde la pendiente suave del terreno y los amplios valles permiten un almacenamiento temporal de un importante volumen de agua. El segundo corresponde a inundaciones rápidas donde el nivel del agua asciende rápidamente dado que la geomorfología de terreno facilita altas velocidades de flujo pero no permite almacenamientos importantes. De esta manera, el Polígono Golondrinás, cuyo terreno corresponde a una ladera de alta pendiente, es susceptible únicamente a inundaciones de tipo rápidas que traen consigo una alta energía del flujo por las altas velocidades de flujo y normalmente bajas profundidades de flujo.

En el análisis de la amenaza por inundación se incluyeron los fenómenos de inundación generados por desbordamientos e incapacidad de los principales cauces naturales y por incapacidad de aquellos naturales que se han convertido en artificiales por la construcción de canalizaciones y coberturas (alcantarillas, canales y box culverts) ubicados al interior y a lo largo del cauce en el tramo de influencia.

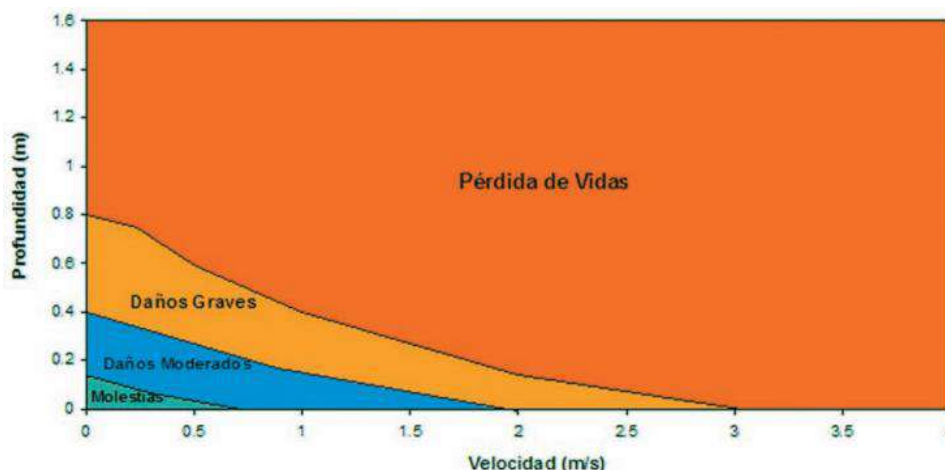
### **14.2 METODOLOGÍA**

Luego de haberse obtenido mediante el modelo hidráulico la magnitud de las variables hidráulicas como la velocidad y la profundidad de flujo, se procedió a calificar el grado de amenaza por inundaciones.

La asignación de la amenaza por inundaciones se realizó a partir de la combinación de la intensidad del fenómeno y de su probabilidad de ocurrencia de acuerdo con metodologías suizas y austriacas para evaluar la amenaza en general, por ejemplo, Ofee et al (1997) y Fiebigler (1997) en López y Courtel (2006) y en FLO-2D (2012). La intensidad del fenómeno está dada por los valores de la profundidad y la velocidad de flujo, mientras que la probabilidad de ocurrencia está directamente relacionada con el periodo de retorno de la creciente.

La categorización de la intensidad se realizó empleando la clasificación recomendada por la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Mi Rio (2003) para los diferentes tipos de daños posibles según diferentes combinaciones de velocidades y profundidades de

flujo (Figura 182). Se consideraron tres categorías de intensidad, alta, media y baja. Las zonas donde ocurran flujos con potencialidad de generar daños graves o pérdidas de vidas se asociaron a una intensidad alta. Por su parte, los flujos con potencialidad de generar daños moderados se consideraron de intensidad media. Finalmente, la intensidad baja fue asociada a aquellos flujos que presentan una combinación de profundidad y velocidad tal que tienen únicamente potencialidad de generar molestias.



**Figura 182. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)**

Por su parte, para la probabilidad también se consideraron tres categorías, alta, media y baja. A los eventos generados por crecientes cuya probabilidad anual de excedencia es inferior al 2%, es decir aquellos asociados a periodos de retorno superiores a 50 años, se les asignó una calificación de probabilidad baja. Se calificaron con probabilidad media a aquellos eventos asociados a una probabilidad anual de excedencia entre el 2% y el 10%, es decir, con periodos de retorno superiores a 10 años e inferiores o iguales a 50 años. Finalmente, los eventos con una probabilidad anual de excedencia igual o superior al 10% se consideraron con una probabilidad alta, es decir a aquellos asociados a periodos de retorno de 10 años o menos. En la Tabla 52 y en la Tabla 53 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

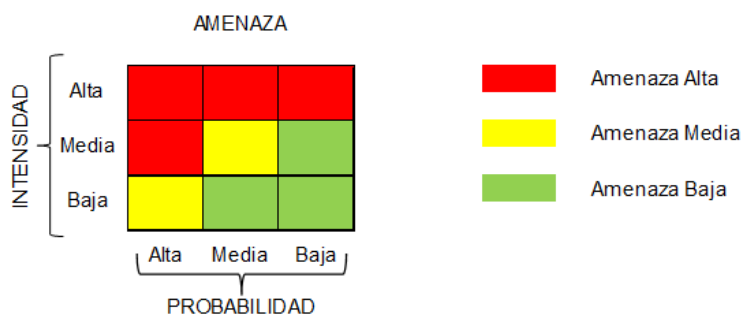
**Tabla 52. Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones**

Calificación de la Probabilidad	Periodo de retorno (Años)	Probabilidad de Excedencia (%)
Alta	TR ≤ 10	10% ≤ P
Media	10 < TR ≤ 50	2% ≤ P < 10%
Baja	50 < TR	P < 2%

**Tabla 53. Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones**

Calificación de la Intensidad	Tipo Potencial de Daños
Alta	Daños graves y pérdida de vidas
Media	Daños moderados
Baja	Molestias



Finalmente, la calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad. Aquellos eventos que presentan una intensidad alta fueron calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Los eventos con probabilidad media e intensidad media se calificaron con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 183 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad.



**Figura 183. Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)**

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

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

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

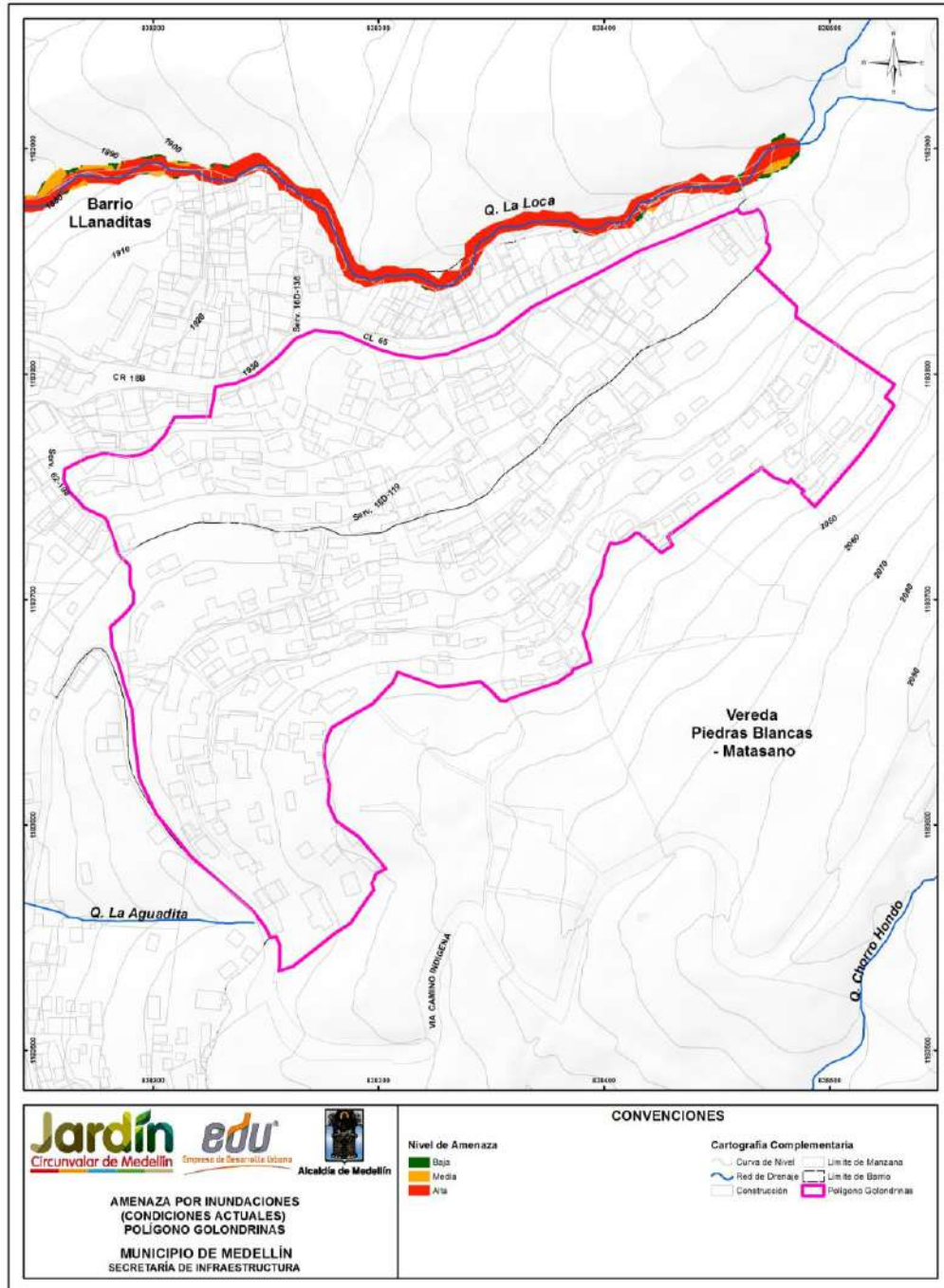
contacto con el flujo diversas asignaciones de la amenaza. En estos casos se asignó a toda la zona cubierta con la edificación la mayor amenaza entre todas las amenazas de todas las celdas adyacentes a ella.

### **14.3 RESULTADOS**

Los resultados de la evaluación de la amenaza por inundaciones indican que el Polígono Golondrinas se encuentra fuera de las zonas amenaza generadas por la Quebrada La Loca, única y principal corriente natural cercana al polígono. Las zonas de amenaza por inundaciones delimitadas se encuentran hacia el interior del cauce el cual corre por el costado norte del Polígono a una distancia que no alcanza a afectarlo por este tipo de fenómenos.



Sin embargo, a pesar de estar fuera del polígono, es importante mencionar que diversas viviendas que están ubicadas cerca de las márgenes de la quebrada La Loca se encuentran en amenaza Alta por Inundaciones, debido a su ubicación en relación con el retiro de la quebrada.

En el Mapa 37 se presenta el análisis de la amenaza por inundaciones para la Quebrada La Loca en el Polígono Golondrinas, donde la mancha de color rojo indica zona de amenaza alta, la de color naranja indica amenaza media y la de color verde indica amenaza baja.



Mapa 37. Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en la Quebrada La Loca en el Polígono Golondrina.  
(25\_GOLAmenazalnundaciones\_Medellin\_C y 25\_GOLAmenazalnundaciones\_Medellin\_T)



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

## **15. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES**

### **15.1 ASPECTOS GENERALES**

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

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

### **15.2 AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA**

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

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

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

Sin embargo, los caudales máximos esperados para la Quebrada La Loca, superiores a 10 m<sup>3</sup>/s para diferentes periodos de retorno, presentarían una importante capacidad de arrastre de los materiales sueltos que se depositarían en el cauce en caso de ocurrir fenómenos de movimiento en masa.

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

Por otro lado, durante las actividades de exploración geológica se detectaron depósitos de material de origen torrencial en la Quebrada La Loca. Estos aspectos, en conjunto con lo reportado en Desinventar, indican que la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de Avenidas Torrenciales con origen en movimientos en masa no puede ser despreciable para el polígono de estudio.

### 15.3 AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN Y TRANSPORTE DEL MATERIAL DEL LECHO

Como ya se mencionó anteriormente las avenidas torrenciales pueden tener tres orígenes. En este apartado se hace un análisis de la posible ocurrencia de avenidas torrenciales cuyo origen está en el arrastre del material del lecho. Este tipo de fenómeno se presenta cuando el flujo genera un esfuerzo cortante sobre el lecho tal que supera el esfuerzo resistente del material que la compone.

De acuerdo con Takahashi (2007), el esfuerzo resistente del material del lecho tiene dos componentes: una componente friccionante y una componente cohesiva, tal como se observa en la siguiente ecuación.

$$\tau_r = g \cos \theta [C_* (\sigma - \rho) a] \tan \phi + c$$

Donde:

- ✓  $\tau_r$  es el esfuerzo resistente.
- ✓  $g$  es la gravedad.
- ✓  $C_*$  es la concentración de equilibrio de partículas gruesas.
- ✓  $\sigma$  es la densidad de partículas.
- ✓  $\rho$  es la densidad del fluido.
- ✓  $a$  es la distancia medida desde la superficie de la capa de sedimento.
- ✓  $\phi$  es el ángulo de fricción del material.
- ✓  $c$  es la cohesión del material.

Por otro lado el esfuerzo que genera el flujo sobre el fondo del cauce en cada sección estudiada se encuentra dado por la siguiente expresión (Sotelo, 2002):

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

Donde:

- ✓  $\tau$  es el esfuerzo que genera el flujo.
- ✓  $R_H$  es el radio hidráulico de la sección.

- ✓  $\gamma$  es el peso específico del agua.
- ✓  $\theta$  es el ángulo de inclinación del fondo del cauce.

Con base en lo anterior se realizó un análisis comparativo entre el esfuerzo que genera el flujo sobre el lecho de los cauces y el esfuerzo resistivo de los materiales que componen el lecho. Para estimar el esfuerzo resistivo se emplearon los resultados del estudio de geología local y los resultados de la exploración y caracterización geológico-geotécnica de los materiales que actualmente conforman el cauce, en especial los parámetros de resistencia al corte, los cuales fueron presentados en el numeral 10.3 de este informe y los cuales se resumen en la Tabla 54.

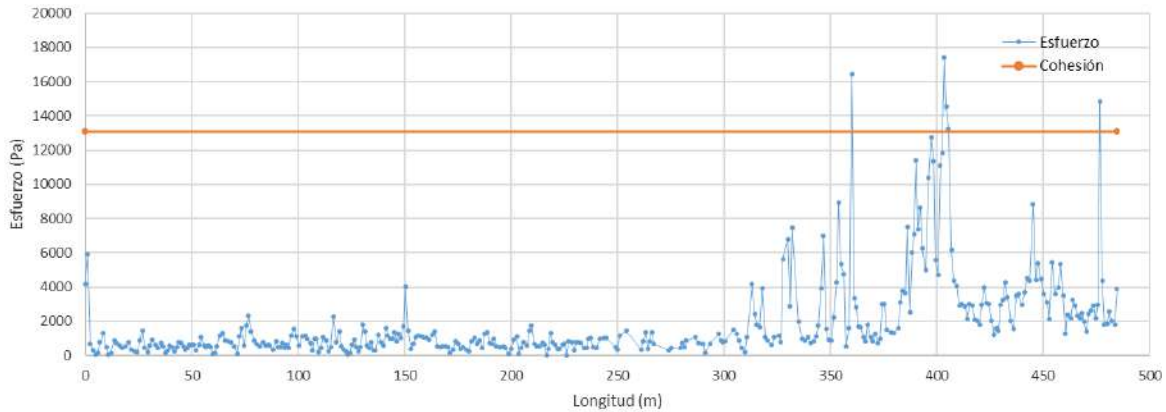
**Tabla 54. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Golondrinas**

<b>GOLONDRINAS</b>	<b>f' (°)</b>	<b>c' (kPa)</b>	<b>g (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Quebrada La Loca			
Lleno Antropico	26,90	13,05	17,43
Dunitas de Medellin (JKuM)	26,50	24,20	16,71
Depositos de flujo de lodos y escombros	24,13	22,79	17,43

En la Tabla 54 puede observarse que los materiales de las corrientes estudiadas tienen cohesiones que varían entre 13.5 kPa y 24.2 kPa correspondiendo el primero a llenos antrópicos y el segundo a las Dunitas de Medellín (JKuM).

El esfuerzo ejercido por el flujo sobre el lecho en cada sección a lo largo de La Quebrada La Loca se presenta en la Figura 184. En esta figura también se ha ubicado la menor cohesión existente de los materiales presentes en el cauce, y de manera comparativa puede observarse que en pocos puntos del cauce el esfuerzo cortante que se transmite al lecho es superior a la menor de las cohesiones de los materiales.

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





**Figura 184. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Loca**

#### 15.4 METODOLOGÍA

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

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

Sin embargo, tanto el POMCA como el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012, no son explícitos en el tipo de modelo a emplear para analizar este tipo de fenómenos, y es común en el medio el empleo de modelos de aguas claras a pesar de las diferencias en el

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

comportamiento hidráulico entre los dos fenómenos (inundaciones y avenidas torrenciales).

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

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

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

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

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

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

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



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

Este procedimiento se realiza sobre los cauces más importantes que tienen influencia en el polígono de estudio.

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

La categorización de la intensidad se realiza empleando la clasificación recomendada en Fiebiger (1997), OFEE (1997) y O'Brian (2010) donde la máxima profundidad y el producto de la máxima profundidad con la máxima velocidad son los factores que determinan el grado de intensidad del fenómeno, según la **Tabla 55**.

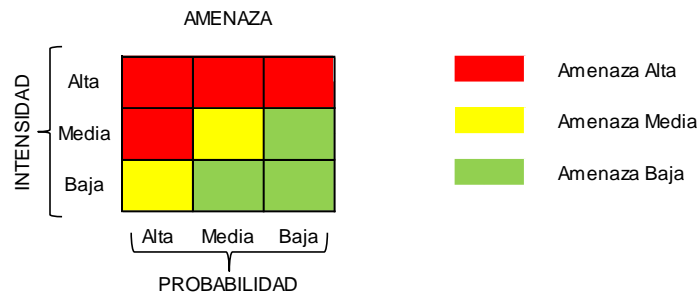
**Tabla 55. Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales**

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

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

La calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad según lo recomendado en Fiebiger (1997) y Ofee (1997). Aquellos eventos que presentan una intensidad alta son calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Por su parte, los eventos con probabilidad media e intensidad media se califican con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 185 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza para avenidas torrenciales según la probabilidad y la intensidad.

Con la misma idea se clasificaron las vías de acceso, las cuales corresponden a vías vehiculares y andenes, y los equipamientos como colegios, hospitales, parques, iglesias, etc. La clasificación se realizó para el caso más crítico de inundación, es decir, inundación por avenidas torrenciales. Para el caso de las vías se clasificó el grado de amenaza en los tramos de vías o andenes que estén dentro de la Amenaza por Avenidas Torrenciales y para el caso de los Equipamientos se clasificó según el mayor grado de amenaza existente al interior del equipamiento o aledaño a él.



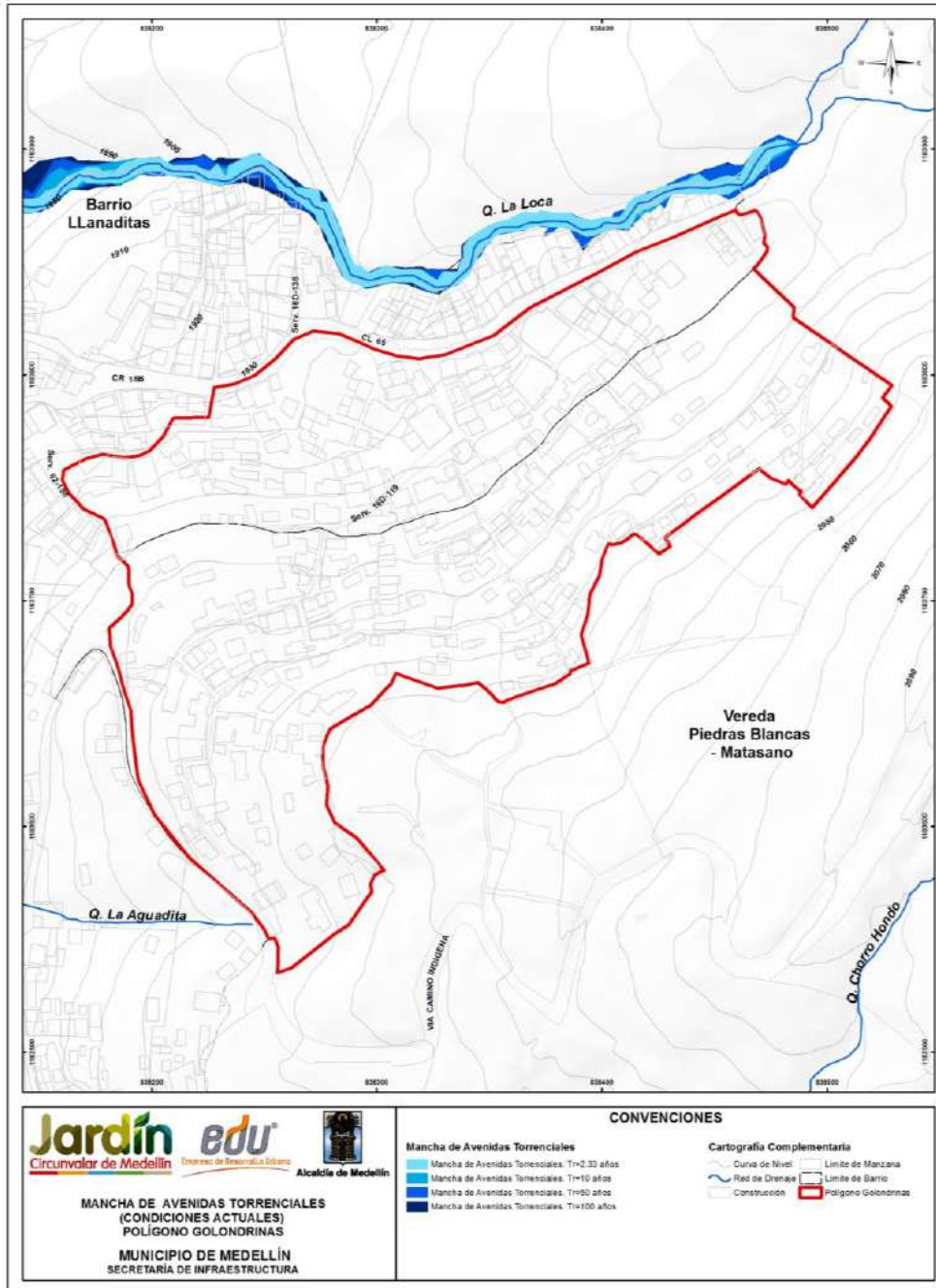
**Figura 185. Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno**

### 15.5 RESULTADOS

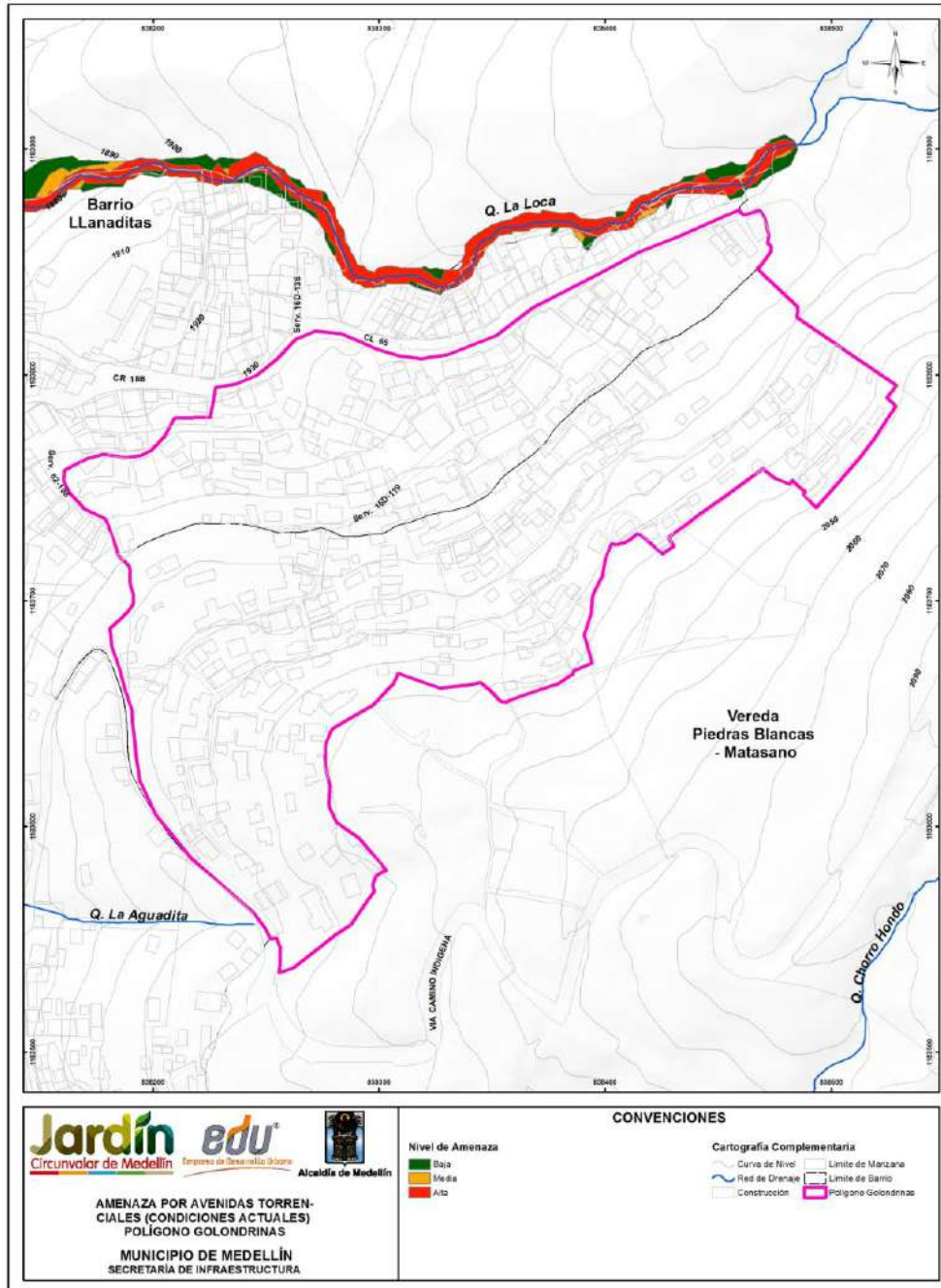
En el Mapa 38, se presenta la mancha de las avenidas torrenciales en condiciones actuales para el tramo de quebrada evaluado, y en el Mapa 39, se presenta la amenaza por este fenómeno, ambas estimadas siguiendo la metodología descrita en el apartado anterior. En estos mapas las líneas color rojo o magenta delimitan el Polígono Golondrinas.

Se puede observar que las manchas del fenómeno y las manchas de la amenaza quedan fuera del polígono de estudio, por lo que puede concluirse que al interior del polígono Golondrinas no se presenta amenaza por ese tipo de fenómenos.

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

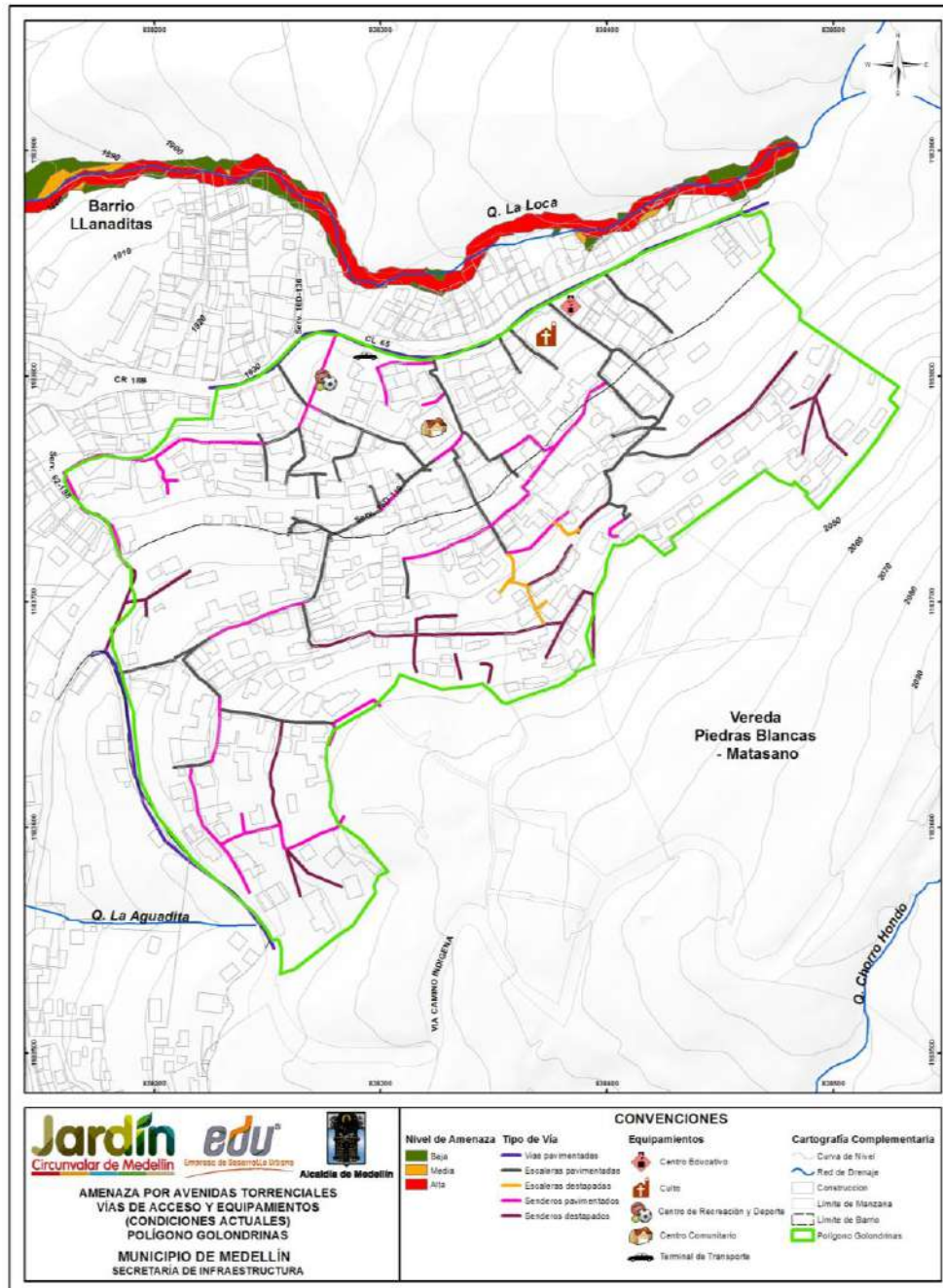


Mapa 38. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrina ( $C_v=0.3$ )  
(23\_GOLManchaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_C y  
23\_GOLManchaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T)





**Mapa 39. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3)**  
**(27\_GOLAmenazaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_C y 27\_GOLAmenazaAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T)**





Mapa 40. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales en el Polígono Golondrinas (GOLAmenazaAvenidasTorrencialesAccesosEquipamiento\_Medellin\_C)



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



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

Los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales tienen en común al elemento hidrológico como uno de los detonantes del evento, y las amenazas que generan ambos fenómenos están concentradas casi siempre en las zonas aledañas o bajo influencia de los cauces.

Para la planificación de la ordenación del territorio se hace entonces necesario seleccionar cuál de los dos eventos o tipos de amenazas debe ser el empleado para esta labor. Al realizar un análisis comparativo, las manchas de los fenómenos de avenidas torrenciales cubren una mayor extensión que las manchas de inundaciones.

Lo anterior implica, también, junto con el sistema de clasificación empleado para calificar la amenaza, que la ésta última para los eventos de avenidas torrenciales sea más severa en comparación con la amenaza generada por las inundaciones.

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

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

## 16. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

### 16.1 ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL

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



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

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

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

Inicialmente se realizó un análisis de información básica. Para esto se consideraron varios aspectos importantes consignados en el documento técnico elaborado por la Universidad San Buenaventura (2014) bajo el contrato *“ESTUDIOS Y DIAGNÓSTICO FÍSICO PARA LA FORMULACIÓN DE LOS PROYECTOS BARRIOS SOSTENIBLES EN LOS SECTORES GOLONDRINAS, VERSALLES, RANCHO DE LATA AL INTERIOR DE LOS MACROPROYECTOS LLANADITAS, LA CRUZ Y EL PICACHO, DENTRO DEL MARCO DEL PROYECTO CINTURÓN VERDE METROPOLITANO EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN”*.

Del estudio mencionado se tuvo en cuenta la información referente al número de niveles por vivienda (1 piso, 2 pisos, de 3 a 5 pisos o más de 6 pisos) y tipo de ocupación (residencial, comercial o mixta), entre otros. La localización espacial correspondiente a cada predio también es obtenida del estudio elaborado por la Universidad San Buenaventura (2014) y es presentada en el actual estudio, como parte de la geodatabase del proyecto. Dicha localización hace referencia al código COBAMA (Comunidad, Barrio y Manzana) que se relaciona con el polígono de construcción y al CBML (Cobama-Lote)

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

que se refiere a la unión del COBAMA y el número del lote. Esta información se relaciona con la ficha de identificación de la estructura a través del Número de Formulario que corresponde al Número de Vivienda en dicha base de datos. Es importante aclarar en este punto que la geodatabase a través del Número de Formulario permite acceder a información detallada de la vivienda consignada en la información entregada como parte del estudio de la Universidad San Buenaventura (2014).

La información de la San Buenaventura (2014) fue posteriormente verificada y complementada a través de trabajos de campo. En los trabajos y visitas de campo efectuados por el personal especialista en estructuras del proyecto se levantó información adicional requerida para la valoración numérica de la vulnerabilidad como fue: el tipo de estructura (concreto y madera, madera o lata y cartón), estado y condiciones de las mismas (muy mala, mala, media, buena o muy buena), tipo de fundación (superficial o profunda), tipo de cubierta (teja de lata, teja de zinc, madera, losa de concreto o plástico), densidad habitacional entre otras, que se consideran importantes para este proyecto. Todas estas características que fueron de suma importancia para la valoración numérica de la vulnerabilidad física de las estructuras hacen parte de la ficha de identificación de cada uno de los predios y se presentan en el Anexo 06.

Además se identificaron y localizaron dentro de cada polígono del Proyecto Barrios Sostenible, los elementos de estructura física expuestos como son: líneas vitales (vías), equipamientos (equipamientos de salud, parques, plazas, plazoletas, plantas de tratamiento, terminales de transporte, metro, metrocable, tranvía y prevención y atención de desastres), equipamientos básicos sociales y comunitarios (salud, recreación y deporte, culturales, comunitarios, fuerza pública – seguridad, almacenamiento y distribución del sector primario); elementos de soporte ciudadano (patrimonio), elementos de soporte económico (industria, comercio y servicios), estructuras y población expuesta.

Para el análisis de la vulnerabilidad física se estableció una metodología para determinar las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas, en cuanto a: tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras. Se buscaron metodologías en el ámbito científico que lograran agrupar este tipo de requisitos, dividiéndose para el caso de las amenazas por movimientos en masa donde se consideró la metodología de Li et al. (2010), Uzielli et al. (2008) y Guimaraes (2015) y para el caso de las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales se estableció la propuesta de Thouret et al. (2013).

Se deben identificar los diferentes tipos de daño o efecto esperado sobre los elementos expuestos que se pueden presentar como resultado del fenómeno natural. Esto solo se realizó para las estructuras identificadas al interior del polígono del proyecto Barrios Sostenibles.

Finalmente, toda esta información se zonificó en un mapa denominado de vulnerabilidad física, categorizando la vulnerabilidad de cada estructura en alta, media y baja, de acuerdo a las características de los elementos expuestos. De forma adicional, en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las

personas que habitan las viviendas y la misma también fue categorizada según el número de personas afectadas dentro de una estructura.

## 16.2 VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA

### 16.2.1 Metodología de análisis

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

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

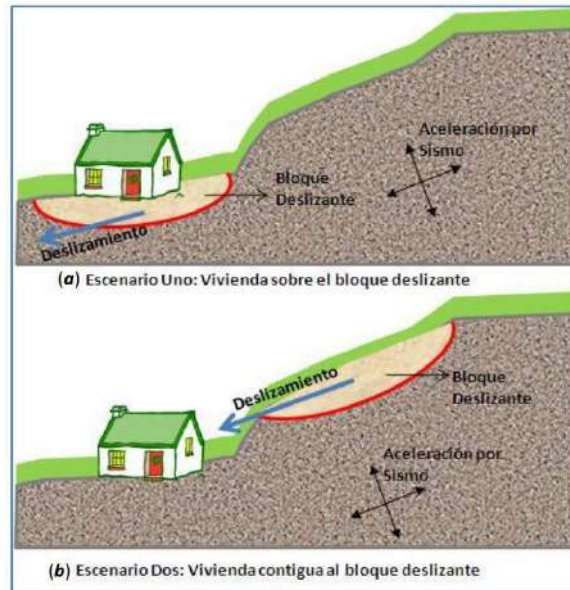
La intensidad para este enfoque, se define como el conjunto de parámetros distribuidos espacialmente, que describe la capacidad arrolladora de un fenómeno natural (Hungry, 1997) en este caso un movimiento en masa. Según Amatruda et al. (2004), la intensidad podría estar expresada en términos de la energía del impacto, la velocidad media y la profundidad del suelo en las zonas potencialmente erodables.

En el trabajo específico de Li et al. (2010), la intensidad de la amenaza es definida como una función de dos variables: el factor de intensidad geométrico ( $I_{gem}$ ) y el factor de intensidad dinámico ( $I_{din}$ ).

El factor de intensidad geométrico tiene que ver con la posición o la proximidad de las estructuras con respecto a lo que se considera la zona de amenaza. Este factor considera entonces las características relacionadas con el tamaño del movimiento en masa. Cuando la estructura se encuentra al interior de la zona donde se podría generar un movimiento en masa, se podrían generar fenómenos de creeping. El factor de intensidad dinámico tiene como principal variable la velocidad del deslizamiento cuando ocurre el impacto contra la estructura localizada fuera del área donde ocurriría el movimiento en masa (Figura 186). Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

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

fuera del movimiento en masa



**Figura 186. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa**

En la expresión anterior,  $I_{gem}$  es el factor de intensidad geométrica e  $I_{dfm}$  es el factor que considera la deformación de las estructuras cuando se encuentran localizadas al interior del área del movimiento en masa y las cuales sufrirán la acción de deslizamientos con bajas velocidades de deslizamiento o creeping.

Por otro lado,  $I_{dpt}$  es el factor que considera el espesor de los detritos que llegan hasta la zona de las estructuras y que impactan las mismas. Este es utilizado para evaluar los elementos exteriores a las áreas de deslizamientos que ocurrieran con altas velocidades y se podría obtener con la ecuación:

$$I_{dpt} = 0.1 \cdot D_{dpt}$$

Finalmente,  $I_{din}$  es el factor que relaciona la velocidad de la amenaza con la estructura impactada. En el caso de que la velocidad del deslizamiento pueda superar los  $5 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$ , Cruden & Varnes (1996) (Tabla 56) afirman que las estructuras serán destruidas y fuera de servicio. Para valores menores de  $5 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$ , las estructuras permanecerían intactas. Así las cosas, la intensidad dinámica podría ser calculada como:

$$I_{din-E} = \begin{cases} 0,00 & C \leq 5 \times 10^{-7} \quad (\text{mm} / \text{s}) \\ \frac{1}{36} (\text{Log}_{10} C + 6.30)^2 & C > 5 \times 10^{-1} \quad (\text{mm} / \text{s}) \end{cases}$$



Donde C es la velocidad en la que se podría desarrollar un fenómeno y para la cual Cruden & Varnes (1996) presentan una clasificación de los movimientos considerando la velocidad. Por ejemplo, para las estructuras fuera de un fenómeno que viaja de forma rápida, estas pueden ser afectadas por bloques de roca o flujo de escombros con alta velocidad. Para las estructuras dentro de la zona de incidencia del fenómeno que viaja lento, los daños pueden estar más asociados a fallos estructurales como deformaciones y desplazamientos de los elementos estructurales que podrían afectar el servicio de la misma.

