



ESTUDIOS BÁSICOS PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGO EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL.

MUNICIPIO DE APARTADÓ



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



ESTUDIO BÁSICO DE RIESGO

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	20
2.	Objetivos	20
3.	Alcances y limitaciones	20
1.	Recopilación de información precedente	27
1.1	Registro eventos históricos	27
1.2	Cartografía base y sensores remotos.....	37
1.3	Geología	43
1.4	Unidades Geológicas Superficiales – UGS.....	47
1.5	Geomorfología	48
1.6	Coberturas y uso de la tierra.....	51
1.7	Geotecnia	53
1.8	Estudios de amenaza y riesgo del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y otras entidades	55
2.	Trabajo de campo	59
3.	Topografía detallada.....	65
4.	Coberturas.....	69
4.1	Metodología.....	70
4.1.1	Adquisición de insumos.....	70
4.1.2	Fotointerpretación de coberturas	72
4.1.3	Control en campo	72
4.2	Territorios artificializados (1.)	79
4.2.1	Zonas urbanizadas (1.1).....	79
4.2.2	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación (1.2)	81
4.2.3	Zonas de extracción minera y escombreras (1.3)	83
4.2.4	Zonas verdes artificializados no agrícolas (1.4)	83
4.3	Territorios Agrícolas (2.).....	84
4.3.1	Cultivos permanentes (2.2)	84
4.3.2	Pastos (2.3)	87
4.3.3	Áreas agrícolas heterogéneas (2.4).....	88
4.4	Bosques y áreas seminaturales (3.).....	91
4.4.1	Bosques (3.1).....	91
4.4.2	Áreas con vegetación herbácea y/ o arbustiva (3.2).....	97
4.4.3	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación (3.3)	99
4.5	Áreas húmedas (4.)	101
4.5.1	Áreas húmedas continentales (4.1)	101
4.6	Superficies de agua (5.)	102
4.6.1	Aguas continentales (5.1).....	102
5.	Hidrología y clima	104
5.1.1	Precipitaciones medias mensuales	108
5.1.2	Valores de precipitación media, máxima y mínima mensual	109
5.1.3	Análisis de frecuencias para diferentes periodos de retorno	110

5.1.4	Número de días mensuales de precipitación	110
5.1.5	Curvas IDF	110
5.2	Temperatura.....	111
5.3	Balance hídrico	113
5.4	Caudales cuencas municipio de Apartadó	114
5.4.1	Caudales medios	114
5.4.2	Caudales máximos instantáneos cuenca río Apartadó.....	116
6.	Geología	120
6.1	Geología regional	121
6.2	Litología local.....	123
6.2.1	Formación Maralú (E3m)	128
6.2.2	Formación Pavo Inferior (Ngpi).....	128
6.2.3	Formación Pavo Superior (Ngps)	132
6.2.4	Formación Floresanto (N1fla)	135
6.2.5	Unidad Arenas Monas (Ngam)	136
6.2.6	Formación Corpa (N2Q1co)	137
6.2.7	Depósitos de abanico aluvial (Qaa)	141
6.2.8	Depósitos fluvio-lacustres (Qfl)	141
6.2.9	Depósitos Fluvio-torrenciales (Qft)	141
6.2.10	Depósitos de barras (Qabp, Qbm, Qbla, Qbp, Qbt)	142
6.2.11	Depósitos de cauce activo (Qca)	142
6.2.12	Depósitos de llanura de inundación (Qal, Q2lli).....	142
6.2.13	Depósitos de terrazas aluviales (Qt1, Qt2).....	143
6.2.14	Depósitos coluviales (Qc)	143
6.2.15	Depósitos de flujo de lodo (Qfd)	144
6.3	Geología estructural	145
7.	Geofísica.....	152
7.1	Metodología.....	152
7.1.1	Equipo y software utilizados	153
7.2	Protocolo para las mediciones geofísicas superficiales	154
7.2.1	H/V.....	154
7.2.2	Medición tipo MASW-SASW	155
7.3	Puntos H/V	156
7.3.1	Protocolo general para el procesamiento	156
7.3.2	Resumen de las mediciones realizadas	156
7.3.3	3.2. Resumen de resultados	163
7.4	Punto H/V y SASW	163
7.4.1	Ensayo H/V	163
7.4.2	Determinación del perfil de velocidades	164
8.	Unidades Geológicas Superficiales - Geotecnia	168
9.	Geomorfología	177
9.1	Geomorfología regional	178

9.2	Proceso metodológico	178
9.2.1	Ambientes Morfogenéticos	179
9.2.2	Atributos para la caracterización del relieve	180
9.3	Geomorfología local	183
9.3.1	Ambiente antropogénico	191
9.3.2	Ambiente denudacional	194
9.3.3	Ambiente fluvial	204
9.3.4	Ambiente estructural	210
10.	Morfodinámica	218
10.1	Movimientos en masa	219
10.2	Erosión	221
10.3	Inundaciones	224
10.4	Avenidas torrenciales	225
11.	Dinámica fluvial	226
11.1	Elementos de dinámica fluvial	227
11.1.1	Perfil Longitudinal	227
11.1.2	Divagación de cauce	227
11.2	Imágenes recopiladas	229
11.3	Análisis elementos dinámica fluvial	233
11.3.1	Perfil longitudinal del río Apartadó	233
11.3.2	Perfil longitudinal del río Zungo	234
11.3.3	Perfil longitudinal del río Mulatos	234
11.3.4	Perfil longitudinal del río Currulao	235
11.3.5	Perfil longitudinal del caño La Chinita	235
11.3.6	Divagación del cauce	236
11.3.7	Análisis geomorfológico e histórico fluvial en el periodo 1969 – 2022.	236
1.	Amenaza por movimientos en masa	242
1.1	Análisis rural de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000	242
1.1.1	Pendiente	246
1.1.2	Precipitación	247
1.1.3	Aceleración sísmica	250
1.1.4	Factor antrópico	253
1.1.5	Modelo geológico geotécnico	253
1.2	Análisis urbano de amenaza por movimientos en masa escala 1:5.000	259
1.3	Análisis de socavación	276
1.3.1	Ecuación de socavación	277
1.3.2	Consideraciones de análisis	277
2.	Amenaza por inundaciones	288
2.1	Análisis rural de amenaza por inundaciones escala 1:25.000	288
2.1.1	Análisis geomorfológico	290
2.1.2	Análisis hidráulico	290
2.2	Análisis urbano de amenaza por inundación escala 1:5.000	293
3.	Amenaza por avenidas torrenciales	312

3.1	Definición de áreas susceptibles a presentar avenidas torrenciales	312
3.1.1	Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales	312
3.1.2	Índice de Melton.....	316
3.2	Análisis rural de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:25.000	316
3.3	Análisis urbano de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:2.000	323
1.	Áreas con condición de amenaza	332
2.	Áreas con condición de riesgo	335
3.	Consideraciones de amenaza y riesgo por sismo	339
4.	Medidas de intervención	342
4.1	Amenaza y riesgo por movimientos en masa	346
4.2	Amenaza y riesgo por inundación.....	346
4.3	Amenaza y riesgo por avenidas torrenciales.....	347
4.4	Marco legal y normativo general para medidas de intervención.....	347
5.	Proyectos relevantes	348
5.1	Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)	348
5.2	Intervención integral del río Apartadó	348
5.3	Caracterización de respuesta dinámica de suelos en el área urbana	349
5.4	Estudios detallados, obras de mitigación y sistemas de alerta	349
6.	Bibliografía.....	355

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Inventario y catálogo de eventos SIMMA. Fuente SGC, 2016.....	28
Figura 2. Detalle inventario PMD SIMMA 33268. Fuente modificado a partir de SGC,2016	28
Figura 3. Recorte infografía sismo Murindó. Fuente SGC	31
Figura 4. Identificación de eventos ocurridos mediante cartografía social. Izquierda espacio con CORPOURABA y derecha espacio con Secretaría de Planeación Apartadó.	31
Figura 5. Procesos morfodinámicos denudacionales identificados	32
Figura 6. Deslizamientos detonados en la quebrada el Muerto. Vereda Arenas Altas.	33
Figura 7. Vista panorámica deslizamientos detonados en la quebrada el Muerto. Vereda Arenas Altas. .	33
Figura 8. Inundación 9 de mayo en la cabecera municipal, en la foto afectación sector La Esperanza. ..	34
Figura 9. Afectaciones inundación 9 de mayo río Apartadó en la cabecera municipal barrio el Concejo, área de expansión urbana y zonas rurales.	34
Figura 10. Mosaico de fotografías (izq.) y vista 3D ortofotomosaico (der) deslizamiento detonado en la quebrada La Sucia. Fuente: elaborado con información CORPOURABA (informe R-PG-08 300-08-02-01-3274- diciembre 2021 Cano J.& Orejuela F.)	35
Figura 11. Deslizamiento detonado vereda Buenos Aires.	35
Figura 12. Material transportado por inundaciones en mayo de 2022 y efectos de socavación en el sector Puente La Libertad de la cabecera municipal.	36
Figura 13. Socavación en el sector Puente El Vélez de la cabecera municipal, vivienda evacuada.	36
Figura 14. Ortofotografía (imagen satelital) municipio de Apartadó. Fuente: equipo POT 2022.	42
Figura 15. Fotografías aéreas disponibles para el año 1993. Construido con información CORPOURABA	42
Figura 16. Geología 1:100.000 planchas 79, 80, 90 Y 91. Fuente: SGC (Antiguo INGEOMINAS).....	45
Figura 17. Geología básica. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	46
Figura 18. Geología básica. Fuente: (Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur , 2018).....	46
Figura 19. Unidades geológicas superficiales -UGS. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	47
Figura 20. Geomorfología planchas 79, 80, 90 y 91 1:100:000. Fuente: SCG.....	49
Figura 21. Geomorfología. Fuente: (Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur , 2018)	50
Figura 22. Geomorfología con criterios morfogenéticos. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	50
Figura 23. Coberturas y uso de la tierra. Fuente: (Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur , 2018).....	51
Figura 24. Coberturas y uso de la tierra. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	52
Figura 25. Leyenda coberturas y uso de la tierra. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	53
Figura 26. Información geotécnica recopilada	55
Figura 27. Amenaza por movimientos en masa. Fuente: Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	58
Figura 28. Amenaza por inundaciones. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).....	58
Figura 29. Amenaza por avenidas torrenciales. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)	59

Figura 30. Ilustración de las actividades realizadas durante la fase de campo	60
Figura 31. Ubicación puntos de campo	60
Figura 32. Esquema triangulación línea de vuelo	65
Figura 33. Línea de vuelo, orientación de fotografías, modelo tridimensional	66
Figura 34. Toma de datos en tierra usando GNSS.....	66
Figura 35. Renderización modelo 3D 5k urbano.....	67
Figura 36. Renderización modelo 3D 2k centro poblado de San José de Apartadó	67
Figura 37. Modelo ortofotomosaico urbano	68
Figura 38. Modelo ortofotomosaico urbano regional.....	69
Figura 39. Proceso para elaborar mapas de coberturas de la tierra	70
Figura 40. Coberturas de la tierra rural	73
Figura 41. Coberturas de la tierra urbana.....	75
Figura 42. Coberturas centros poblados Salsipuedes, La Victoria y San José de Apartadó.....	75
Figura 43. Coberturas centros poblados San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	76
Figura 44. Coberturas centros poblados El Diamante y San Pablo	76
Figura 45. Coberturas centro poblado Churidó.....	77
Figura 46. Tejido urbano continuo	80
Figura 47. Tejido urbano discontinuo.....	80
Figura 48. Tejido urbano discontinuo con zonas verdes y tejido urbano continuo	81
Figura 49. Zonas comerciales	81
Figura 50. Red vial asociada.....	82
Figura 51. Aeropuertos	82
Figura 52. Extracción de materiales en la vereda Salsipuedes.....	83
Figura 53. Zonas verdes urbanas.....	84
Figura 54. Zonas recreativas	84
Figura 55. Cultivos permanentes herbáceos. Banano y plátano.....	85
Figura 56. Otros cultivos permanentes arbustivos.....	86
Figura 57. Otros cultivos permanentes arbóreos.....	86
Figura 58. Pastos limpios	87
Figura 59. Pastos arbolados	88
Figura 60. Pastos enmalezados	88
Figura 61. Mosaico de cultivos.....	89
Figura 62. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	89
Figura 63. Mosaico de pastos con espacios naturales.....	90
Figura 64. Mosaico de cultivos y espacios naturales.....	90
Figura 65. Bosque denso	91
Figura 66. Bosques altos inundables	92
Figura 67. Bosque abierto	93
Figura 68. Bosque abierto bajo inundable	94
Figura 69. Bosque fragmentado	95
Figura 70. Bosque de galería o ripario.....	96
Figura 71. Plantación forestal	96
Figura 72. Herbazal	97
Figura 73. Arbustal.....	98
Figura 74. Vegetación secundaria	99
Figura 75. Tierras denudadas y degradadas	100
Figura 76. Zonas quemadas	101