**Tabla 56. Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996)**

CLASE	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	PROBABLE NIVEL DE DESTRUCCIÓN
7	Extremadamente rapido	$5 \times 10^3$	Desastre de gran violencia, estructuras destruidas por impacto del material desplazado, muchos muertos, improbabilidad de escape
6	Muy rapido	$5 \times 10^1$	Algunas vidas perdidas, la velocidad supera la velocidad de escape de las personas.
5	Rapido	$5 \times 10^{-1}$	Es posible escapar o evacuar las estructuras, posesiones y equipamientos destruidos.
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$	Algunas estructuras temporales e insensibles pueden mantenerse temporalmente
3	Lento	$5 \times 10^{-5}$	Medidas de remediación pueden ser adoptadas durante el movimiento. Las estructuras pueden mantenerse pero con trabajos frecuentes de mantenimiento.
2	Muy lento	$5 \times 10^{-7}$	Algunas estructuras permanecen sin daños ante el movimiento
1	Extremadamente lento		No se tiene percepción del movimiento. Se hace necesario implementar instrumentos.

La resistencia refleja la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del fenómeno con un determinado grado de severidad. Para las personas, esta misma resistencia representaría la capacidad de reacción y evacuación. En el caso de las estructuras, la resistencia total es función de varios factores y en el trabajo de Li et al. (2010) estos factores son específicamente:

$$R = \left( \prod_{i=1}^{ns} \xi_i \right)^{1/ns}$$

Si se consideran los factores de fundación ( $\xi_{sfd}$ ), los factores por el tipo de estructura ( $\xi_{sty}$ ), el factor de mantenimiento o estado ( $\xi_{smn}$ ) y el factor de altura o niveles de las estructuras ( $\xi_{shl}$ ), la resistencia se podrá calcular como:

$$R = (\xi_{sfd} \cdot \xi_{est} \cdot \xi_{alt} \cdot \xi_{man})^{1/4}$$

Para determinar el factor de fundación Ragozin and Tikhvinsky (2000) propusieron la siguiente ecuación en función de la profundidad de desplante de la fundación ( $D_{fun}$ )

$$\xi_{sfd} = \left( \frac{D_{fun}}{10} \right)^{1/3} + 0.05$$

Con esta ecuación se podría establecer unos rangos de valores para determinadas profundidades de fundación.

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

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

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

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

**Tabla 57. Factor por tipo de estructura**

TIPO DE ESTRUCTURA	$\xi_{est}$
Muy ligera (lata y cartón)	0.1
Ligera (Madera)	0.2
Mixta (Concreto y madera-Prefabricada)	0.4
Mampostería	0.8
Concreto sin refuerzo	1.3
Concreto reforzado	1.5

**Tabla 58. Factor por altura de la estructura**

ALTURA DE LA ESTRUCTURA	$\xi_{alt}$
Un solo piso	0.1
De 2 pisos	0.4
De 3 a 5 pisos	0.9
Más de 6 pisos	1.5

**Tabla 59. Factor de estado de la estructura**

ESTADO DE LA ESTRUCTURA	$\xi_{man}$
Muy mala	0.1
Mala	0.4
Media	0.8
Buena	1.2
Muy Buena	1.5

Para determinar la vulnerabilidad, Li et al. (2010) proponen expresiones en función de la intensidad de la amenaza ( $I$ ) asociada a los elementos expuestos y de la resistencia ( $R$ ) de esos elementos para soportar esa amenaza.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - \frac{2(R-I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases}$$

Guimaraes (2015) estableció a través de aplicaciones de la metodología de Li et al. (2010) en la Región Serrana de Rio de Janeiro donde se presentan algunas condiciones similares a Medellín en cuanto a ambientes geotécnicos se refiere, que la misma presenta dificultades en la obtención de algunos parámetros fundamentales para el cálculo de la vulnerabilidad física por movimientos en masa. Algunos de esos elementos son por ejemplo la determinación del factor  $D_{dpt}$ , ya que se trata de una variable que involucra el espesor de los detritos dejada por el movimiento en masa, la velocidad del deslizamiento  $C$ , para el cual tampoco se cuenta con información suficiente, y el  $I_{dfm}$  el cual involucra la deformación de las estructuras que se encuentran al interior del movimiento en masa.

Los anteriores factores requerirían entonces que el usuario deba esperar que el evento pase y observar dichas variables, o tener herramientas avanzadas que le permitan hacer simulaciones previas para determinar analíticamente o numéricamente dichos valores, lo que torna poco practica la metodología.

Considerando dichas dificultades, Guimaraes (2015) elaboró una metodología de cálculo para estimar la vulnerabilidad de las estructuras ante movimientos en masa, utilizando parámetros de fácil acceso aplicados sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de la estructura con la localización respecto al movimiento en masa.

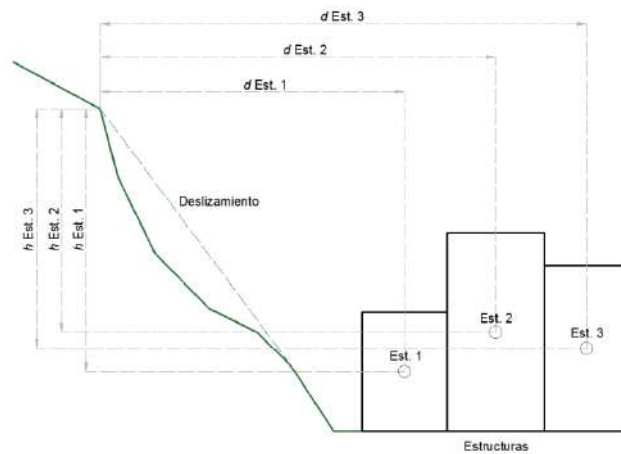
Teniendo en cuenta lo anterior, Guimaraes (2015) considera dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, fue considerada la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 187 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la distancia (d) y la altura (h) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad  $Z=h/d$ .

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

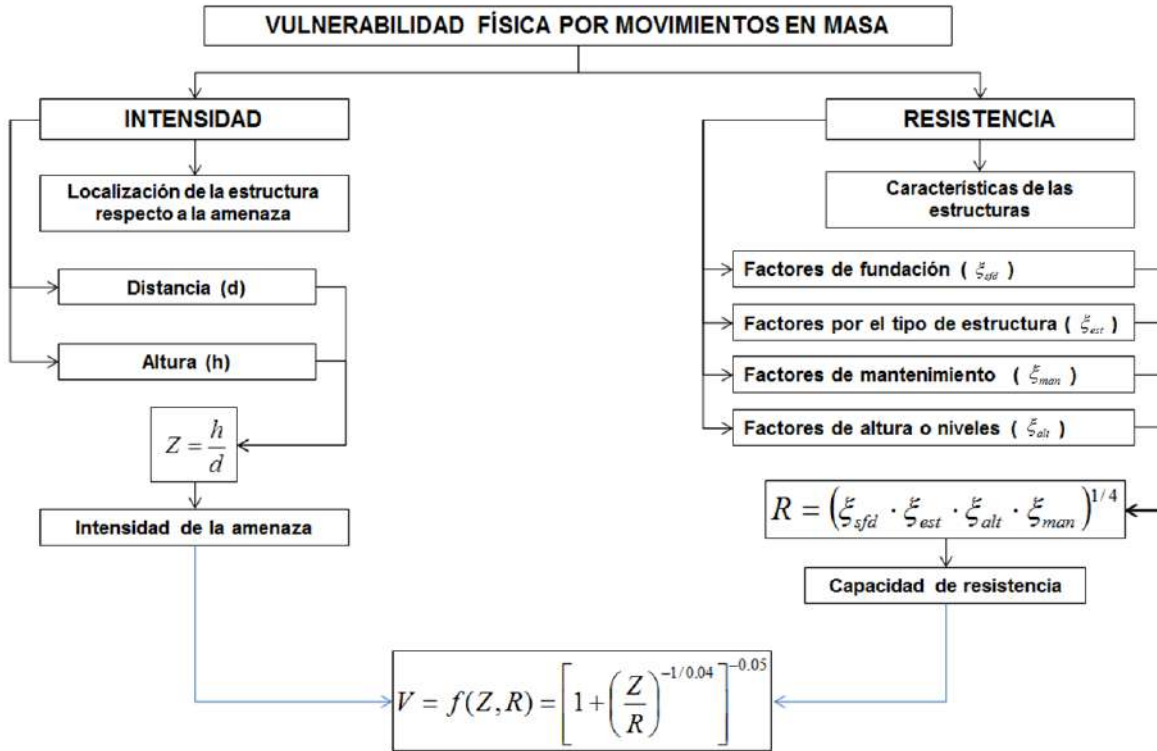
$$V_e = f(Z, R) = \left[ 1 + \left( \frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

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

La Figura 188 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.



**Figura 187. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables**



**Figura 188. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa**

## 16.2.2 Calibración de la metodología

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

### 16.2.2.1 Polígono asociado al Deslizamiento Villatina

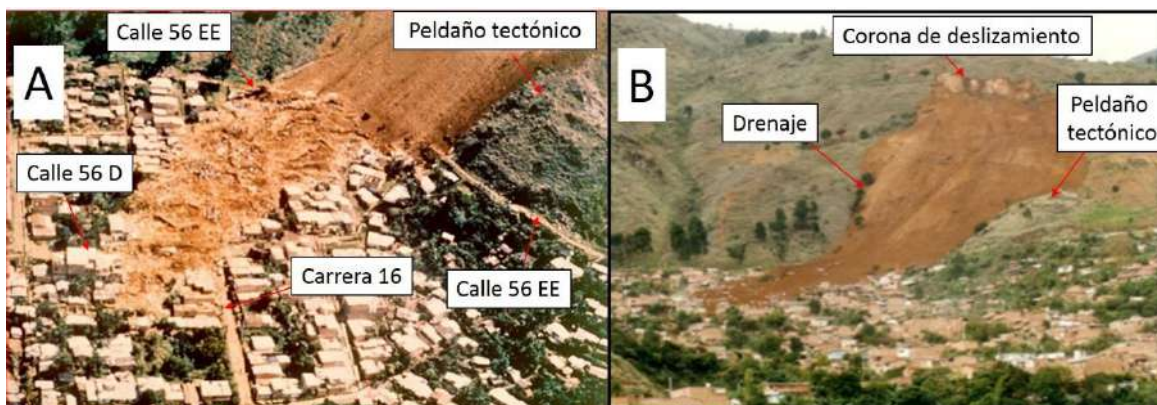
En la UMI delimitada para el Polígono San Antonio, también objeto de estudio en el Proyecto Barrios Sostenibles (SIGA, 2018), se presentó el conocido como deslizamiento Villatina, el cual generó una mancha de deslizamiento clave para la calibración de la metodología de trabajo usada para evaluar el riesgo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



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

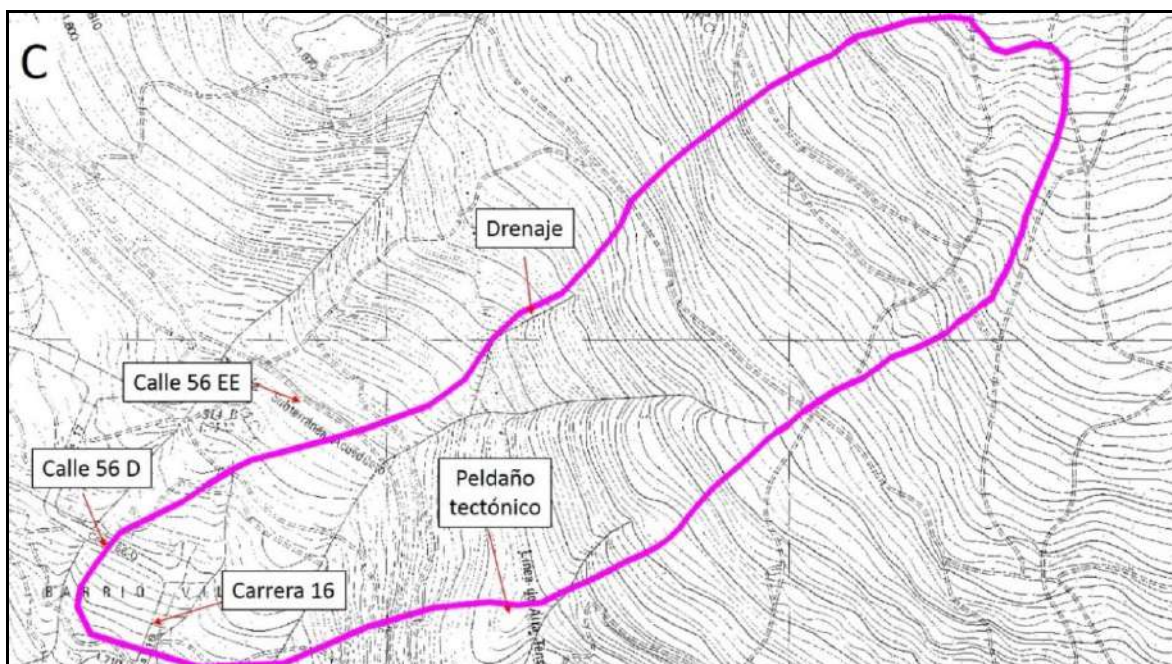
Como insumo para definir el polígono, se utilizaron registros fotográficos del deslizamiento, tomados desde diferentes ángulos, la descripción del movimiento en masa según los expertos del tema, la información recopilada durante la campaña de campo que hizo parte de este estudio y la interpretación de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

Dentro de los puntos que sirvieron como guía para establecer el posible límite de la mancha, se identificó una geoforma denominada en el capítulo de geomorfología del Estudio del Polígono San Antonio (SIGA, 2018) como Peldaño Tectónico, ubicado en la parte SSW del deslizamiento, un drenaje ubicado en el límite occidental y las vías con nomenclatura Calle 56 EE, Calle 56 D y Carrera 16 (Figura 189).



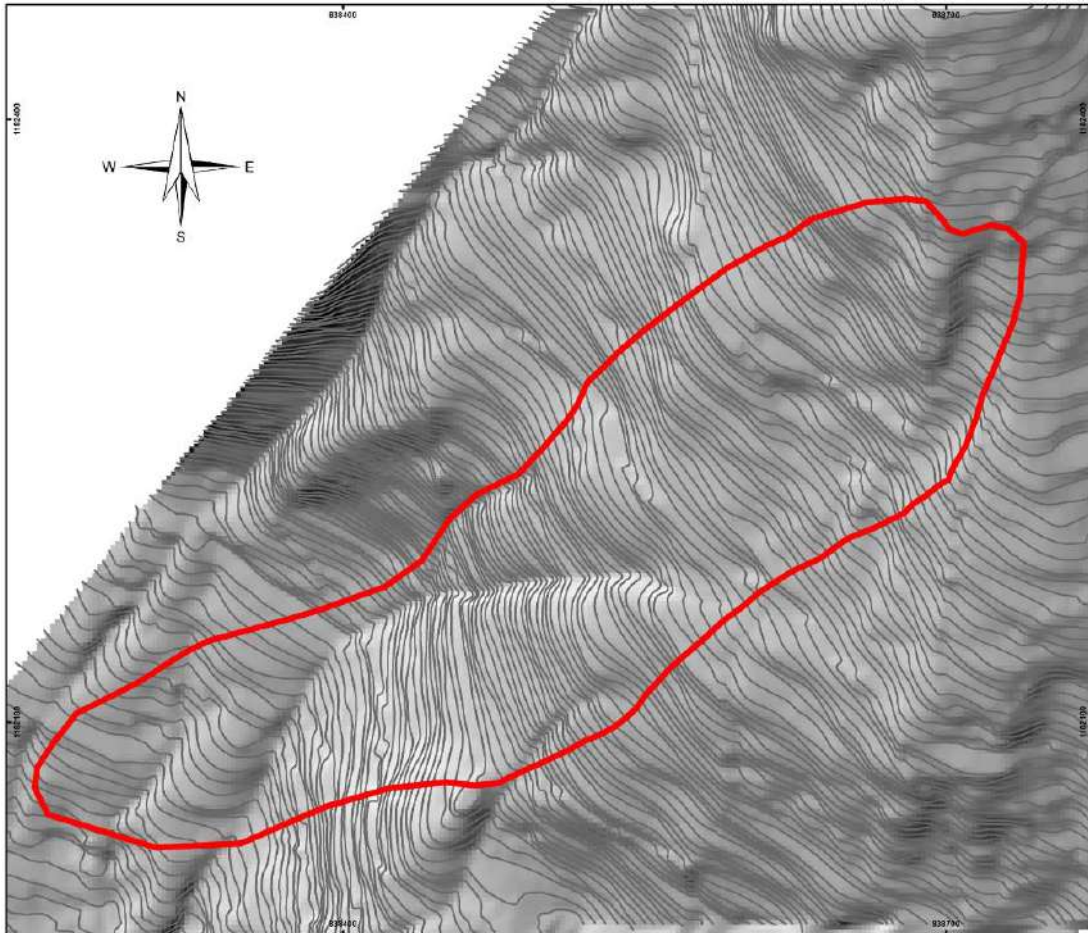
**Figura 189. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo**

Con la identificación de las referencias mencionadas anteriormente, que se localizan en partes externas del movimiento, y con la interpretación de la cartografía, se demarcó el polígono asociado al evento Villatina (Figura 190).



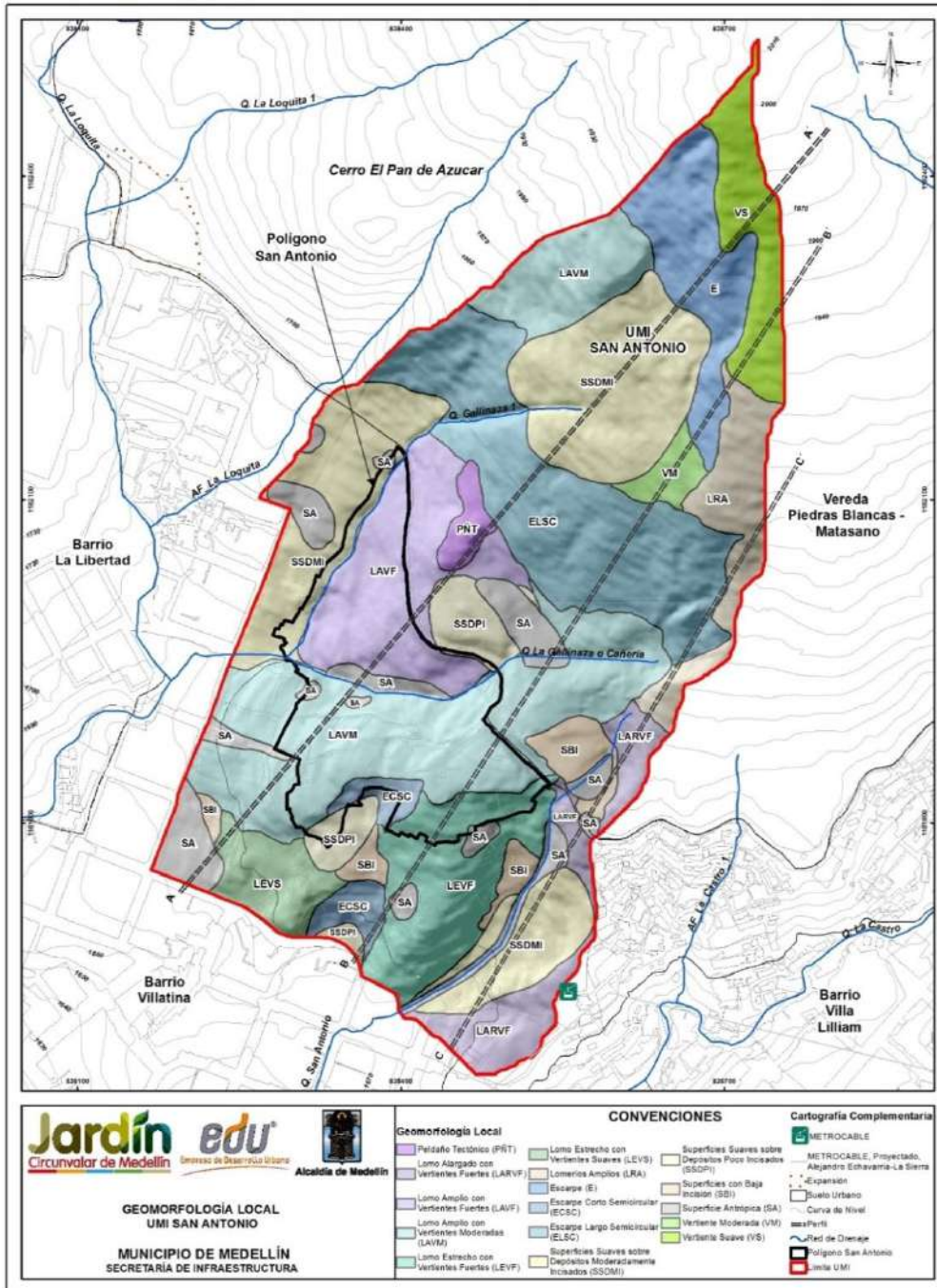
**Figura 190. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías**

La Figura 191, a continuación, muestra de nuevo el polígono asociado al deslizamiento mencionado, partiendo de su escarpe de tipo acorazonado y llegando hasta la zona conocida como Campo Santo. En el Mapa 41 y la Figura 192 se presentan las unidades geomorfológicas y el Perfil A-A, trazado en parte de la zona del deslizamiento Villatina; de la UMI San Antonio. La explicación en detalle de dichas unidades geomorfológicas se presenta en el Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales para el Polígono San Antonio (Siga, 2018).

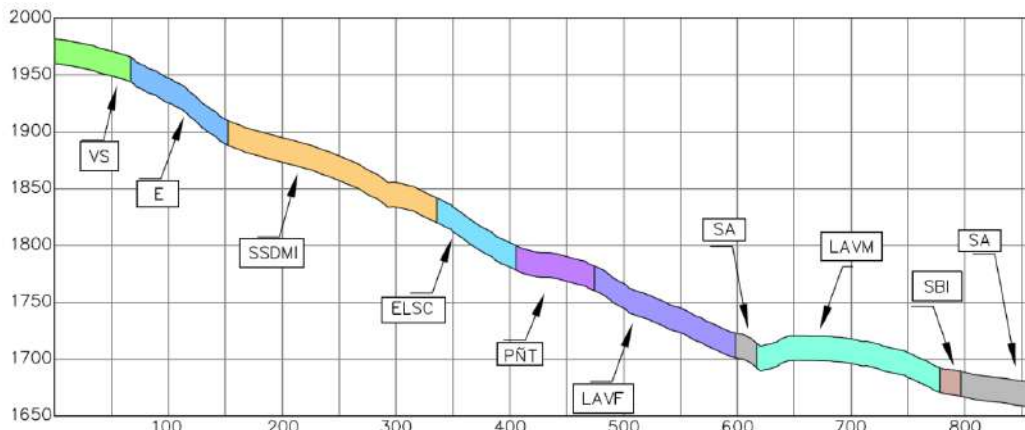


**Figura 191. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973**





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





**Figura 192. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)**

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

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

En la margen occidental a la altura de la unidad escarpe largo semicircular (ELSC), el material se encausa tanto en el cañón de la Quebrada Gallinaza 1 como en el cañón de una quebrada que se observa claramente en la cartografía del IGAC (1973) y en las fotografías planteadas en la Figura 189. Este suceso sumado a la cantidad de material y velocidad del mismo, provocan que continúe en dirección SSW hacia el escarpe del lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), que actúa como barrera, ocasionando el rebote hacia el suroccidente y llegando a depositarse hasta la esquina de la carrera 16 con calle 56 D (Figura 189). Es importante mencionar que el drenaje utilizado como referencia, no hace parte de la red hidrográfica de la cartografía actual del POT (2014), siendo este un cambio morfológico importante ocurrido después del fenómeno deslizamiento Villatina.





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

### 16.2.2.2 Factor de intensidad

Se habló en el Numeral 16.2.1 sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de una estructura de acuerdo con la localización respecto a un probable movimiento en masa. Según Guimaraes (2015) se consideran dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, se tiene en cuenta la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 187 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la altura (h) y la distancia (d) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad  $Z=h/d$ .

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

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

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

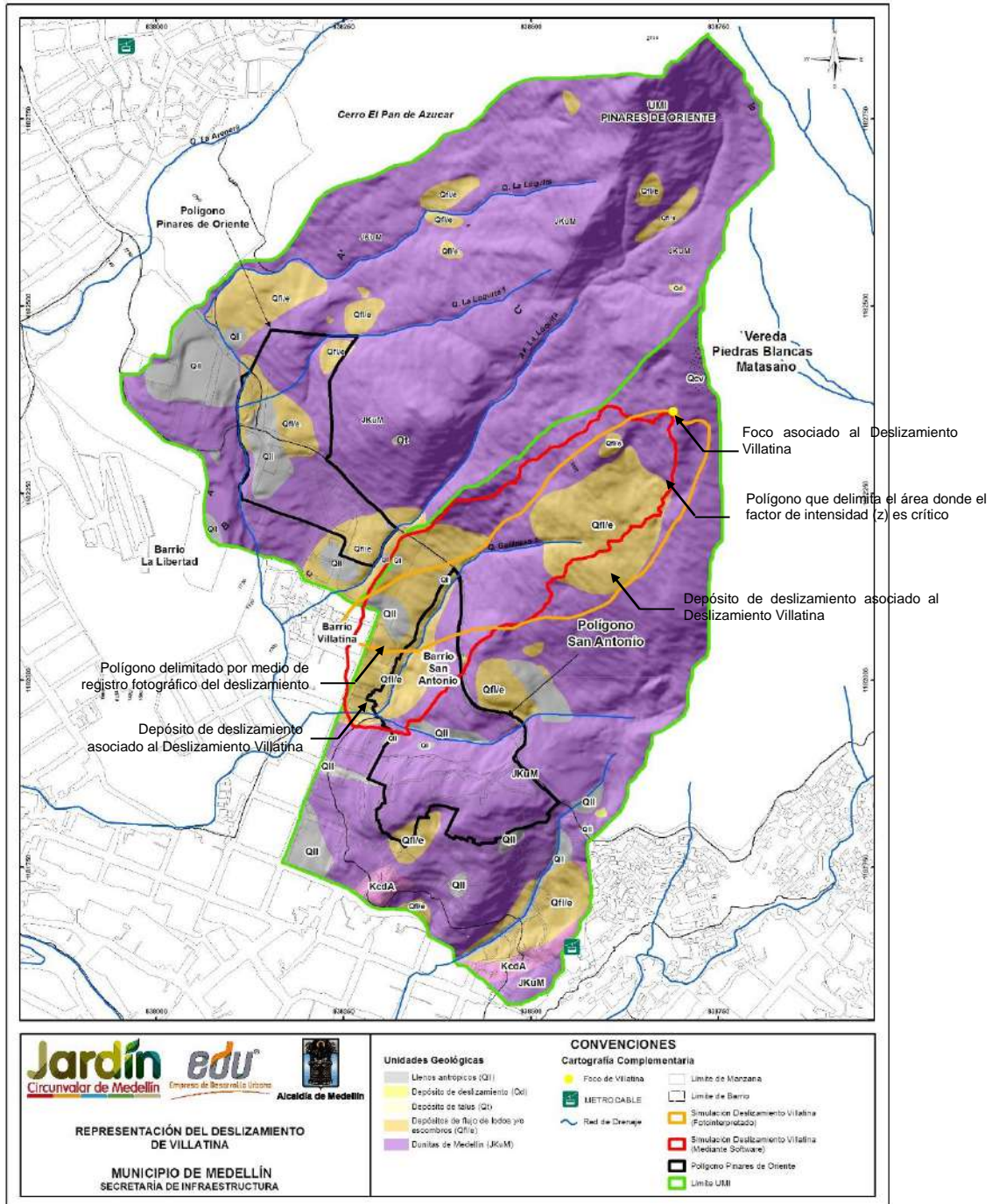
- ✓ Se genera un raster de intensidad máxima (Z) que es el resultado de tomar los raster de intensidad de cada punto crítico y para cada ubicación evaluar cuál es máximo valor y asignarle ese a la superficie definitiva.

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



### **16.2.2.3 Comparación de factor de intensidad con polígono de deslizamiento**

La Figura 193, a continuación, presenta en una misma imagen el mapa del modelo geológico de las UMI's San Antonio y Pinares de Oriente obtenido con la cartografía del 2014 tomada del POT y el factor de intensidad (z) calculado con la cartografía del IGAC (1973), en la zona aferente al deslizamiento Villatina, la cual es cercana al Polígono San Antonio. Se ha incluido además el polígono asociado al deslizamiento según los geólogos de esta oficina, el cual se había mostrado y explicado ya en el Numeral 16.2.2.1 de este mismo informe.

Es importante aclarar que el polígono rojo de la Figura 193 al ser trazado sobre la cartografía del IGAC (1973) da lugar a lo que se denomina en el área de la geotecnia un “back analysis”. Esto último por cuanto corresponde a lo que sería la mancha más importante generada por el deslizamiento en una cartografía previa a la de generación del deslizamiento. Se resalta el foco del deslizamiento y la zona que los geólogos mapearon como depósito de deslizamiento, en este caso el asociado al deslizamiento Villatina, el cual queda contenido en polígono rojo calculado según la metodología.



**Figura 193. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio**

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



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

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

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

### **16.2.3 Levantamientos de campo y análisis de la información**

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

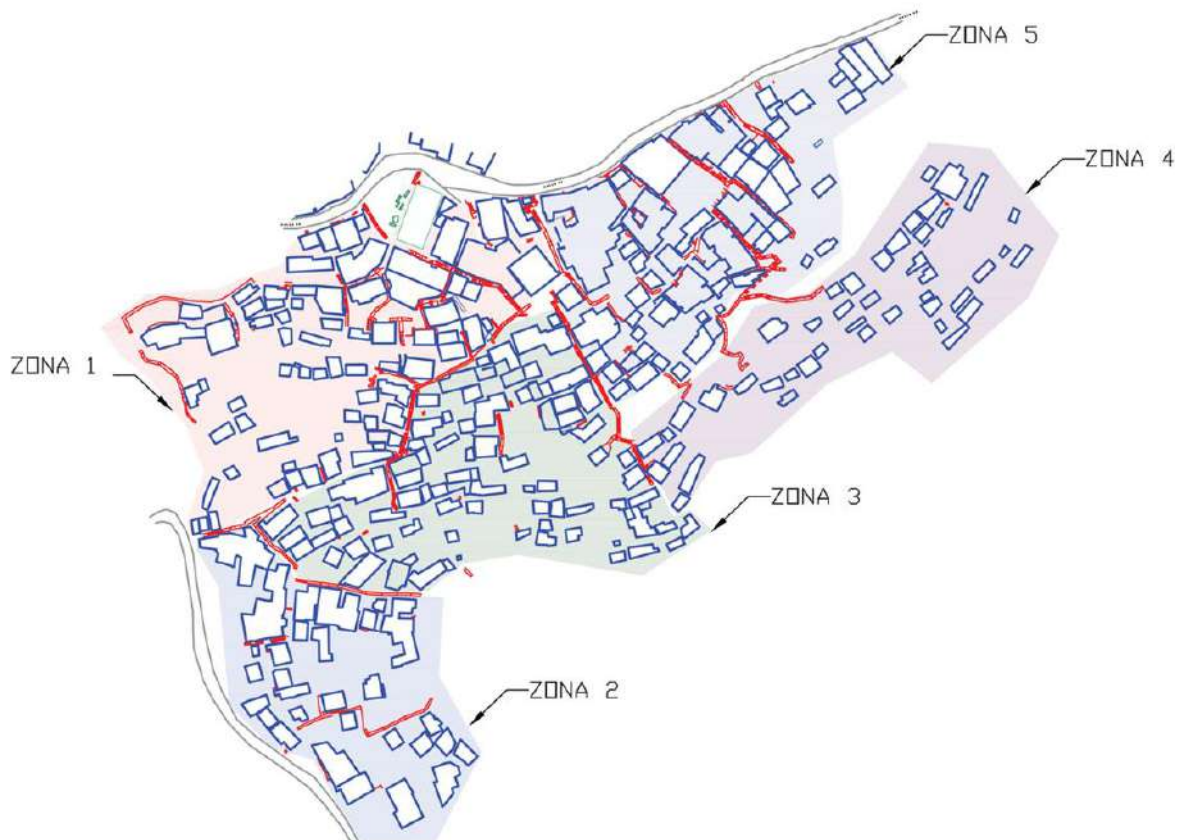
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

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

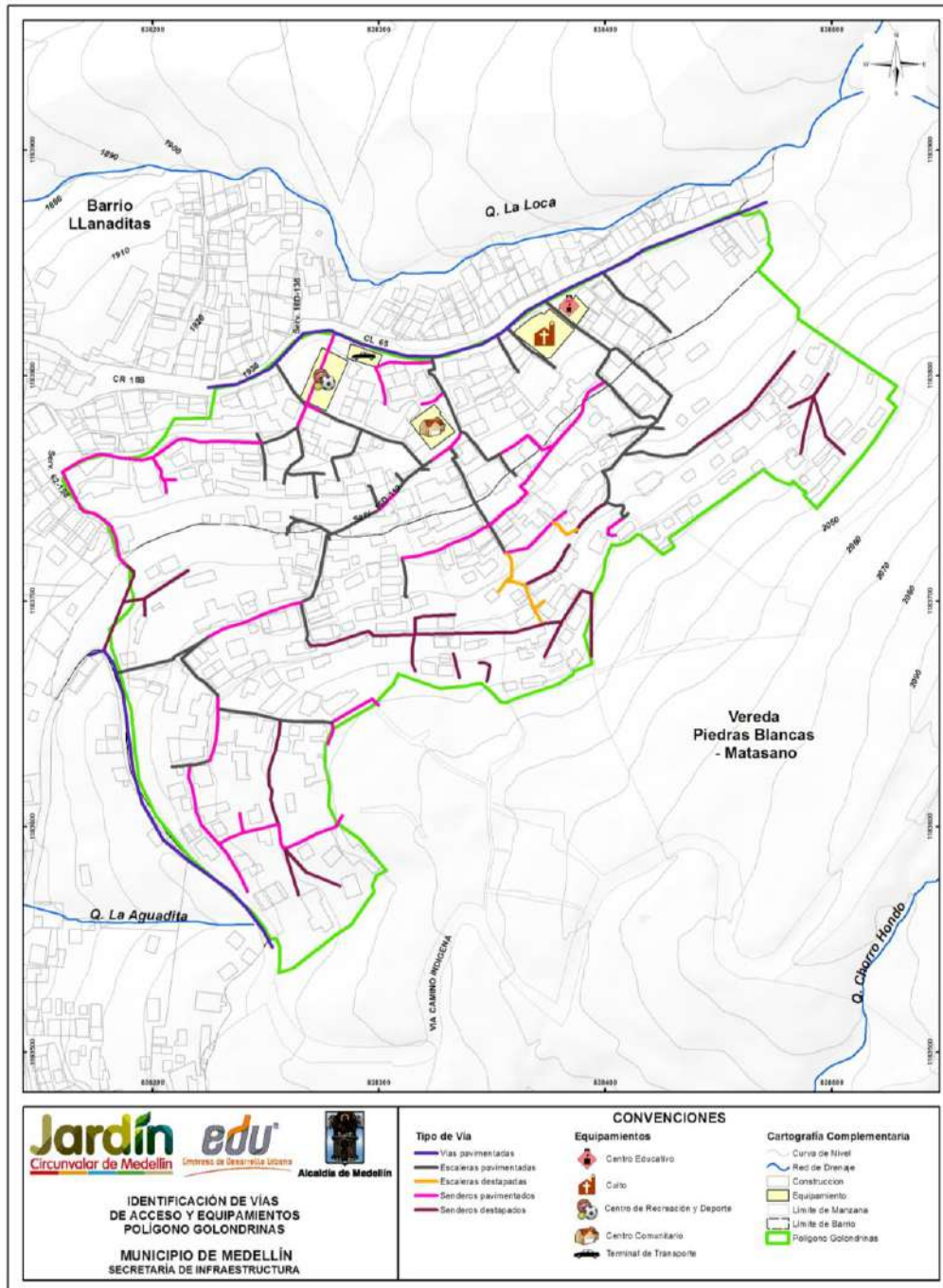
El polígono de intervención fue dividido en 5 zonas (Figura 194) para facilitar la inspección de las viviendas en campo. De las zonas del polígono cabe resaltar que las Zonas 3 y 4: se observan como zonas potencialmente inestables, presentando gran cantidad de escombros y residuos orgánicos. Para la delimitación del polígono de intervención, se utilizaron los siguientes referentes físicos: Ubicado en la zona norte del cerro Pan de Azúcar en límites con los predios del Batallón Girardot y pertenece al barrio Llanaditas, el cual se desarrolla hacia la zona urbana sobre el costado occidental del polígono de estudio. Esta ubicación lo posiciona como el sector que limita con la comuna 3 en la ladera oriental de la ciudad. Otros referentes de vías de acceso y equipamientos en el polígono se presentan en.

En este capítulo se presentan los resultados de la recolección e inventario de toda la información referente a los componentes físicos relevantes para el cálculo de la vulnerabilidad estructural de acuerdo a la metodología presentada. Los componentes principales inspeccionados fueron: tipo de ocupación, tipo de estructura, estado o condiciones de la estructura, altura de la estructura (número de niveles por edificación) y tipo de cubierta. Se realizó el levantamiento, inspección e inventario completo del Polígono Golondrinas, con un total de 312 estructuras. Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. El Mapa 42 presenta las vías de acceso y equipamientos del Polígono Golondrinas.







**Figura 194. Zonificación del Polígono Golondrinas (Sin escala)**



Mapa 42. Localización vías de acceso y equipamiento en el Polígono Golondrinas  
(39\_GOLViasdeAccesosyEquipamientos\_Medellin\_C y  
39\_GOLViasdeAccesosyEquipamientos\_Medellin\_T)

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

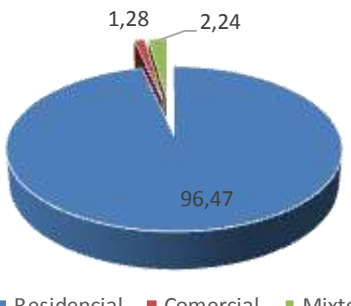
Luego de recopilada la información de campo, ésta es analizada mediante la conformación inicial de una base de datos con la numeración y atributos de cada estructura. Con esta base de datos se realizó un análisis estadístico mediante la implementación de diagramas circulares (Tabla 60 a Tabla 63) para facilitar la interpretación de los resultados.

De forma general, las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio que hace referencia a un estado entre bueno y malo. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta calificación debido a que estaban mejor estructuradas e incorporaban en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además, se encontraron estructuras en madera en un estado con notable deterioro. Las fundaciones de las estructuras son superficiales no convencionales dado que existe una gran cantidad de construcciones en las que sus cimentaciones son troncos de madera, terreno natural, delgadas losas en mampostería y/o concreto o simplemente estructuras con una esbeltez no proporcional entre altura y ancho. Específicamente en el polígono de Golondrinas se tiene las siguientes características:

- ✓ El mayor porcentaje de las viviendas en el Polígono Golondrinas tiene un tipo de ocupación residencial, con un 96.47%. Se presenta en menores porcentajes el tipo de ocupación Mixto y Comercial con un 2.24% y un 1.28% respectivamente (Tabla 60).
- ✓ Un poco más de la mitad de las construcciones del Polígono Golondrinas tienen un tipo de estructura en mampostería con un 63.78%. Le sigue las estructuras de madera (Ligera) con un 33.33%. En menores porcentajes se encontraron estructuras Mixtas y en Concreto reforzado, con el 1.6% y 1.28% respectivamente (Tabla 61).
- ✓ El Polígono Golondrinas tiene un alto porcentaje de las construcciones que se ubican en estado medio, con un 75% del total de las inspecciones realizadas. El porcentaje que le sigue es Malo con un 16.67%. En menores porcentajes se encontraron estructuras muy malas, buenas y muy buenas, con el 3.85%, 2.88% y 1.6%, respectivamente (Tabla 62).
- ✓ Un gran porcentaje de las viviendas del Polígono Golondrinas cuentan con un solo nivel construido, con un 71.15%. Le siguen las edificaciones de dos niveles y de tres a cinco niveles, con un 25% y un 3.85% respectivamente (Tabla 63).
- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del Polígono Golondrinas, se identificó que el 100% de las estructuras poseen fundaciones superficiales a través de sistemas de encepados en concretos ciclópeos conformados por piedra y mortero.

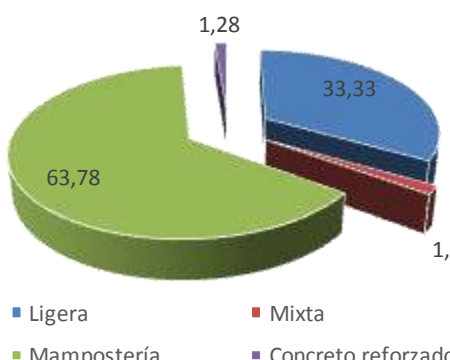
**Tabla 60. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa**

Ocupación	Total Viviendas	%
Residencial	301	96.47
Comercial	4	1.28
Mixto	7	2.24
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



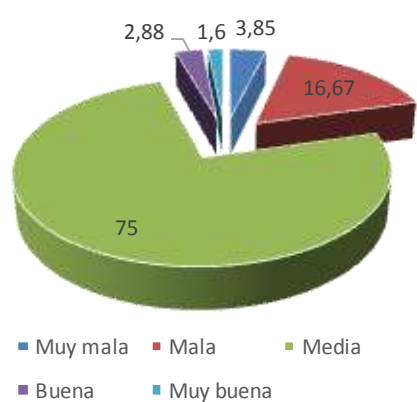
**Tabla 61. Tipo de estructura – Movimiento en Masa**

Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	104	33.33
Mixta	5	1.6
Mampostería	199	63.78
Concreto reforzado	4	1.28
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



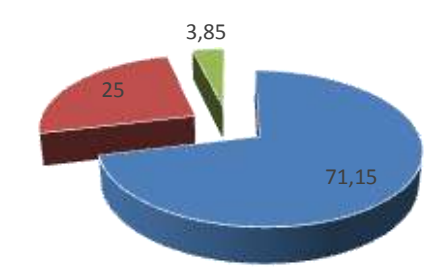
**Tabla 62. Estado de la estructura – Movimiento en Masa**

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Muy mala	12	3.85
Mala	52	16.67
Media	234	75
Buena	9	2.88
Muy buena	5	1.6
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



**Tabla 63. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa**

Altura Estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	222	71.15
De 2 pisos	78	25
De 3 a 5 pisos	12	3.85
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>

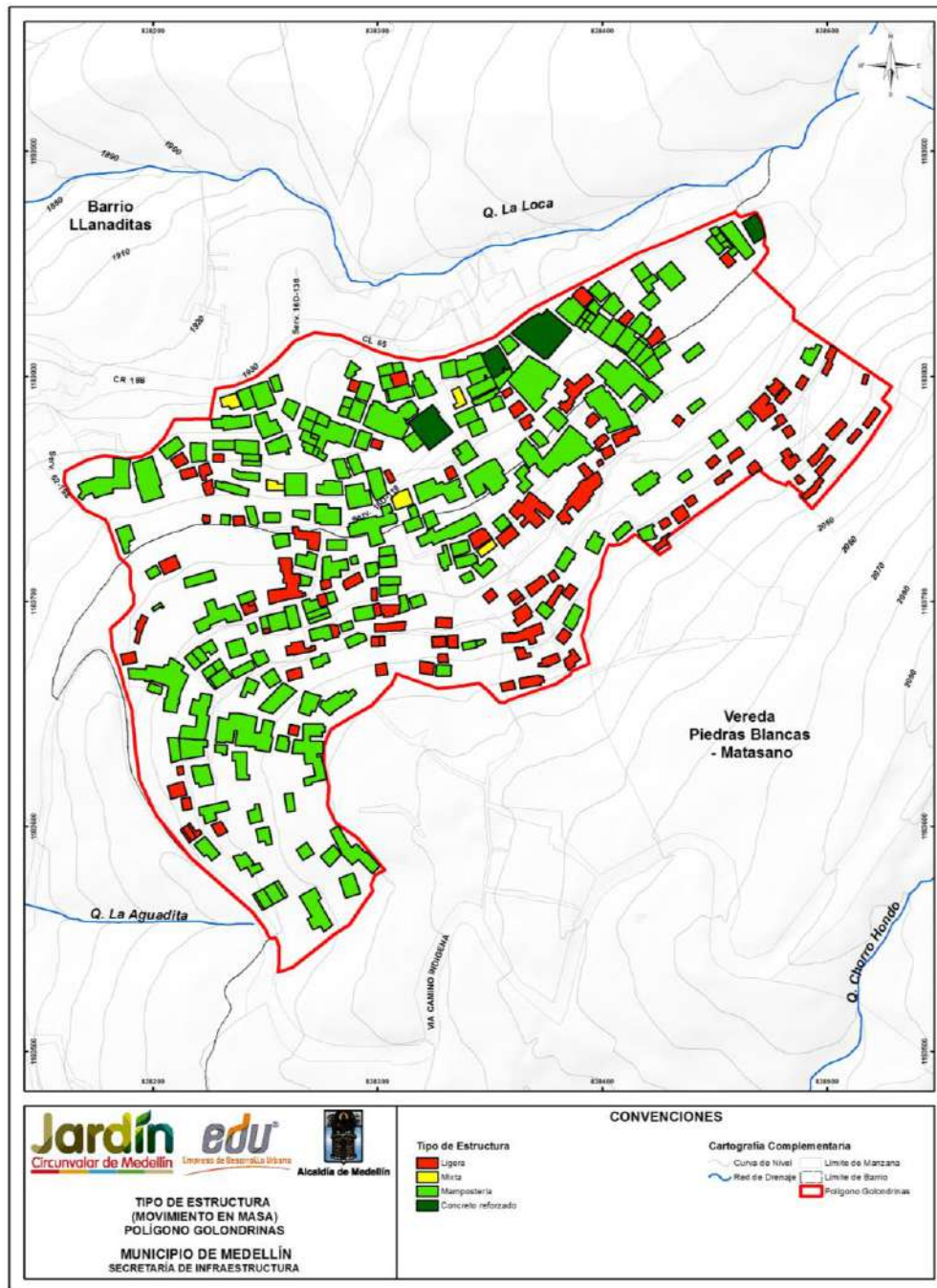


■ Un solo piso ■ De 2 pisos ■ De 3 a 5 pisos

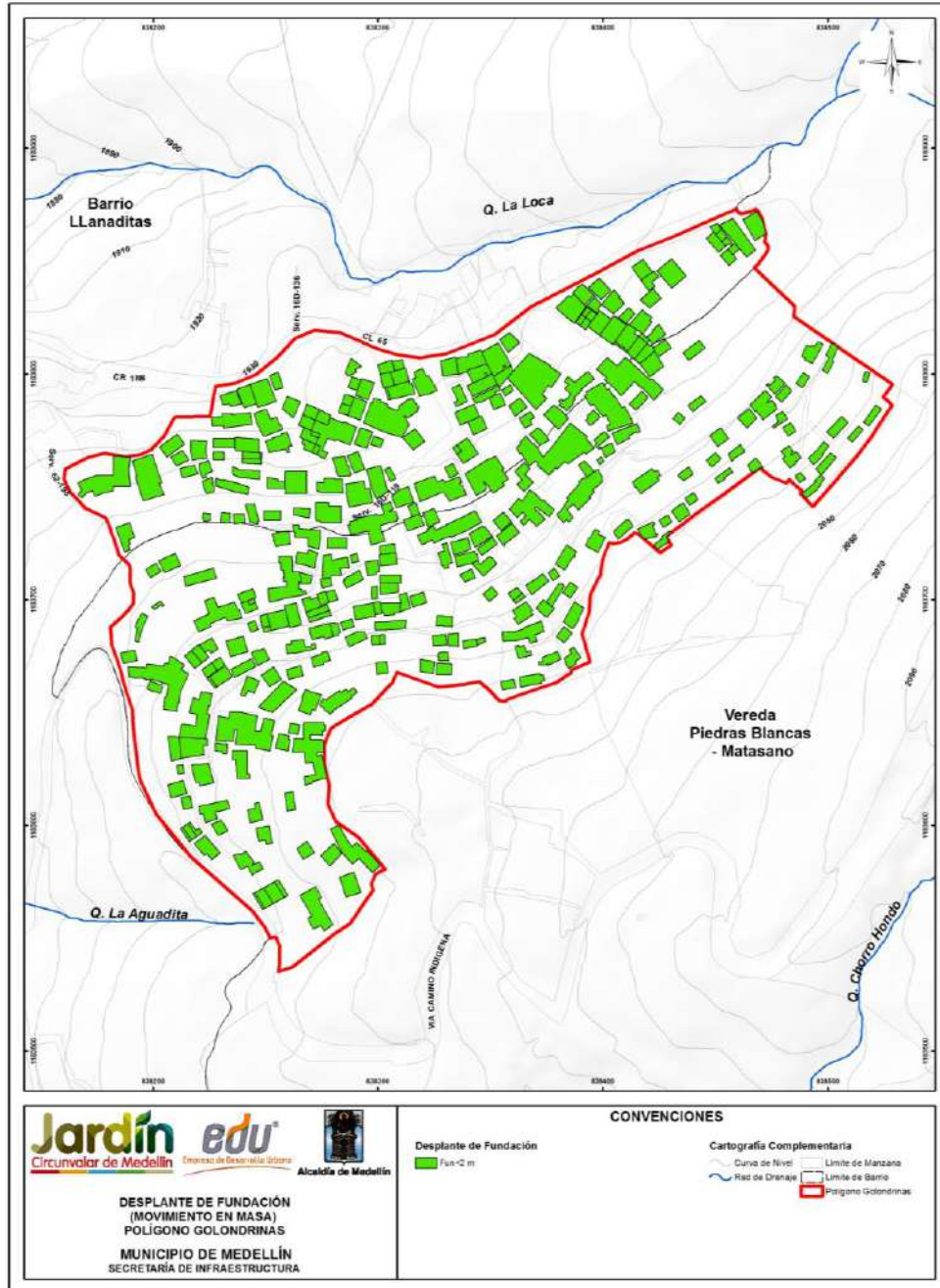
Además de los análisis estadísticos se realizaron mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, los cuales se presentan del Mapa 43 al Mapa 47.

Con la información presentada y la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. En el Mapa 48 se presenta la distribución del factor resistencia, donde un factor de resistencia de 1.0 corresponde a una vivienda de máxima resistencia.

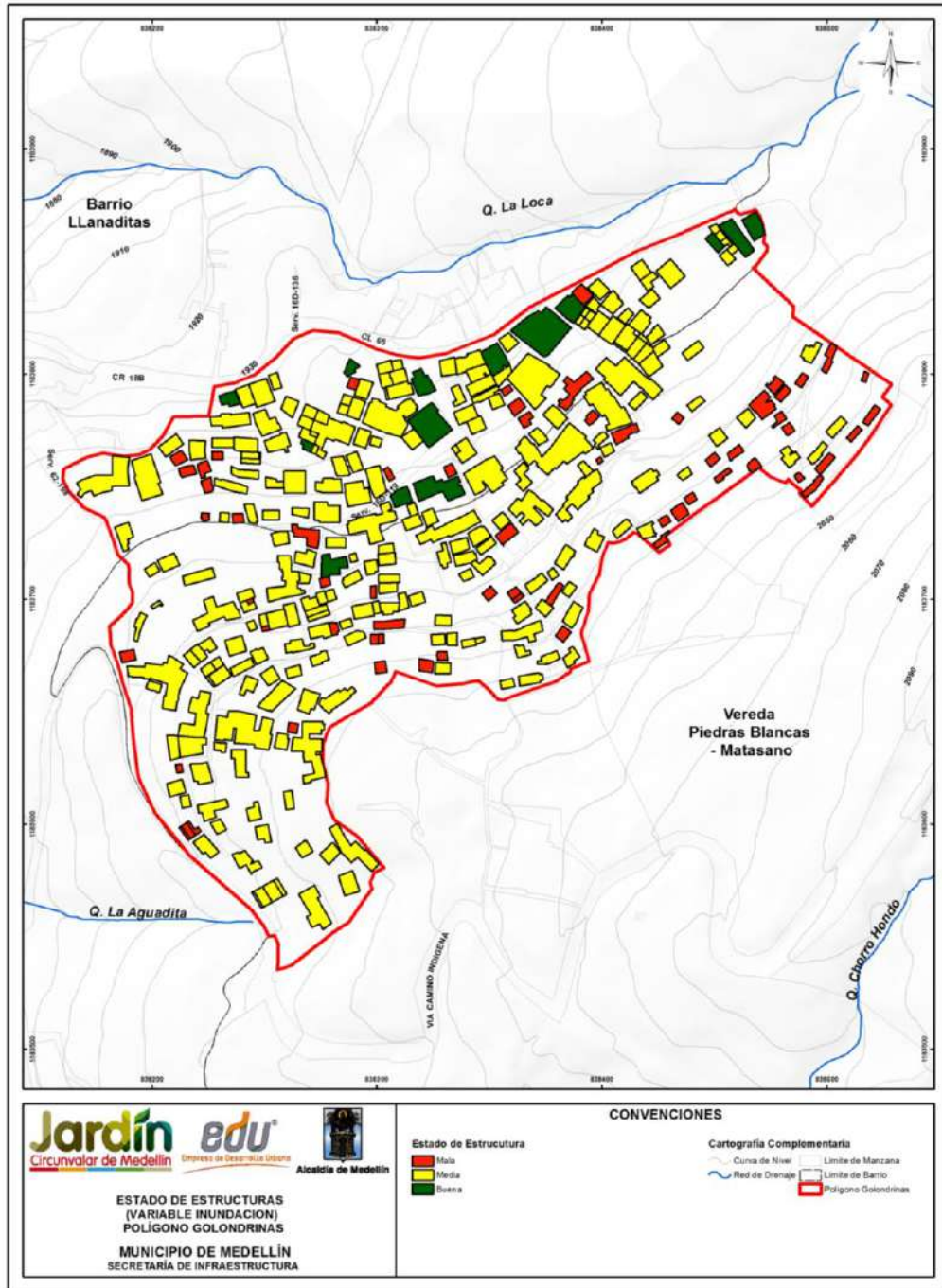




Mapa 43. Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono Golondrina (29\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_C y 29\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_T)

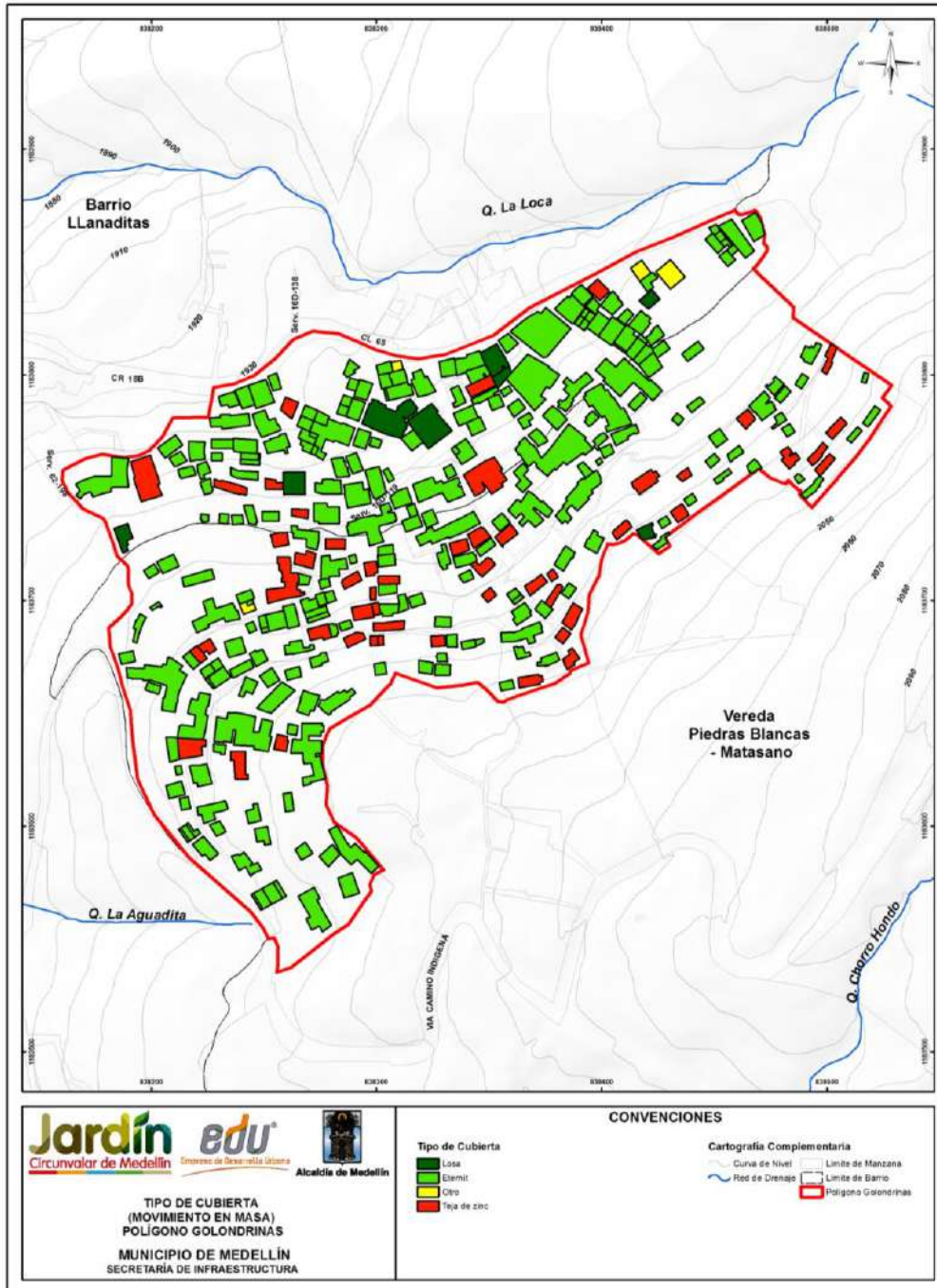


Mapa 44. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono Golondrinas (30\_GOLDesplantedeFundaciones\_Medellin\_C y 30\_GOLDesplantedeFundaciones\_Medellin\_T)

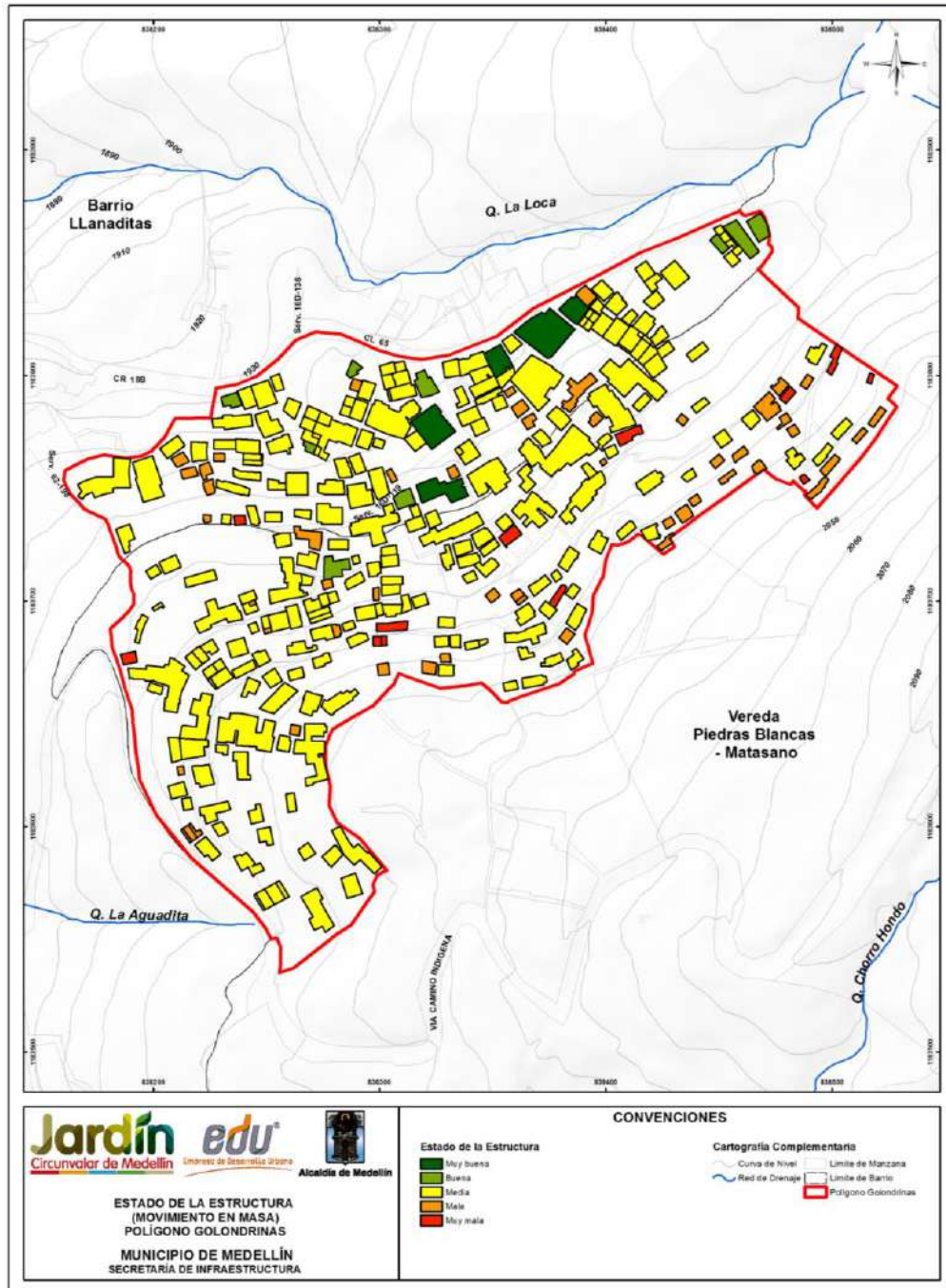


**Mapa 45. Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono Golondrina**  
 (31\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_C y 31\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_T)



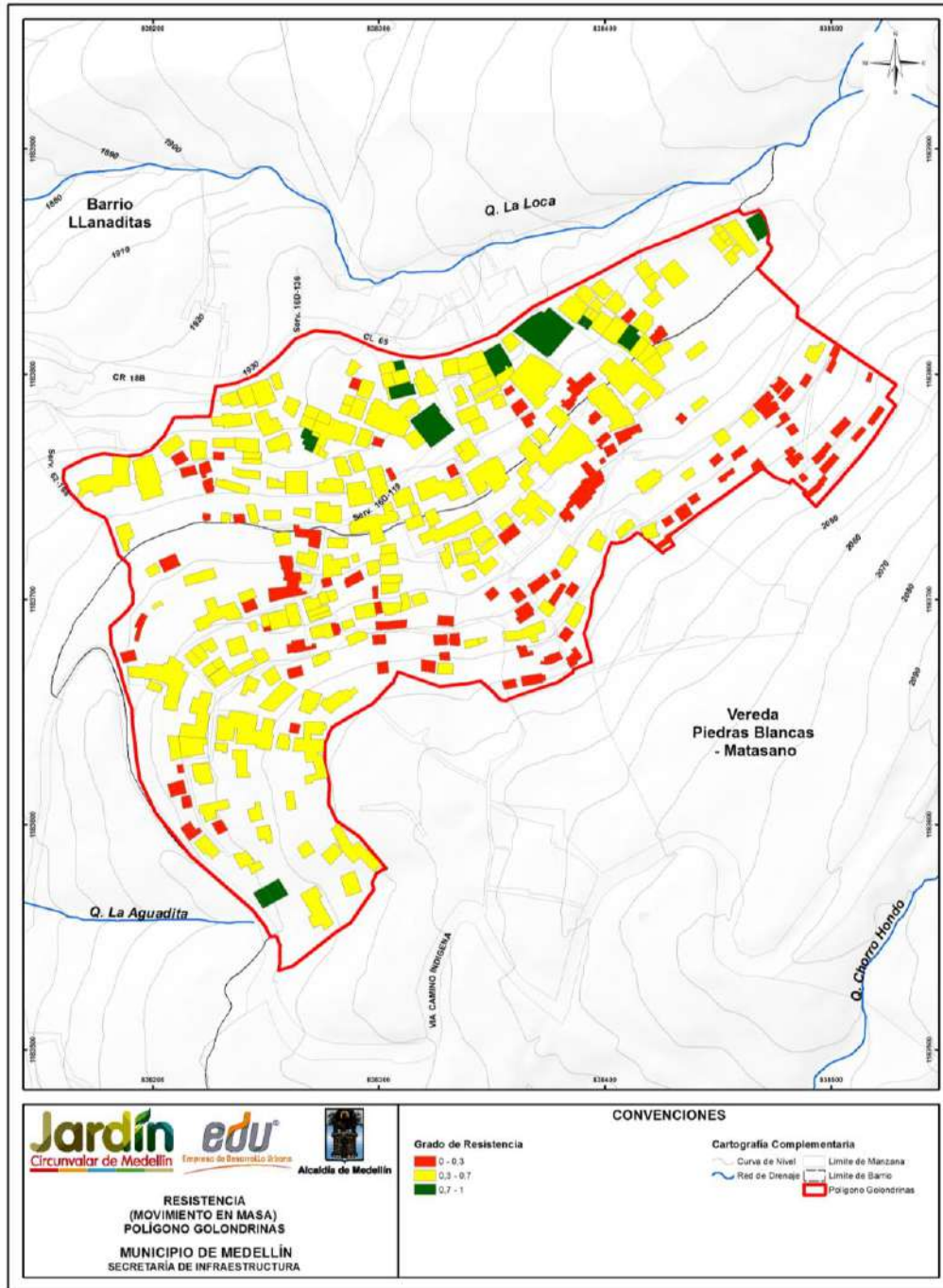


**Mapa 46. Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono Golondrina**  
 (32\_GOLTipodeCubierta\_Medellin\_C y 32\_GOLTipodeCubierta\_Medellin\_T)





Mapa 47. Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono Golondrina (33\_GOLAIturadelaConstruccion\_Medellin\_C y 33\_GOLAIturadelaConstruccion\_Medellin\_T)





Mapa 48. Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa (34\_GOLMapadeResistencia\_Medellin\_C y 34\_GOLMapadeResistencia\_Medellin\_T)

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

#### 16.2.4 Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas

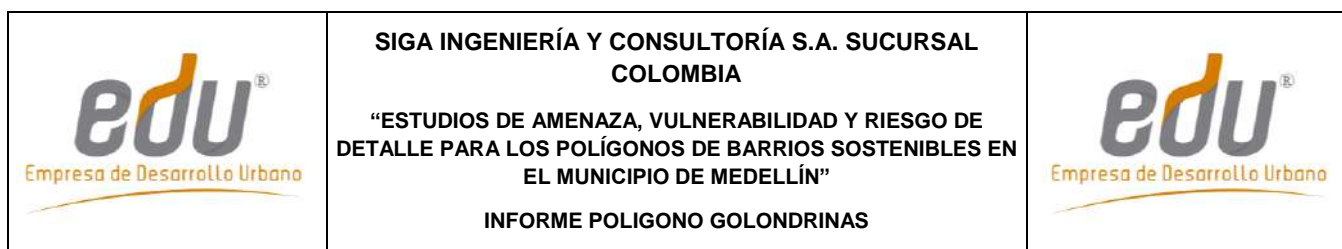
Teniendo en cuenta la propuesta de Guimaraes (2015) y considerando la obtención del factor resistencia de cada una de las estructuras (R) al interior del Polígono Golondrinas, observado en el Mapa 48, se procedió a determinar el factor intensidad (Z) a través de los focos de los movimientos en masa más probables que podrían afectar la zona del Polígono Golondrinas. Se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años. Se determinaron las zonas de máxima probabilidad de falla y se evaluó su proximidad al Polígono Golondrinas. El factor intensidad de los movimientos en masa más probables (Z), que juzga la vulnerabilidad de la estructura por su localización con respecto a su foco de inestabilidad más probable, se determinó mediante la relación entre la distancia real en terreno (d) y las diferencias de altura (h), ambas medidas entre el foco del deslizamiento y el centroide de las estructuras potencialmente afectadas, resultando el Mapa 49, pudiéndose resaltar lo siguiente.

- ✓ Se observa que el conjunto de focos localizados por fuera del Polígono Golondrinas, en la ladera ubicada al costado noroccidental del mismo, los denominados Focos 5, 23, 24 y 25 en el Mapa 49, generan factores de intensidad al interior del Polígono Golondrinas variables entre 0.29 y 1.34. La mayor parte de la zona que alcanzan a afectar estos focos generan factores de intensidad en los rangos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.34. Es importante resaltar el hecho de que las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 48, presentan vulnerabilidad física por movimientos en masa de media, es decir, en el rango que va de 0.3 a 0.7.
- ✓ De los focos ubicados al interior del Polígono Golondrinas, denominados en el Mapa 49 como Focos 26, 27 y 28, resultan especialmente importante los dos últimos. Estos dos focos, generan dentro del Polígono Golondrinas rangos del factor de intensidad, en los rangos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.34. Prácticamente todas las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 48 también presentan vulnerabilidad física por movimientos en masa de media, es decir, en el rango que va de 0.3 a 0.7.

En conjunto con la resistencia (R) de cada estructura, el factor intensidad de los movimientos en masa más probables (Z), permite obtener la vulnerabilidad estructural de cada elemento por medio de la siguiente expresión:

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

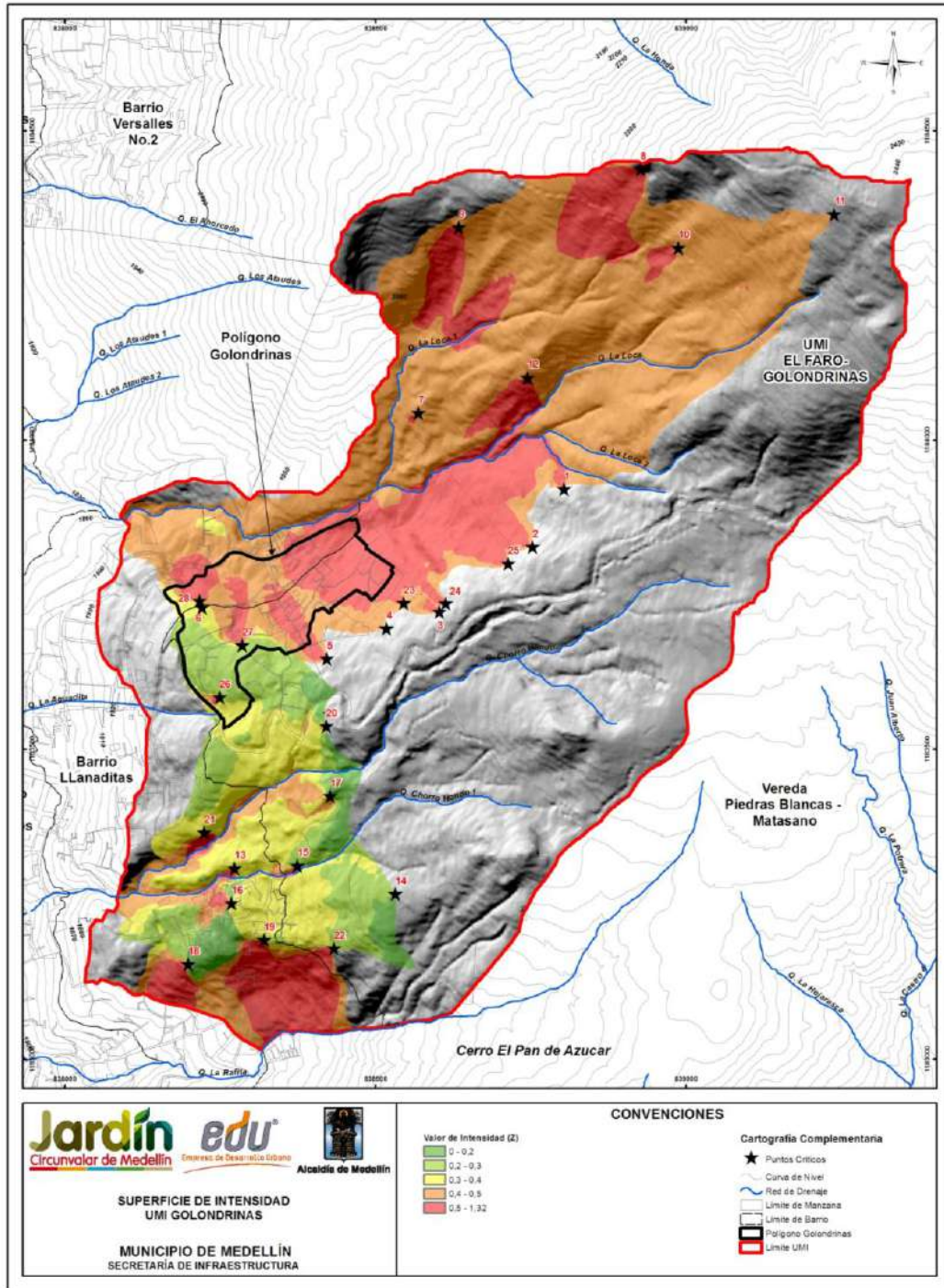
La vulnerabilidad estructural se expresa en esta metodología como un número adimensional que varía entre 0 y 1, donde 1 es el valor de máxima vulnerabilidad estructural. Este valor bien puede representar un factor de daño. La Tabla 64 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.



**Tabla 64. Categorización de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos de movimientos en masa**

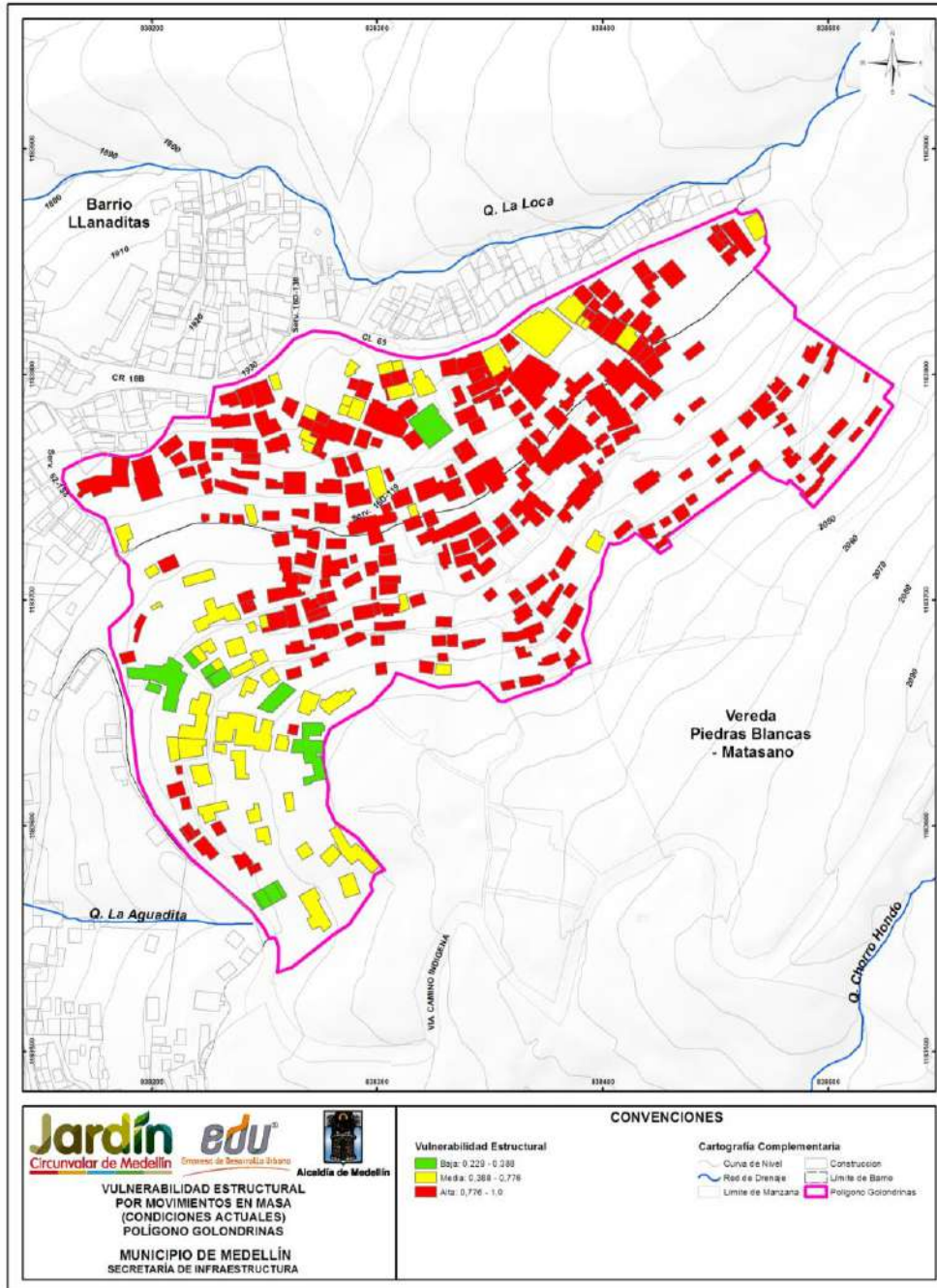
<b>Categoría de la Vulnerabilidad</b>	<b>Rango de la Vulnerabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Baja	0.0 – 0.388	Estructuras que presentarían condiciones de servicio con ligeros daños los cuales pueden ser solucionados con labores de mantenimiento y repotenciación
Media	0.388 – 0.776	Destrucción parcial de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

El Mapa 50 y el Mapa 51 presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso y equipamientos del Polígono Golondrina con su respectiva clasificación entre baja, media y alta según el criterio de la Tabla 64.



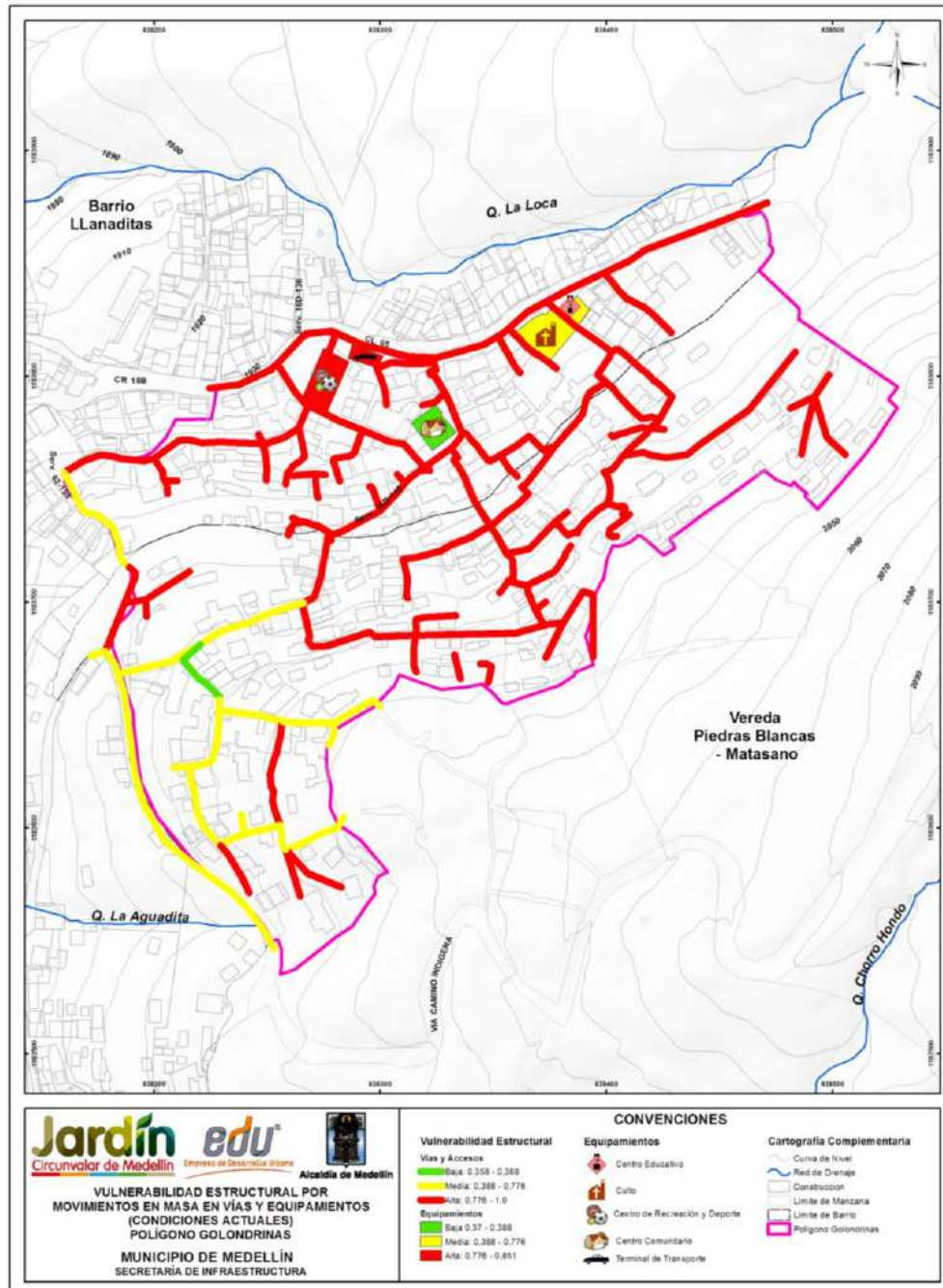
**Mapa 49. Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Golondrinas (GOLSuperficieIntesidadesZUMI\_Medellin\_C)**





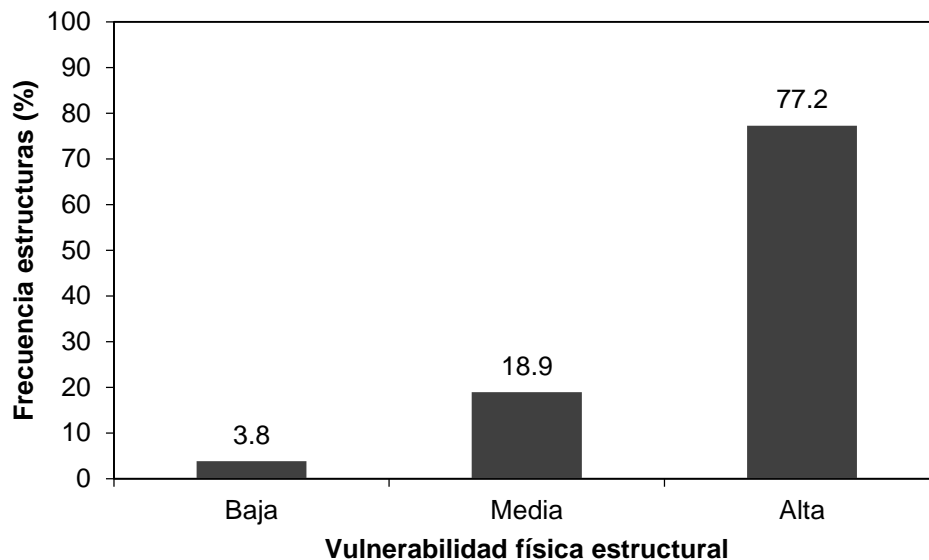
Mapa 50. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono Golondrina  
(40\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_C y  
40\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_T)





Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono Golondrinas  
(51\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_Cy  
51\_GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_T)

La Figura 195 muestra la distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras por movimientos en masa presentada en el Mapa 50. Se ilustra que el 77% de las estructuras presentes al interior del Polígono Golondrinas presentan una vulnerabilidad alta, el 19% presentan una vulnerabilidad media y el 4% presentan vulnerabilidad baja. Las estructura, las vías de acceso y lo equipamientos con vulnerabilidad alta se concentran principalmente en las Zonas 1, 3, 4 y 5, las viviendas en su gran mayoría son de un solo piso construidas en mampostería y en madera, y los accesos son de tipo escaleras y senderos pavimentados.