Figura 77. Zonas pantanosas	102
Figura 78. Mosaico de imágenes del río Apartadó	103
Figura 79. Panorámica del río Apartadó	103
Figura 80. Canales.....	104
Figura 81. Estanques	104
Figura 82. Red de drenaje del municipio	105
Figura 83. Subcuencas principales pertenecientes al municipio	106
Figura 84. Localización de estaciones.	107
Figura 85. Precipitaciones totales mensuales.....	108
Figura 86. Isoyetas y precipitación media.	109
Figura 87. Precipitación media, máxima y mínima mensual.	109
Figura 88. Curvas IDF.....	111
Figura 89. Temperatura media, máxima y mínima mensual de las temperaturas medias registradas por la estación Aeropuerto los Cedros.	112
Figura 90. Isotermas y temperatura.	112
Figura 91. Comparación entre la precipitación y la evapotranspiración Apartadó.....	113
Figura 92. Déficit y exceso en el balance hídrico.....	113
Figura 93. Trazado de la cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal.....	114
Figura 94. Caudales estimados cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal.....	115
Figura 95. Caudales medios de las macrocuencas del municipio	116
Figura 96. Resultados del tiempo de concentración	117
Figura 97. Hietograma de precipitación para el río Apartadó	118
Figura 98. Resultados del caudal	120
Figura 99. Configuración actual de las Placas Suramericana y Caribe con un desplazamiento de 10-22 mm/año, en sentido este – oeste. Fuente: ANH (2009).....	121
Figura 100. Modelo secuencial del movimiento de la Placa Caribe desde el Cretácico superior hasta el Mioceno. Fuente: Mann, Edwards & Ku (1995).....	123
Figura 101. Compilación de nomenclaturas estratigráficas y correlación propuesta por los diferentes autores que han estudiado la geología en el área de interés	124
Figura 102. Unidades geológicas identificados en la zona rural	125
Figura 103. Afloramiento de la Formación Pavo Inferior en la zona central del municipio. A. Arenitas líticas de tono gris con cemento calcáreo. B. Fragmentos de arenitas grises con silicificación y fractura concoidea. Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)	130
Figura 104. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Pavo Inferior. A. Capas de espesor medio a grueso de arenitas grises. B. Presencia de tallos y raíces oxidadas en la base de las capas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)	131
Figura 105. Afloramiento del paquete intermedio de la Formación Pavo Inferior. A. Capas de lodolitas fósiles con presencia de nódulos de siderita. B. Presencia de suelos residuales resultado de la meteorización de lodolitas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018).....	131
Figura 106. Afloramiento del paquete superior de la Formación Pavo Inferior. A. Capas tabulares gruesas de arenitas cementadas con material calcáreo. B. Presencia de icnofósiles en las bases de las capas de la unidad. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018).....	132
Figura 107. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Pavo Superior. Secuencia de arenitas plano paralelas y tabulares, basculada con poco diaclasamiento. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018).....	134

Figura 108. Afloramiento del segundo paquete de la Formación Pavo Superior. Secuencia de lodolitas grises intercaladas con arenitas sublíticas con cementación calcárea. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)	134
Figura 109. Afloramiento del tercer paquete de la Formación Pavo Superior. Secuencia de arenitas grises y lodolitas oscuras cementadas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)	135
Figura 110. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Corpa, donde se observan niveles de arenitas de tono grises con parches de oxidación: Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)	138
Figura 111. Afloramiento del paquete intermedio de la Formación Corpa. A. Arenitas conglomeráticos con clastos tamaño gránulo, muy deleznales y con presencia de minerales de oxidación. B. Niveles de lodolitas grises muy diaclasadas y con abundante presencia de alteración supérgena a minerales de arcilla. Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)	139
Figura 112. Afloramiento Formación Corpa, quebrada el Muerto	140
Figura 113. Afloramiento del paquete superior de la Formación Corpa. A. Lodolitas de color gris azulado con intenso diaclasamiento y meteorización. B. Contacto erosivo entre depósitos cuaternarios y lodolitas gris azulosas, PS (Paquete superior). Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)	141
Figura 114. Depósitos de cauce activo del río Apartadó	142
Figura 115. Depósitos coluviales quebrada el Muerto	143
Figura 116. Ubicación cortes estructurales	144
Figura 117. Perfil A-A'	145
Figura 118. Perfil B-B'	145
Figura 119. Mapa tectónico estructural de la zona de Urabá y zona costera del Caribe colombiano. Fuente: ANH (2009)	146
Figura 120. Estructuras geológicas presentes en el municipio	148
Figura 121. Diagrama de rosas de las tendencias estructurales de fallas y pliegues	149
Figura 122. Diagrama de rosas de las tendencias estructurales de las unidades litológicas	149
Figura 123. Diagramas de rosas diferenciados para las unidades aflorantes. A Fm. Maralú. B. Fm. Pavo Inferior. C. Fm. Pavo Superior. D. Fm. Corpa	151
Figura 124. Orientaciones estructurales de las unidades litoestratigráficas	151
Figura 125. Esquema típico de métodos para la determinación de perfiles de Vs con una fuente activa. Tomado de (Pelekis & Athanasopoulos, 2011)	153
Figura 126. Emplazamiento de sensor para medición tipo H/V	155
Figura 127. Emplazamiento de sensor y mazo utilizado para la generación de fuente activa	155
Figura 128. Localización de mediciones de tipo H/V	156
Figura 129. Espectro H/V para el punto 1.	157
Figura 130. Espectro H/V para el punto 2.	158
Figura 131. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 2.	158
Figura 132. Perfil de velocidades obtenido para el punto 2 con la inversión del espectro de H/V	159
Figura 133. Espectro H/V para el punto 3.	160
Figura 134. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 3.	160
Figura 135. Perfil de velocidades obtenido para el punto 3 con la inversión del espectro de H/V	160
Figura 136. Espectro H/V para el punto 5.	161
Figura 137. Espectro H/V para el punto 6.	162
Figura 138. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 6.	162
Figura 139. Perfil de velocidades obtenido para el punto 6 con la inversión del espectro de H/V	162
Figura 140. Resumen de periodos obtenidos por H/V en los puntos de estudio	163
Figura 141. Espectro H/V para el punto 4.	164
Figura 142. Ubicación de las dos líneas de medición.	165

Figura 143. Resultados de refracción sísmica en el programa Grilla para el lineamiento 1.	166
Figura 144. Resultados de refracción sísmica en el programa Grilla para el lineamiento 2.	166
Figura 145. Imagen del espectro de velocidades de fase hallada para el lineamiento 1.	167
Figura 146. Imagen del espectro de velocidades de fase hallada para el lineamiento 2.	167
Figura 147. Perfiles determinados e el punto 4 por el método SASW.	167
Figura 148. Mediciones geotécnicas en campo	169
Figura 149. Mediciones tomadas con penetrómetro de bolsillo	169
Figura 150. Información geotécnica recopilada.....	170
Figura 151. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico escala rural	171
Figura 152. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano	175
Figura 153. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	175
Figura 154. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	176
Figura 155. Patrón de drenaje controlado por estructura o pendiente. Fuente: Leiva et al. (2012).....	181
Figura 156. Pendientes	183
Figura 157. Geomorfología rural	184
Figura 158. Geomorfología urbana	187
Figura 159. Geomorfología centros poblados Salsipuedes, La Victoria y San José de Apartadó	188
Figura 160. Geomorfología centros poblados San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera.....	188
Figura 161. Geomorfología centros poblados El Diamante y San Pablo.....	189
Figura 162. Geomorfología centro poblado Churidó	189
Figura 163. Leyenda geomorfología centros poblados.....	190
Figura 164. Rellenos antrópicos en la cabecera municipal	192
Figura 165. Canales artificiales en área de expansión urbana	192
Figura 166. Red vial en la cabecera municipal	193
Figura 167. Jarillón río Grande, vereda Puerto Girón. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019)	193
Figura 168. Excavaciones.....	194
Figura 169. Cerro remanente o relicto	195
Figura 170. Colina remanente disectada	195
Figura 171. Cerro residual.....	196
Figura 172. Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión	196
Figura 173. Escarpes de erosión menor en el río Zungo	197
Figura 174. Loma denudada.....	197
Figura 175. Loma denudada suavemente inclinada	198
Figura 176. Lomo denudado	199
Figura 177. Lomo denudado bajo de longitud corta	199
Figura 178. Lomo denudado moderado de longitud media	200
Figura 179. Lomeríos disectados	200
Figura 180. Ladera erosiva.....	201
Figura 181. Lomeríos muy disectados	201
Figura 182. Lomeríos poco disectados	202
Figura 183. Loma residual.....	202
Figura 184. Ladera ondulada.....	203
Figura 185. Montículo y ondulaciones denudacionales.....	203
Figura 186. Sierra denudada	204
Figura 187. Barra compuesta río Apartadó	205

Figura 188. Barra puntual	205
Figura 189. Mosaico de imágenes del río Apartadó	206
Figura 190. Panorámica del río Apartadó.....	207
Figura 191. Meandro abandonado	207
Figura 192. Planicie de inundación.....	208
Figura 193. Planicie y delta lacustre.....	209
Figura 194. Cuesta	210
Figura 195. Ladera estructural de cuesta	211
Figura 196. Ladera de contrapendiente de cuesta	211
Figura 197. Colina estructural	212
Figura 198. Espinazo	212
Figura 199. Lomos.....	213
Figura 200. Plancha.....	213
Figura 201. Sierra.....	214
Figura 202. Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal	214
Figura 203. Ladera estructural de sierra anticlinal.....	215
Figura 204. Sierra homoclinal	215
Figura 205. Ladera estructural de sierra homoclinal	216
Figura 206. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	216
Figura 207. Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	217
Figura 208. Ladera estructural de sierra sinclinal	217
Figura 209. Procesos morfodinámicos identificados en el municipio	218
Figura 210. Deslizamientos identificados en cercanías al centro poblado de San José de Apartadó	219
Figura 211. Deslizamiento quebrada el Muerto	220
Figura 212. Erosión por degradación del suelo	221
Figura 213. Socavación en el río Apartadó	222
Figura 214. Socavación en el río Zungo.....	222
Figura 215. Socavación en el quebrada el Guineo.....	223
Figura 216. Superficies de erosión y cárcavamiento	223
Figura 217. Inundación El Reposo, junio de 2022	224
Figura 218. Afectaciones inundación mayo 2022. Fuente: Secretaría de planeación Apartadó.....	225
Figura 219. Jarillón artificial sobre el río Grande de Nicuro. Localización Estación GM80 X:708960 Y:1368093. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019).....	225
Figura 220. Red hídrica principal del municipio	226
Figura 221. Ejemplo de perfil longitudinal del río Tajo, Jarama-Aranjuez. España	227
Figura 222. Relación entre el tipo de cauce, la carga sedimentaria, capacidad de carga y migración lateral (estabilidad relativa).....	228
Figura 223. Tipos y características de los cauces aluviales	229
Figura 224. Ortofotografía 2006 municipio de Apartadó. Fuente: (Consorcio zonificación 2008, 2011)	232
Figura 225. Ortofotografía (imagen satelital 2013) municipio de Apartadó. Fuente: equipo POT 2022.	232
Figura 226. Fotografías aéreas disponibles para el año 1993. Construido con información CORPOURABA	233
Figura 227. Perfil longitudinal río Apartadó.....	234
Figura 228. Perfil longitudinal río Zungo.....	234
Figura 229. Perfil longitudinal río Mulatos.....	235
Figura 230. Perfil longitudinal río Currulao	235
Figura 231. Perfil longitudinal caño La Chinita	236

Figura 232. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector urbano.....	237
Figura 233. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector área de expansión	237
Figura 234. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector rural	237
Figura 235. Análisis multitemporal del caño Chinita	238
Figura 236. Análisis multitemporal cauce del río Churidó.....	238
Figura 237. Análisis multitemporal cauce del río Zungo	238
Figura 238. Análisis multitemporal cauce del río Currulao.....	239
Figura 239. Análisis multitemporal cauce del río Mulatos.....	239
Figura 240. Estructura metodológica para la evaluación de amenaza por movimientos en masa	242
Figura 241. Esquema del modelo de talud infinito. Fuente: SGC, 2015.....	244
Figura 242. Pendiente.....	246
Figura 243. Precipitación Tr 10 años.....	247
Figura 244. Precipitación Tr 50 años.....	248
Figura 245. Precipitación Tr 100 años	248
Figura 246. Precipitación Tr 300 años	249
Figura 247. Retención Potencial	249
Figura 248. Concavidad	250
Figura 249. Efecto topográfico.	251
Figura 250. Efecto de material	251
Figura 251. Velocidad onda cortante promediada a 30 m de profundidad.....	252
Figura 252. Aceleración sísmica en roca para periodo de retorno 475 años	252
Figura 253. Aceleración sísmica en superficie para periodo de retorno 475 años.....	253
Figura 254. Modelo geológico - geotécnico.....	254
Figura 255. Probabilidad de falla	257
Figura 256. Probabilidad de falla y validación con eventos	258
Figura 257. Amenaza por movimientos en masa.....	258
Figura 258. Modelo de estabilidad de talud infinito. Fuente: SGC (2015)	259
Figura 259. Área de estudio 5k.....	260
Figura 260. Área de estudio suelo urbano	260
Figura 261. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras urbano	261
Figura 262. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	261
Figura 263. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	262
Figura 264. Pendiente del terreno en la zona urbana	262
Figura 265. Pendiente del terreno en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	263
Figura 266. Pendiente del terreno en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes.....	263
Figura 267. Efecto de sitio o respuesta local urbano	264
Figura 268. Efecto de sitio o respuesta local en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	264
Figura 269. Efecto de sitio o respuesta local en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	265
Figura 270. Aceleración sísmica en superficie	265
Figura 271. Aceleración sísmica en superficie en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	266

Figura 272. Aceleración sísmica en superficie en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	266
Figura 273. Presencia de agua urbano	267
Figura 274. Presencia de agua en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera.....	267
Figura 275. Presencia de agua centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes .	268
Figura 276. Exploración geotécnica.....	269
Figura 277. Caracterización geotécnica en la zona urbana.....	271
Figura 278. Caracterización geotécnica en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	271
Figura 279. Caracterización geotécnica en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes.....	272
Figura 280. Probabilidad de falla en suelo urbano.....	273
Figura 281. Probabilidad de falla en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	273
Figura 282. Probabilidad de falla en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes.....	274
Figura 283. Probabilidad de falla y validación con eventos en suelo urbano.....	274
Figura 284. Amenaza por movimientos en masa en suelo urbano	275
Figura 285. Amenaza por movimientos en masa en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	275
Figura 286. Amenaza por movimientos en masa en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	276
Figura 287. Ubicación de puntos identificados para análisis de socavación	276
Figura 288. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal	284
Figura 289. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal	284
Figura 290. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal	284
Figura 291. Modelo de socavación actual	285
Figura 292. Proyección multitemporal de socavación	285
Figura 293. Amenaza por socavación lateral.....	286
Figura 294. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND (Fuente: este estudio basado en IDEAM)	289
Figura 295. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND. Fuente IDEAM	289
Figura 296. Áreas susceptibles por análisis geomorfológico	290
Figura 297. Áreas de afectación por inundación para un Tr 100 yr resultado de la modelación en el área rural	291
Figura 298. Áreas de afectación por inundación para un Tr 200 yr resultado de la modelación en el área rural	292
Figura 299. Áreas de validación de eventos por inundación verificados en la modelación en el área rural	292
Figura 300. Amenaza por inundación en el área rural	293
Figura 301. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND. Fuente: IDEAM.....	294
Figura 302. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes urbano	296
Figura 303. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) urbano	296
Figura 304. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie urbano	297
Figura 305. Áreas de desbordamiento y encharcamiento urbano	297
Figura 306. Amenaza por inundaciones validada con eventos 2019 y 2020	298
Figura 307. Amenaza por inundación en el área urbana	299

Figura 308. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP El Diamante y San Pablo	300
Figura 309. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP El Diamante y San Pablo.....	301
Figura 310. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP El Diamante y San Pablo	301
Figura 311. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP El Diamante y San Pablo.....	302
Figura 312. Amenaza por inundación en el área CP El Diamante y San Pablo	302
Figura 313. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Churidó.....	303
Figura 314. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Churidó	303
Figura 315. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Churidó	304
Figura 316. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Churidó	304
Figura 317. Amenaza por inundación en el área CP Churidó	305
Figura 318. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín	305
Figura 319. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín	306
Figura 320. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín	306
Figura 321. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín	307
Figura 322. Amenaza por inundación en el área CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín	307
Figura 323. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria	308
Figura 324. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria	308
Figura 325. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria.....	309
Figura 326. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria	309
Figura 327. Amenaza por inundación en el área CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria ..	310
Figura 328. IV cuencas municipio de Apartadó	313
Figura 329. IM cuencas municipio de Apartadó	315
Figura 330. IVET cuencas municipio de Apartadó	315
Figura 331. Índice de Melton cuencas municipio de Apartadó.....	316
Figura 332. Variables y criterios para el modelo de amenaza por avenidas torrenciales. Fuente GEOTRIE, 2017.....	317
Figura 333. Variables y criterios para el modelo de amenaza por avenidas torrenciales. Fuente GEOTRIE, 2021.....	317
Figura 334. Estimación de volumen desplazado por la avenida torrencial. Fuente: Miura, 2019	318
Figura 335. Estimación de volumen desplazado por la avenida torrencial. Fuente GEOTRIE, 2019	318
Figura 336. Drenajes sujetos a evaluación con comportamiento torrencial	319
Figura 337. Identificación de áreas con aporte de sedimentos.....	319
Figura 338. Áreas afectadas en modelación fluidodinámica para un Tr 100 yr	320
Figura 339. Áreas afectadas en modelación fluidodinámica para un Tr 200 yr	321
Figura 340. Amenaza por avenidas torrenciales	322

Figura 341. Acercamientos a la zonificación de amenaza en la parte alta el río Apartadó, veredas la Unión, Arenas Altas y el Cuchillo	323
Figura 342. Amenaza por avenidas torrenciales en el área urbana	324
Figura 343. Amenaza por avenidas torrenciales en el área urbana	324
Figura 344. Áreas sujetas de modelación en centros poblados.....	325
Figura 345. Aporte de sedimentos regional	325
Figura 346. Volumen de material aportado a nivel regional	326
Figura 347. Drenajes con comportamiento torrencial	326
Figura 348. Aporte de sedimentos local	327
Figura 349. Volumen de material aportado a nivel local	327
Figura 350. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados	328
Figura 351. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados en periodos de retorno recurrentes	328
Figura 352. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados en periodos de retorno extremos Niña	329
Figura 353. Amenaza por avenidas torrenciales en los centros poblados San José de Apartadó y La Victoria	329
Figura 355. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en suelo urbano	332
Figura 355. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	333
Figura 355. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	333
Figura 355. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de Churidó	334
Figura 355. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de El Diamante y San Pablo	334
Figura 354. Elementos expuestos en suelo rural.....	335
Figura 355. Áreas con condición de riesgo rural por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales	336
Figura 355. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en suelo urbano	336
Figura 355. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes	337
Figura 355. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera	337
Figura 355. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de Churidó	338
Figura 355. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de El Diamante y San Pablo	338
Figura 356. Ubicación de Apartadó en relación con fuentes sismogénicas. Fuente: (Arcila, 2020)	340
Figura 357. Aceleración en centros poblados. Fuente: (Arcila, 2020).....	341
Figura 358. Prioridad de medida de intervención	350
Figura 358. Tipo de medida de intervención.....	350
Figura 359. Escala a la cual se debe ejecutar la medida de intervención	351
Figura 360. Descripción medida de intervención	351

Figura 361. Premura de intervención medida	352
Figura 362. Importancia medidas de intervención.....	352

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Eventos históricos reportados en bases de datos de atención a emergencias	29
Tabla 2. Cartografía base recopilada	37
Tabla 3. Sensores remotos	38
Tabla 4. Imágenes satelitales recopiladas para análisis multitemporal	39
Tabla 5. Relación información recopilada geología	43
Tabla 6. Relación información recopilada unidades geológicas superficiales	47
Tabla 7. Relación información recopilada geomorfología	48
Tabla 8. Relación información recopilada coberturas y uso de la tierra	51
Tabla 9. Relación información recopilada geotecnia	53
Tabla 10. Relación información recopilada caracterización geotécnica POMCA	54
Tabla 11. Relación información recopilada estudios de amenaza y riesgo	55
Tabla 12. Resumen actividades de campo	61
Tabla 13. Longitudes de onda y resolución de las bandas trabajadas de las imágenes satelitales descargadas.....	71
Tabla 14. Leyenda coberturas de la tierra rural y urbana	77
Tabla 15. Áreas de las cuencas correspondientes al municipio de Apartadó	106
Tabla 16. Estaciones climáticas usadas	107
Tabla 17. Precipitaciones medias mensuales	108
Tabla 18. Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno.....	110
Tabla 19. Días mensuales con precipitación	110
Tabla 20. Valores base IDF	111
Tabla 21. Temperatura máxima de la estación Aeropuerto Los Cedros (12015070).....	112
Tabla 22. Caudales mensuales cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal	115
Tabla 23. Caudales medios de las cuencas de la zona rural	115
Tabla 24. Caudales por periodos de retorno	116
Tabla 25. Parámetros morfométricos de la cuenca río Apartadó	116
Tabla 26. Resultados de caudal para la subcuenca río Apartadó	119
Tabla 27. Unidades litológicas aflorantes en la zona de estudio	125
Tabla 28. Especificaciones generales del equipo Tromino.	153
Tabla 29. Canales del equipo Tromino.	154
Tabla 30. Resumen de propiedades generales del punto 1.	157
Tabla 31. Resumen de propiedades generales del punto 2.	157
Tabla 32. Resumen de propiedades generales del punto 3.	159
Tabla 33. Resumen de propiedades generales del punto 5.	161
Tabla 34. Resumen de propiedades generales del punto 6.	161
Tabla 35. Resumen de resultados de sitios de medición H/V.	163
Tabla 36. Resumen de propiedades generales del punto 4.	164
Tabla 37. Relación información recopilada caracterización geotécnica POMCA	170
Tabla 38. Parámetros de comportamiento de los materiales presentes en superficie en suelo rural.....	171
Tabla 39. Relación información recopilada geotecnia	173
Tabla 40. Parámetros de comportamiento de los materiales presentes en superficie en suelo urbano y centros poblados evaluados en escala 1:5.000	176
Tabla 41. Rangos de intervalos de altura o relieve relativo. Fuente: Leiva et al. (2012).....	180
Tabla 42. Rango de longitud de ladera Fuente: Leiva et al. (2012)	181
Tabla 43. Rangos de pendientes para estudios geomorfológicos. Fuente: Leiva et al. (2012)	181