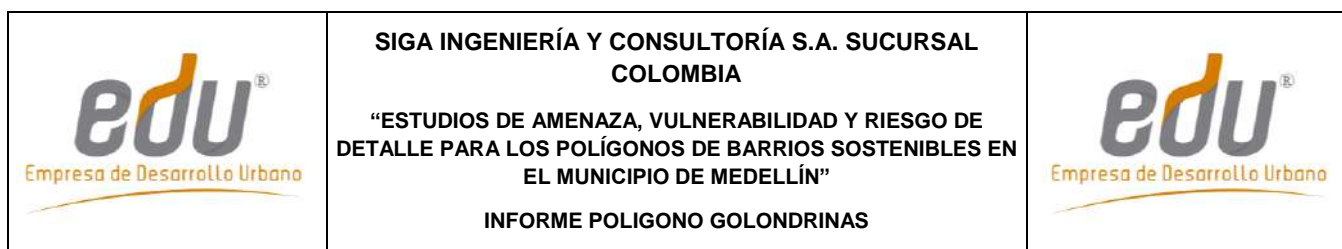


**Figura 195. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras**

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

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

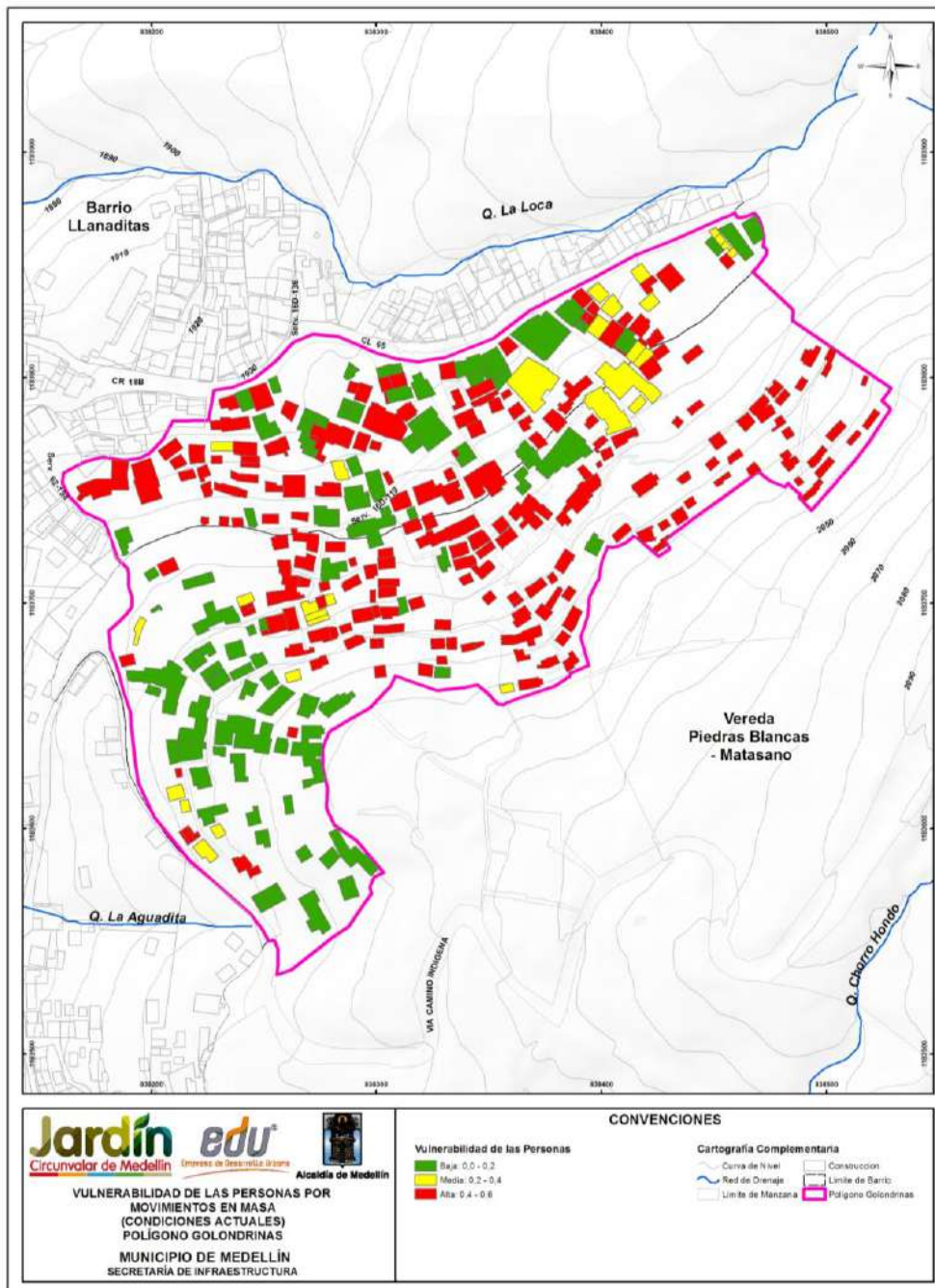
La vulnerabilidad de las personas se expresa en como un numero adimensional que varía entre 0 y 0.6, donde 0.6 es el valor de máxima vulnerabilidad de las personas. Finalmente, la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras por efectos de movimientos en masa, se podrá categorizar como se muestra en la Tabla 65.



**Tabla 65. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa**

<b>Categoría de la Vulnerabilidad</b>	<b>Rango de la Vulnerabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Baja	0.0 – 0.2	Lesiones leves en las personas. A pesar de las lesiones, las personas se mantienen conscientes de lo sucedido y pueden mantenerse en pie sin ningún tipo de asistencia.
Media	0.2 – 0.4	Lesiones moderadas a graves en las personas. Las personas pueden perder ligeramente la conciencia o entrar en estados de shock temporales. Las lesiones pueden ir entre cortes y fracturas pueden requerir de asistencia médica que dejan a la persona sin capacidad de movilizarse de forma temporal.
Alta	0.4 – 0.6	Lesiones muy graves como invalides o perdida de miembros corporales. Pérdida de vida por efecto del deslizamiento.



El Mapa 52 presenta el análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Golondrinas por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. Se observa que de las 312 estructuras, 192 presentan alta vulnerabilidad de personas (62%), 91 presentan vulnerabilidad de personas baja (29%) y 29 presentan vulnerabilidad media (9%). Las estructuras que presentan una alta vulnerabilidad de personas coinciden con las que presentan una alta vulnerabilidad física y se concentran en las áreas de máximas pendientes. Considerando el estado de las estructuras, se tiene que el 51% de las estructuras que presentan alta vulnerabilidad de personas se caracterizan por estar construidas en madera.



Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono Golondrina

(41\_GOLVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_C  
41\_GOLVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_T)



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

Ahora, considerando las estructuras que harán parte del Proyecto Barrios Sostenibles, se hizo una evaluación adicional de la vulnerabilidad. Para esta modelación se consideró que las nuevas estructuras de dicho proyecto tendrán unas características mejores que las estructuras existentes, al considerar que se trataría de estructuras de muy buen estado, con más de tres niveles en concreto reforzado que cumplirán las respectivas normas técnicas, entre ellas la Norma NSR-10 y que adicionalmente deberán estar cimentadas sobre fundaciones profundas de más de 10 m de profundidad. Por tal motivo, y considerando las calificaciones de la metodología propuesta para el análisis de vulnerabilidad, las nuevas estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles presentan las siguientes características (Tabla 66).

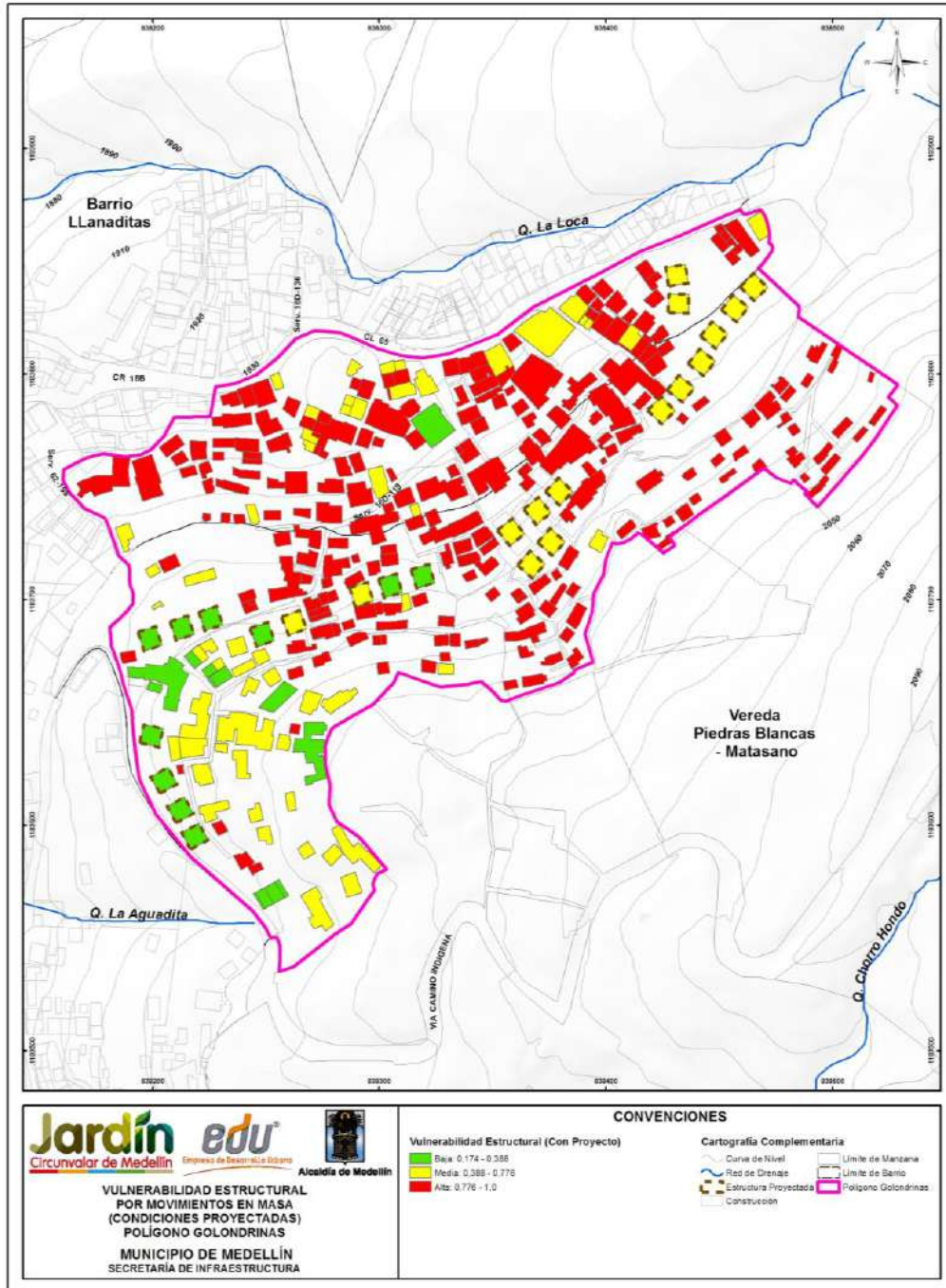
**Tabla 66. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono Golondrinas**

<b>Factores de vulnerabilidad estructural</b>	<b>Calificación</b>
Estado de la estructura ( $\xi_{man}$ )	1.50
Altura de la estructura ( $\xi_{alt}$ )	0.90
Nivel de fundación de la estructura ( $\xi_{sfd}$ )	1.05
Tipo de estructura ( $\xi_{est}$ )	1.50

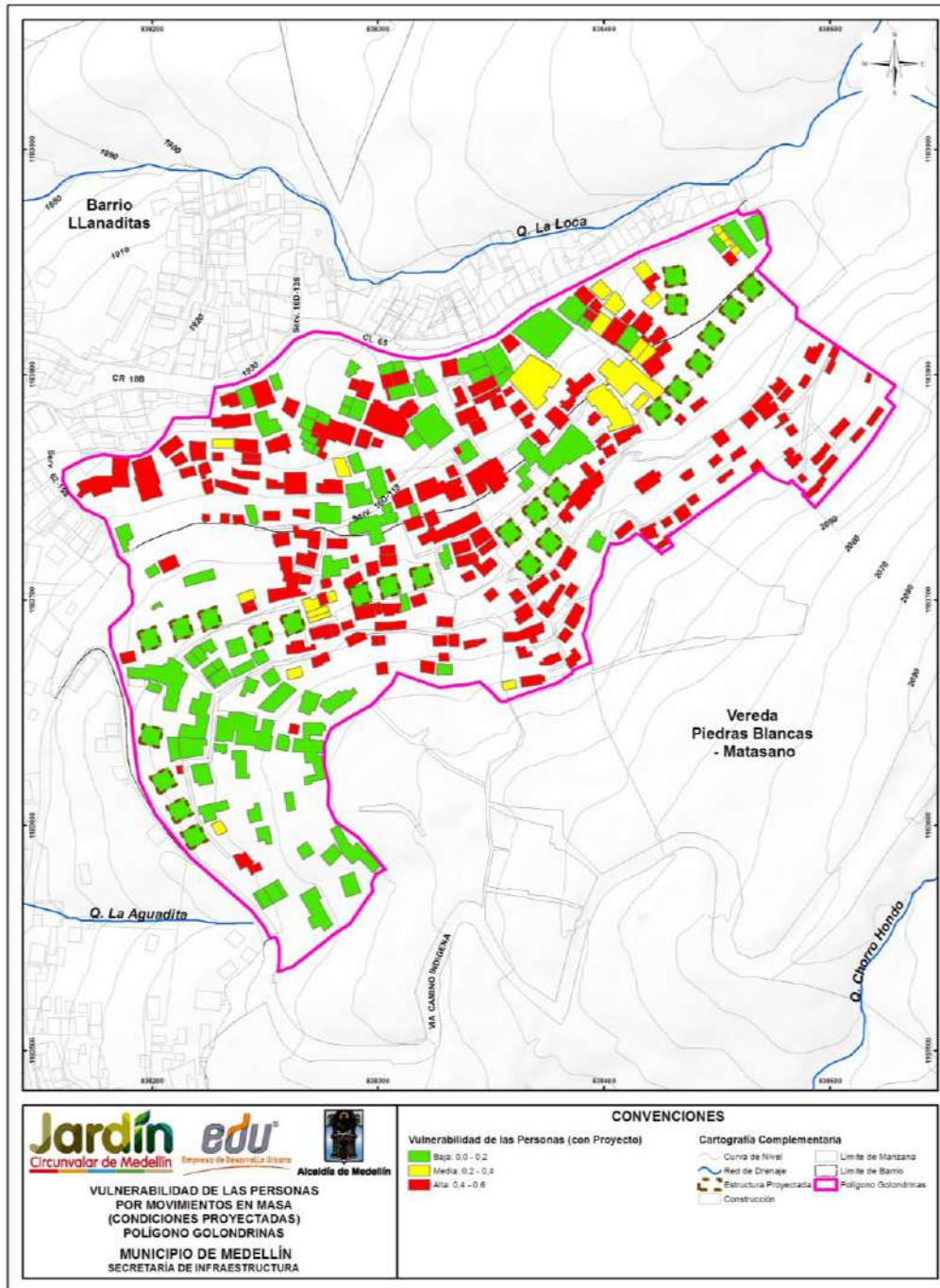
Teniendo en cuenta lo anterior, el factor de resistencia (R) para estas estructuras es de 1.20. A este factor se le aplicó un factor de seguridad de 1.20, considerando cualquier factor constructivo y de diseño, enfocado en tener un factor de resistencia conservador, de tal manera que el valor de resistencia finalmente usado fue de 1.0 para todas las estructuras. El Mapa 53 y el Mapa 54 presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad del Mapa 49. Se observa que las nuevas estructuras se construirán a lo largo de la zona central del polígono donde se tienen altas pendientes del terreno con inclinaciones mayores que 15° y estructuras con vulnerabilidad estructural alta.

Se observa que las nuevas estructuras quedan con vulnerabilidad que variarían de medias a bajas. Lo ideal sería que quedaran con vulnerabilidad baja, pero debido a la ubicación de estas estructuras con respecto a los focos de inestabilidad más probables, se tienen factores de intensidad incluso superiores a 0.4, tal como se puede ver en el Mapa 49 los cuales afectan a las estructuras.





Mapa 53. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Golondrinas por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (GOLVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto\_Medellin\_C)



**Mapa 54. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Golondrinas por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (GOLVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto\_Medellin\_C)**

### 16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

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

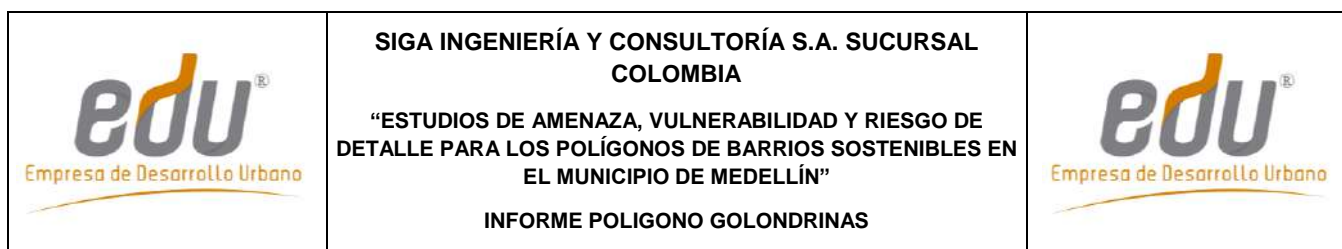
Según esta metodología, la vulnerabilidad física está definida a partir del Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI, por sus siglas en inglés), el cual a su vez está definido según el índice de Vulnerabilidad de la Edificación (BuV). Este último depende estrictamente de las características de las edificaciones,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

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

Por su parte, en Thouret et al. (2013) el factor de vulnerabilidad por la calidad de la construcción (FVC) es evaluada de 1 a 3 según el grado de mantenimiento que presente la edificación. Se asigna una calificación de 1 a aquellas construcciones que tengan buen mantenimiento, 2 a aquellas que tengan un mantenimiento aceptable o medio, y 3 a aquellas que presenten un mantenimiento deficiente. Para el caso en estudio, se considerará para la calidad de la construcción el tipo de material de la vivienda y el estado de la estructura, dado que estos elementos representan con mayor fidelidad el grado de resistencia de la estructura frente a los fenómenos estudiados en la zona. La calificación a adoptar para cada combinación del tipo de material-estado se presenta en la Tabla 67.

**Tabla 67. Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales**

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



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

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

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

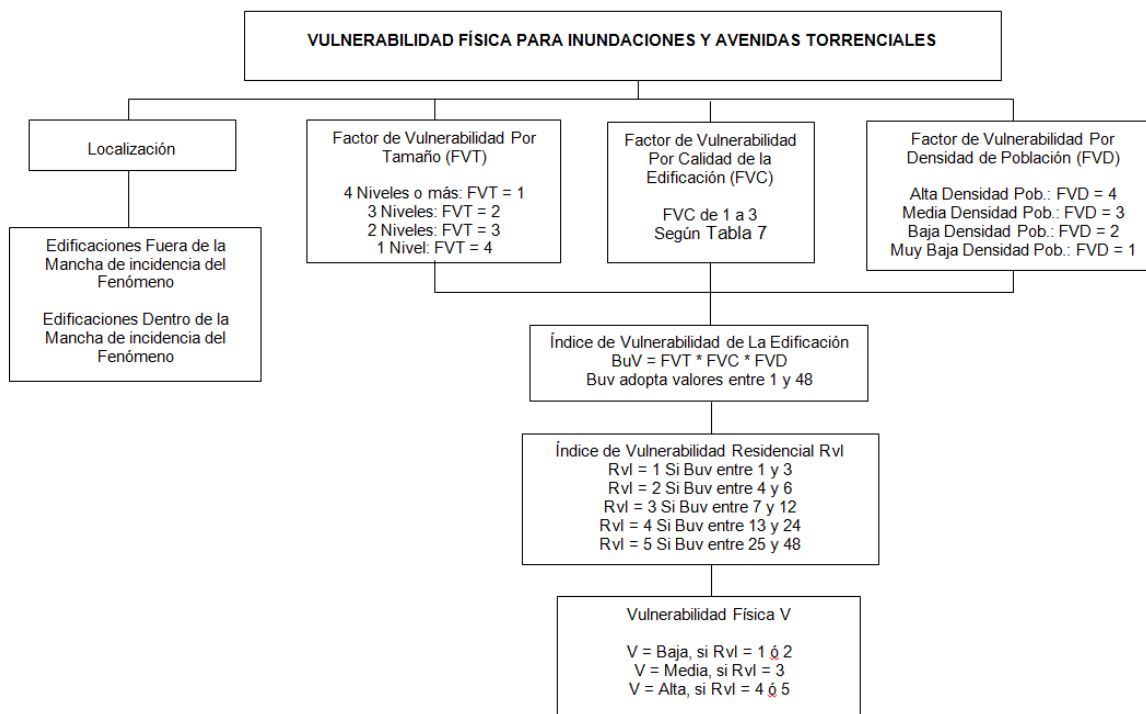
A partir del Índice BuV se estima el Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI), tal como se presenta en la Tabla 68.

Finalmente, para efectos del presente estudio, la vulnerabilidad será clasificada en alta, media y baja, reuniendo los RvI 1 y 2 en Vulnerabilidad Baja, el RvI 3 en Vulnerabilidad Media, y los RvI 4 y 5 en Vulnerabilidad Alta.

**Tabla 68. Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV**

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





**Figura 196. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales**

Para el caso de inundaciones y avenidas torrenciales, las etapas son las anteriormente descritas. La diferencia consiste en que se incluye un atributo adicional para cada estructura, que es la densidad habitacional. Este atributo fue extraído del documento técnico elaborado por la Universidad San Buenaventura para la EDU.

Del Mapa 55 al Mapa 58 se presentan los mapas de atributos para cada estructura, los cuales corresponden a Tipo de Estructura, Estado de la Estructura, Altura de la Construcción, Densidad de Población y Grado de Vulnerabilidad a Inundación.

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

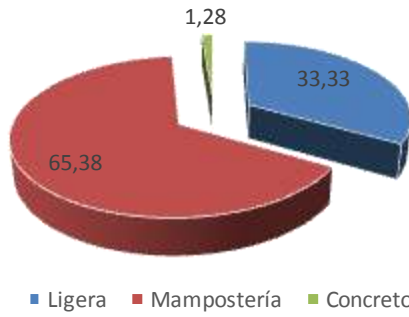
- ✓ Un poco más de la mitad de las construcciones del Polígono Golondrinas tienen un tipo de estructura en Mampostería con un 65.38%. Le siguen las estructuras Ligeras con un 33.33%. En menor porcentaje se encuentran las estructuras en Concreto con un 1.28% (Tabla 69).
- ✓ El Polígono Golondrinas presenta un alto porcentaje de las construcciones en estado Medio, con un 75% del total de las inspecciones realizadas. Le siguen las estructuras en estado Malo con un 20.51%. En menor porcentaje se encuentran estructuras Buenas con un 4.49%. (Tabla 70).



- ✓ En el polígono de Golondrinas un gran porcentaje de las viviendas cuentan con un solo piso construido con un 71.15%. Le siguen las edificaciones de dos pisos y de tres pisos con un 25% y 3.85% respectivamente (Tabla 71).
- ✓ En la mayoría de las construcciones del Polígono Golondrinas se tiene una densidad Muy baja con un 99.04%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades Bajas y Altas con un 0.64% y 0.32% respectivamente. (Tabla 72).

**Tabla 69. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales**

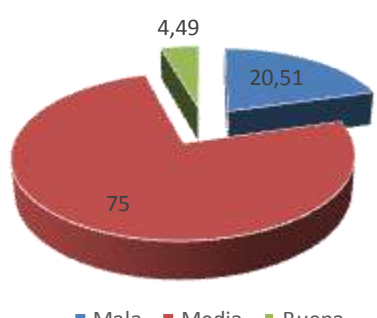
Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	104	33.33
Mampostería	204	65.38
Concreto	4	1.28
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



■ Ligera ■ Mampostería ■ Concreto

**Tabla 70. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales**

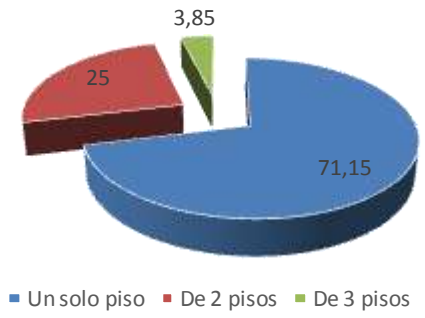
Estado Estructura	Total Viviendas	%
Mala	64	20.51
Media	234	75
Buena	14	4.49
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



■ Mala ■ Media ■ Buena

**Tabla 71. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales**

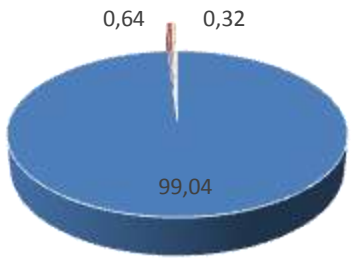
Altura de la estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	222	71.15
De 2 pisos	78	25
De 3 pisos	12	3.85
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



■ Un solo piso ■ De 2 pisos ■ De 3 pisos

**Tabla 72. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales**

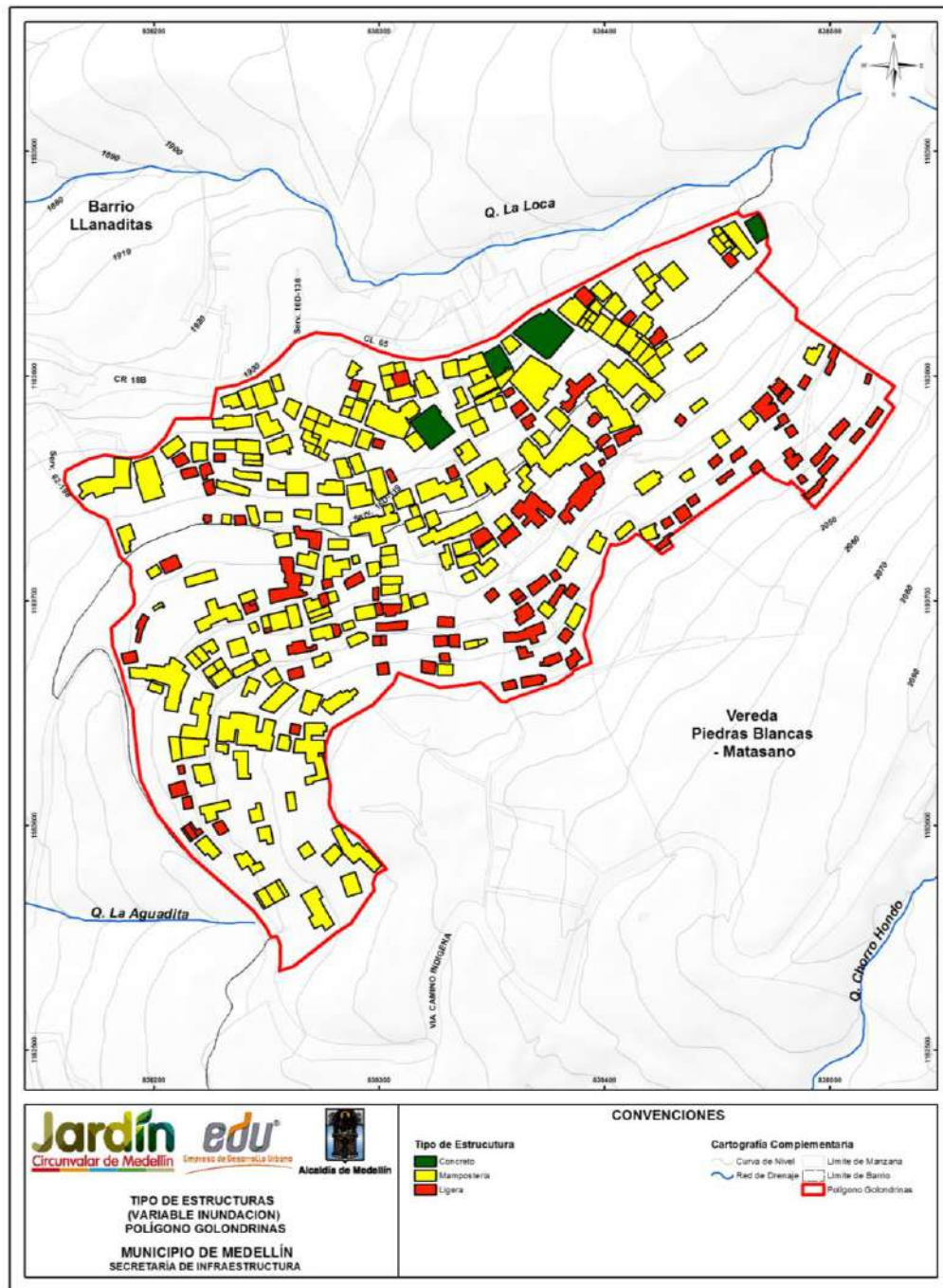
Densidad de población	Total Viviendas	%
Muy baja	309	99.04
Baja	2	0.64
Alta	1	0.32
<b>Total</b>	<b>312</b>	<b>100</b>



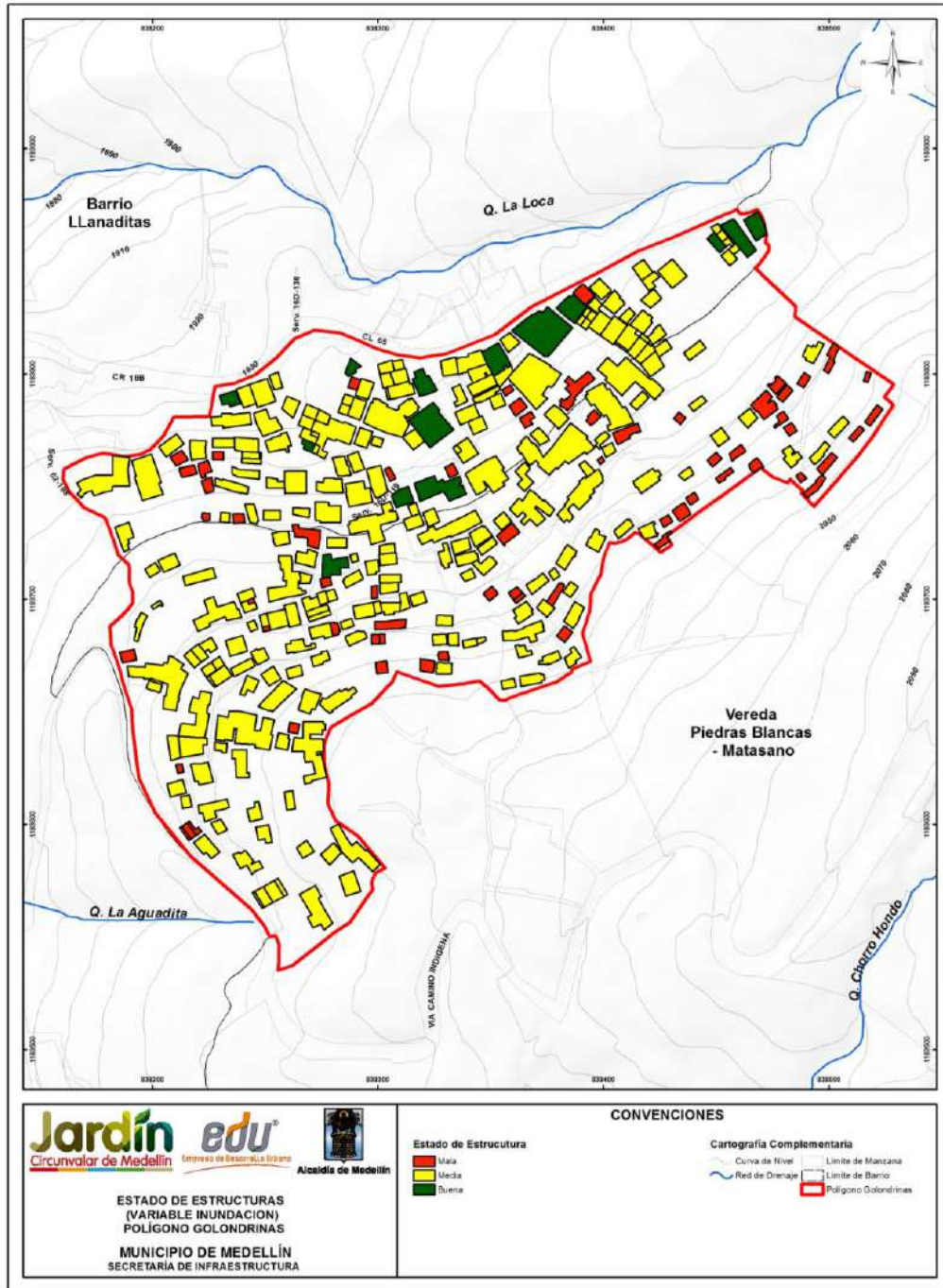
■ Muy baja ■ Baja ■ Alta

Finalmente con la información y con la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por inundaciones y avenidas torrenciales, se determinó el índice de vulnerabilidad residencial de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. El Mapa 59 presenta el índice de vulnerabilidad residencial para las estructuras del Polígono Golondrinas. En el Mapa 60 se presenta igualmente la vulnerabilidad de las estructuras ante inundaciones, considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles.

De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono Golondrinas. Para el caso de las vías, se tiene que el Factor de Vulnerabilidad por Densidad (FVD) y el Factor de Vulnerabilidad por Tamaño (FVT) son constantes con los valores 4 y 4 respectivamente, asociados a Alta Densidad debido a la circulación de personas y vehículos y considerando que son estructuras de una planta. Para el caso de los equipamientos, su grado de vulnerabilidad sigue siendo el indicado por la misma metodología y factores aplicados en el análisis de vulnerabilidad de las edificaciones. En el Mapa 61 se presenta el mapa resultado del análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales para el Polígono Golondrinas.