Tabla 44. Clasificación forma de la ladera. Fuente: Leiva et al. (2012)	181
Tabla 45. Forma de cresta y valle. Fuente: Leiva et al. (2012).....	182
Tabla 46. Calificación del atributo morfografía. Fuente: (Carvajal, 2012).....	182
Tabla 47. Subunidades geomorfológicas identificadas en el área rural	185
Tabla 48. Subunidades geomorfológicas identificadas en el área urbana y CP evaluados en escala 1:5.000	190
Tabla 49. Fenómenos identificados y espacializados	218
Tabla 50. Agentes y procesos geomorfológicos externos.....	219
Tabla 51. Tipo de cauce de acuerdo con la sinuosidad	228
Tabla 52. Imágenes satelitales recopiladas para análisis multitemporal	230
Tabla 53 Índice de sinuosidad	236
Tabla 54. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases. Fuente: SGC, 2012	245
Tabla 55. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases. Fuente: SGC, 2012	245
Tabla 56. Parámetros geomecánicos evaluados para cada unidad geológica superficial.....	254
Tabla 57. Categorías de amenaza por movimientos en masa. Fuente: SGC (2015)	268
Tabla 58. Parámetros de comportamiento de los materiales presentes en superficie en suelo urbano y centros poblados evaluados en escala 1:5.000	269
Tabla 59. Clasificación índice de variabilidad	312
Tabla 60. Calificación índice de torrencialidad.....	314
Tabla 61. Relación índice Morfométrico de torrencialidad y el índice de variabilidad	315
Tabla 62. Sismos históricos sentidos en Apartadó. Fuente: SGC (2020)	339
Tabla 63. Medidas administrativas y proyectos en gestión de riesgo	342
Tabla 64. Medidas que apuntan a la reducción del riesgo.....	344
Tabla 65. Medidas de intervención propuestas	353

1. Introducción

En el marco de la elaboración de los estudios de amenaza y riesgo como insumo básico dentro del proceso de revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Apartadó, se plantea la necesidad de incluir aspectos relacionados con la gestión del riesgo en las áreas rurales y urbanas en que puedan existir modificaciones para la nueva vigencia del ordenamiento territorial. Para ello se toma como referencia la Ley 1523 de 2012, el Decreto 1807 de 2014 y el Decreto 1077 de 2015, con los cuales se establece un lineamiento en la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial municipal. Así, se establece la escala de trabajo para estudios básicos está clasificada en suelo rural y zonas urbanas (área urbana, suelo de expansión, centros poblados) con el fin de trabajar a mayor detalle las áreas con alta concentración de población que pueden ser vulnerables. Para el desarrollo del trabajo se realizaron diferentes etapas que incluyen recopilación de información existente, campañas de campo y análisis de amenazas por movimientos en masa, inundaciones por desbordamiento y avenidas torrenciales en la cabecera municipal en escala 1:5.000 y en áreas rurales del municipio en escala 1:25.000.

Para el cumplimiento de lo dispuesto en la Sección 3 "INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LOS PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL" de los decretos mencionados anteriormente y de los alcances planteados por el municipio en el cumplimiento del contrato de consultoría se realiza el presente documento que contiene información de obtención de cartografía base, análisis de información preexistente, fotointerpretación, trabajos en campo y oficina con los que se obtienen los insumos para el análisis de amenazas en los estudios básicos de riesgo del municipio.

2. Objetivos

- ▽ Analizar, incluir y enlazar los componentes biofísicos de estudios previos realizados para el municipio.
- ▽ Relatar los procesos empleados para elaborar insumos necesarios en la evaluación de amenazas naturales en orden a lo descrito en la normativa nacional de ordenamiento territorial.
- ▽ Describir la dinámica de las características biofísicas del municipio que dan o podrían dar origen a fenómenos amenazantes de origen socio natural.
- ▽ Proporcionar las herramientas técnicas de identificación de amenazas para su incorporación en los instrumentos de ordenamiento territorial y soportar las medidas de gestión de riesgo y adaptación a los efectos del cambio climático que se formulen en los programas y proyectos que se desarrollen en adelante.
- ▽ Identificar las zonas de amenazas baja, media y alta para atender la necesidad de establecer las áreas que requieren ejecución de medidas de reducción de riesgo.
- ▽ Incorporar dentro del análisis de amenazas los efectos de la variabilidad y cambio climático en términos de consideración de eventos extremos.
- ▽ Priorizar acciones dirigidas al conocimiento, reducción del riesgo y recuperación ambiental de los territorios afectados por la manifestación de los fenómenos amenazantes.

3. Alcances y limitaciones

- ▽ Se realizaron a lo largo del municipio levantamientos fotogramétricos usando vehículos aéreos no tripulados tipo drone para la cabecera municipal, zona de expansión urbana, centros poblados con afectaciones de fenómenos amenazantes (principalmente inundaciones), con resoluciones de producto final 1:2.000 y 1:5.000 respectivamente.
- ▽ Se realizaron vuelos fotogramétricos a lo largo del municipio con el fin de reconocer sectores de difícil acceso o generar visuales regionales de sitios visitados.
- ▽ Dentro de las labores de campo se realizaron controles litológicos, geomorfológicos, de

coberturas e inventario de eventos amenazantes, de igual manera, se practicaron ensayos geofísicos usando registro de microtemores para obtener H/V así como exploración geotécnica mediante sondeos y apiques.

- ▽ La exploración geotécnica se complementó con información generada y brindada por el municipio.
- ▽ Como información ráster base se usaron modelos de elevación digital escala 1:25.000, imágenes pancromáticas y monocromáticas de 10 m de píxel.
- ▽ Los insumos temáticos fotointerpretados se elaboran en escala 1:25.000 para zonas rurales y en escala 1:5.000 para la cabecera municipal, área de expansión y centros poblados sujetos a evaluación urbana.
- ▽ Para la fotointerpretación de variables físicas (geología, geomorfología, unidades geológicas superficiales y geotecnia) y bióticas (coberturas) se emplearon sensores remotos, ortofotografías, modelos de elevación así como información generada en años anteriores por CORPOURABA.
- ▽ El análisis de las variables climáticas tomó como base los estudios realizados en la elaboración de los POMCA río León y río Turbo Currulao.
- ▽ Si bien la geología de la zona es relativamente homogénea, varios autores consideran la aparición de algunas unidades que para otros autores no afloran en la región. El presente documento no tiene como objetivo determinar las posibles correlaciones de las formaciones que afloran en algunos sectores y que en otros no se observan.
- ▽ La información geológica especializada cuenta con la descripción del tipo de rocas o depósitos, pliegues, fallas y lineamientos, leyenda litoestratigráfica, corte geológico indicativo de la disposición estratigráfica y estructural, útiles para la identificación de zonas de amenaza y riesgo en el municipio, la cual no debe ser confundida con una geología multipropósito, siguiendo los estándares cartográficos del Servicio Geológico Colombiano.
- ▽ La caracterización geomorfológica se realiza a nivel de subunidades geomorfológicas para el área rural y a nivel de componente o elemento geomorfológico en la cabecera municipal empleando la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (Carvajal, 2012).
- ▽ La caracterización geológica de los macizos rocosos y de los materiales superficiales del área de estudio corresponde con los análisis básicos para el estudio del comportamiento geomecánico de los terrenos, útiles en la evaluación de amenazas por movimientos en masa para el condicionamiento al uso del suelo, entre otros instrumentos de ordenamiento territorial.
- ▽ El cálculo de amenaza por movimientos en masa incluye análisis geológico y geomorfológico, validación de eventos históricos y estimación de posibilidad de deslizamiento superficial mediante métodos determinísticos probabilísticos en los sectores rurales y centros poblados, y en la cabecera municipal en función del comportamiento geomecánico de resistencia al corte de suelos (caracterizados mediante exploración geotécnica en campo y ensayos de laboratorio) en escenarios que combinan condiciones de lluvia y sismo.
- ▽ El cálculo de amenaza por avenidas torrenciales incorpora la estimación de indicadores de torrencialidad como el número de Melton, el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales IVET planteado por el IDEAM, análisis geomorfológico con paleoinundaciones y zonifica mediante método semicuantitativo los cuerpos de agua que presentan posibilidad de avenidas torrenciales dentro del área de estudio utilizando la estimación de volumen de sedimentos planteada por Miura (2019) y el modelo HAND de propagación de flujos planteado por Geotrie (2017).
- ▽ El cálculo de amenaza por inundación desarrolla una zonificación a partir de nuevas modelaciones hidrodinámicas por método semicuantitativo HAND de propagación de flujos planteado por Geotrie (2017).
- ▽ La estimación de amenaza por inundación en el área rural considera las manchas de inundación históricas recopiladas, análisis geomorfológico con paleoinundaciones y calcula mediante

modelación hidrodinámica por método semicuantitativo las zonas de amenaza en todos los drenajes que tienen influencia sobre el área de estudio.

A continuación, se conceptualizan términos involucrados dentro de la gestión del riesgo siguiendo la terminología sobre gestión de riesgo de desastres y fenómenos amenazantes del comité nacional para el conocimiento del riesgo del SNGRD:

Adaptación: comprende el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados o a sus efectos, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas. En el caso de los eventos hidrometeorológicos la adaptación al cambio climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad.

Amenaza: peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Avenida torrencial: creciente súbita que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca está compuesta por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre, con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad. Son uno de los tipos más comunes de amenazas y son extremadamente peligrosas debido a su naturaleza rápida. Sus características son: corta duración, pequeña extensión de área de influencia, alto caudal pico y flujo rápido generalmente causantes de daños importantes a la propiedad. Ocurren a causa de tormentas de alta intensidad, en áreas de altas pendientes en las cuencas y cobertura vegetal pobre, que se ven afectadas de manera importante cuando el índice de infiltración se reduce por tormentas previas. Se pueden subdividir de acuerdo con el material de arrastre de la corriente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Áreas con condición de amenaza: áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo.

Áreas con condición de riesgo: áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos.

Delimitación: identificación del límite de un área determinada mediante un polígono. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo.

Evento: cualquier acontecimiento que probablemente pueda ocurrir en una posición y momento determinados, que lo definen como un punto en el espacio-tiempo y que representa a la fuente en términos de las respectivas características, dimensiones y localización geográfica (Portilla M., 2001).

Exposición (elementos expuestos): se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Factores condicionantes: cualquier acontecimiento, circunstancia, suceso o situación previa que predispone o prepara las condiciones de la fuente ante la materialización de un evento. La caracterización de estos factores, así como la identificación de sus interacciones, permite la incorporación en la zonificación de la susceptibilidad y de esta manera en la evaluación de la respectiva amenaza para un área determinada (Glade & Crozier, 2005).

Factores detonantes: también llamados desencadenantes y corresponden a cualquier acontecimiento, circunstancia, suceso o caso posible que genere una perturbación de la fuente y conlleve a la materialización de un evento (Portilla M., 2012).

Fuente: lugar o sitio donde se puede generar un evento.

Gestión de riesgo: de acuerdo con el artículo 4, numeral 11 de la Ley 1523 de 2012, “es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”.

Inundaciones: las inundaciones son fenómenos hidrológicos resultado de la dinámica de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas ocasionando un aumento progresivo del nivel de las aguas que sobrepasa la capacidad de retención del suelo y supera 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.

- **Inundaciones lentas:** son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, reportando afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses. Modificado de (IDEAM, 2016).
- **Inundaciones rápidas:** son las que ocurren en las zonas confinadas de los cuerpos de agua tras la ocurrencia de crecientes súbitas de caudal generándose desbordamiento de los cauces, el cual ocurre y desaparece rápidamente.

Movimiento en masa: equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas. La terminología y clasificación de movimientos en masa para este documento es conforme a la Guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2007), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Ávila, y otros, 2015).

- **Caídas:** la caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (PMA: GCA, 2007). Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Una característica importante de las caídas es que el movimiento no es masivo ni del tipo flujo (PMA: GCA, 2007).
- **Vuelcos:** se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).
- **Deslizamientos:** son un movimiento en sentido ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una o más superficies de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (modificado de PMA: GCA, 2007). Los deslizamientos pueden ser rotacionales, traslacionales (planares o en cuña) o compuestos según la forma del movimiento y la cantidad de superficies de falla.
- **Propagaciones laterales:** la propagación de un suelo cohesivo o masa de roca combinado con un hundimiento general de la masa de material fracturado sobre un material subyacente cohesivo más blando (Cruden & Varnes, 1996). La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material (PMA: GCA, 2007).
- **Flujos:** es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco (PMA: GCA, 2007). En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Los flujos son movimientos espacialmente continuos en los que las superficies de cizalla se encuentran muy próximas y generalmente no se conservan, la distribución

de velocidades en la masa desplazada se parece a la que se presenta en un fluido viscoso. Por este motivo, la masa movida no conserva la forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo, formas lobuladas cuando interesan a materiales cohesivos y desparramándose por la ladera o formando conos de deyección cuando afectan a materiales granulares (Corominas, 2007). Según el tipo de material involucrado, contenido de humedad, velocidad de movimiento y otros factores, se pueden clasificar en flujos de roca, flujos de suelo, flujos secos, flujos de detritos, flujos de lodos, flujos de tierra, crecientes de detritos, avalanchas de detritos, avalanchas de rocas, reptamiento, soliflucción, entre otros.

Susceptibilidad: es el grado de predisposición que tiene una fuente a que en él se genere un evento (Escobar, 2007).

Intervención correctiva: proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Intervención prospectiva: proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevos riesgos y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y en general todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.

Mitigación del riesgo: medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente (Ley 1523 de 2012).

Ordenamiento territorial: el ordenamiento del territorio municipal y distrital comprende un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, emprendidas por los municipios o distritos y áreas metropolitanas, en ejercicio de la función pública que les compete, dentro de los límites fijados por la Constitución y las leyes, en orden a disponer de instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales (Ley 388 de 1997).

Paleoinundaciones: método que identifica zonas de amenaza por inundaciones mediante la disposición y tipología de las formas del terreno y los depósitos generados durante o tras un evento de inundación las cuales no disponen de información histórica registrada o datada. Con ello se pueden delimitar áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial y sus márgenes, y por tanto susceptibles a ser inundadas en el marco de la dinámica natural de la corriente fluvial, frecuencia cualitativa de inundación, e incluso inferir ordenes de magnitud de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga solidada transportada.

Plan de gestión del riesgo: es el instrumento que define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, mediante las cuales se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y de manejo de desastres, en el marco de la planificación del desarrollo.

Reducción de riesgo: proceso de la gestión del riesgo compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevos riesgos en el territorio, entiéndase: prevención del riesgo. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera.

Resiliencia: la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.

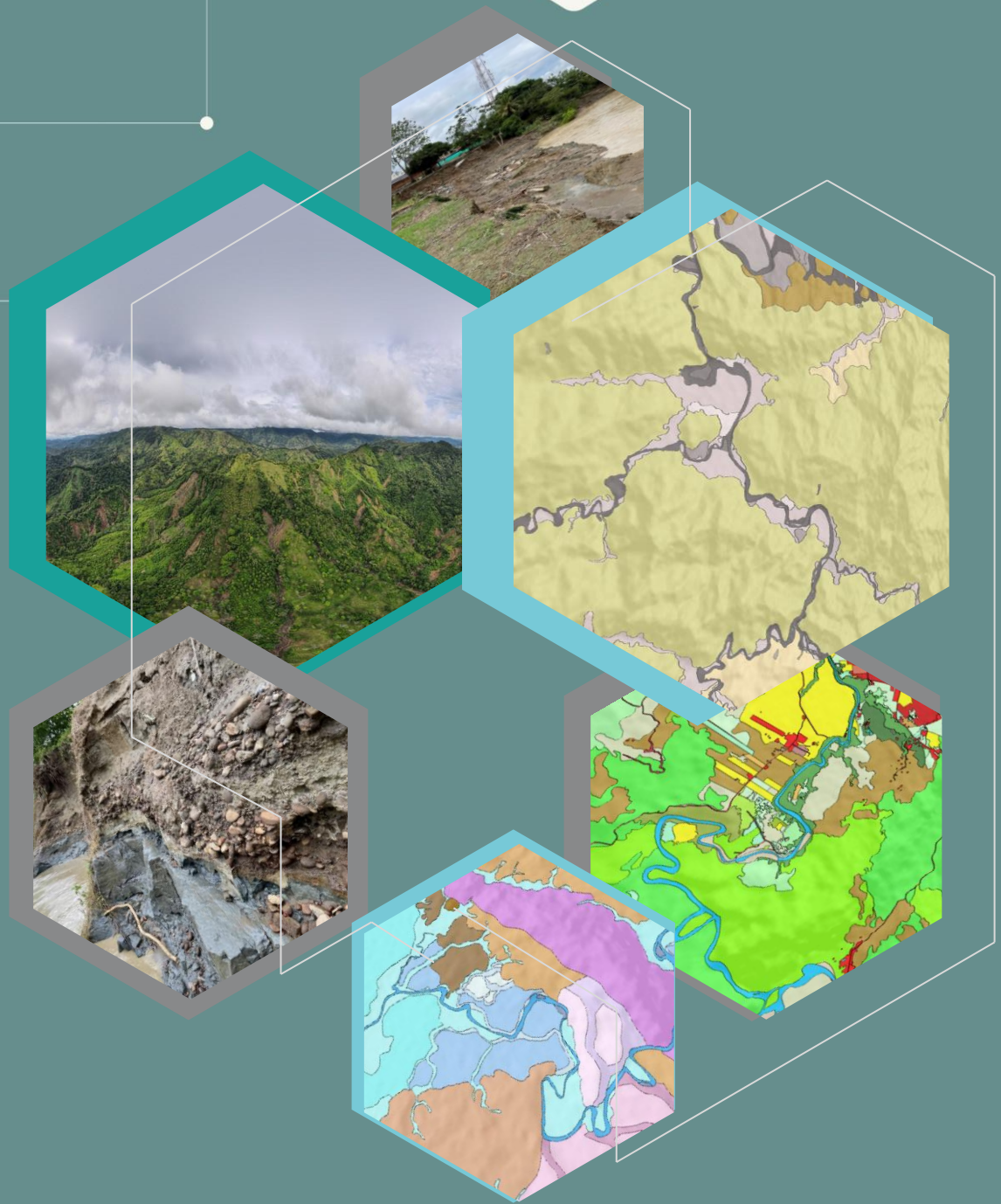
Riesgo de desastres: corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socionatural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Vulnerabilidad: 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.

Zonificación: representación cartográfica de áreas con características homogéneas. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo.



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



INSUMOS PARA LA
ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

A. INSUMOS PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

1. Recopilación de información precedente

La base para el desarrollo de la zonificación es la revisión y recopilación de fuentes bibliográficas de diferentes documentos relacionados con la metodología de zonificación para los fenómenos citados en el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015, con el fin de identificar la metodología pertinente. Adicionalmente se complementa con la base cartográfica suministrada por la Corporación para el desarrollo sostenible del Urabá (CORPOURABA) y el municipio de Apartadó, estudios geotécnicos y de suelos realizados en el municipio, estudios del Servicio Geológico Colombiano (SGC), documentos y cartografía de los POMCA río León y río Turbo Currulao., entre otros documentos recopilados los cuales se describen en los siguientes numerales.

Finalmente se consultaron diferentes documentos como la "Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa" IDEAM, la "Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE LAND COVER adaptada para Colombia", la "Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico colombiano", la "Guía Metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000" IDEAM; el documento "SIG para la susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca del río Campo Alegre"; "Simulación hidráulica aplicada usando HEC-Ras" de Mario Mori Balca; "Guía técnica para la formulación de los planes y manejos de cuencas hidrográficas POMCA" del Ministerio de Medio Ambiente; "zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2000 y 1:5000 en áreas urbanas para 10 municipios del territorio colombiano" IDEAM-UNAL 2013 y documentos de caracterización de las condiciones de riesgo de varios POMCA del país en las que se aplican métodos estadísticos y determinísticos cuantitativos y semicuantitativos para evaluación de amenaza por sismo, movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.

En esta fase se obtiene una visión global del territorio y se identifican las variables importantes de estudios precedentes relacionados a la existencia de eventos o registros históricos y con las variables temáticas referentes a factores de propensividad que aportan a la susceptibilidad y amenaza en el territorio.

1.1 Registro eventos históricos

Se realizó una revisión de registros históricos de eventos relacionados con los fenómenos de estudio (Inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales), para ello fue necesaria la búsqueda de noticias, actas, registros de las actas del consejo municipal de gestión de riesgo, bases de datos de DESINVENTAR y del SGC y demás documentos que hayan consignado información relacionada, así como la información suministrada por los habitantes de la región. Esta revisión es importante ya que muestra los hechos históricos del municipio en cuanto a fenómenos naturales, el comportamiento del área de estudio, las razones o causas por las cuales ocurrieron; de igual manera también permite determinar el estado y futuro comportamiento de los eventos. Con respecto al Sistema de Información de Movimientos en Masa -SIMMA, se encontraron 12 eventos tipo deslizamiento y caída que hacen parte del inventario (4) y catálogo (8) de eventos amenazantes realizados en los ejercicios de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 como se observa en la Figura 1. En la Figura 2 se muestra el detalle de proceso 33268 inventariado por el SGC.