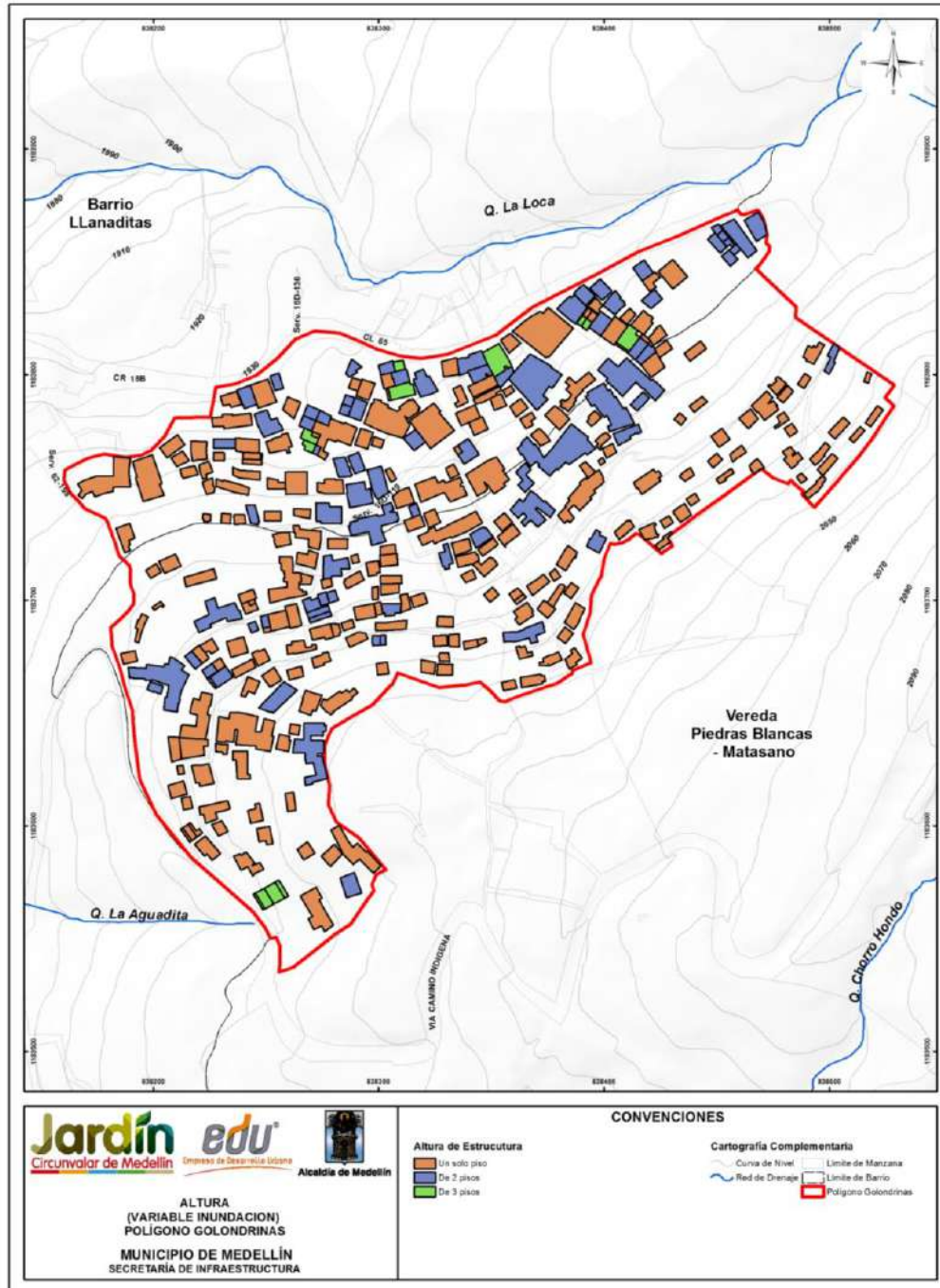


**Mapa 55. Localización espacial del tipo de estructura para inundaciones en el Polígono Golondrina**  
**(35\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_C y 35\_GOLTipodeEstructura\_Medellin\_T)**



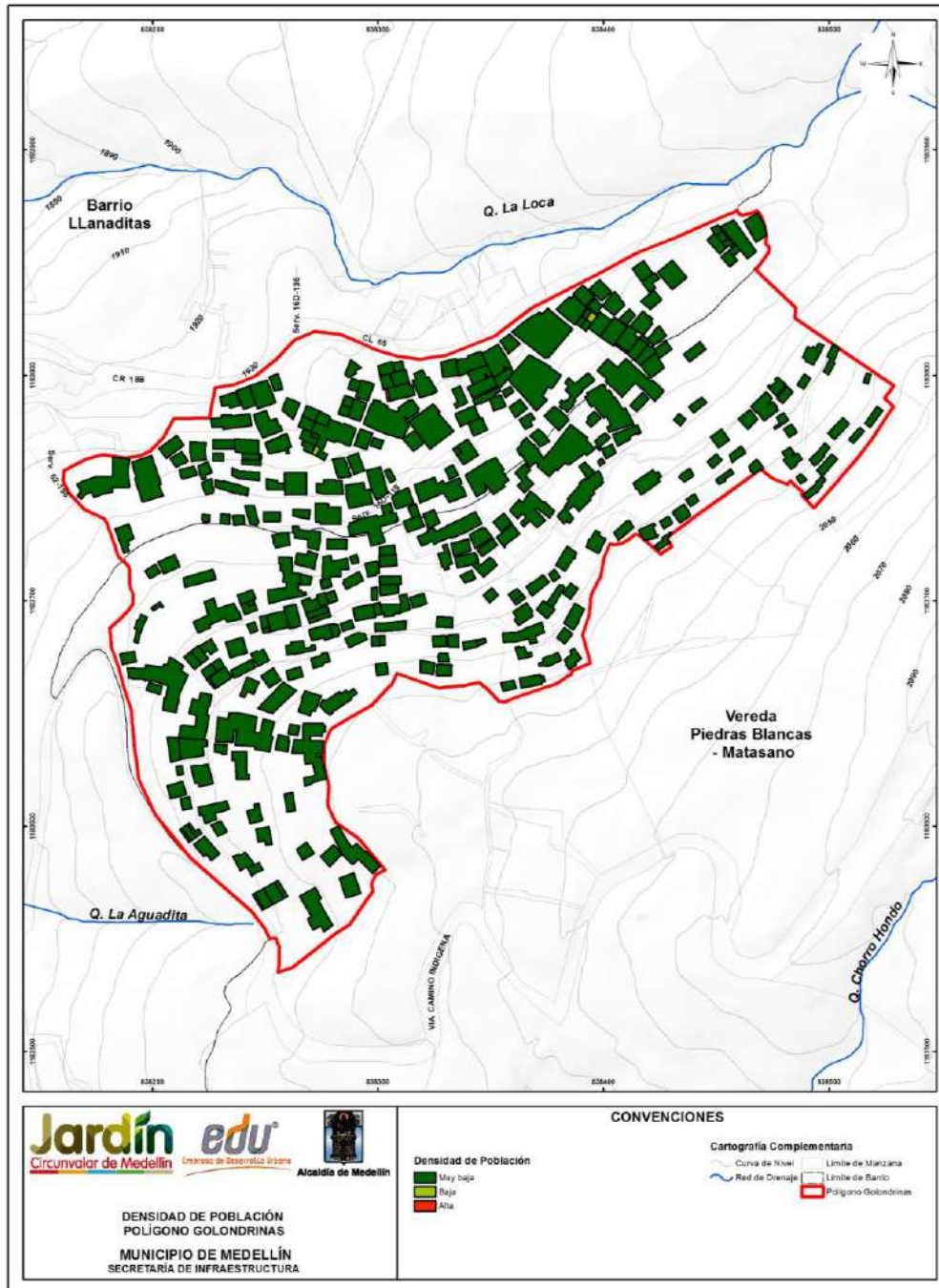
**Mapa 56. Localización espacial del estado de la estructura para inundaciones en el Polígono Golondrinas**  
(36\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_C y 36\_GOLEstadodelaEstructura\_Medellin\_T)



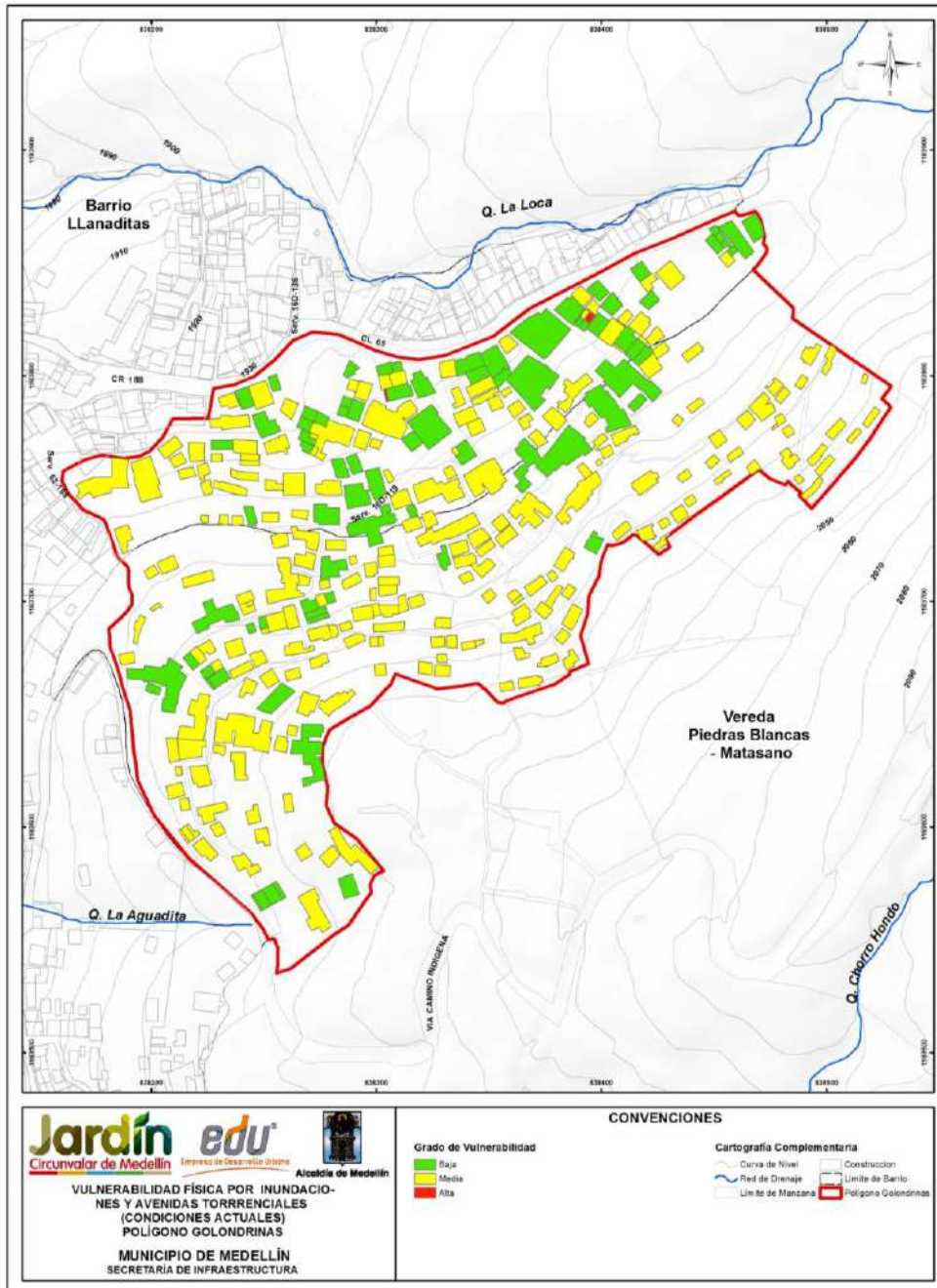


Mapa 57. Localización espacial de la altura de las estructura para inundaciones en el Polígono Golondrina (37\_GOLAAlturadelaConstrucción\_Medellin\_C y 37\_GOLAAlturadelaConstrucción\_Medellin\_T)

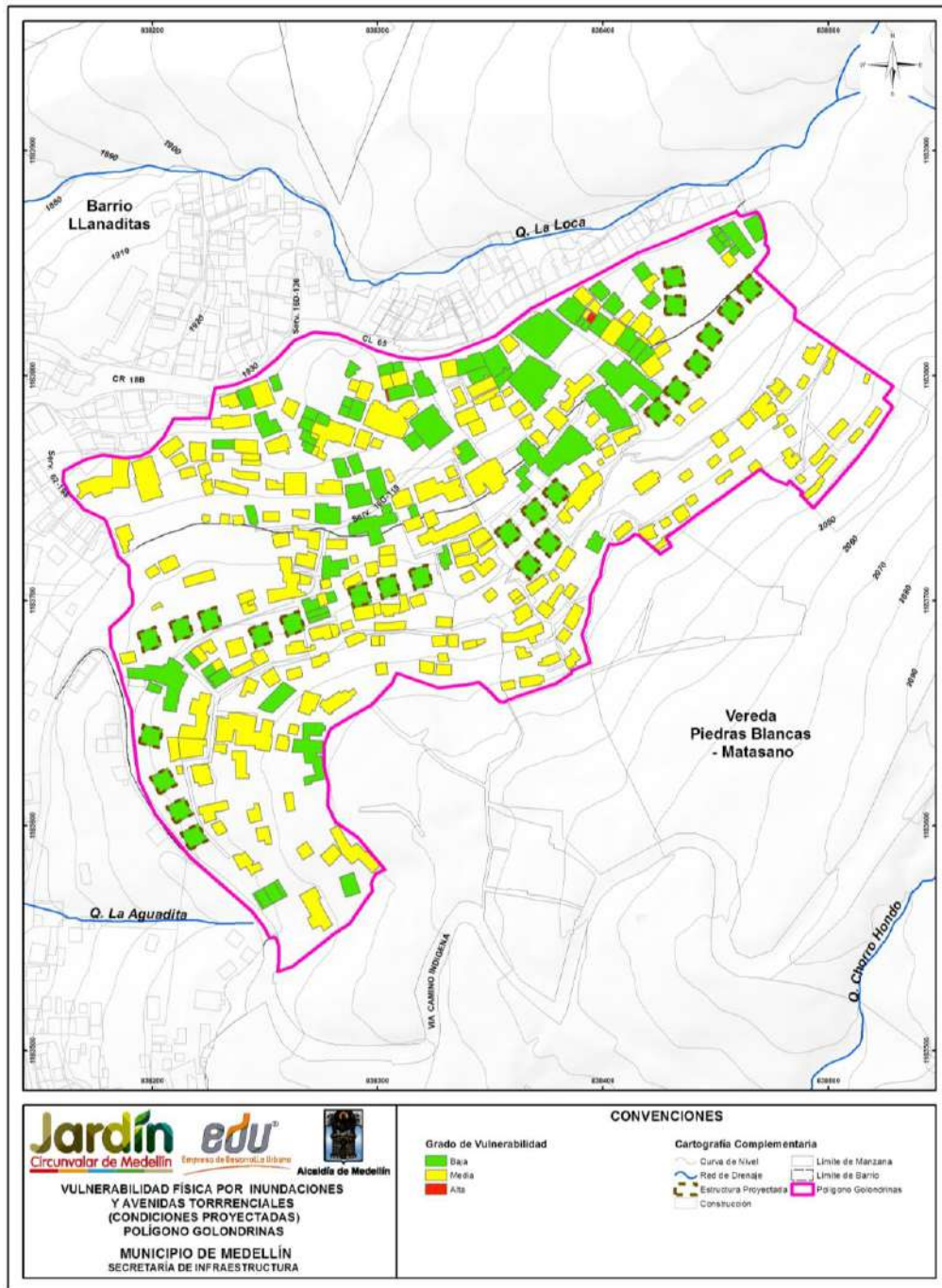




Mapa 58. Localización espacial de la densidad de población para inundaciones en el Polígono Golondrina (38\_GOLDensidaddePoblacion\_Medellin\_C y 38\_GOLDensidaddePoblacion\_Medellin\_T)

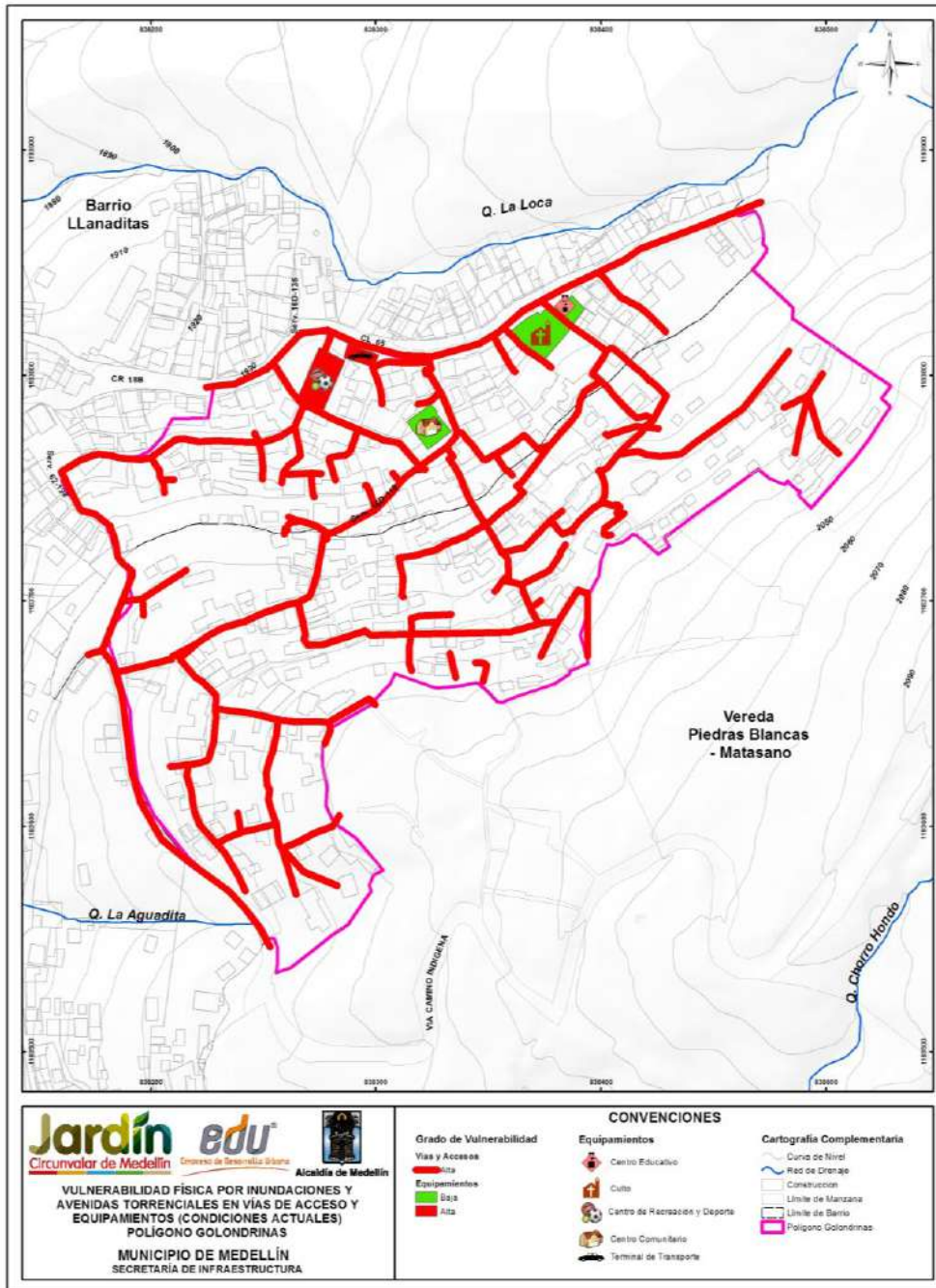


Mapa 59. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones y avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrina  
(42\_GOLVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales\_Medellin\_Cy  
42\_GOLVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T)



**Mapa 60. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Golondrinas con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (GOLVulnerabilidadFisicaporInundacionesProyecto\_Medellin\_C)**





Mapa 61. Análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales en el Polígono Golondrina para las Vías de Acceso y Equipamientos (52\_GOLVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos\_Medellin\_C y 52\_GOLVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos\_Medellin\_T)

## 16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO DE LAS ESTRUCTURAS

En la Tabla 73 y la Tabla 74 se presenta el registro fotográfico tomado durante los recorridos del Polígono Golondrinas.



**Tabla 73. Registro fotográfico en el Polígono Golondrinas**





**Tabla 74. Registro fotográfico en el Polígono Golondrinas (Continuación)**



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

## **17. RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA**

### **17.1 ASPECTOS GENERALES**

Se entiende como riesgo aceptable aquel nivel en que los individuos o comunidades se muestran dispuestos a aceptar sin invertir recursos para la contención del mismo. El riesgo admisible o tolerable, por otro lado, es el nivel de riesgo hasta el cual el individuo o la comunidad están dispuestos a aceptar a cambio de ciertos beneficios o con cierta cantidad de inversión.

En el caso del Proyecto Barrios Sostenibles, el riesgo aceptable será el requerido para comparar cuando se tenga la evaluación de las condiciones actuales de la ladera, mientras que el riesgo admisible será aquel que sirva de comparación para cuando se tengan las condiciones de mitigación a través de la implementación de las medidas estructurales y no estructurales.



Actualmente, en Medellín no se tiene una categorización en términos de lo que corresponde a riesgo aceptable o admisible y en el mundo estos valores pueden variar dependiendo, por ejemplo, de la importancia de la obra y la vida útil de la misma. Whitman (1987) cuestionó la existencia de padrones o niveles para establecer el riesgo admisible, y en caso de que los mismos se fijen, podría resultar peligroso establecer un criterio inflexible que podría implicar durante la etapa de diseño la ejecución de análisis con precisiones posiblemente fuera de la realidad.

### **17.2 CÁLCULO DEL RIESGO**

El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se den consecuencias negativas desde el punto de vista de vidas y la infraestructura, de manera que se hace necesario su estimación cuantitativa para la toma de decisiones. Estos análisis pueden llevarse a cabo, por ejemplo, en forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un evento o escenario o aleatorio, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín et al., 2013).

Las cuantificaciones son claves, puesto que permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas. Más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis empleados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos. Además, facilita la comunicación entre profesionales, propietarios y tomadores de decisiones (Corominas et al., 2014). Analíticamente, el riesgo específico se podrá calcular con base en la siguiente expresión:

$$R = P(H_i) \cdot V \cdot E$$

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

Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad ( $H_i$ ), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. En este caso los escenarios de amenaza son el de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.  $P(H_i)$  es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica ( $H_i$ ) en un tiempo dado y en un área específica.  $V$  es vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de  $E$  probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud ( $H_i$ ) expresada en una escala entre 0 y 1 como en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa.  $E$  es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por la amenaza; para el caso de personas.

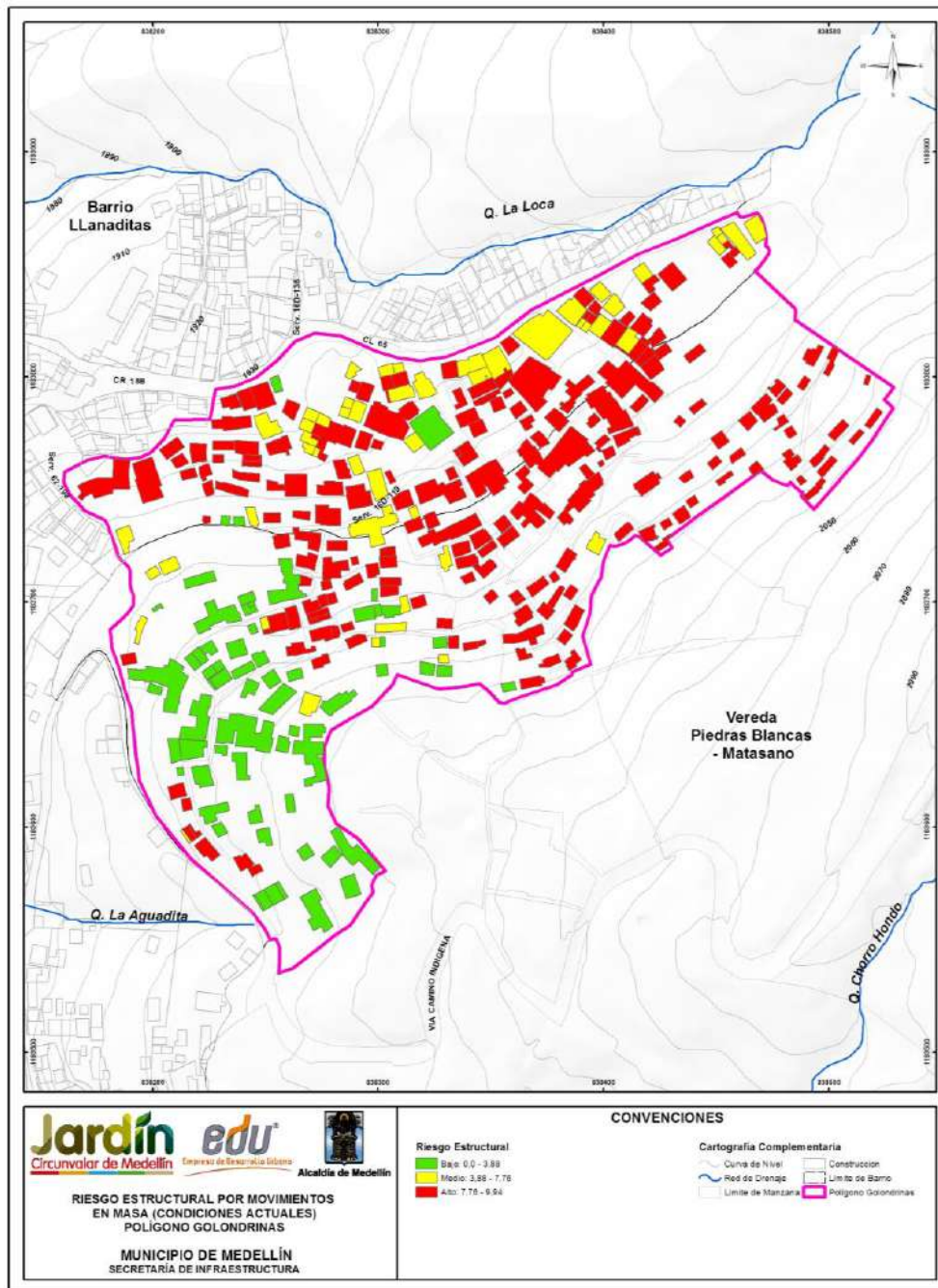
Teniendo en cuenta lo anterior, los términos a los que se quiere llegar con los análisis de riesgo, son análisis materializados bien sea representados en porcentajes de pérdidas, costos económicos o en pérdidas de vida. De esta forma se tendrá un valor tangible del riesgo que permitirá la toma de decisiones en cuanto al proyecto.

### **17.3 RESULTADOS**

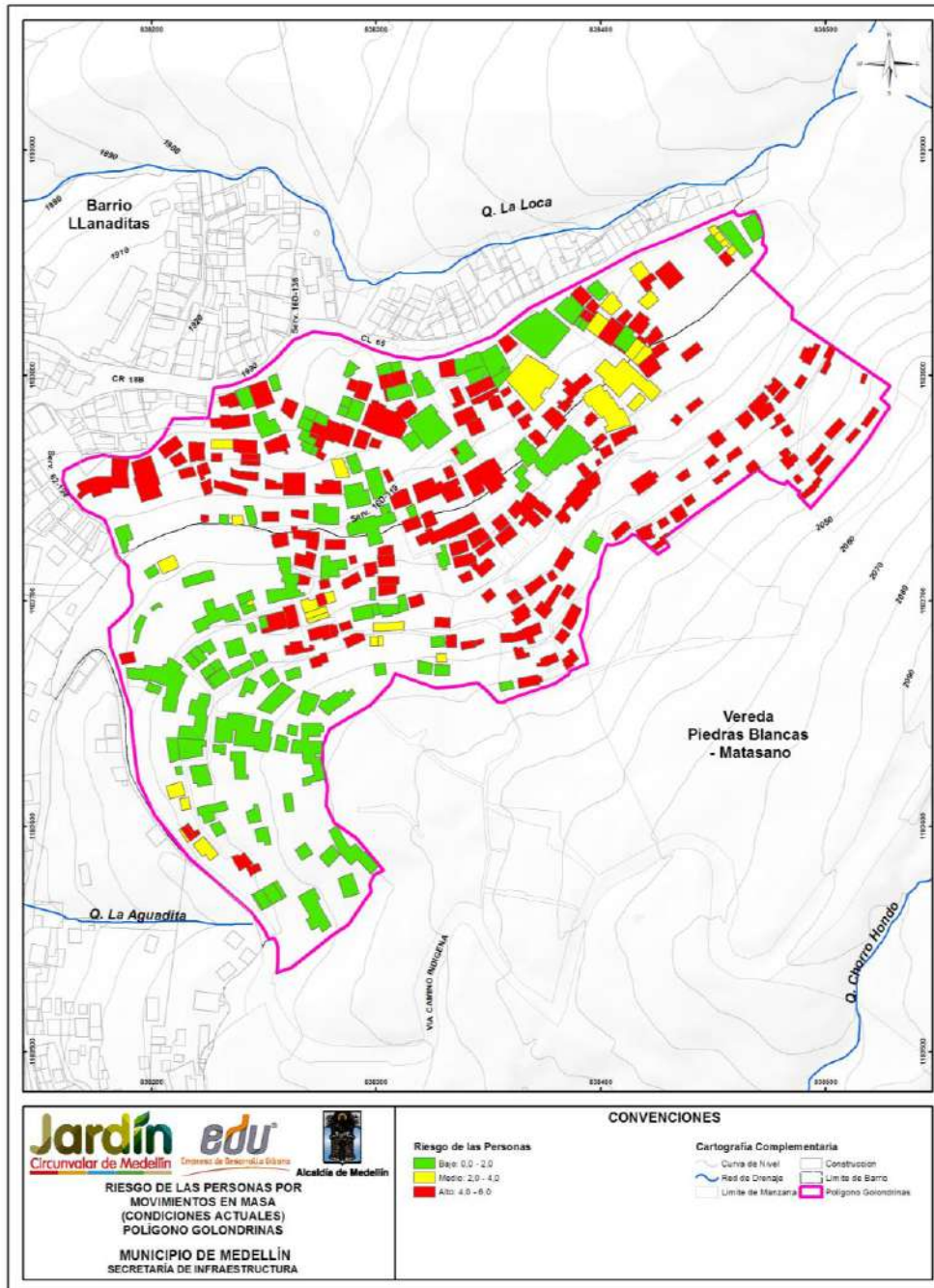
El análisis de riesgo por movimientos en masa se realizó considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años (Mapa 36), donde se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros y la actuación del sismo en 50 años y los mapas de vulnerabilidad estructural y de personas presentados y analizados en el Numeral 16.2.4.

En el Mapa 62 y en el Mapa 63 se presentan los resultados de los análisis de riesgo considerando las condiciones actuales, en términos de porcentaje de pérdidas económicas y en términos de porcentaje de pérdidas de vidas respectivamente. El Mapa 64 presenta la categorización del riesgo por movimiento en masa de las vías de acceso y equipamientos del polígono, clasificándolo en riesgo bajo, medio y riesgo alto mitigable y no mitigable. Se puede observar que es más crítico el resultado del riesgo en términos de porcentaje de pérdidas económicas y da lugar a un gran número de viviendas del sector norte del polígono con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad por fuera del Polígono Golondrinas, en su costado noroccidental, la responsable principal de los resultados obtenidos.





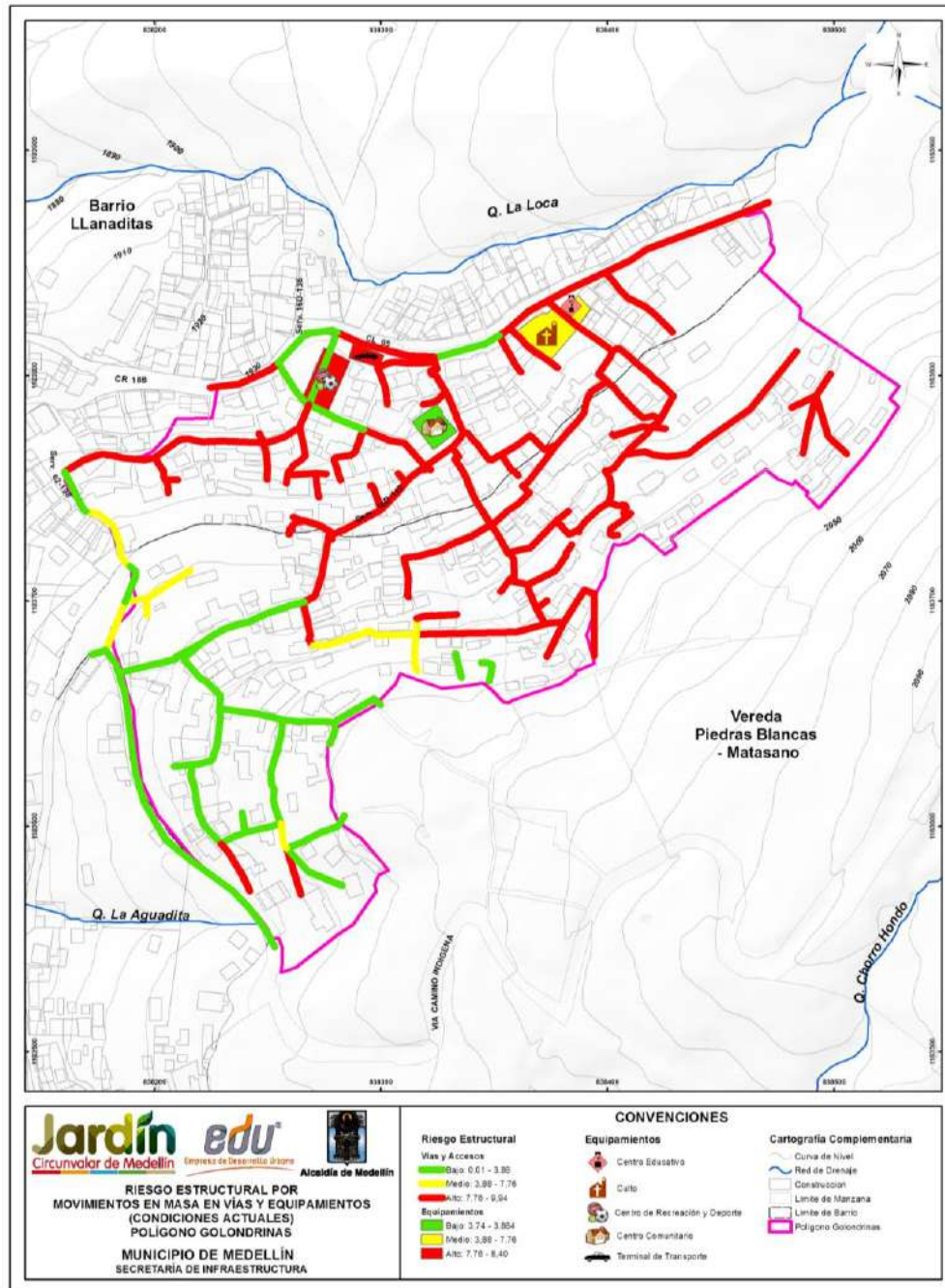
Mapa 62. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas (43\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_C y 43\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosenMasa\_Medellin\_T)



**Mapa 63. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Golondrina**

**(44\_GOLRiesgoPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_C y 44\_GOLRiesgoPersonasMovimientosenMasa\_Medellin\_T)**





Mapa 64. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa en el Polígono Golondrina  
(54\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_C y 54\_GOLRiesgoEstructuralMovimientosMasa\_ViasEquipamientos\_Medellin\_C\_T)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se generó un mapa de riesgo total que consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Este mapa de riesgo total se hizo basado en la propuesta del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en su Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015).

**Tabla 75. Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total**

RIESGO ESTRUCTURAS	RIESGO DE PERSONAS		
	BAJO	MEDIO	ALTO
BAJO	B	B	M
MEDIO	M	M	A
ALTO	M	A	A



Finalmente fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto donde la descripción de cada categoría se indica en la Tabla 76.

**Tabla 76. Categorización del riesgo total**

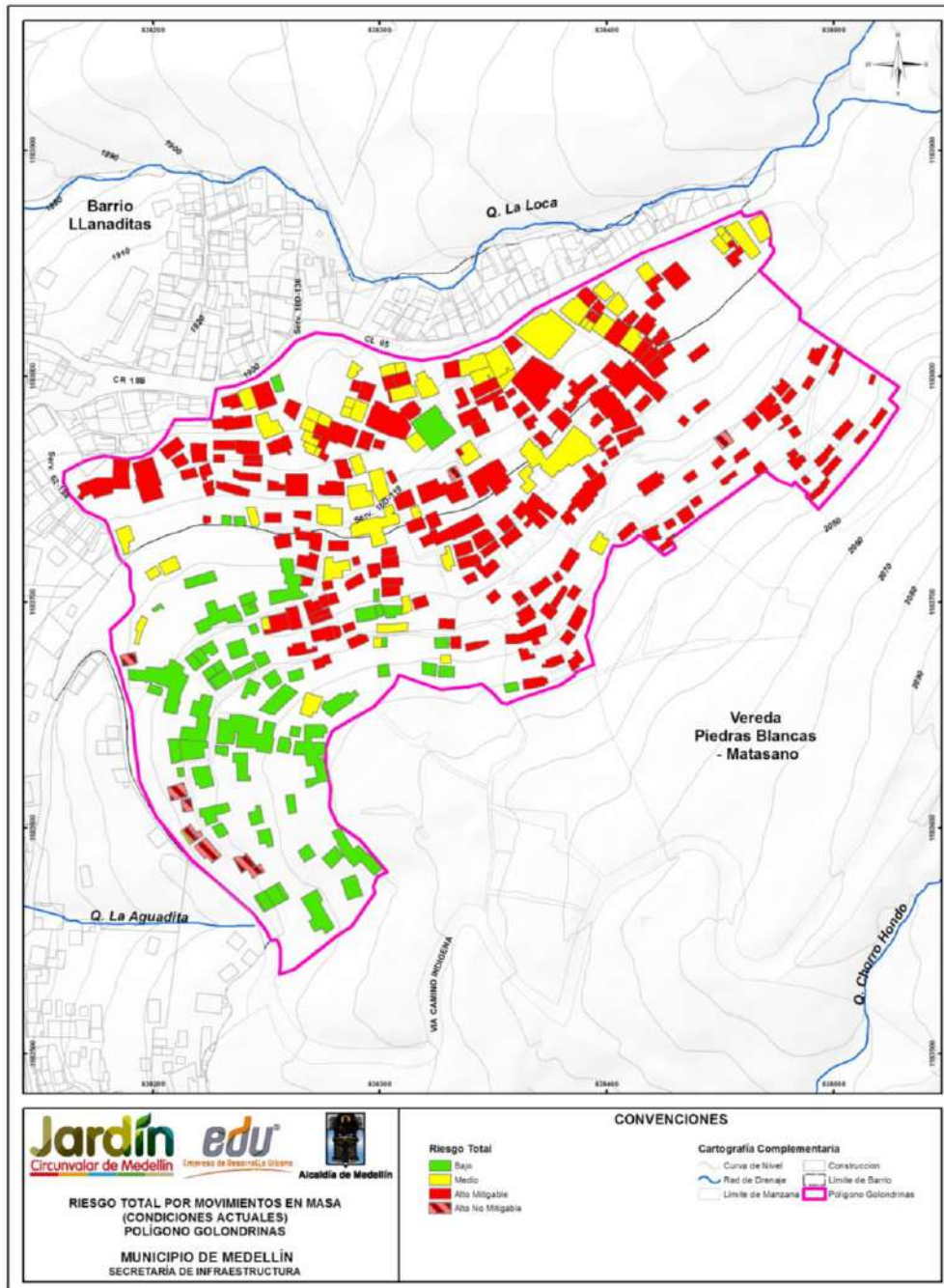
<b>ALTO (A)</b>	Alta probabilidad de víctimas fatales y lesiones serias en la población. La implementación de medidas de intervención es prácticamente inviable desde el punto de vista técnico. Se debe hacer una evaluación económica detallada para establecer la posibilidad de mitigación y disminución del nivel de riesgo. Las pérdidas por materialización de la amenaza superan en todos los casos los valores económicos de los bienes.
<b>MEDIO (M)</b>	Lesiones moderadas muy frecuentes, con alguna probabilidad de víctimas fatales. Se requiere evitar que el nivel de riesgo aumente, pero las medidas de intervención son en todo caso viables técnica y económicamente.
<b>BAJO (B)</b>	Probabilidad de víctimas fatales prácticamente nula. Es un riesgo aceptable y requiere tan solo medidas de prevención.

Adicionalmente, la categoría de riesgo alto fue subcategorizada en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura exceden los costos de las alternativas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si por el contrario, los beneficios de la reubicación de asentamientos e infraestructura representan la mejor opción económica, se deduce que el riesgo es no mitigable.

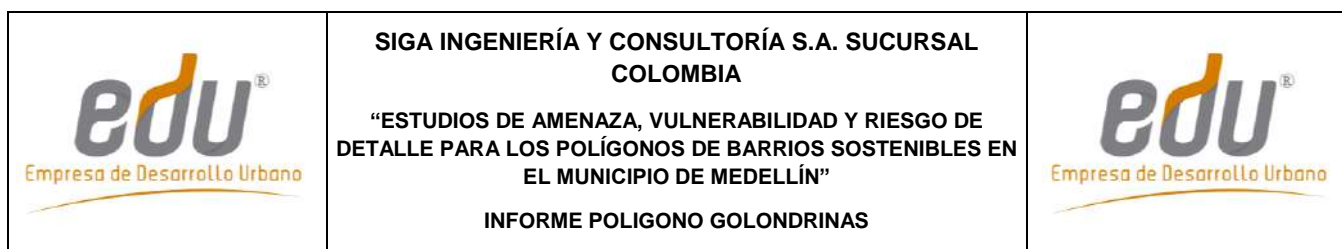
En el Mapa 65 se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 312 estructuras, solo 63 de ellas presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (20%), 59 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (19%) y 190 presentan riesgo alto

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

ante movimientos en masa (61%), de las cuales 9 cuales fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable. Se puede observar que se tiene un gran número de estructuras del sector norte del polígono con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad por fuera del Polígono Golondrinas, en su costado nororiental, la responsable principal de los resultados obtenidos.



**Mapa 65. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono Golondrinas (45\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasa\_Medellin\_C y 45\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasa\_Medellin\_T)**



En la Tabla 77 se presenta la descripción de cada una de las estructuras que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa. En el Capítulo 20 se exponen las consideraciones tenidas en cuenta para la clasificación de las estructuras como riesgo alto no mitigable.

**Tabla 77. Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono Golondrinas**

<b>Estructura (Formulario)</b>	<b>COBAMA</b>	<b>Ocupación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fundación</b>	<b>Estado</b>	<b>Altura</b>
7		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
10	9008008	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
14	9008008	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
15		Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
19		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
21	9008008	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
54	806035	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
175	9008009	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
209		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso

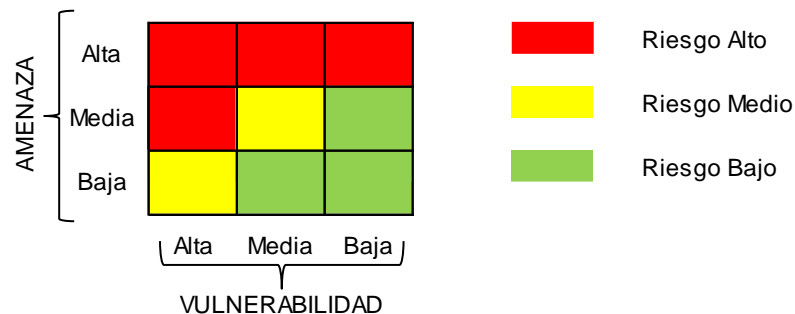


## 18. RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

### 18.1 METODOLOGÍA

A partir de los resultados de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad por inundaciones y avenidas torrenciales, es posible evaluar finalmente el riesgo existente en el Polígono Golondrinas ante este tipo de fenómenos.