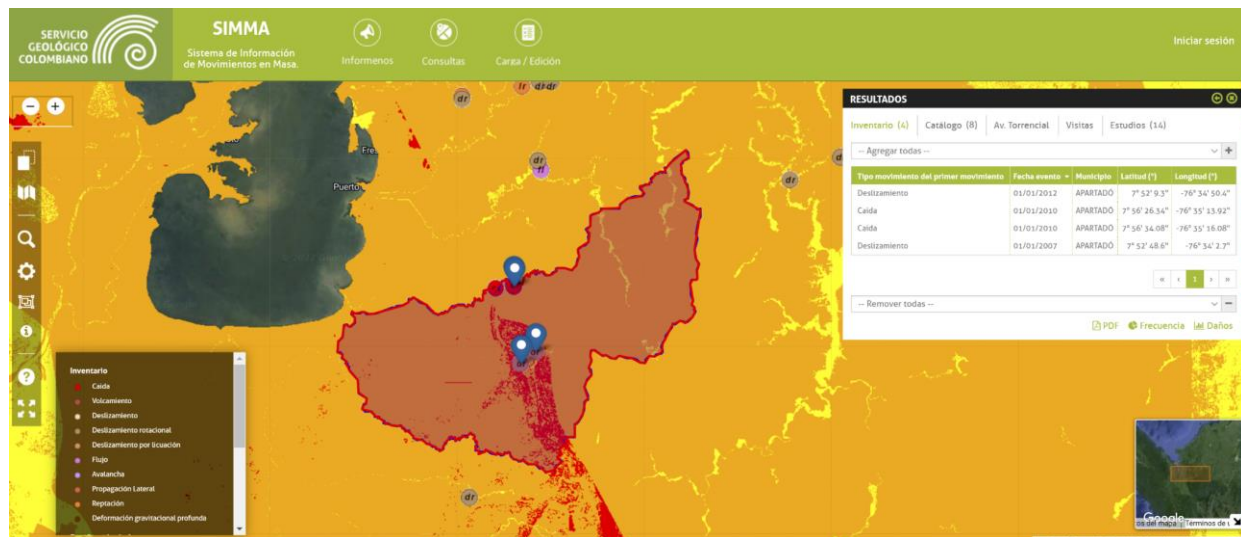


Figura 1. Inventario y catálogo de eventos SIMMA. Fuente SGC, 2016

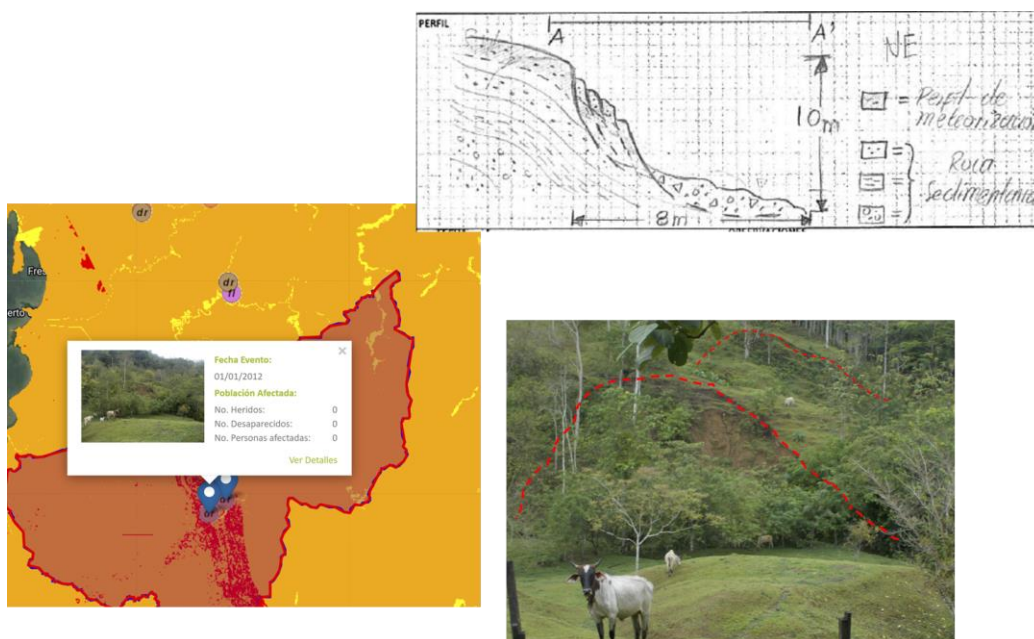


Figura 2. Detalle inventario PMD SIMMA 33268. Fuente modificado a partir de SGC, 2016

De la información recopilada por bases de atención a emergencias (Tabla 1) se encontró un registro histórico de 15 eventos por inundación en el río Apartadó, Vijagual, Grande y sus afluentes, afectando en diferentes ocasiones cultivos e infraestructura en la cabecera municipal, principalmente los barrios el Concejo, la Esperanza, San Fernando, la Chinita, Fundadores, Ortiz, Vélez, Los Pinos, Nueva Civilización, Obrero, Primero de Mayo, Las Brisas, entre otros y centros poblados de baja pendiente (Churidó, Vijagual, El Reposo, Lomaverde, Zungo Carretera, San Martín, Puerto Girón, San Pablo, El Diamante) y cerca del margen de los ríos que tributan al río Apartadó en los centros poblados de Salsipuedes, La Victoria y San José de Apartadó, la gran mayoría reportados durante los años 1965 y 2017. Por otro lado, un registro de deslizamiento en la vereda el Guineo en 2017 no hay registros de avenidas torrenciales en ninguno de los

cuerpos de agua del municipio. De igual manera reportan sismos en los años 1977 (30 de agosto de 1977 con epicentro en Apartadó, en el Urabá antioqueño fue el epicentro de un sismo con intensidad de 6,6 grados, que dejó un muerto y una veintena de heridos), 1992 (17 de octubre de 1992 (Figura 3): durante tres días toda Antioquia se sacudió. Las víctimas fatales fueron cinco, y los heridos cerca de 50 pero los daños fueron millonarios; 114 familias de Murindó perdieron todo. La población quedó prácticamente destruida. Los sismos generaron la erupción de un volcán submarino y de uno terrestre de lodo, el Cacahual y 4 incendios de las coberturas, atendidos durante los años 2012 (2) y 2014 (2).

Tabla 1. Eventos históricos reportados en bases de datos de atención a emergencias

Serial	Evento	Departamento	Municipio	Fecha	Ubicación
1965-0024	Vendaval	Antioquia	Apartadó	7/07/65	
1967-0041	Vendaval	Antioquia	Apartadó	8/07/67	
1973-0198	Tormenta	Antioquia	Apartadó	16/07/73	
1975-0372	Inundación	Antioquia	Apartadó	16/09/75	
1975-0401	Inundación	Antioquia	Apartadó	10/10/75	
1977-0149	Sismo	Antioquia	Apartadó	30/08/77	
1977-0161	Sismo	Antioquia	Apartadó	15/09/77	
1979-0214	Inundación	Antioquia	Apartadó	22/07/79	
1981-0325	Inundación	Antioquia	Apartadó	15/05/81	
1982-0400	Vendaval	Antioquia	Apartadó	3/08/82	
1988-0075	Tormenta	Antioquia	Apartadó	6/06/88	Urabá
1991-0184	Inundación	Antioquia	Apartadó	16/11/91	
1992-0159	Sismo	Antioquia	Apartadó	18/10/92	
1993-0127	Inundación	Antioquia	Apartadó	3/05/93	Barrios. El Concejo, Vélez, Ortiz, La Playita, La Esmeralda
1993-0200	Inundación	Antioquia	Apartadó	15/05/93	
1994-0316	Inundación	Antioquia	Apartadó	18/05/94	Corregimiento. Río Grande y caserío Ahuyamita.
1995-0616	Inundación	Antioquia	Apartadó	27/08/95	
1996-0009	Inundación	Antioquia	Apartadó	12/01/96	
1996-0464	Inundación	Antioquia	Apartadó	4/06/96	San Fernando La Esmeralda
1996-0683	Inundación	Antioquia	Apartadó	16/07/96	V. Puerto Giron
1998-0502	Vendaval	Antioquia	Apartadó	10/08/98	
2000-0247	Inundación	Antioquia	Apartadó	2/05/00	
2001-0327	Vendaval	Antioquia	Apartadó	18/07/01	Veredas el Guineo, San Pablo, El Tigre, El Diamante, Salsipuedes.
2001-0625	Inundación	Antioquia	Apartadó	15/10/01	
2003-0351	Inundación	Antioquia	Apartadó	27/09/03	
2004-0197	Vendaval	Antioquia	Apartadó	18/05/04	
2005-0279	Inundación	Antioquia	Apartadó	13/05/05	
2005-0506	Inundación	Antioquia	Apartadó	20/08/05	
2006-0526	Inundación	Antioquia	Apartadó	30/05/06	
2006-0909	Inundación	Antioquia	Apartadó	22/11/06	
2007-0254	Inundación	Antioquia	Apartadó	10/05/07	Corregimiento de San José. Barrio el Concejo, la Esperanza
DGR-2008-00279	Vendaval	Antioquia	Apartadó	9/05/08	
DGR-2008-00535	Inundación	Antioquia	Apartadó	12/06/08	
DGR-2008-01046	Inundación	Antioquia	Apartadó	5/11/08	

Serial	Evento	Departamento	Municipio	Fecha	Ubicación
DGR-2009-00019	Inundación	Antioquia	Apartadó	16/01/09	
DGR-2010-01957	Inundación	Antioquia	Apartadó	13/12/10	Corregimiento el Reposo.
UNGRD-2012-0026	Incendios de las coberturas de la tierra	Antioquia	Apartadó	30/01/12	
UNGRD-2012-0067	Incendios de las coberturas de la tierra	Antioquia	Apartadó	12/03/12	
UNGRD-2012-0201	Vendaval	Antioquia	Apartadó	20/07/12	
UNGRD-01460	Inundación	Antioquia	Apartadó	23/04/13	
UNGRD-01487	Inundación	Antioquia	Apartadó	26/04/13	
UNGRD-01679	Inundación	Antioquia	Apartadó	15/05/13	
UNGRD-01678	Inundación	Antioquia	Apartadó	15/05/13	
UNGRD-02718	Inundación	Antioquia	Apartadó	5/09/13	
UNGRD-2014-0088	Incendios de las coberturas de la tierra	Antioquia	Apartadó	31/03/14	
UNGRD-2014-0090	Incendios de las coberturas de la tierra	Antioquia	Apartadó	2/04/14	
UNGRD-2014-0164	Vendaval	Antioquia	Apartadó	9/07/14	Veredas afectadas son: Buenos Aires; la Unión; Guineo Bajo
UNGRD-2014-0244	Inundación	Antioquia	Apartadó	2/09/14	
UNGRD-2016-0188	Inundación	Antioquia	Apartadó	29/05/16	
UNGRD-2016-0265	Inundación	Antioquia	Apartadó	29/08/16	
UNGRD-2016-0311	Inundación	Antioquia	Apartadó	21/10/16	
UNGRD-2017-0157	Inundación	Antioquia	Apartadó	31/05/17	
UNGRD-2017-0158	Deslizamiento	Antioquia	Apartadó	2/06/17	Finca Los dos hermanos
UNGRD-2017-0222	Inundación	Antioquia	Apartadó	7/09/17	12 Barrios y 3 Corregimientos afectados.
UNGRD-2017-0256	Inundación	Antioquia	Apartadó	21/10/17	Sector El Reposo

Fuente DESINVENTAR



Figura 3. Recorte infografía sismo Murindó. Fuente SGC

Se adelantaron espacios de apropiación y espacialización de eventos mediante cartografía social (Figura 4) en donde se identificaron sectores históricamente críticos por fenómenos amenazantes, zonas recurrentes en la existencia de deslizamientos e inundaciones a donde periódicamente deben desplegar cuerpos de atención a emergencias y se deben entregar ayudas humanitarias.

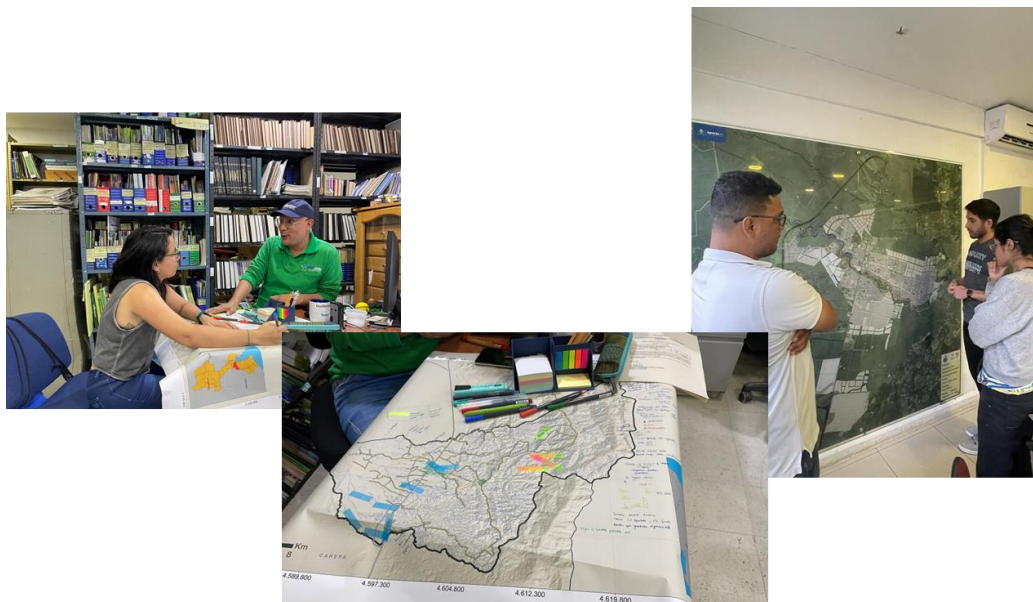


Figura 4. Identificación de eventos ocurridos mediante cartografía social. Izquierda espacio con CORPOURABA y derecha espacio con Secretaría de Planeación Apartadó.

Dentro de las visitas de campo y los procesos de fotointerpretación se encontraron 1797 procesos morfodinámicos, principalmente denudacionales, asociados a deslizamientos, flujos y procesos de socavación; igualmente, se visitaron sectores con deslizamientos en las veredas el Guineo, la Balsa, los Mandarinos, la Unión, Buenos Aires, entre otras, adyacentes a las quebradas El Muerto, El Cuchillo (Figura 5).

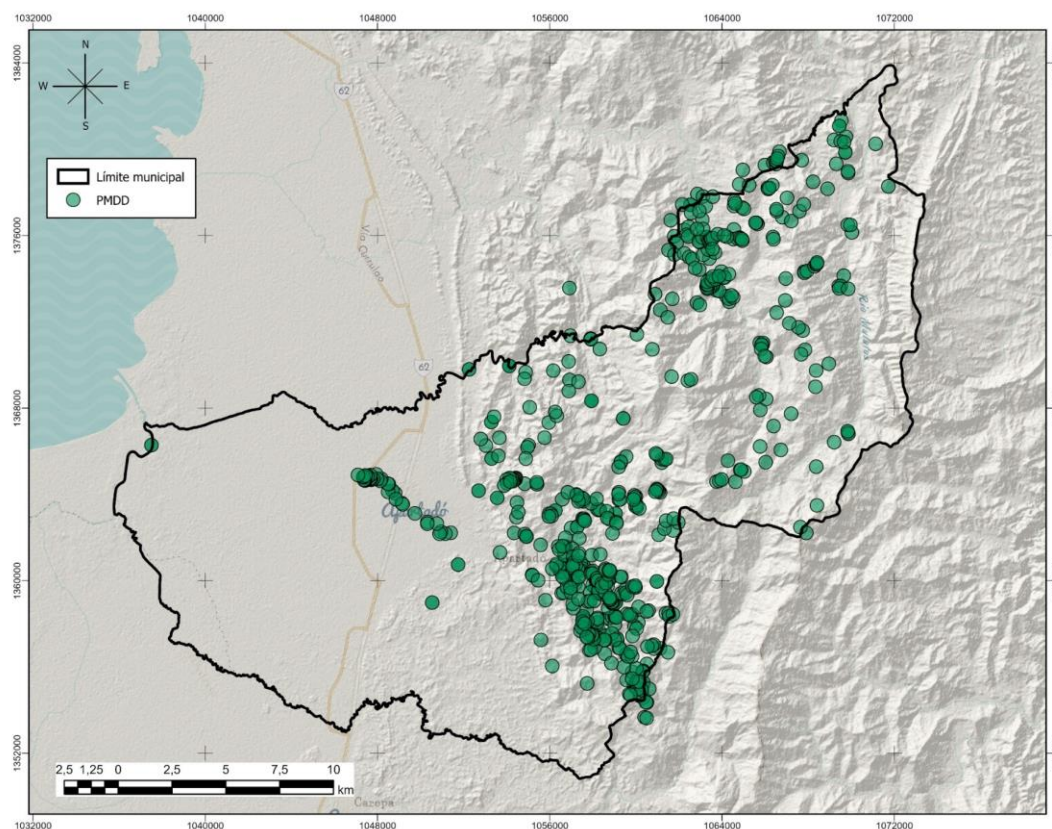


Figura 5. Procesos morfodinámicos denudacionales identificados

Durante la primer semana de mayo del año en el que se elabora este estudio (2022), se presentaron eventos de inundaciones, deslizamientos y flujos en gran parte de la extensión del municipio, eventos que fueron visitados por el equipo de Gestión de Riesgo de CORPOURABA y atendido por las entidades participantes del sistema de atención de emergencias y desastres del municipio de Apartadó, el cual conforma, entre otros, la administración municipal de Apartadó. A continuación se relacionan algunos eventos presentados durante el periodo citado.



Figura 6. Deslizamientos detonados en la quebrada el Muerto. Vereda Arenas Altas.



Figura 7. Vista panorámica deslizamientos detonados en la quebrada el Muerto. Vereda Arenas Altas.



Figura 8. Inundación 9 de mayo en la cabecera municipal, en la foto afectación sector La Esperanza.



Figura 9. Afectaciones inundación 9 de mayo río Apartadó en la cabecera municipal barrio el Concejo, área de expansión urbana y zonas rurales.



Figura 10. Mosaico de fotografías (izq.) y vista 3D ortofotomosaico (der) deslizamiento detonado en la quebrada La Sucia. Fuente: elaborado con información CORPOURABA (informe R-PG-08 300-08-02-01-3274- diciembre 2021 Cano J.& Orejuela F.)



Figura 11. Deslizamiento detonado vereda Buenos Aires.



Figura 12. Material transportado por inundaciones en mayo de 2022 y efectos de socavación en el sector Puente La Libertad de la cabecera municipal.

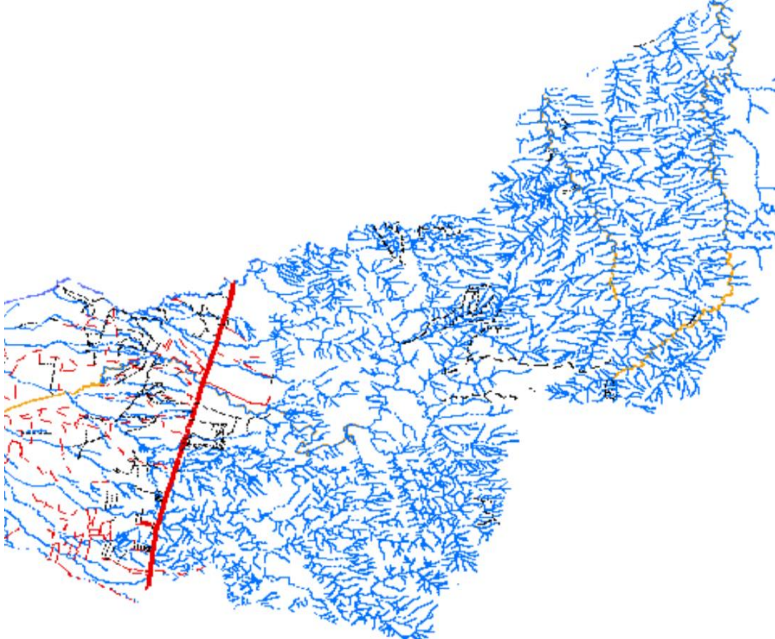


Figura 13. Socavación en el sector Puente El Vélez de la cabecera municipal, vivienda evacuada.

1.2 Cartografía base y sensores remotos

Se realiza la recopilación y depuración de las bases de datos geográficas oficiales 1:25.000 elaboradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC levantadas durante la década de 2010 e integradas en el año 2017, de igual manera se realiza el mosaico que compila el modelo digital de elevación ALOS PALSAR con resolución de 12.5m, suficiente para la elaboración de insumos y zonificaciones a escala rural (Tabla 2). De igual manera se consulta información, encontrada principalmente para escala rural de sensores remotos con resolución temporal reciente (Tabla 3) y temporalidades históricas (Tabla 4) para identificar cambios en la dinámica del municipio. De igual manera, la administración municipal cuenta con una imagen tomada durante el año 2013 (Figura 14) útil para procesos de georreferenciación y control morfodinámico. CORPOURABA cuenta con un adecuado inventario de fotografías aéreas (Figura 15) las cuales se digitalizaron y georreferenciaron, toda esta información es útil al momento de generar cartografía temática de insumos y zonificación de amenazas.

Tabla 2. Cartografía base recopilada

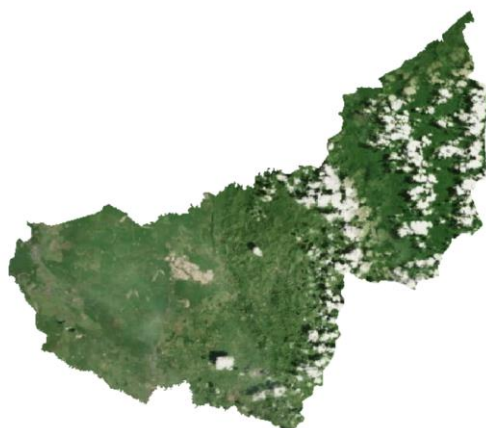
Información cartográfica base			
			
Título	Autor	Año	Relevancia
Mapa topográfico escala 1:25.000 de las planchas 79IVB, 79IVC, 79IVD, 80IC, 80IIIA, 80IIIC, 90IIA, 90IIB y 91IA.	Instituto Geográfico Agustín Codazzi	2017	Definición en escala 1:25.000 de los componentes fisiográficos del área de estudio.
Modelo Digital de Elevación DEM			



Mosaico digital de elevación construido con información del sensor ALOS PALSAR con un nivel de reconocimiento FBS, el cual registra elevaciones no equiparable con altura sobre el terreno. Según (JAXA/METI, 2011) el radar de apertura sintética (SAR) de banda L de PALSAR produce observaciones detalladas, de día y de noche, en todas las condiciones meteorológicas, así como interferometría de paso repetido. Los datos de PALSAR provienen de múltiples modos de observación con polarización variable, resolución, ancho de franja y ángulo fuera del nadir. PALSAR fue uno de los tres instrumentos del Advanced Land Observing Satellite-1 (ALOS), también conocido como DAICHI, desarrollado para contribuir a los campos de mapeo, observación precisa de la cobertura terrestre regional, monitoreo de desastres y estudio de recursos. ALOS fue una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). Este mosaico está conformado por imágenes capturadas el 9 de marzo de 2011.

Tabla 3. Sensores remotos

Mosaico imágenes Sentinel-2 L2A



Mosaico construido con imágenes de la misión Sentinel 2 con un nivel de procesamiento L2A, es decir, ortorectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera. Este mosaico está conformado por imágenes capturadas el 13 de octubre de 2021. La selección de las imágenes se realizó buscando el menor cubrimiento de nubes en el área de estudio, razón por la cual los periodos de toma de las imágenes difieren.






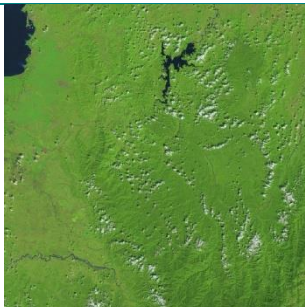

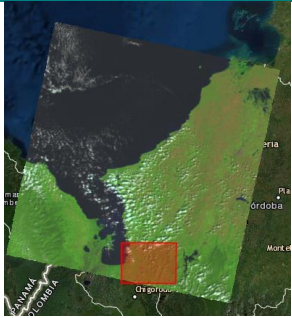
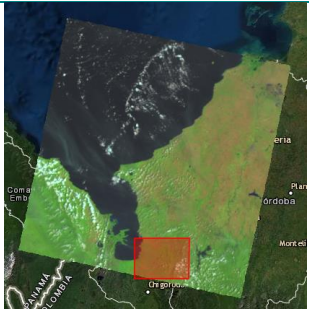
Nombre del archivo	% Cobertura de nubes	
S2A_MSIL2A_20211013T153621_N0301_R068_T18NTN_20211013T195326	19,44%	
Sensores remotos Mosaico Imágenes Landsat 8		
		
<p>Se construyeron mosaicos a partir de imágenes Landsat-8 Colección 2 de nivel 2 del año 2014 al 2021. Esta colección se encuentra ortorectificada con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera. Dada la alta cobertura de nubes se buscaron mosaicos de fotografías para cada año que contaran con la menor cobertura en el área de influencia del proyecto. La cobertura de nubes de las imágenes varía entre el 4% y el 83%, sin embargo, es importante tener en cuenta que además de este parámetro para la búsqueda de las fotografías, se tuvo en cuenta su distribución espacial propendiendo por una menor cobertura en el área de influencia del proyecto.</p>		
Nombre del archivo	Fecha toma	% Cobertura de nubes
LC08_L2SP_010054_20170224_20200905	10/02/2020	17,49%