De acuerdo con lo presentado en los capítulos de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, la amenaza evaluada trae implícito la calificación de la intensidad del fenómeno y la magnitud de los daños potenciales. A su vez, la evaluación de la vulnerabilidad considera la densidad habitacional y la resistencia de las estructuras frente a este tipo de fenómenos. Con base en esto, la asignación del riesgo se realizó de manera cualitativa combinando los resultados de los niveles de amenaza y los niveles de vulnerabilidad según el esquema mostrado en la Figura 197.

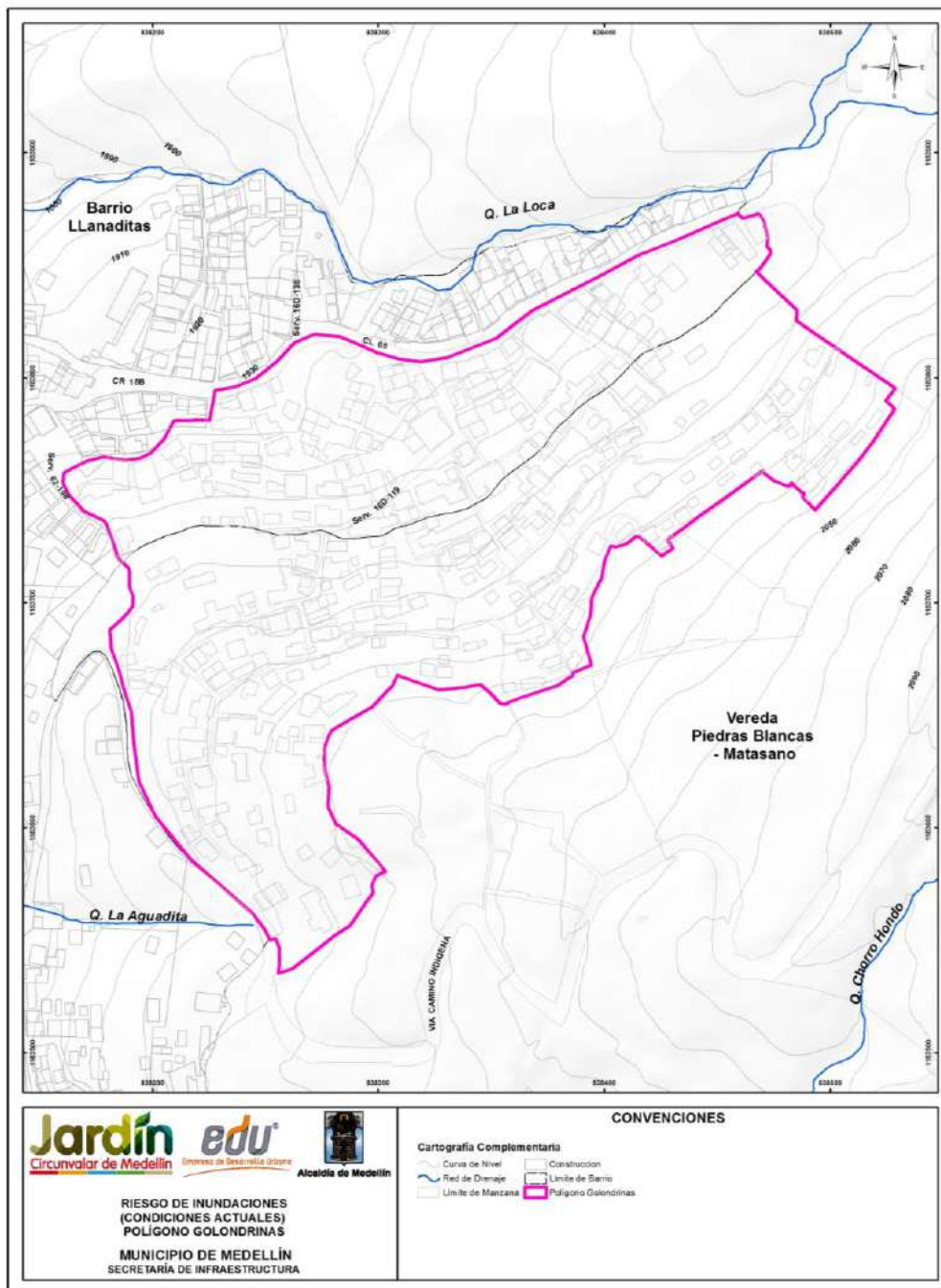


**Figura 197. Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad**

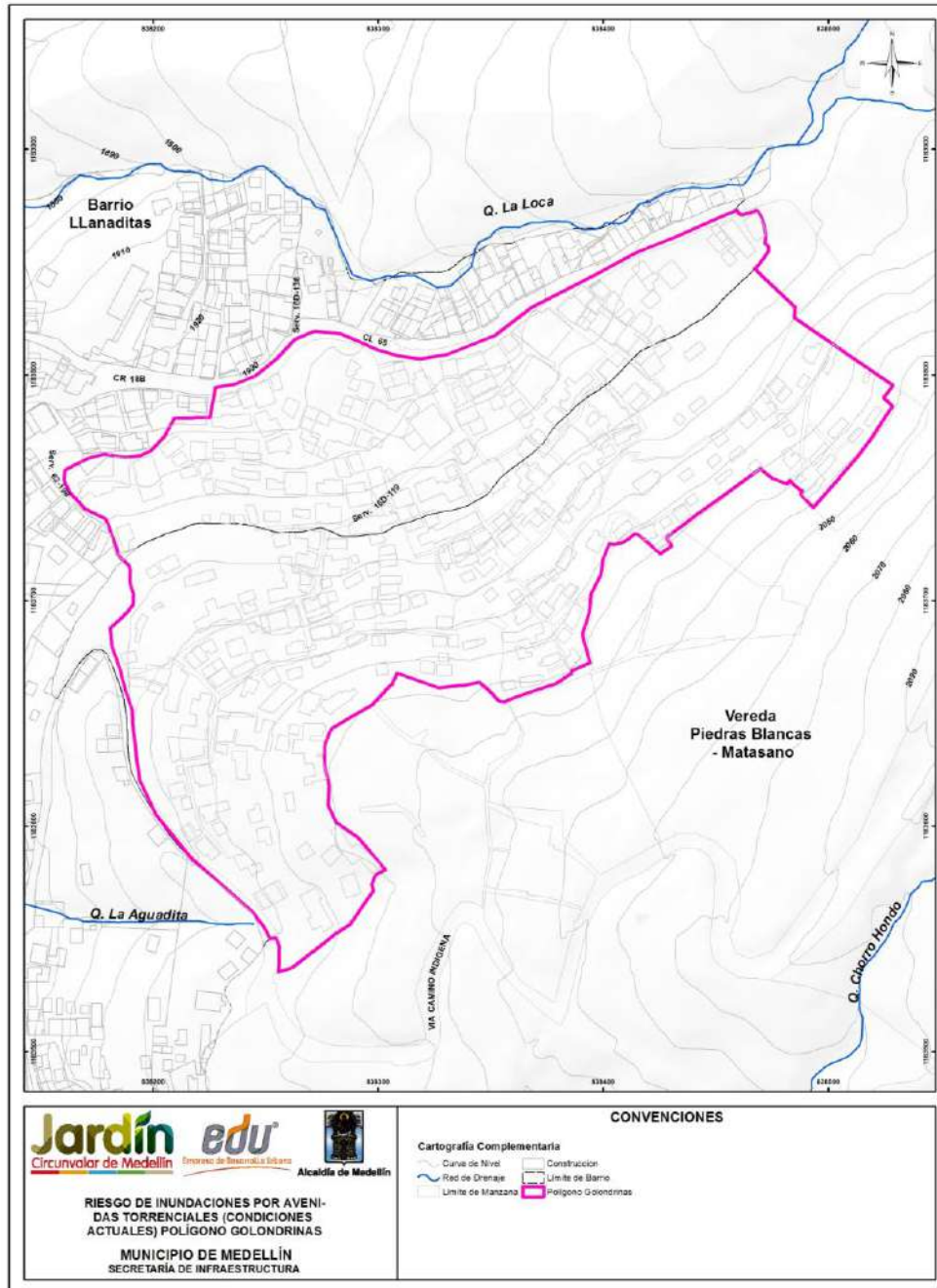
### 18.2 RESULTADOS

Luego de aplicar la metodología para la calificación del nivel del riesgo ante fenómenos de Inundación y Avenidas Torrenciales, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Mapa 66 y en el Mapa 67. Puede observarse que para el interior del Polígono Golondrinas no existe riesgo por estos dos fenómenos dado que la amenaza no se presenta en esta zona, por ello el mapa es carente de clasificación del riesgo. En el mapa no se presenta el riesgo que existe en el cauce de la Quebrada La Loca puesto que esta zona se encuentra fuera del polígono en estudio.

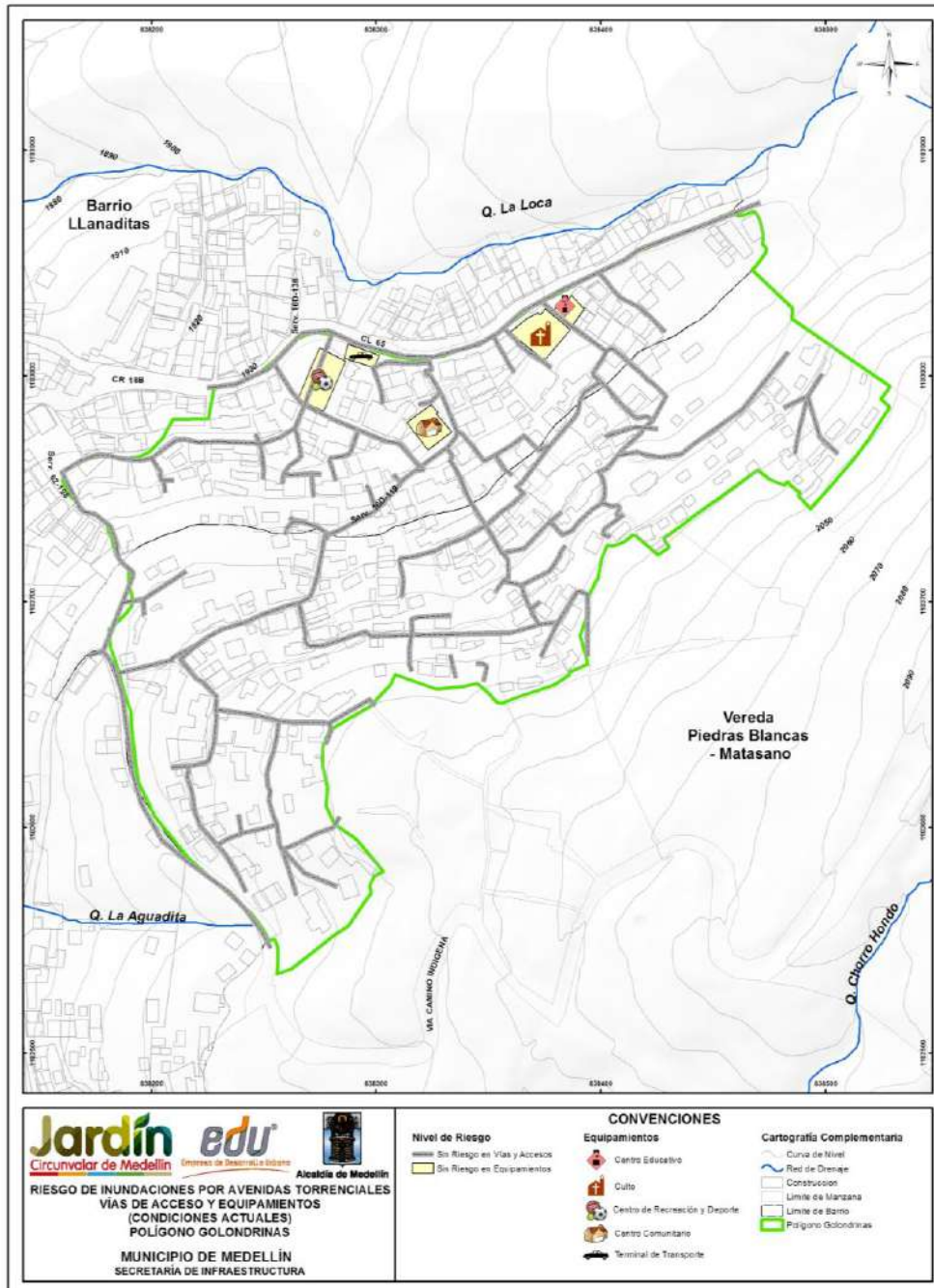
De igual manera, en el Mapa 68 se puede observar el nivel de riesgo para las vías de acceso y equipamiento. En este caso, no existe una amenaza por avenidas torrenciales por ende no se presentara un riesgo ante este evento. No se presenta mapas relacionados a inundaciones (aguas claras), ya que el caso crítico está relacionado a un posible evento de avenidas torrenciales.



**Mapa 66. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Golondrina para viviendas y construcciones (47\_GOLRiesgoInundaciones\_Medellin\_C y 47\_GOLRiesgoInundaciones\_Medellin\_T)**





Mapa 67. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrinas para las vías de acceso y equipamientos (49\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_Medellin\_C y 49\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_Medellin\_T)



**Mapa 68. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Golondrina para las vías de acceso y equipamientos**  
**(54\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_ViasEquipamientos\_Medellin\_C y 54\_GOLRiesgoAvenidasTorrenciales\_ViasEquipamientos\_Medellin\_T)**



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

## **19. ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS**

En este capítulo se presenta el análisis complementario efectuado considerando la presencia de redes de servicios públicos al interior del Polígono Golondrinas. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según la información entregada por La EDU a SIGA, en los mapas de amenaza por movimientos en masa y por inundaciones. Posteriormente se hizo una valoración de la vulnerabilidad de las estructuras correspondientes a las redes y con base en estos dos aspectos se hicieron análisis sobre el riesgo al que finalmente están expuestas las redes.

### **19.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES**

A partir del análisis de la información recibida por parte de La EDU, es posible afirmar que en el Polígono Golondrinas no existe cobertura alguna de redes de acueducto, de alcantarillado ni de gas de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse en el Mapa 69 o en el Mapa 70.

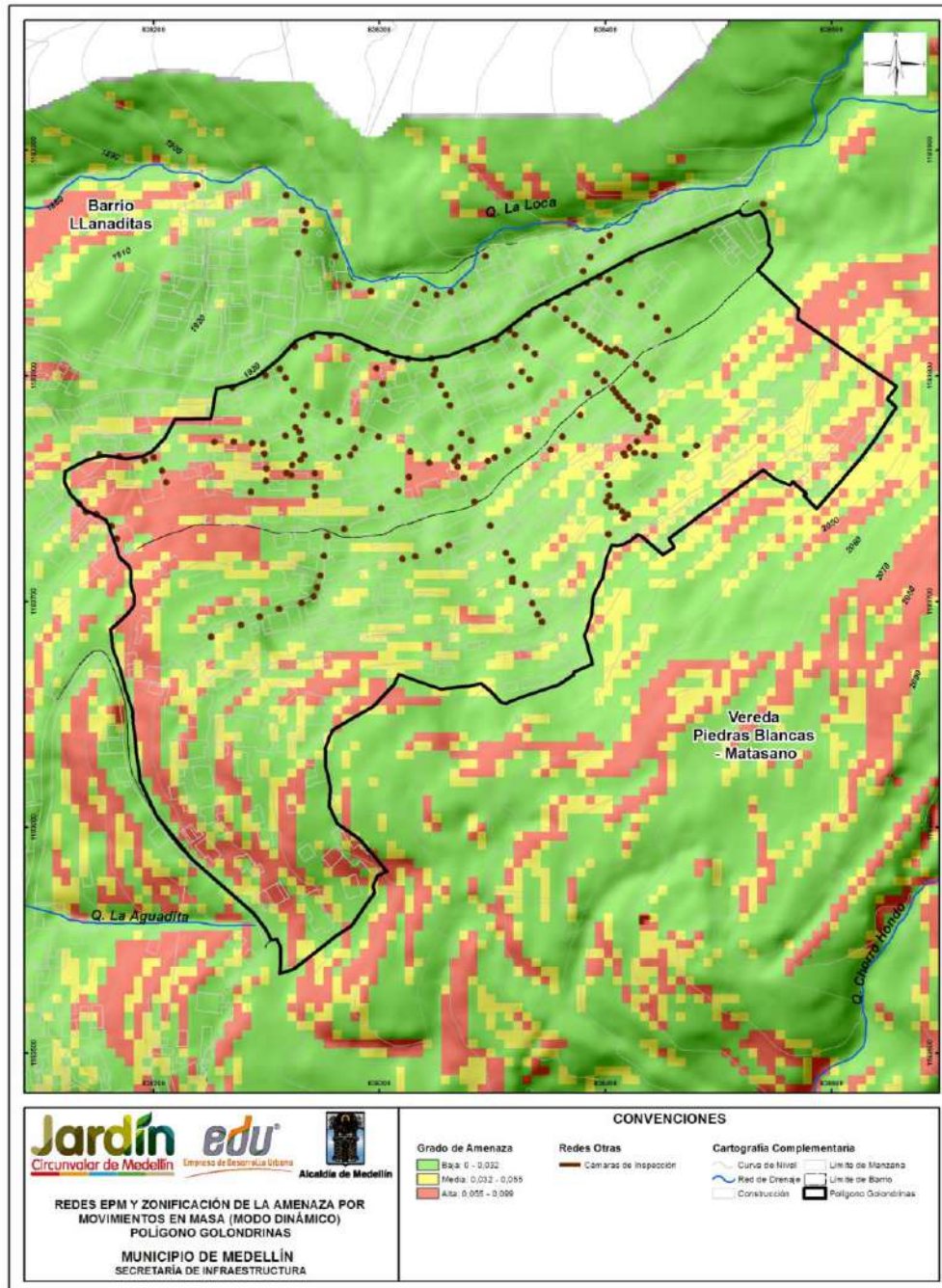
Sin embargo, la información topográfica suministrada por La EDU para este polígono contiene un conjunto de cámaras de inspección ubicadas al interior del Polígono Golondrinas que según lo observado en campo hacen parte de un sistema de alcantarillado combinado que drena en sentido suroriente-noroccidente hasta la Calle 65 donde las aguas son recogidas por un colector. Con respecto a los materiales y diámetros de estas redes, la información topográfica no presenta dicha información, pero según lo observado en campo las tuberías corresponden principalmente a policloruro de vinilo (PVC) y sus diámetros son generalmente inferiores que 300 mm. Se desconoce entonces el origen de este sistema y su operador.

Adicionalmente, no se descarta la existencia de líneas de tuberías o mangueras instaladas por la comunidad para el suministro de agua para el polígono, las cuales quedan por fuera del alcance general del presente estudio.



### **19.2 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA**

En el Mapa 36 se presenta el mapa de zonificación de la amenaza considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. En el Mapa 69 se presenta este mismo mapa pero sobre él se han superpuesto cámaras de inspección consignadas en la información topográfica suministrada por el EDU.





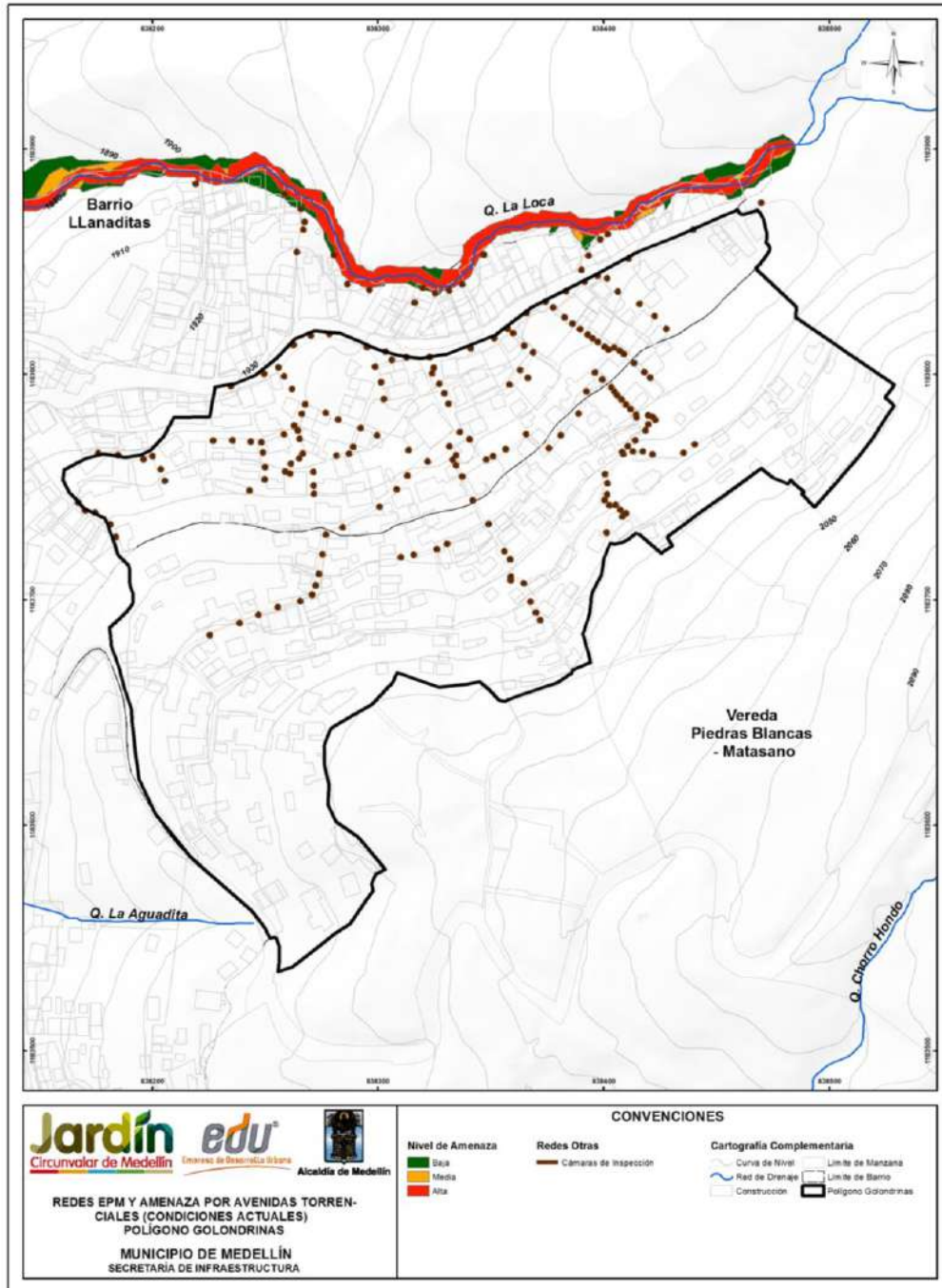
**Mapa 69. Cámaras de inspección sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g.**  
(GOLRedesEPMYAmenazaMovimientosenMasa\_Medellin\_C)

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



La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa, mostrada en la Mapa 69, permite ver la localización de las cámaras de inspección con respecto a la zonificación de la amenaza por movimiento en masa, realizada dentro del polígono y proyectada para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un sismo de 0.25g. Resultan especialmente importantes de analizar los tramos de redes que se encuentran en zonas de amenaza alta, al interior del polígono como tal. En este sentido, se resaltan dos tramos de redes de 5 m y 20 m aproximadamente, que se encuentran en una zona de amenaza alta. Dichos tramos se localizan en el costado occidental y sobre el límite del polígono.

En el Mapa 37 se presenta la amenaza por inundaciones y en el Mapa 39, la amenaza por avenidas torrenciales para el Polígono Golondrinas. En el Mapa 70 se presenta este mismo mapa de amenaza por avenidas torrenciales pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes. Sólo se presenta la superposición sobre el mapa de avenidas torrenciales dado que éste es más desfavorable que el de amenaza por inundaciones (éste último cubre completamente las zonas afectadas por inundaciones), y las zonas de amenaza por torrencialidad no alcanzan a intersectar las redes al interior del Polígono Golondrinas, quedando así cubierto el análisis por inundaciones.

La superposición efectuada sobre los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, mostrada en el Mapa 70, permite determinar que el 100% de las redes de servicios públicos existentes al interior del Polígono Pinares de Oriente se encuentran por fuera de las zonas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.



Mapa 70. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.  
(GOLRedesEPMAvenidaTorrencial\_Medellin\_C)

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

### **19.3 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES**

La vulnerabilidad de las redes depende del tipo de tubería que se esté usando. Para este sitio en particular, en el alcantarillado y en el acueducto se han encontrado tuberías en policloruro de vinilo (PVC). Algunas características de las tuberías en PVC son mostradas a continuación.

Los tramos de PVC en las tuberías de acueducto, generalmente presentan un comportamiento bueno. Cuando se presentan daños por fugas, éstas ocurren en las conexiones. Por ésta razón, la parte más vulnerable ante los efectos en masa son las conexiones.

Según la descripción anterior, las conexiones de las tuberías en PVC tienen una baja capacidad de deformación diferencial horizontal y se concluye entonces que estas son altamente vulnerables ante un movimiento en masa. Este tipo de estructuras también es vulnerable a un lavado del material de fundación debido a una inundación o a una avenida torrencial cerca de los cauces de quebrada.

### **19.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES**

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad de las redes de servicios públicos, como se explicó en el numeral anterior, se concluye que el riesgo en el cual se encuentran las redes ubicadas justo en las zonas de amenaza alta por deslizamiento es también alto. En el desarrollo del presente estudio, en esta zona de amenaza alta se planteó como obra de mitigación la construcción de una pantalla de pilas para aumentar el factor de seguridad de la ladera, como se expone en el Capítulo 20. Debido a esta obra de mitigación la zona dejaría de estar en amenaza alta y por consiguiente no se presentaría riesgo por movimiento en masa sobre las redes actuales.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones y avenidas torrenciales al interior del Polígono Golondrinas, en los apartados anteriores se concluyó que el 100% de las redes de servicios se encuentran fuera de la zona de amenaza, por lo que es posible afirmar también que en la misma proporción estas redes se encuentran fuera de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.



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

## 20. PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

En los Capítulos 17 y 18 de este informe se presentaron los resultados de las evaluaciones del riesgo por movimientos en masa y por inundaciones y avenidas torrenciales. En este capítulo se presenta lo relacionado con el planteamiento de las obras de mitigación dirigidas a control de los factores de riesgo detectados y presentados en los capítulos mencionados.

Para lograr lo anterior, se diseñaron fichas de análisis de alternativas de solución, las cuales se presentan como anexo a este informe. Se trata de dos fichas, una en la cual se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por movimientos en masa y otra en la que se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

Cada una de las fichas contiene una descripción general de la problemática, incluyendo esta descripción un registro gráfico, el riesgo, la vulnerabilidad y la amenaza, además de una directriz general sobre las soluciones analizadas. Luego se presentan las alternativas evaluadas, mostrándose de cada una de ellas las características, el esquema, las ventajas, las desventajas y el costo aproximado. Después se muestra la valoración de cada una de las soluciones considerando los aspectos técnico, económico, socio ambiental y mantenimiento. A estos aspectos se les dio una importancia de 40%, 20%, 30% y 10%, en su orden, de manera que juntos constituyen el 100%. Cada aspecto fue subdividido y puntuado, de manera que se da una valoración final de cada solución que es el resultado de sumar los productos del porcentaje asignado a cada subdivisión efectuada por la puntuación otorgada. La mejor solución para mitigación del riesgo es la que mayor valor obtenga luego de hacerse la operación descrita.

Las fichas para el análisis de las respectivas obras de mitigación por movimientos en masa se presentan en el Anexo 07.



### 20.1 OBRAS PARA MOVIMIENTOS EN MASA

Para la evaluación del riesgo por movimientos en masa se dividió el Polígono Golondrinas en tres zonas, Zona 1 en el norte del polígono, la Zona 2 hacia el límite noroccidental y la Zona 3 en el sur del polígono, (Figura 204).

El análisis de riesgo efectuado por movimientos en masa, dio lugar a un número importante de viviendas con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad por fuera del Polígono Golondrinas, en su costado nororiental, la responsable principal de los resultados obtenidos en la Zona 1. Mientras que en la Zona 2 y en la Zona 3, las estructuras se encuentran principalmente amenazadas por estar inmersas en una masa de suelo potencialmente inestable.

El factor intensidad de los movimientos en masa más probables (Z), que juzga la vulnerabilidad de la estructura por su localización con respecto a su foco de inestabilidad más probable, permitió determinar lo siguiente.



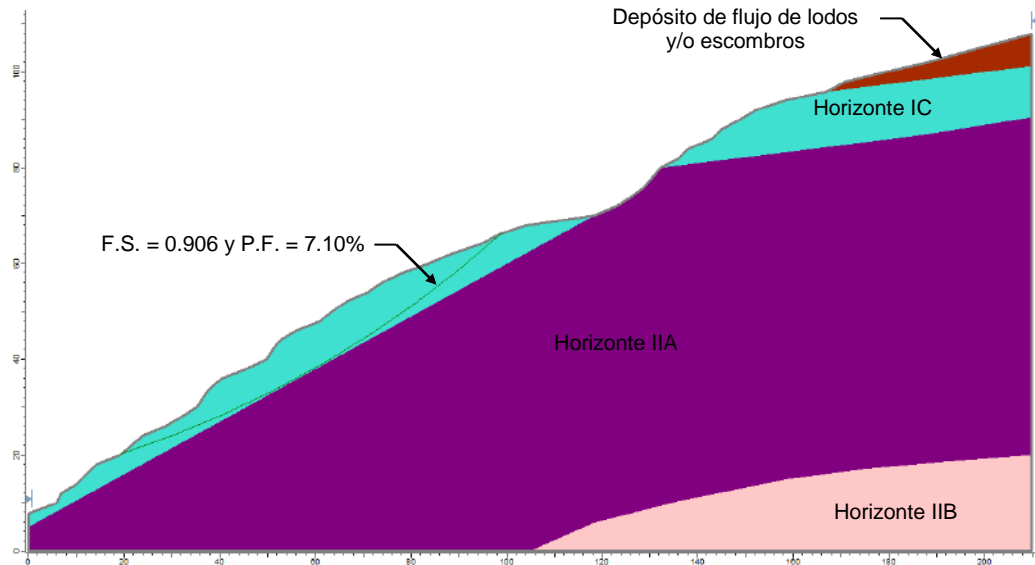
	<p><b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b></p> <p><b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b></p> <p><b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b></p>	
---	---	---

- ✓ El conjunto de focos localizados por fuera del Polígono Golondrinas, en la ladera ubicada al costado nororiental del mismo, los denominados Focos 5, 23, 24 y 25 en el Mapa 49, generan factores de intensidad al interior del Polígono Golondrinas variables entre 0.29 y 1.32. La mayor parte de la zona que alcanzan a afectar estos focos generan factores de intensidad en los rangos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.34. Es importante resaltar el hecho de que las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en la Mapa 48, presentan vulnerabilidad estructural por movimientos en masa media, es decir, en el rango que va de 0.388 a 0.776.
- ✓ De los focos ubicados al interior del Polígono Golondrinas, denominados en el Mapa 49 como Focos 26, 27 y 28, resultan especialmente importante los dos últimos. Estos dos focos, generan dentro del Polígono Golondrinas valores del factor de intensidad en los rangos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.32. Prácticamente todas las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 48, también presentan vulnerabilidad física por movimientos en masa media, es decir, en el rango que va de 0.388 a 0.776.

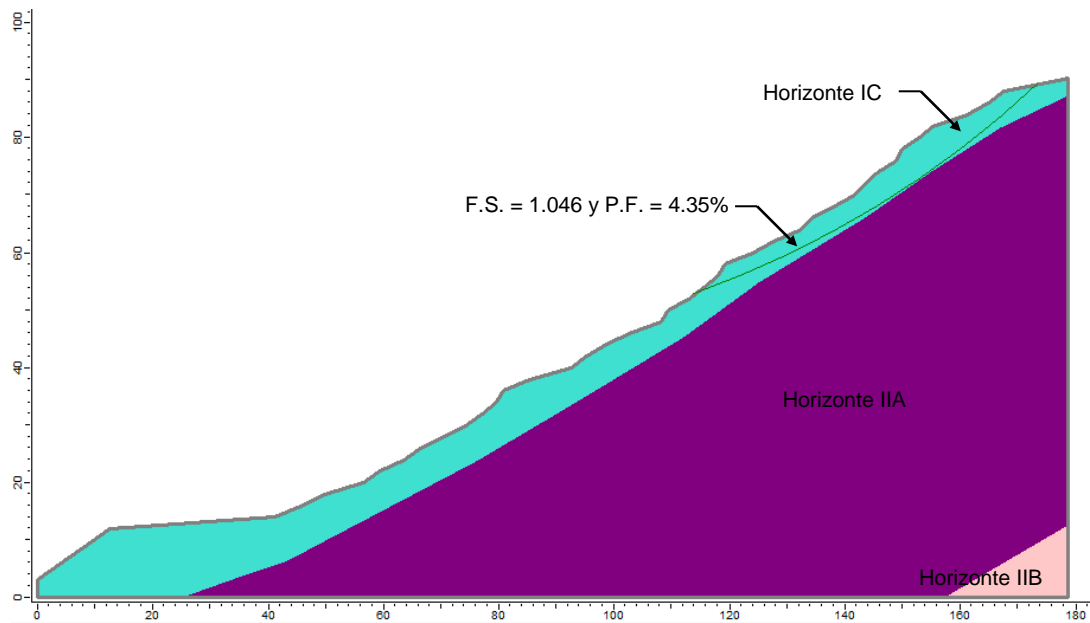
Así las cosas, se procedió a la realización de análisis de estabilidad, a través del Software SLIDE V6, localizados por medio de secciones transversales que consideraran la localización del foco de inestabilidad y en el sentido de la trayectoria principal de estos. Se analizaron los Perfiles 1 a 6, en condiciones actuales pero teniendo en cuenta la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo, obteniéndose los resultados que se muestran de la Figura 198 a la Figura 203. La localización en planta de estos perfiles se muestra en la Figura 204. El valor de probabilidad de falla incluida en cada figura hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años.

Considerando los resultados obtenidos, se ratifica el hecho de que los focos detectados por medio de la evaluación de riesgo representan superficies de falla que se generan a través del saprolito de las Dunitas de Medellín. La forma de las superficies de falla permite validar además los detectados como focos más probables, esto por cuanto se trata de superficies de falla que inician más o menos donde está localizado el foco. Las probabilidades de falla son algo más bajas que las obtenidas por medio de la metodología utilizada para evaluación de la amenaza por movimientos en masa, lo cual se debe a las diferencias en los mecanismos de falla considerados.

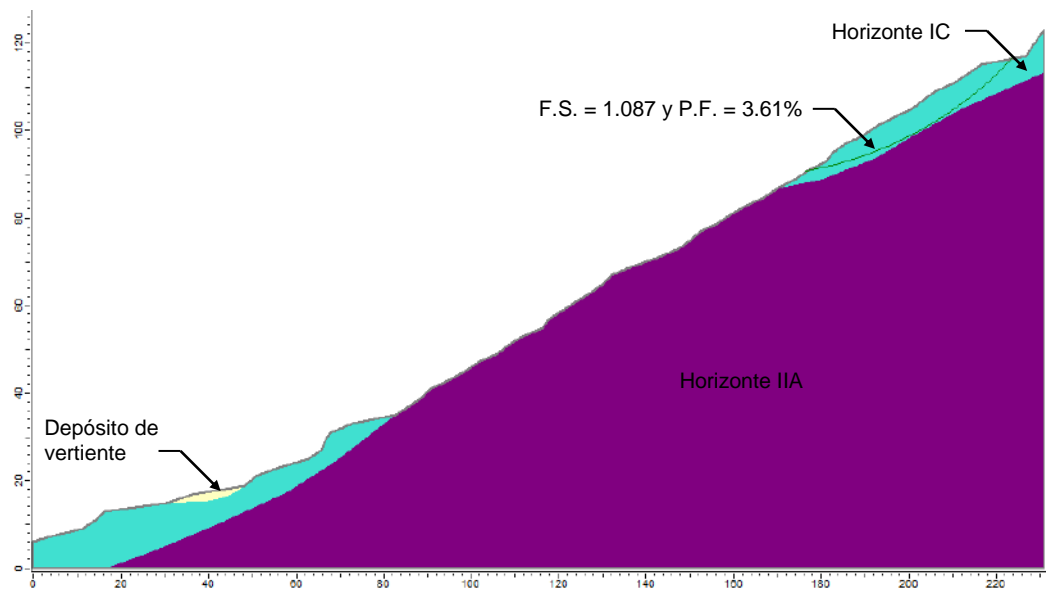
En el caso específico del Perfil 1, las superficies de falla generadas a través de terreno pertenecientes al Polígono Golondrinas permiten determinar que la implementación de pantallas de contención profundas ayudaría a disminuir el riesgo, tal como se comenta en las páginas subsiguientes.



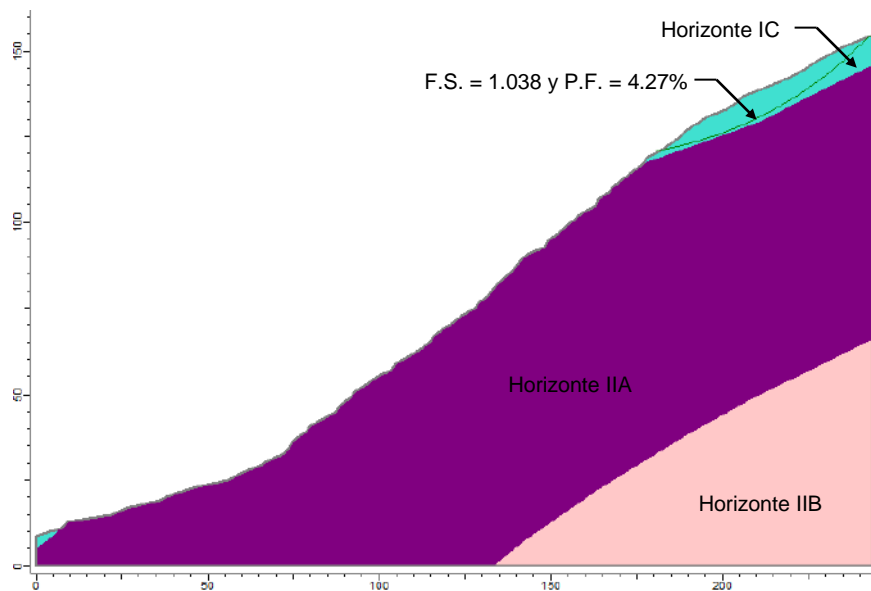
**Figura 198. Análisis de estabilidad del Perfil 1 cercano a Foco 28, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



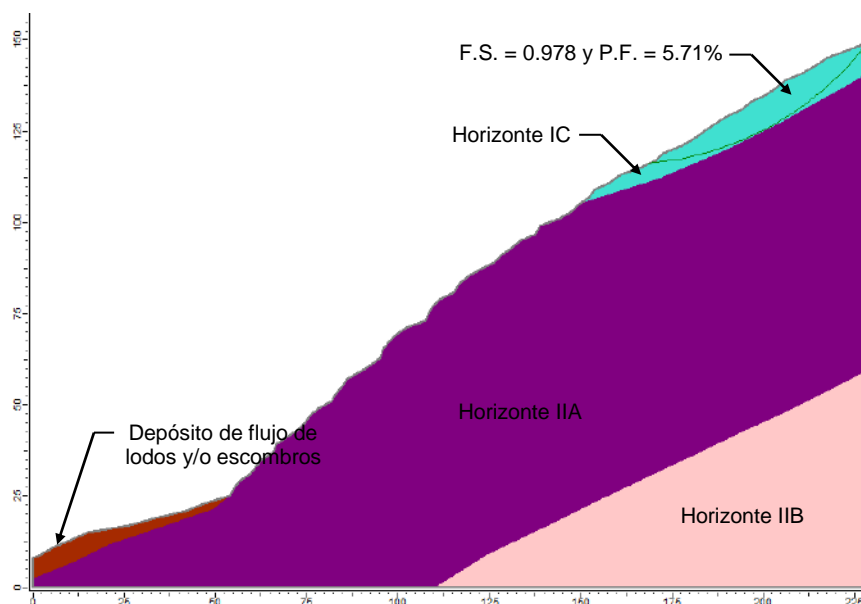
**Figura 199. Análisis de estabilidad del Perfil 2 cercano a Foco 27, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



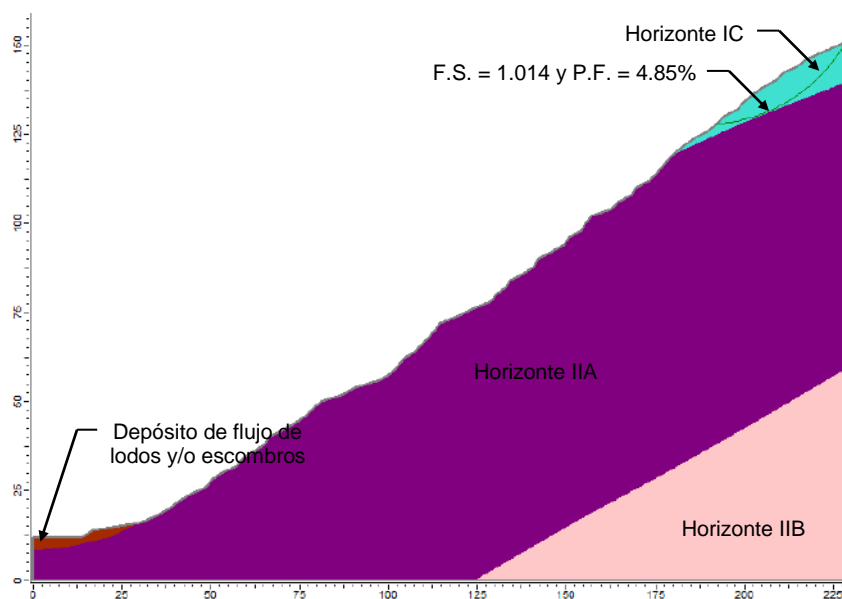
**Figura 200. Análisis de estabilidad del Perfil 3 cercano a Foco 5, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



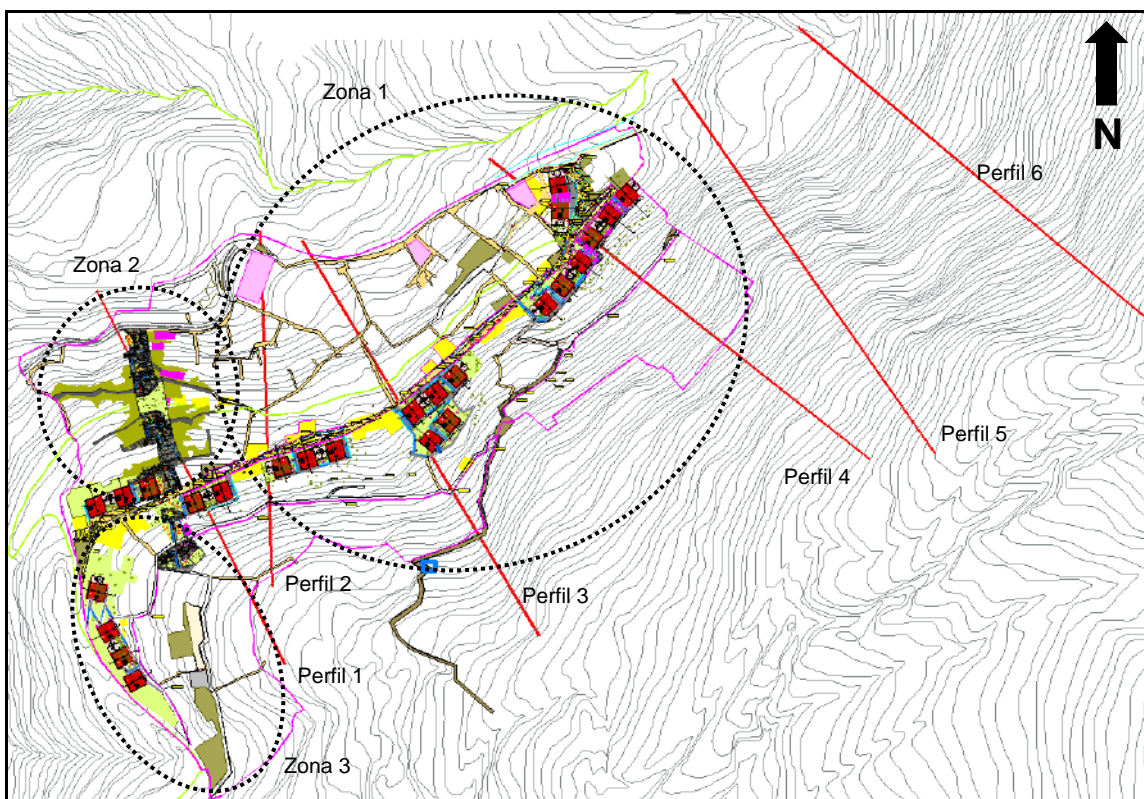
**Figura 201. Análisis de estabilidad del Perfil 4 cercano a Foco 23, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



**Figura 202. Análisis de estabilidad del Perfil 5 cercano a Foco 24, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



**Figura 203. Análisis de estabilidad del Perfil 6 cercano a Foco 25, considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**

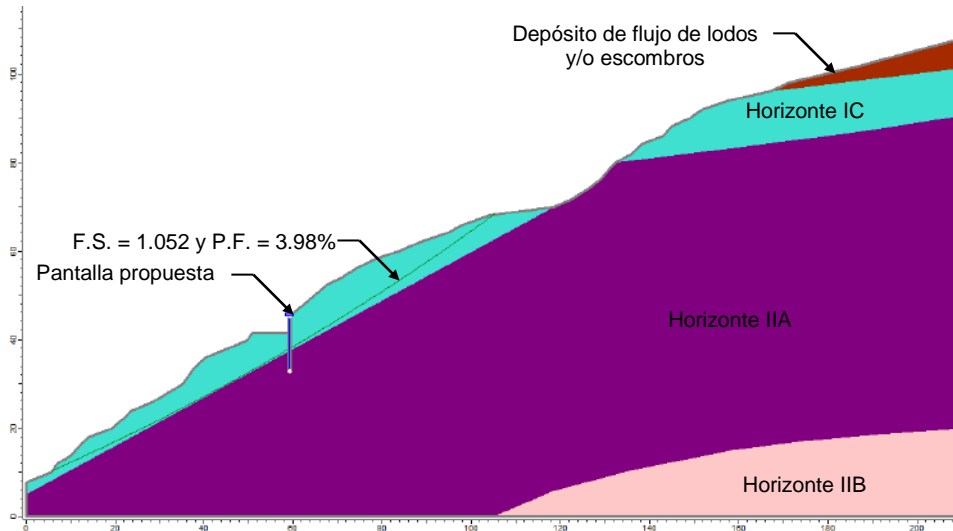


**Figura 204. Esquema de localización en planta de los Perfiles 1 a 6 cercanos a los Focos 5, 23, 24, 25, 27 y 28 incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles**

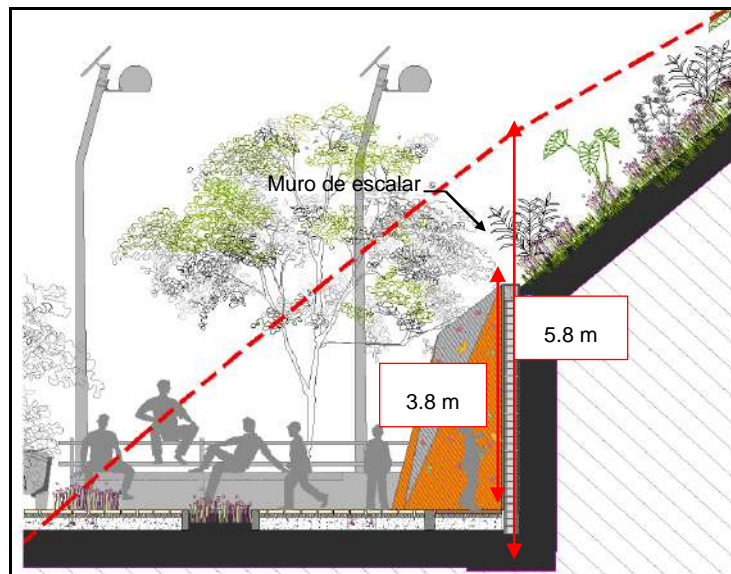
En la Figura 205 se presentan los resultados para el Perfil 1 obtenido en la Zona 2, donde se observa que una pantalla de pilas que intercepte la superficie de falla mostrada en la Figura 198, da como resultado un incremento en el factor de seguridad pseudoestático, pasando de  $FS=0.906$  a  $FS=1.052$ , con la consecuente disminución a valores más aceptables de la probabilidad de falla pasando de  $PF_{50años}=7.10\%$  (amenaza alta) a  $PF_{50años}=3.98\%$  (amenaza media).

La localización de la pantalla de pilas en el punto indicado es clave, dado que al aumentar el factor de seguridad de la ladera, no sólo beneficia a las viviendas por debajo de la pantalla, sino a aquellas enmarcadas en la superficie de falla mostrada. Adicionalmente, la posición de la pantalla coincide con uno de los cortes y muro de contención planteado por el Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente para un muro de escalar, para el cual se requiere un corte aproximado de 5.80 m, quedando una altura de muro de 3.80 m como se muestra en la Figura 206. Por su parte, en la Figura 207 se presenta el esquema de solución propuesto de acuerdo con la geometría del muro planteada para el Proyecto Barrios Sostenibles. En los Anexos 08 y 09 se presentan las memorias de diseño de la alternativa propuesta, con los respectivos planos.

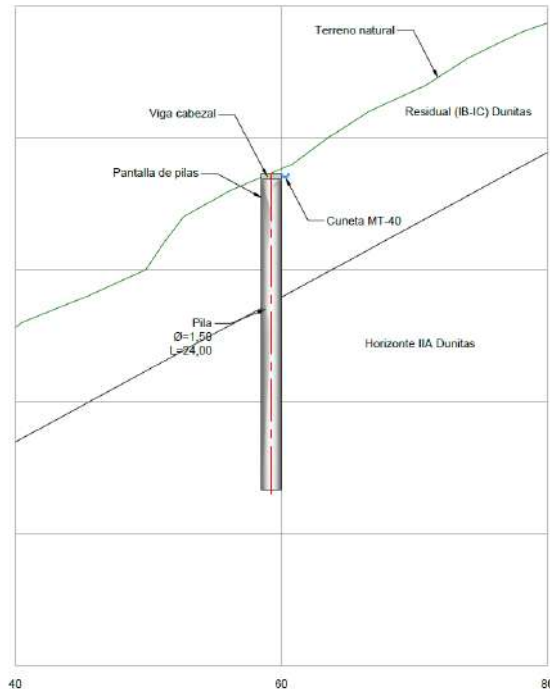




**Figura 205. Análisis de estabilidad del Perfil 1 cercano a Foco 28 implementando solución en pantalla de pilas considerando variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo**



**Figura 206. Muro de escalar planteado para el proyecto Barrios Sostenibles**





**Figura 207. Esquema de la solución propuesta para el Perfil 1**

Se recomienda que el diseño de la contención mencionada se realice de acuerdo con las necesidades del Proyecto Barrios Sostenibles. Sin embargo, se presentan a continuación las especificaciones mínimas para que se tenga la disminución esperada en las probabilidades de falla y aumentos en los factores de seguridad planteados en términos de estabilidad global de la zona:

- ✓ Diámetro mínimo de las pilas que componen la pantalla  $D=1.5$  m.
- ✓ Separación máxima de las pilas que componen la pantalla  $Sh=3$  m.
- ✓ Profundidad total de la pantalla  $L=24$  m. De los cuales 3.80 m serían exentos y los restantes cumplirían su función de interceptar la superficie de falla y además empotrarse por debajo de ella dentro del Horizonte IIA de las Dunitas.
- ✓ La longitud total de la pantalla ubicada en planta sería de unos 76 m, contemplando la construcción de aproximadamente 26 pilas.

En el Anexo 08 se presentan las memorias de diseño de esta obra de mitigación planteada. En los Planos P-2445-G-OM-01 y P-2445-G-OM-02 se presenta la localización y los detalles de la obra planteada para la mitigación del riesgo por movimientos en masa en este polígono de estudio.

En la Zona 1 se analizaron diferentes perfiles representativos para el análisis del riesgo, del Perfil 2 al 4. Para el Perfil 2, cercano al Foco 27, donde se obtuvo una probabilidad de falla normalizada a 50 años de  $PF=4.35\%$ , la cual corresponde a una amenaza media, se

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

recomienda la no intervención de la ladera con medidas de gran envergadura. En su lugar, se considera adecuada la implementación de alternativas que incluyan manejo adecuado de aguas y medidas que prevengan la erosión como la instalación de trinchos donde se requiera. Así mismo, debe contemplarse campañas de capacitación para los habitantes de la zona que permitan generar conciencia sobre la importancia de descargar adecuadamente aguas residuales, así como la disposición adecuada de mangueras que conducen agua potable, dado que ambas se puede convertir en desencadenantes de fenómenos de inestabilidad.

Con base en los resultados de los análisis de estabilidad de los Perfiles 3 a 6, correspondientes a focos de inestabilidad ubicados por fuera del Polígono Golondrinas, en una ladera no urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el saprolito de las Dunitas de Medellín, se considera que su intervención para mitigación del riesgo debe restringirse a obras menores, tales como cunetas para manejo de aguas de escorrentía concentrada y trinchos para controlar problemas de erosión puntuales, además de una reforestación adecuada para fines de estabilidad de las zonas desprovistas de vegetación. No se considera viable la intervención por medio de movimientos de tierras o pantallas de contención de una ladera natural. Las probabilidades de falla obtenidas son relativamente aceptables como para que con obras como las mencionadas se pueda considerar mitigable el riesgo.

Así las cosas, en el Polígono Golondrinas se recomienda la construcción de la pantalla de pilas propuesta según los análisis de estabilidad del Perfil 1 en la Zona 2, cercano al Foco 28. En cuanto a la Zona 1, ladera donde se ubican los Focos 5, 23, 24, 25 y 27 (Perfiles 2 al 6) se recomiendan obras menores, tales como cunetas para manejo de aguas de escorrentía concentrada, trinchos para controlar problemas de erosión puntuales y capacitaciones a la población especialmente dirigidas al manejo del agua potable (transportada a través de tuberías de manera desordenada), así como al manejo de aguas residuales. Como se observa, todas las obras propuestas van encaminadas a evitar la infiltración de agua al terreno, así como controlar la erosión, fenómenos que suelen ser desencadenantes de movimientos en masa. En la Zona 1 se recomienda la reubicación de dos estructuras, ya que presentan vulnerabilidad alta y se localizan en zonas de amenaza alta ante movimientos en masa.

En concordancia con las soluciones propuestas para los Perfiles del 2 al 6 se presentan a continuación imágenes que muestran ejemplos de tales soluciones aplicadas a sitios puntuales ubicados en la zona.

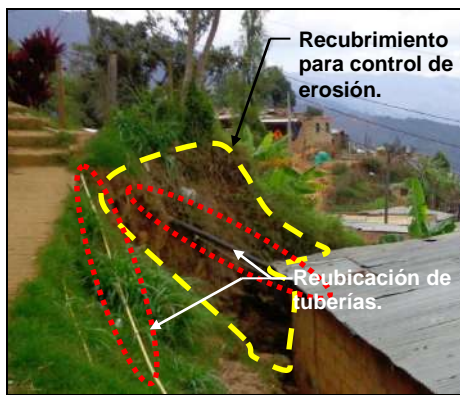


**Figura 208. Zonificación del Polígono Golondrinas de acuerdo con focos de inestabilidad**





**Figura 209. Imagen asociada al Perfil 2 (Foco 27)**



a) Imagen asociada a Foco 26



b) Imagen asociada a Foco 26

**Figura 210. Localización general de obras de mitigación propuestas para el Foco 26**





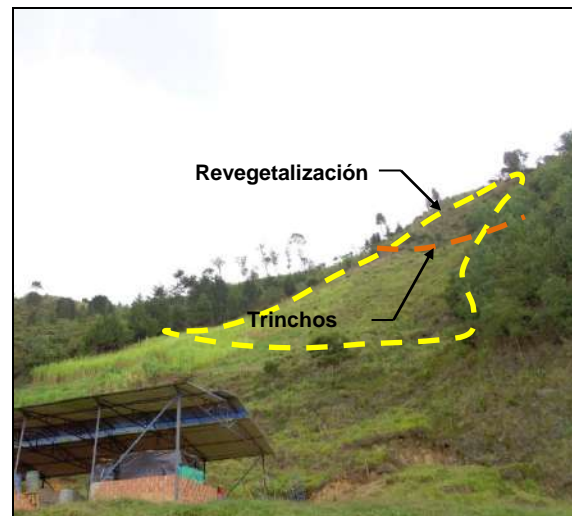
a) Imagen asociada a Perfiles 3, 4, 5 y 6



b) Imagen asociada a Perfil 3





c) Imagen asociada a Perfil 4



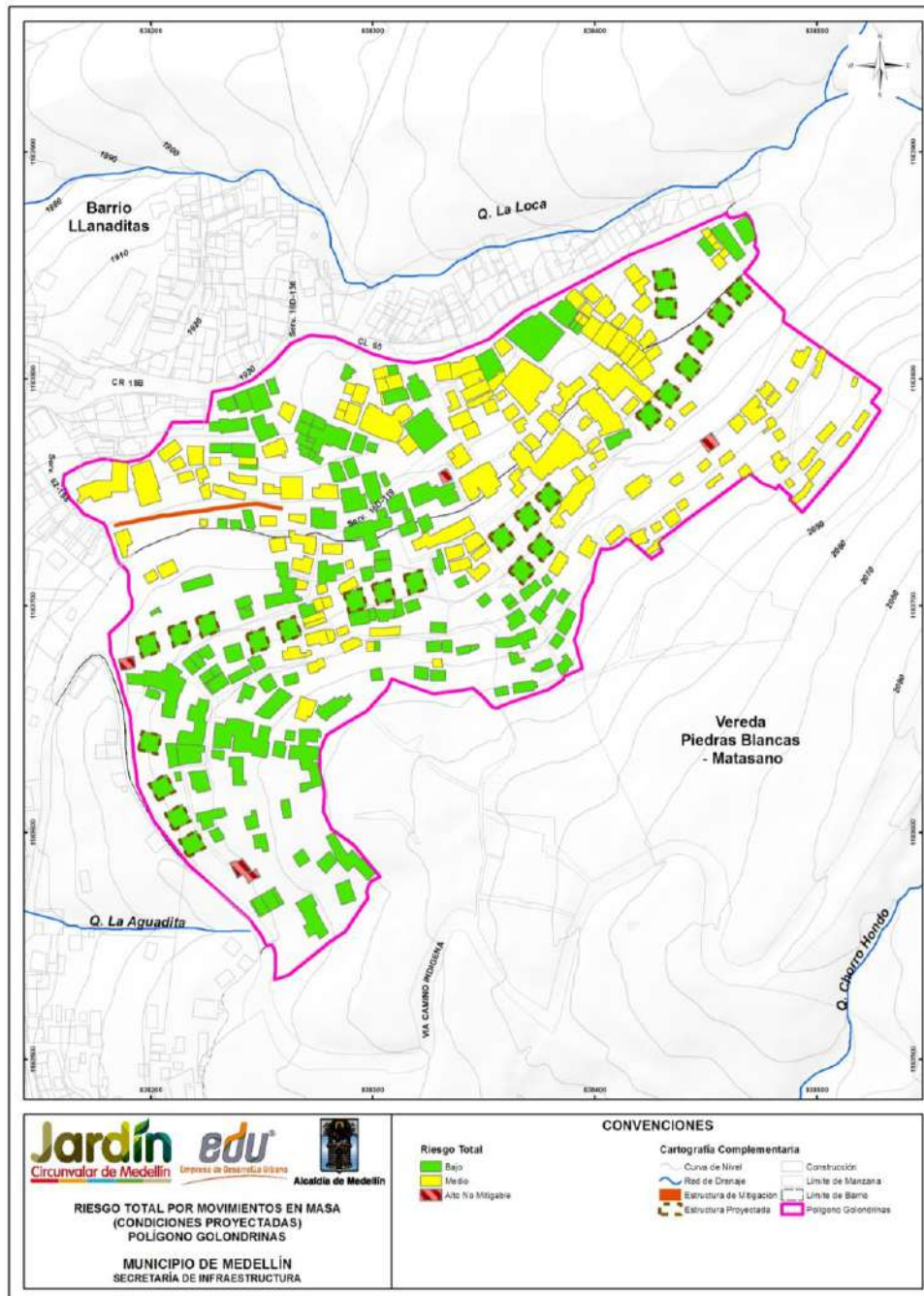
d) Imagen asociada a Perfil 5

**Figura 211. Localización general de obras de mitigación propuestas para los Perfiles 3, 4, 5 y 6**

Finalmente, para la Zona 3 la mejor alternativa analizada es la reubicación de las viviendas que fueron catalogadas en alto riesgo, debido a que se localizan en zonas de amenaza alta y la resistencia estructural de la mayoría de ellas es baja dado que fueron construidas en madera. Además se recomienda que todos los proyectos que se tengan planteados en esos sectores consideren la implementación de las cimentaciones profundas.

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

Considerando las observaciones hechas en cuanto a intervenciones recomendadas para el Polígono Golondrinas, el mapa de riesgo total final quedaría como se muestra en el Mapa 71. Se han incluido las obras proyectadas para mitigación del riesgo al interior del polígono. En el Anexo 07 se presentan las fichas de alternativas analizadas para cada una de las zonas del Polígono Golondrinas.



**Mapa 71. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (46\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto\_Medellin\_C y 46\_GOLRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto\_Medellin\_T)**

Con el fin de monitorear y evaluar la efectividad de sistema de estabilización propuesto en el Polígono Golondrinas para el área asociada al Perfil 1, luego de efectuado el análisis de riesgo por movimientos en masa, se propone la instalación de un inclinómetro en una de las pilas de la pantalla, esto con la finalidad de monitorear los desplazamientos en la zona a largo plazo y poder establecer mecanismos de alarma. Además, se recomienda una frecuencia de monitoreo mínimo de una lectura mensual durante el primer año después de construidas las pantallas y dependiendo de los resultados de dicho monitoreo, sí no se detectan desplazamientos considerables en la zona, se recomienda un monitoreo preventivo de tres lecturas al año. A seguir se presentan algunos aspectos generales sobre los inclinómetros:

Las deformaciones laterales del terreno, en lo que tiene que ver con magnitud, dirección y profundidad de los movimientos, se monitorean con ayuda de los inclinómetros. Estos equipos, se deberán instalar en las zonas donde se proyectan la construcción de las pilas de los muros pantallas recomendados. De esta forma se podrá evaluar el comportamiento de las pantallas después de efectuado las labores correspondientes.

Estos elementos consisten de una tubería ranurada diametralmente, la cual se instala dentro de una perforación efectuada en un terreno en el que se sospecha que están ocurriendo o pueden ocurrir movimientos (Figura 212). Adicionalmente, se debe contar con un torpedo, el cual se usa primero para medir la posición inicial de la tubería cuando acaba de ser instalada y luego para medir las posiciones sucesivas de la tubería cuando esta se va moviendo.



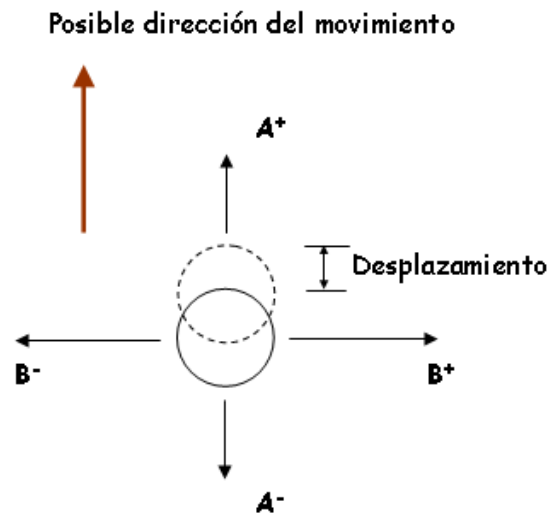
**Figura 212. Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente  
(Tomada de Roctest y Telemac)**

La función de la tubería es entonces proveer el acceso para el torpedo de lecturas. Las ranuras longitudinales marcadas en el interior de la tubería, controlan la orientación del torpedo y proveen una superficie desde la cual se pueden hacer lecturas repetibles.



Al instalar el inclinómetro se debe buscar que una de las ranuras quede en el mismo sentido en que se espera ocurra el movimiento, el cual se denomina convencionalmente Sentido A. Las ranuras ubicadas a 90° del Sentido A constituyen el denominado Sentido B y normalmente permiten controlar una orientación en la que no se esperan mayores movimientos.

Como se muestra en la Figura 213, se habla tanto del Sentido A+ como del Sentido A- y tanto del Sentido B+ como del Sentido B-. El Sentido A+ queda orientado hacia la dirección donde se espera que se den los mayores movimientos (pendiente abajo) y el Sentido A- en dirección contraria (pendiente arriba). Según esto, los Sentidos A-, B+ y B- se encuentran orientados hacia donde no se espera que se den mayores movimientos.



**Figura 213. Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros**



Esta información se ha presentado con el objetivo de orientar en los procesos de contratación de esta instrumentación. Específicamente la tubería mostrada en la Figura 212 es especialmente recomendada por el material del cual es hecha (Plástico ABS) y porque sus empalmes son internos de manera que reduce costos en la perforación por el diámetro dentro del cual se puede instalar.

Con el estudio se presenta el Anexo 08 con las memorias de diseño de las obras de mitigación planteadas y el Anexo 09 con los Planos P-2445-G-OM-01 y P-2445-G-OM-02, en los que se presentan la localización y los detalles de la obra planteada para la mitigación del riesgo por movimientos en masa en este polígono de estudio.

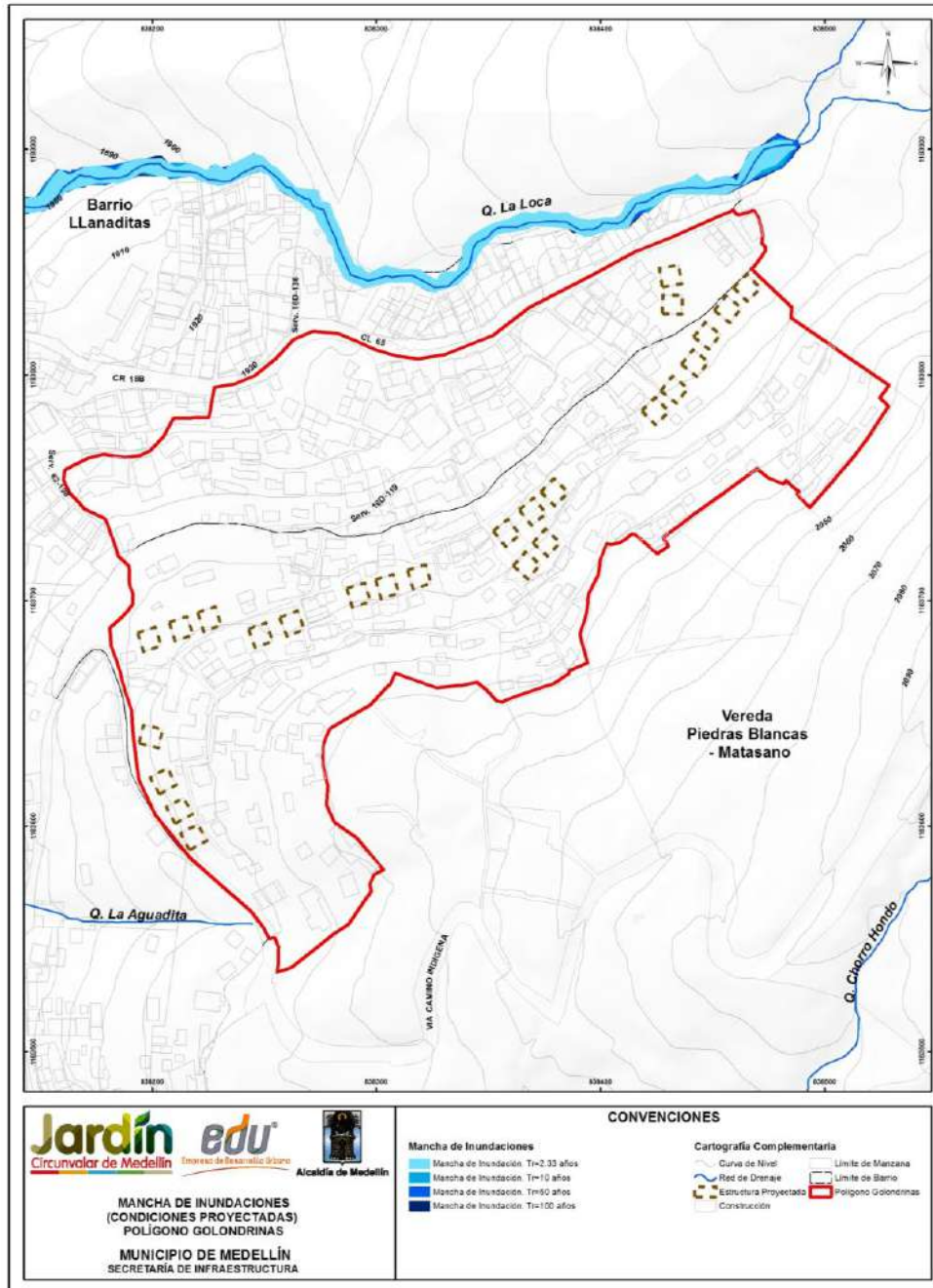
## **20.2 OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES**

Debido a que los límites de afectación de la Quebrada La Loca (única y principal corriente natural cerca del polígono de estudio), se encuentran por fuera del polígono y por ende no hay ni viviendas ni estructuras que puedan ser afectadas por fenómenos de inundación y

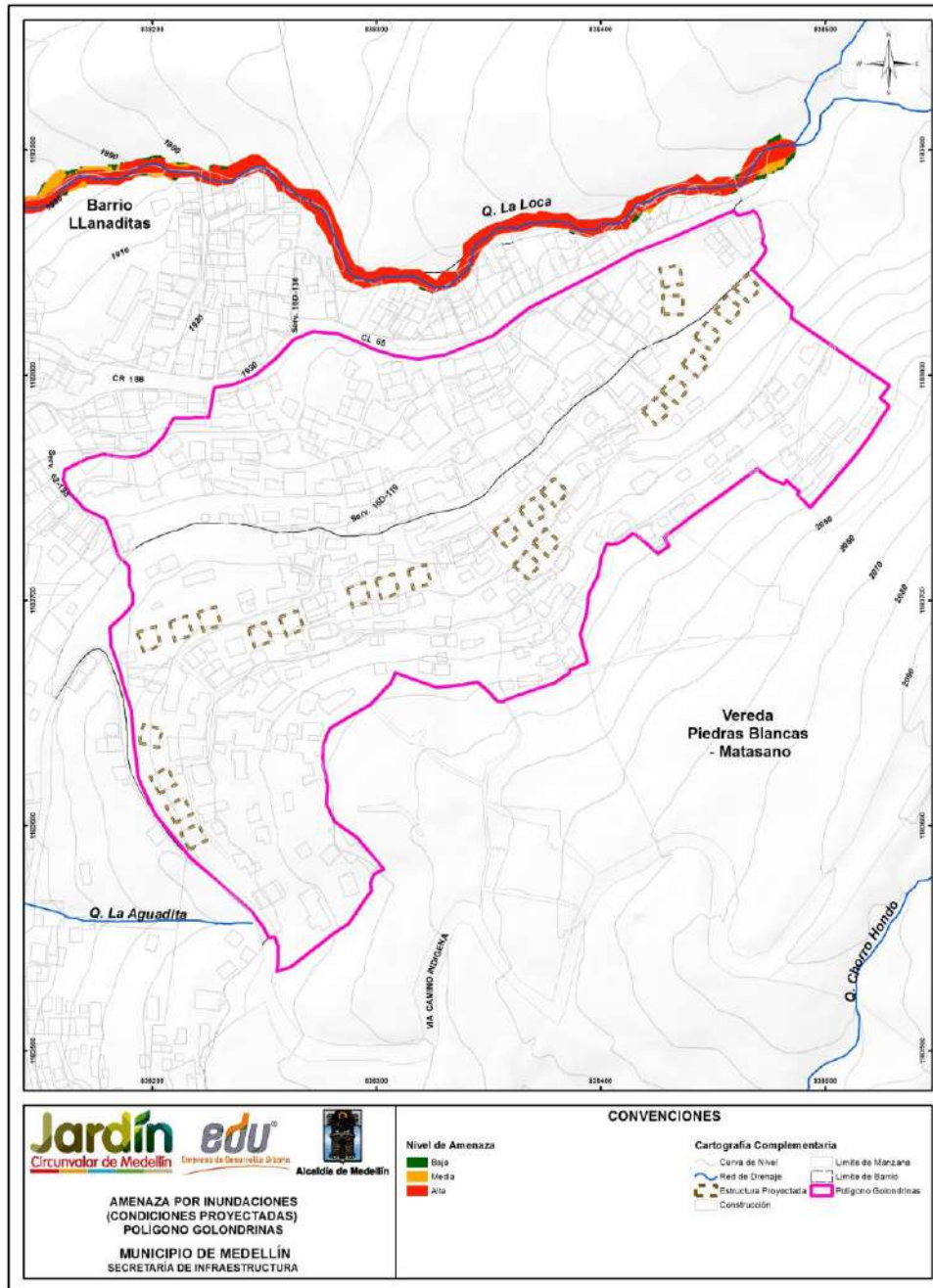


	<p align="center"> <b>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</b>   <b>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</b>   <b>INFORME POLIGONO GOLONDRINAS</b> </p>	
---	--	---

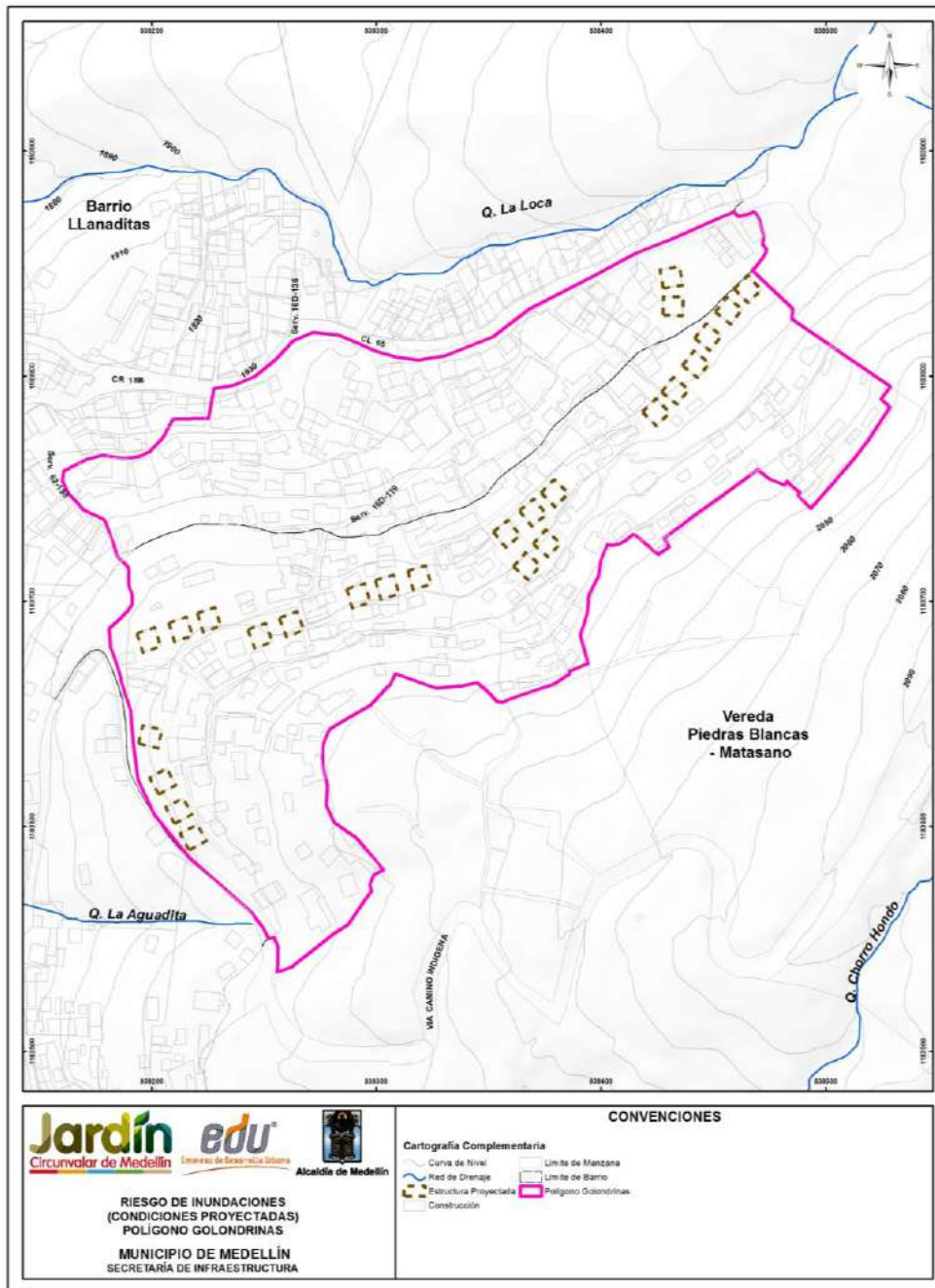
avenidas torrenciales, no se requieren obras de mitigación ya que no existe ningún riesgo que afecte al polígono, lo anterior se puede observar en el Mapa 72, el Mapa 73, el Mapa 74, el Mapa 75, el Mapa 76 y Mapa 77. En el Mapa 78 se muestra el retiro a la quebrada planteado por el POT (2014) y el retiro hidrológico en condición proyectada obtenido del presente estudio, aclarando, que la extensión de la mancha está asociada al caso más crítico, es decir, inundación por avenidas torrenciales.



**Mapa 72. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas. Polígono Golondrinas.**  
(22\_GOLManchaInundacionesCondProyecto\_Medellin\_C y 22\_GOLManchaInundacionesCondProyecto\_Medellin\_T)

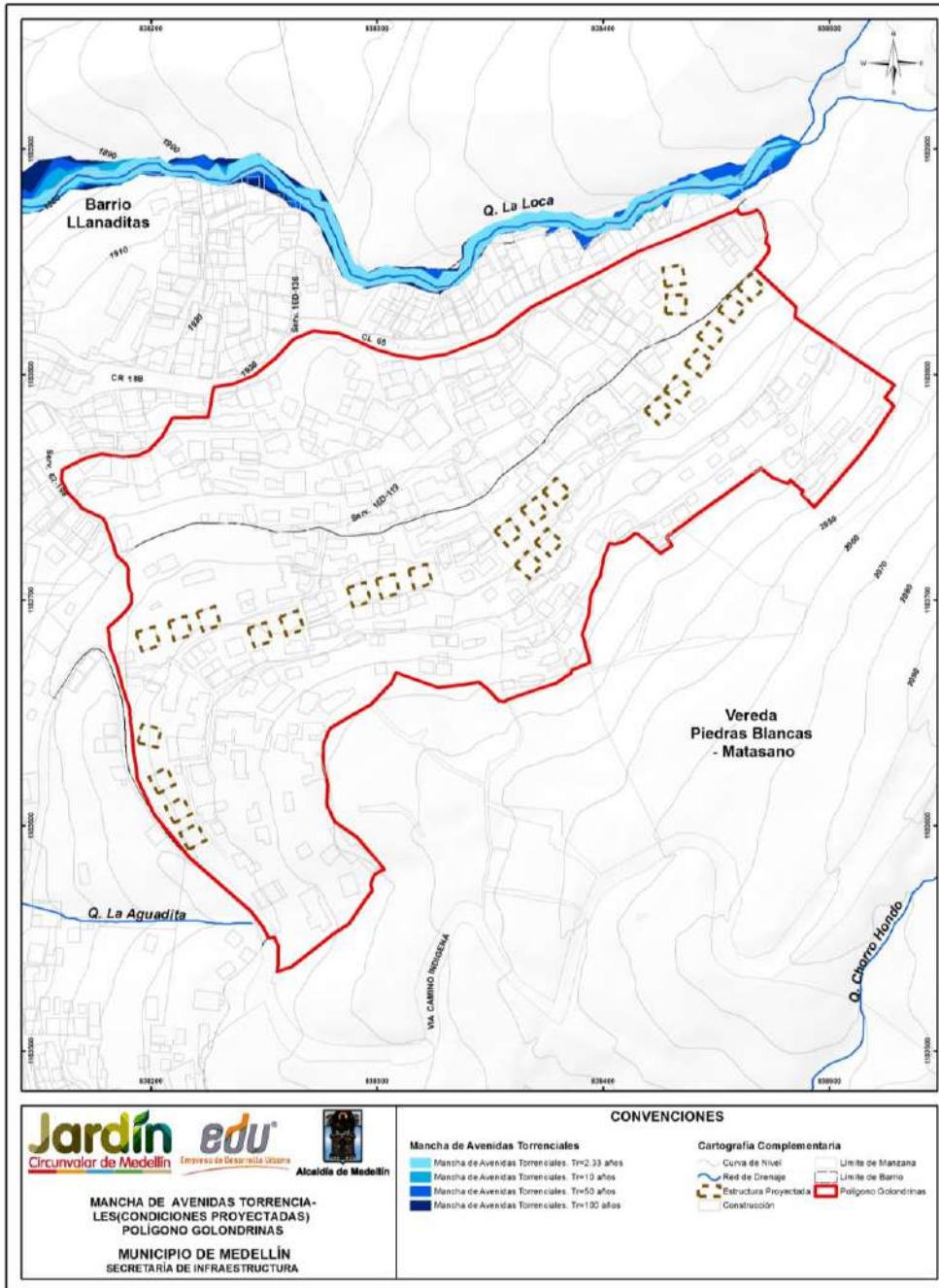


**Mapa 73. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en la Quebrada La Loca. Polígono Golondrinas.**  
 (26\_GOLAmenazalnundacionesCondProyecto\_Medellin\_C y 26\_GOLAmenazalnundacionesCondProyecto\_Medellin\_T)



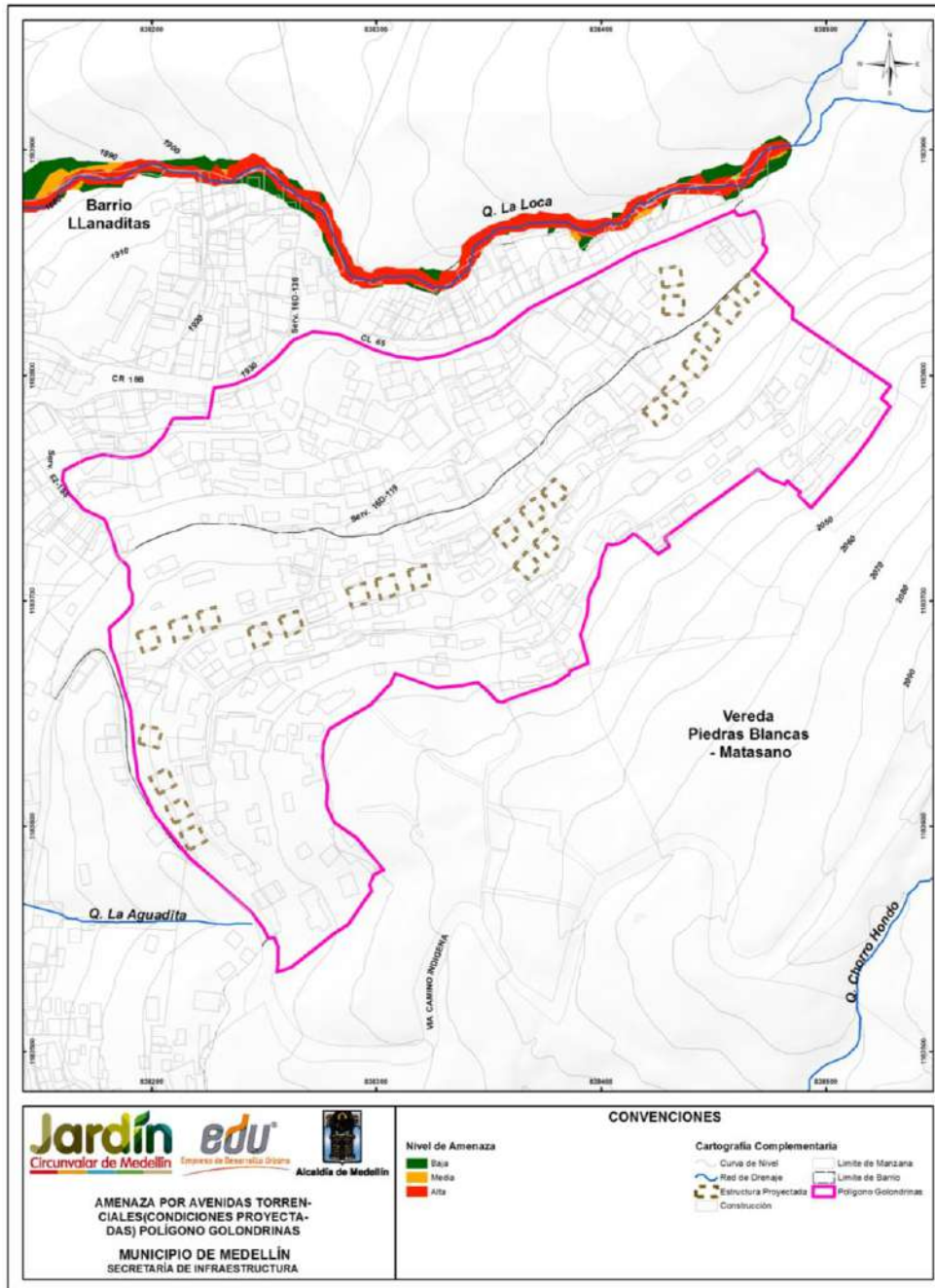
**Mapa 74. Análisis de riesgo por inundaciones para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (48\_GOLRiesgolnundacionesCondProyecto\_Medellin\_C y 48\_GOLRiesgolnundacionesCondProyecto\_Medellin\_T)**



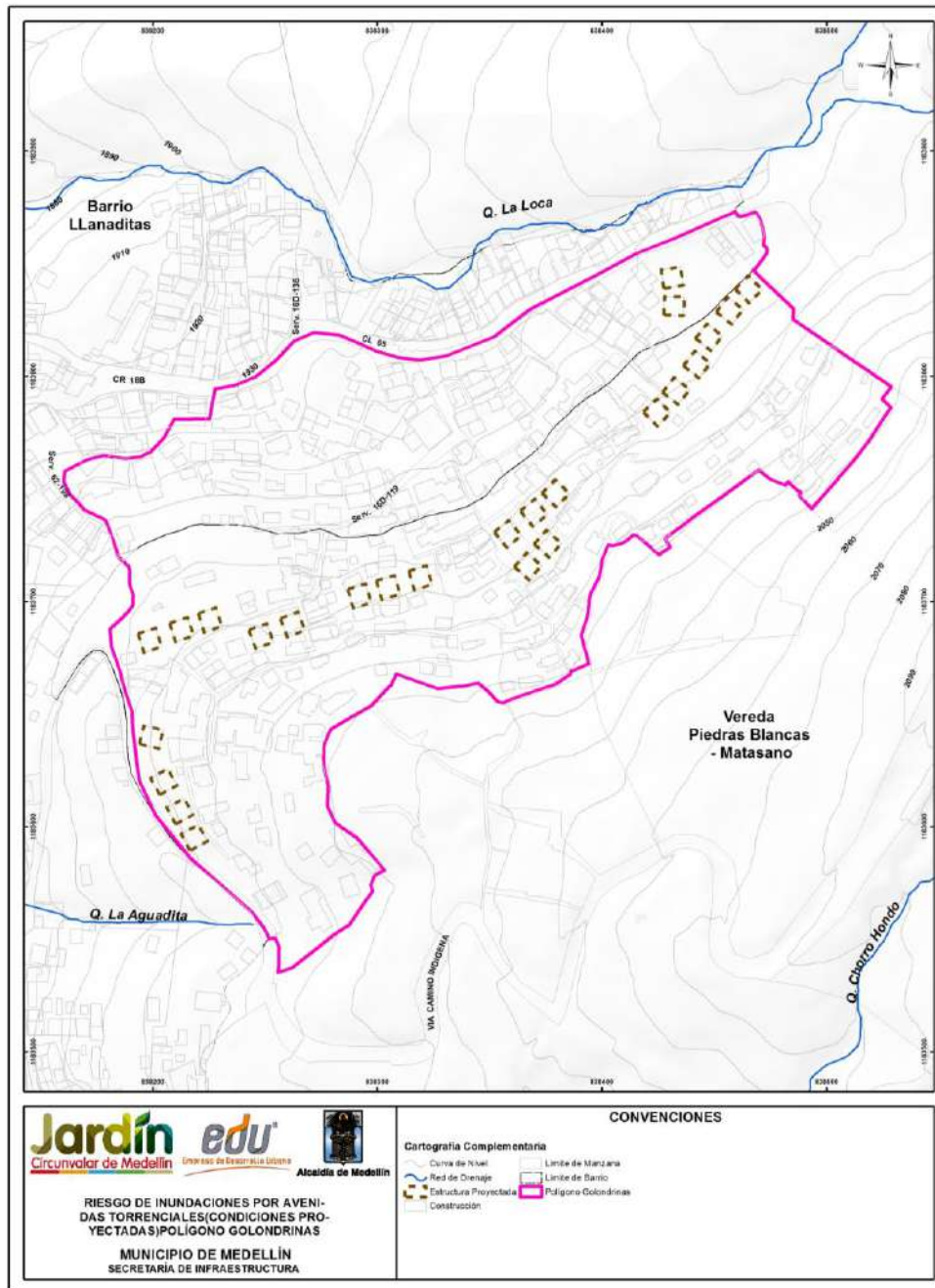


**Mapa 75. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3)**  
 (24\_GOLManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_C y  
 24\_GOLManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T)

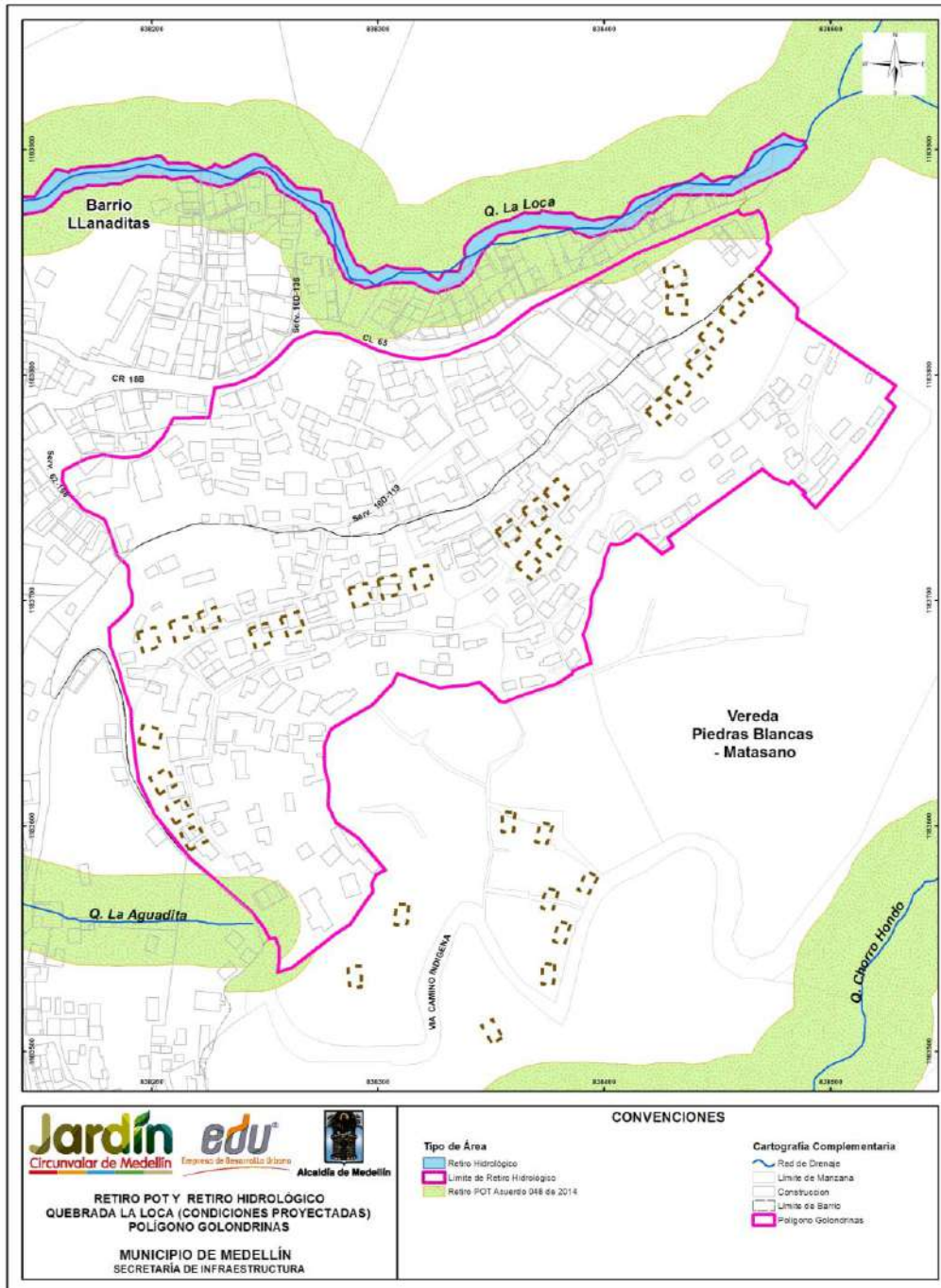




**Mapa 76. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (Cv=0.3)**  
**(28\_GOLAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_C y 28\_GOLAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T)**





Mapa 77. Análisis de riesgo por torrencialidad para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono Golondrinas (50\_GOLRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_C y 50\_GOLRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto\_Medellin\_T)



Mapa 78. Retiro POT y retiro hidrológico por avenidas torrenciales para las Quebrada La Loca  
(GOLRetiroPOT-RetiroHidrológicoyGeológico\_Medellin\_C)



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

## 21. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zona de estudio se localiza en la parte alta de la ladera centro oriental, entre los límites rurales y urbanos de la ciudad de Medellín. Los polígonos correspondientes al “Proyecto Barrios Sostenibles”, se encuentran ubicados en su mayoría en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique).



El Polígono Golondrinas se encuentra ubicado en el Barrio Llanaditas y sus sectores El Faro, Golondrinas, Altos de La Torre y El Pacífico, además de una parte de la zona rural del Corregimiento Santa Elena en las Veredas Piedras Blancas – Matasano, Media Luna y una pequeña porción de Mazo, teniendo a su vez ocupación en sectores de las cuencas de las Quebradas La Castro, Chorro Hondo, La Aguadita, La Loca, El Ahorcado y una pequeña fracción de la del Ñato. El Sector Golondrinas se ubica en la zona norte del Cerro Pan de Azúcar, en límites con los predios del Batallón de Girardot y pertenece al Barrio Llanaditas. El Polígono Golondrinas, el cual tiene un área aproximada de 5.27 hectáreas, limita con la Comuna 3 en la ladera oriental de la ciudad.

De este polígono, se ha efectuado el estudio de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del mismo. Se tuvieron en cuenta tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan el Polígono Golondrinas, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

La UMI asociada al polígono de estudio en el Barrio Golondrinas, comparte UMI con el Polígono El Faro. La inclusión de los Polígonos El Faro y Golondrinas dentro de una misma UMI, resulta como consecuencia de su proximidad. La selección inicial de cada UMI para estos polígonos generó que ambas presentaran una intercepción mayor al 80% en su área de influencia, es decir, más de la mitad del área de una UMI consideraba el área de la UMI vecina, con procesos en común para ambas. Por lo anterior, para efectos de optimizar los trabajos de análisis, ambas UMIS se unificaron. Finalmente la denominada en este estudio como UMI El Faro - Golondrinas tiene un área aproximada de 158 hectáreas aproximadamente y corresponde a los Polígonos El Faro y Golondrinas.

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

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

De forma general, la UMI se localiza en el centro de la Comuna 8 y se posiciona en el extremo norte del Proyecto Barrios Sostenibles, limitando al sur con la UMI del Polígono Trece de Noviembre, al oriente con la UMI Esfuerzos de Paz y Villa Turbay y hacia la zona occidental con el Barrio Llanaditas. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI se encuentra acotada principalmente en sus flancos sur, norte y oriente por la presencia física de algunas divisorias de aguas.

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:



Las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. Se presentan los Horizontes IC y IIA del perfil de meteorización de las Dunitas de Medellín, el Horizonte IC hacia el extremo sur, y el Horizonte IIA en el extremo noreste. Suprayaciendo las unidades anteriores se encuentran depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) en el centro del polígono y llenos antrópicos (Qll) en la parte norte.

Como parte del análisis morfodinámico de la UMI El Faro-Golondrinas, se llevó a cabo el análisis multitemporal con la fotointerpretación de las 103 fotografías aéreas recopiladas, correspondientes a 13 líneas de vuelo para el período comprendido entre 1959 y 1998 y con escalas variables entre 1:3.200 y 1:21.700. Los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente activos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y socavación lateral. Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas, así mismo los bloques del macizo que sobresalen en superficie y que se encuentran muy fracturados son propensos a desprenderse.

En cuanto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro - Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad (Figura 61).

El mapa de aptitud geológica-geotécnica fue generado a partir de las formaciones geológicas superficiales, unidades geomorfológicas y procesos morfodinámicos. Las formaciones superficiales corresponden a los horizontes de meteorización IC y IIA de las Dunitas de Medellín (JKuM), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósito de deslizamiento (Qd), cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ y llenos antrópicos



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



(QII) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. Las unidades geomorfológicas predominantes de la UMI El Faro - Golondrinas son las unidades de lomos tales como Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM y Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF y los procesos morfodinámicos encontrados son predominantemente activos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y socavación lateral. Finalmente el mapa de aptitud geológica-geotécnica indica que la proporción de las zonas aptas con restricciones moderadas, aptas con restricciones altas, no aptas y no aptas por normatividad es similar en toda la UMI. Al interior del Polígono Golondrinas dominan las zonas aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones altas.

En lo relacionado con los **Aspectos Geotécnicos** tanto de la UMI como del polígono, refiriéndose estos principalmente a la caracterización de los materiales determinados por medio de la exploración del subsuelo:

Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron pruebas de laboratorio sobre las muestras alteradas e inalteradas recuperadas por medio de los sondeos exploratorios. El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son humedad natural, límites de consistencia, granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 y gravedad específica. Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo para condiciones consolidadas drenadas. La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales.

Todos los ensayos recopilados sugieren, como era de esperarse, una variabilidad considerable de las propiedades geotécnicas de los materiales. Por esto, se realizó un análisis estadístico de las propiedades de los materiales que conformando el perfil geotécnico típico, representan mayor amenaza para el proyecto. Estos análisis son necesarios para la aplicación de cualquier método probabilístico que permita encontrar la probabilidad de falla de una ladera, objetivo primordial de este estudio. Por tal razón, se requiere una gran cantidad de información en términos de parámetros de resistencia, por lo que se consideró conveniente unir todos aquellos ensayos de las diferentes UMI o polígonos que caracterizarán los diferentes estratos u horizontes del proyecto.

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

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



estándar. Adicionalmente, fue calculado la covarianza o coeficiente de variación (COV) de cada uno de los parámetros.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza total por movimientos en masa para 50 años, teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g, se hacen los siguientes comentarios:

- ✓ Los identificados en el Mapa 49 como Focos 5, 23, 24 y 25, 26, 27 y 28 son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda. La mayor parte de las zonas que alcanzan a afectar estos focos generan factores de intensidad en los rangos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.34. Es importante resaltar el hecho de que las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 48, presentan vulnerabilidad física por movimientos en masa de media, es decir, en el rango que va de 0.3 a 0.7.
- ✓ Se puede hablar de un conjunto de focos localizados por fuera del Polígono Golondrinas, en la ladera ubicada al costado noroccidental del mismo. Se trata principalmente de los identificados como Focos 5, 23, 24 y 25. Son sitios potencialmente inestables, ubicados en una ladera no urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el saprolito de las Dunitas de Medellín. En la zona se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera, en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas.
- ✓ Al interior del Polígono Golondrinas se pueden citar principalmente los Focos 26, 27 y 28. De éstos, el de mayor afectación resulta ser el Foco 28, con una probabilidad de falla del orden del 9.8%. Se localiza al interior del polígono afectando un total de dos viviendas, desarrollándose sobre saprolito de la Dunita de Medellín en una zona urbanizada. En la zona también se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos. De estos focos, resultan especialmente importante los dos últimos, los cuales generan dentro del Polígono Golondrinas rangos del factor de intensidad, en los intervalos que van de 0.42 a 0.52 y de 0.53 a 1.34. Prácticamente todas las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 48, presentan vulnerabilidad física por movimientos en masa de media, es decir, en el rango que va de 0.3 a 0.7.

Desde el punto de vista del riesgo por movimientos en masa, se pudo determinar que es más crítico el resultado en términos de porcentaje de pérdidas económicas, el cual da



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

lugar a un gran número de viviendas con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad por fuera del Polígono Golondrinas, en su costado nororiental, la responsable principal de los resultados obtenidos en la Zona 1. Mientras que en la Zona 2 y la Zona 3, las estructuras se encuentran principalmente amenazadas por estar inmersas en una masa de suelo potencialmente inestable.

Así las cosas, se procedió con la ejecución de análisis de estabilidad localizados por medio de secciones transversales distribuidas en las Zonas 1 y 2, y las cuales consideraran la localización del foco de inestabilidad y el sentido de la trayectoria principal de estos. Cuatro secciones se encuentran al interior del Polígono Golondrinas (Perfiles 1 a 4) y dos de ellas por fuera del mismo (Perfil 5 cercano a Foco 24 y Perfil 6 cercano a Foco 25). El Perfil 1 es representativo de la Zona 2 y los Perfiles 2 al 4, representan la Zona 1, según la división realizada del Polígono Golondrinas. Se analizaron en condiciones actuales, pero teniendo en cuenta la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. Considerando los resultados obtenidos, se ratifica el hecho de que los focos detectados por medio de la evaluación de riesgo representan superficies de falla que se generan a través del saprolito de las Dunitas de Medellín. La forma de las superficies de falla permite validar además los detectados como focos más probables, esto por cuanto se trata de superficies de falla que inician más o menos donde está localizado el foco. Las probabilidades de falla son algo más bajas que las obtenidas por medio de la metodología utilizada para evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Los análisis para el Perfil 1 (Zona 2), ubicado por el costado occidental del polígono, cercano al Foco 28, permiten determinar que la implementación de pantallas de contención profundas ayudaría a disminuir el riesgo, dando como resultado un incremento en el factor de seguridad pseudoestático, pasando de 0.943 a 1.082, con la consecuente disminución a valores más aceptables de la probabilidad de falla pasando de 6.26% (amenaza alta) a 3.15% (amenaza baja). La localización de la pantalla de pilas en el punto indicado es clave, dado que al aumentar el factor de seguridad de la ladera, no sólo beneficia a las viviendas por debajo de la pantalla, sino a aquellas enmarcadas en la superficie de falla mostrada. Adicionalmente, la posición de la pantalla coincide con uno de los cortes y muro de contención planteado por el Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente para un muro de escalar, para el cual se requiere un corte aproximado de 5.80 m, quedando una altura de muro de 3.80 m. Se recomienda que el diseño de la contención mencionada se realice de acuerdo con las necesidades del Proyecto Barrios Sostenibles. Sin embargo, se presentan a continuación las especificaciones mínimas para que se tenga la disminución esperada en las probabilidades de falla y aumentos en los factores de seguridad planteados en términos de estabilidad global de la zona:

- ✓ Diámetro mínimo de las pilas que componen la pantalla  $D=1.5$  m.
- ✓ Separación máxima de las pilas que componen la pantalla  $Sh=3$  m.

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



- ✓ Profundidad total de la pantalla  $L=12.5$  m. De los cuales 3.80 m serían exentos y los restantes cumplirían su función de interceptar la superficie de falla y además empotrarse 3D (4.5 m) por debajo de ella dentro del Horizonte IIA de las Dunitas. Esta longitud sólo debe entenderse como un mínimo para la mejora de la seguridad global de la ladera, de manera que debe revisarse su estabilidad interna de acuerdo con las necesidades finales del proyecto.
- ✓ La longitud total de la pantalla ubicada en planta sería de unos 76 m, contemplando la construcción de aproximadamente 26 pilas.

Con base en los resultados de los análisis de estabilidad realizados en la Zona 1, Perfiles del 2 al 6, correspondientes a focos de inestabilidad ubicados por fuera del Polígono Golondrinas, en una ladera no urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el saprolito de las Dunitas de Medellín, se considera que su intervención para mitigación del riesgo debe restringirse a obras menores, tales como cunetas para manejo de aguas de escorrentía concentrada y trinchos para controlar problemas de erosión puntuales, además de una reforestación adecuada para fines de estabilidad de las zonas desprovistas de vegetación. No se considera viable la intervención por medio de movimientos de tierras o pantallas de contención de una ladera natural. Las probabilidades de falla obtenidas son relativamente aceptables como para que con obras como las mencionadas se pueda considerar mitigable el riesgo. También se recomiendan capacitaciones a la población especialmente dirigidas al manejo del agua potable (transportada a través de tuberías de manera desordenada), así como al manejo de aguas residuales. Como se observa, todas las obras propuestas van encaminadas a evitar la infiltración de agua al terreno, así como controlar la erosión, fenómenos que suelen ser desencadenantes de movimientos en masa. En concordancia con las soluciones propuestas para los Perfiles del 2 al 6 se presentaron en el Capítulo 20 imágenes que muestran ejemplos de tales soluciones aplicadas a sitios puntuales ubicados en la zona.

Para la Zona 3 del polígono, la mejor alternativa analizada es la reubicación de las viviendas que fueron catalogadas en alto riesgo, debido a que se localizan en zonas de amenaza alta y la resistencia estructural de la mayoría de ellas es baja dado que fueron construidas en madera. Se recomienda que todos los proyectos que se tengan planteados en esos sectores consideren la implementación de las cimentaciones profundas.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Inundación y Avenidas Torrenciales** específicamente para el polígono:

A pesar de estar cercano a la Quebrada La Loca, el Polígono Golondrinas no presenta amenaza por inundaciones y por avenidas torrenciales. Las manchas estimadas para ambos fenómenos no alcanzan a incorporarse al polígono o a entrar en contacto con sus viviendas. Dado que no se presenta amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, el riesgo por estos dos fenómenos tampoco se presenta. Debido a que dentro del

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

Polígono Golondrinas no se tienen zonas con riesgo de inundación no se hace necesario el planteamiento de obras de mitigación para éste.

A pesar de lo anterior, es importante mencionar que fuera del Polígono Golondrinas existen viviendas que se encuentran bajo amenaza alta por inundaciones y por avenidas torrenciales de manera que también presentan riesgo alto por inundaciones y avenidas torrenciales. Estas viviendas corresponden a las que se encuentran ubicadas muy cerca de la Quebrada La Loca al interior de la franja de retiro.



Según la superposición realizada a la capa de edificaciones proyectadas por la EDU, y la capa de retiros a corrientes hídricas establecidos por el POT (2014), se observó que las edificaciones están fuera de los límites de la franja de retiro. A partir de los resultados del presente estudio de detalle puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha de inundación asociados a 100 años periodo de retorno, es decir, se encuentra fuera de lo que sería la franja de retiro hidrológico que se delimitaría a partir de estos resultados. Es importante mencionar que la delimitación de la envolvente de retiro total a la corriente hídrica se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

Así las cosas, finalmente se puede concluir que se logró el alcance definido desde el principio para el Polígono Golondrinas. Se llegó hasta definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable, por medio de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al interior de las zonas con riesgo mitigable se llegó hasta el establecimiento de las medidas de estabilización que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo.

En los Planos P-2445-G-OM-01 y P-2445-G-OM-02 del Anexo 09 se presenta el diseño de la estructura mencionada que da solución a la problemática de riesgo del polígono asociada al Foco 28 y estudiada por medio del denominado Perfil 1. En el Anexo 11 se presentan las cantidades de obra, presupuesto y especificaciones. Como se mencionó antes, también se analizaron otros perfiles, (Perfiles 2 a 6) determinándose para ellos que su intervención para mitigación del riesgo debe restringirse a obras menores, tales como cunetas para manejo de aguas de escorrentía concentrada y trinchos para controlar problemas de erosión puntuales, además de una reforestación adecuada para fines de estabilidad de las zonas desprovistas de vegetación. También se recomendaron medidas no estructurales tales como capacitaciones a la población especialmente dirigidas al manejo del agua potable (transportada a través de tuberías de manera desordenada), así como al manejo de aguas residuales. De acuerdo con esto, se considera que en el Polígono Golondrinas son igualmente prioritarias todos los tres tipos de intervenciones:

- ✓ Implementación de pantallas de contención profundas en la zona de influencia correspondiente al Perfil 1.



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

- ✓ Obras menores, tales como cunetas para manejo de aguas de escorrentía concentrada y trinchos para controlar problemas de erosión puntuales, además de una reforestación adecuada para fines de estabilidad de las zonas desprovistas de vegetación.
- ✓ Capacitaciones a la población especialmente dirigidas al manejo del agua potable (transportada actualmente a través de tuberías de manera desordenada), así como al manejo de aguas residuales.

Como se observa, todas las obras propuestas van encaminadas a evitar la infiltración de agua al terreno, así como controlar la erosión, fenómenos que suelen ser desencadenantes de movimientos en masa y por esto son igualmente prioritarias.

En los Planos P-2445-G-OM-01 y P-2445-G-OM-02 del Anexo 09 se han incluido las principales recomendaciones relacionadas con la obra dimensionada. No obstante, será responsabilidad de El Contratista bajo la supervisión de La Interventoría que se tomen todas las precauciones adicionales necesarias para evitar que se presenten daños en las estructuras o en el terreno por efecto de los métodos constructivos. Debe garantizarse que con las excavaciones no se desconfinen viviendas o el terreno.

Finalmente, el Anexo 12 contiene la información correspondiente a la metodología del trabajo en SIG con el manual de usuario y con las rutinas que se implementaron para generar los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, además de las bases de datos, los archivos de mapa, los archivos raster y complementarios. La información se localiza en una carpeta (directorio) llamada *Proy\_Riesgos\_EDU*, y al interior de ésta, 14 subdirectorios que contienen la información requerida por los usuarios del proyecto y que son los necesarios para el entendimiento de la información, y a su vez al interior de algunos de estos subdirectorios, se ubicaron otras carpetas que dan cuenta de diversos aspectos de la información geográfica (Figura 214).

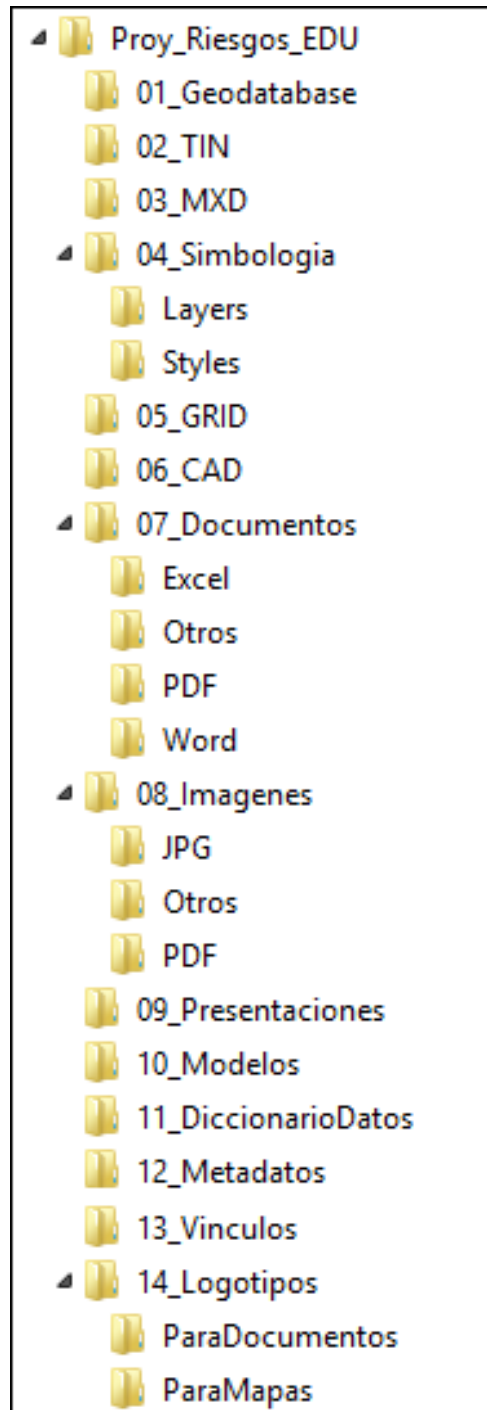




Figura 214. Estructura general de la información entregada

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

## 22. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMVA. (2007). Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Publicación Institucional No. 29 ed.). Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA. (2009). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión (Vol. Libro II). (C. y. Proyecto en conjunto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con los municipios de Medellín y Envigado, Ed.) Medellín: Área metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA. (2012). Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Aleoti'i P, Chowdhury R, 1999. Landslide Hazard Assessment: Summary Review And New Perspectives[J]. Bull. Eng. Env., 58:21-44.

Anbalagan D, 1992. Landslide Hazard Evaluation And Zonation Mapping In Mountainous Terrain [J]. Engineering Geology, 32; 269 - 277.

Ariztizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007.

Brass. A., Wadge, G. and Reading, A. J. 1989. 'Designing a Geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies', Proc. Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions, University College, London, 3-7 April 1989, 13pp

Baecher, G.B. and Christian J.T, (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons. England. 620 p.



Carrara A, 1995. GIS Technology In Mapping Landside Hazard [A]. In: CARRARA A, GUZZETTI F (eds.). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards[C]. Dordrecht: Kluwer Acad. Pub1., 135 - 176.

Consortio Microzonificación (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 745 P.

Coupé F., Arboleda E. & García C., (2007). Villatina: Algunas reflexiones 20 años después de la tragedia. Gestión y Ambiente. Volumen 10 – No. 2. Medellín, agosto de 2007.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., (1996). Landslide types and processes. Landslide investigation and mitigation, TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington, DC, pp. 36–75.

Daí F.C, Lee C.F, 2001. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study[J]. Can. Geotech. J., 38:911-923.

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

Daí F.C, Lee C.F, & Ngai Y.Y, (2002). Landslide Risk Assessment and Management: An Overview. Engineering Geology. 65-87 p.

DEACIVIL (2014) “Estudios de Microzonificación Geológico – Geotecnia, de Suelos, E Hidrológicos y Análisis de Estabilidad de Laderas para la Recuperación de Zonas de Riesgo en Sectores del Cerro Pan De Azúcar Influenciadas por los Proyectos del Cinturón Verde Metropolitano en la Ciudad De Medellín”.

Deere, D.U. y Patton F.D. (1971). Slope stability in residual soils. En Proc. Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Puerto Rico. Vol. 1. Pág. 87-170.

Hermelín, Michel (2005). Desastres de origen natural en Colombia, 1979-2004. Universidad EAFIT. Pag 55-62.

Hidalgo, C.A. (2013). Incertezas, Vulnerabilidade e Avaliação de Risco Devido a Deslizamento em Estradas. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-089A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 280 p.

Huggett, Richard J. (2007). Fundamentals of geomorphology, second edition, New York. pp 184-219.

Figueras, S., Macau, A., Goula, X., Gonzalez, M.(2005) “Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra”. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24.



Hungr, O., (1997). Some Methods of Landslide Intensity Mapping. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), Landslide risk assessment — Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19–21 February 1997. Balkema, Rotterdam, pp. 215–226.

INCIGAM (2015). “Estudio Geotécnico preliminar para la construcción de la primera etapa del proyecto 13 de Noviembre en el Proyecto Barrios Sostenibles, en desarrollo del objeto de la Contratación Directa No. 67 de 2013, celebrado entre la Universidad y la Empresa de Desarrollo Urbano –EDU”.

INGEOCILCÓN LTDA (2009). “Estudio de Suelos para el Parque de la Memoria de Villa Tina en Desarrollo de los convenios suscritos entre la Secretaría del Medio Ambiente de Medellín y la Empresa de Desarrollo Urbano-EDU”.

INGEOCILCÓN LTDA (2014). “Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano”.

Isaza, P. A. (2011). Avaliação do Risco Aceitável por Escorregamentos de Encostas em Regiões Tropicais Montanhosas: Caso de Aplicação Medellín, Colômbia. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 204 p.

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

LANTADA, M. N, (2007) Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona – España. 2007.

Li. Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S. (2010). Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. Springer Verlag. Landslides 7:125-134.

Luzi, L., Pergalani, F. & Terlien, M. T. J. (2000), Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. Engineering Geology, 58: 313-336.

Municipio de Medellín (2014). Plan De Ordenamiento Territorial – POT.

Newmark N (1965). “Effects of earthquakes on dams and embankments”. Géotechnique, 15.2. pp 139-159.

Posada, P., Blanca Oliva (2000). Sensores remotos y SIG en la cartografía de cenizas volcánicas. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT.

Ragozin, A.L., Tikhvinsky, I.O. (2000). Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslides. In: Research, Theory and Practice. Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, 26–30 June 2000, pp. 1257–1262.

Rosgen, Dave (1994). Applied River Morphology. Second Edition.

San Buenaventura (2014). “Estudios y diagnóstico físico para la formulación de los proyectos barrios sostenibles en los sectores Golondrinas, Versalles, Rancho de lata al interior de los macroyectos Llanaditas, La Cruz y El Picacho, dentro del marco del proyecto cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín”. Polígono de Intervención Golondrinas. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Contrato de Asociación 63 de 2014. Universidad San Buenaventura, Mayo 2014.

Taylor, D.W., (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. Wiley, New York.



TECNISUELOS (2013). “Estudio de suelos para la construcción del parque ecoturístico y recreativo Trece de Noviembre, ubicado en el Cerro Pan de Azúcar, Municipio de Medellín”.

Thouret, J.C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., Arguedas, A., and Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru.

Uzielli, M, (2006). Risk and Vulnerability for Geohazards – Probabilistic Estimation of Regional Vulnerability to Landslides. ICG report 2006-2-7, Oslo.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacase, S., Kaynia, A.M. (2008). A conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. Engineering Geology 102. 251-256.



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

Van Westen C J, Terlien M T J, (1996). An Approach Towards Deterministic Landslide Hazard Analysis in GIS: A Case Study From Manizales (Colombia) [J]. Earth SuqCace Processes and Landforms, 21: 853 - 868.

Vega, J. A. (2013). Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas. La Plata - Argentina. 2012. pp51.

Velez, R. M. (2010). Estudio de suelos para el paseo de borde en la base del cerro pan de azúcar y senderos peatonales a la cima del cerro. Bordes Urbano Rurales, Empresa Desarrollo Urbano (EDU).



Versteeg, M. (1987). External Safety Policy in The Netherlands: Na Approach To Risk Management. Journal of Hazardous Materials 17: 215-221

Ward, T. J., Ruh-Ming, L. and Simons, D. B. 1982. 'Mapping landslide hazards in forest watershed', Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108(GT2), 3 19-324.

Whitman, R. V. (1984). Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. Journal of Geotechnical Engineering, 110 (2): 144-188

XIE MO-wen, ZHOU G, ESAKI T, (2001). Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation based on GIS [A]. In: CHANDRA S D et al. (eds.). The 10th International Conference of IACMAG [C]. Arizona: A.A. Balkema Publishers, 169 - 173.

XIE MO-wen, ZHOU G, ESAKI T, (2003).GIS Component Based 3D Landslide Hazard Assessment System: 3DSLOPEGIS. Chinese Geographical Science, Volume 13, Number 1. Science Press, Bijing China. pp 66-72.

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

## **23. LIMITACIONES**

El presente informe se fundamenta en las condiciones del terreno encontradas durante los trabajos de exploración en campo, la información básica recopilada, y posteriormente, en los análisis efectuados.

Lo estimado son proyecciones aplicando la “buena práctica profesional”, haciendo un esfuerzo razonable en términos de recursos y de la aplicación del conocimiento para proponer soluciones a los problemas planteados. Sin embargo, la naturaleza es aleatoria en cuanto a la intensidad y frecuencia en la ocurrencia de los fenómenos, por lo que el ingeniero puede estimar más no predecir la ocurrencia de los eventos naturales que pueden afectar una obra de ingeniería.