Tabla 4. Imágenes satelitales recopiladas para análisis multitemporal

Id	Fecha de adquisición	Cobertura nubes %	Vista previa
Sentinel 2B			
L1C_T18N UP_A0204 00_202101 31T153618	31/01/21	14,17%	

Id	Fecha de adquisición	Cobertura %	nubes	Vista previa
L1C_T18N UP_A0056 71_201804 07T153815	7/04/18	9,54%		
L1C_T18N UP_A0139 36_201802 21T153745	21/02/18	9,01%		
L1C_T18PT Q_A01393 6_2018022 1T153745	21/02/18	9,03%		
L1C_T18N UP_A0040 98_201712 18T153606	18/12/17	1,02%		
Landsat 8				
Id	Fecha de adquisición	Cobertura %	nubes	Vista previa

Id	Fecha de adquisición	Cobertura % nubes	Vista previa
LC08_L1TP_010054_2 0180110_2 0200902_0 2_T1	10/01/18	16,49%	
LC08_L2SP_010054_2 0181228_2 0200829_0 2_T1	28/12/18	8,71%	
LC08_L2SP_010054_2 0170224_2 0200905_0 2_T1	24/02/17	12,27%	

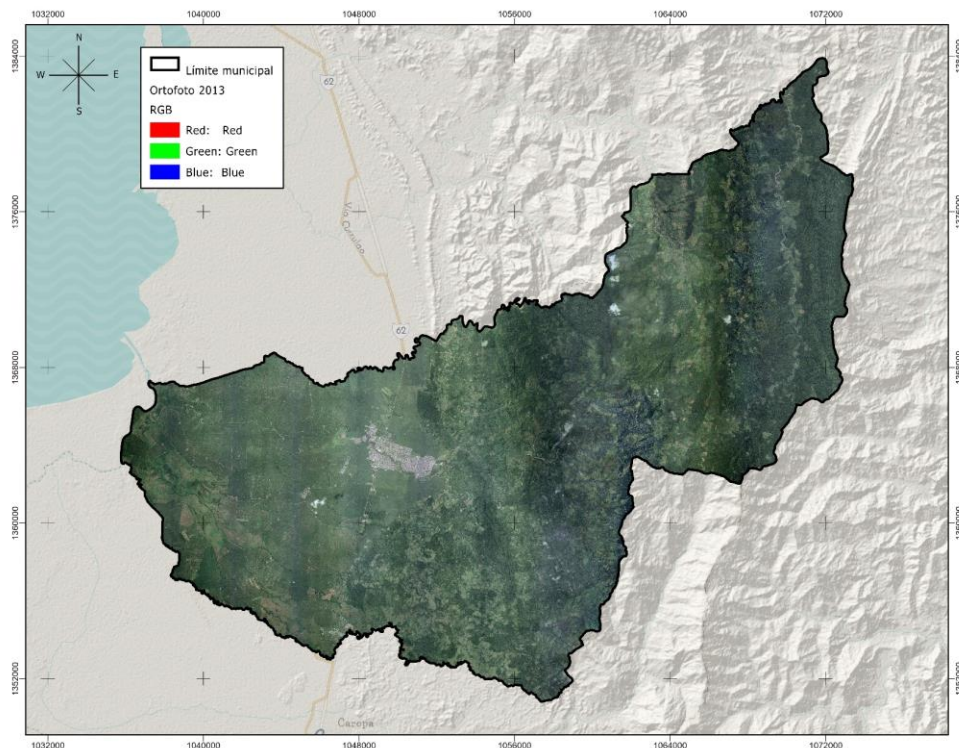


Figura 14. Ortofotografía (imagen satelital) municipio de Apartadó. Fuente: equipo POT 2022.

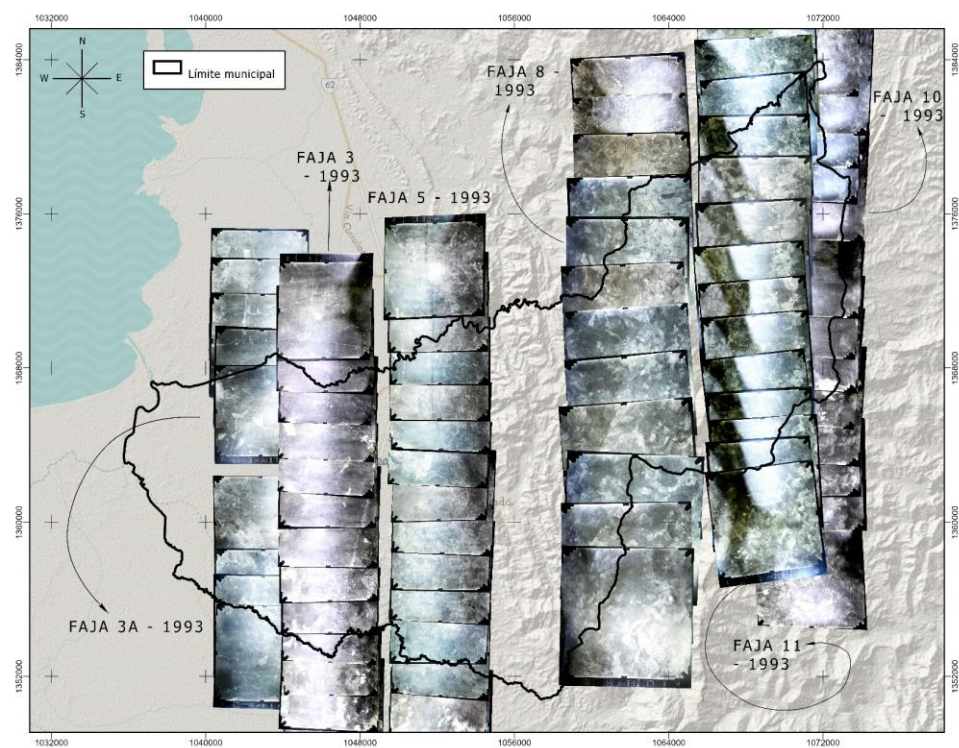


Figura 15. Fotografías aéreas disponibles para el año 1993. Construido con información CORPOURABA

1.3 Geología

En décadas anteriores se han realizado diferentes estudios cuyo objetivo principal ha sido determinar las características geológicas que se presentan en el municipio de Apartadó y los posibles recursos del subsuelo que podían ser utilizados como base para el desarrollo económico de la región. Algunos de estos estudios han aportado al entendimiento del contexto geológico de la zona y por este motivo se listan a continuación aquellos documentos que han sido relevantes para la realización del presente trabajo, específicamente en el apartado geológico (Tabla 5). En las Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se muestra la cartografía temática base geológica encontrada en escalas 1:100.000 (SGC), 1:25.000 (CORPOURABA y otros) y el insumo usado en la presentación de estudios básicos de riesgo (POT Modernos), respectivamente.

Partiendo de la concepción nacional (escala 1:100.000), se contemplan las planchas geológicas 79 Turbo, 80 Tierralta, 90 Chigorodó y 91 Belencito, las cuales fueron generadas en décadas diferentes, contienen caracterizaciones crono litoestratigráficas de unidades de la Cordillera Occidental del Mioceno al Holoceno; es de entender que la nomenclatura incluida en estas planchas obedece a las disposiciones que en el momento de su publicación estableció el comité internacional de estratigrafía, conceptos que fueron modificados y actualizados en el ajuste de este insumo.

Por otro lado durante los años 2018 y 2019 se presenta, dentro de un esfuerzo nacional, los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas POMCA, los POMCA del río León y de los ríos Turbo Currulao, el cual dentro de sus productos entrega una interpretación en escala semi intermedia de unidades geológicas básicas para ordenamiento las cuales presentan disimiles en nomenclatura y límites intercuenca, los cuales son ajustados y unificados para el presente estudio; de este insumo se resalta la recopilación de información estructural.

Tabla 5. Relación información recopilada geología

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Informe de la región de Urabá explorada por Andrade y Gibson en 1923	Gibson, W. C.	1923	Primer informe reportado sobre la geología de la región de la Provincia de Urabá en el Municipio de Turbo con fines de exploración petrolífera.
Historia de los estudios geológicos sobre Antioquia	Royo, J.	1946	Revisión bibliográfica de los estudios geológicos realizados hasta la fecha en la región del Urabá Antioqueño.
Mapa geológico general, departamento de Antioquia	Servicio Geológico Nacional	1946	Definición en escala 1:500.000 de las unidades geológicas del departamento de Antioquia.
On the geology of the Urabá and Northern Chocó Regions, NW - Colombia.	Haffer, J.	1967	Descripción de la estratigrafía y geología estructural de la región del Urabá Antioqueño.

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Evaluación de amenazas geológicas en el municipio de Apartadó	Ministerio de Minas y Energía; INGEOMINAS	1993	Descripciones de las unidades litológicas que afloran en el Urabá. Caracterización de los rasgos estructurales de la región.
Evaluación del agua subterránea en la región de Urabá, Departamento de Antioquia y mapa geológico	INGEOMINAS	1995	Descripciones litológicas actualizadas de las unidades presentes en el área de estudio. Caracterización regional de un marco geológico y estructural del área estudiada.
Cartografía geológica de la región del Sinú	INGEOMINAS	1997	Actualización detallada y sistemática de las unidades litoestratigráficas aflorantes en el noroeste de Colombia, que comprende las planchas 50, 51, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79 y 80.
Modelo hidrogeológico en el municipio de Apartadó, Urabá Antioqueño	Ríos, M.	1997	Descripción de unidades litológicas a partir de una nomenclatura informal presente en el Urabá Antioqueño. Caracterización regional y estructural de la zona.
Geología de la Plancha 79 Turbo	INGEOMINAS	1999	Definición en escala 1:100.000 de las unidades geológicas y la geología estructural que abarca el noroccidente del municipio de Apartadó.
Geología de la Plancha 80 Tierralta	INGEOMINAS	1999	Definición en escala 1:100.000 de las unidades geológicas y la geología estructural que abarca el sector nororiental del municipio de Apartadó.
Geología de los cinturones del Sinú y San Jacinto.	INGEOMINAS	2003	Definición actual de la cartografía, estratigrafía, geología estructural de los cinturones de Sinú y San Jacinto que abarcan las planchas 79 Turbo y 80 Tierralta en la que se encuentra ubicado Apartadó.
Investigación Integral del Andén Pacífico Colombiano	IGAC; INGEOMINAS	2005	Caracterización geotectónica y compilación de la estratigrafía del Andén Pacífico. Analiza las planchas 79 Turbo y 90 Chigorodó, que cubren el municipio de Apartadó.
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río Turbo-Currulao – Capítulo Geología	UT POMCA río Turbo Currulao; CORPOURABA	2018	Descripción más actualizada del marco geológico regional y local de la región norte del Urabá, donde se incluye parcialmente el municipio de Apartadó.

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río León - Capítulo Geología	ECOFORST; CORPOURABA	2019	Descripción más actualizada del marco geológico regional y local de la región sur del Urabá, donde se incluye parcialmente el municipio de Apartadó.
Consultoría para desarrollar la zonificación de amenazas y riesgos en las áreas urbanas de los municipios de Apartadó y Carepa, en el departamento de Antioquia	CONSORCIO ZONIFICACIÓN 2008; CORPOURABA	2011	Descripción geológica y geotécnica indicativa usada para la elaboración de los estudios básicos de riesgo urbanos vigentes del municipio de Apartadó.
Documento de diagnóstico que contiene la metodología, proceso y resultados de los estudios básicos para la incorporación de la gestión de riesgo en el POT. Programa POT modernos	Consortio Inypsa - Argea - Acceplan - Ur	2018	Descripción geológica regional indicativa usada para la elaboración de los estudios básicos de riesgo urbanos y rurales del municipio de Apartadó.

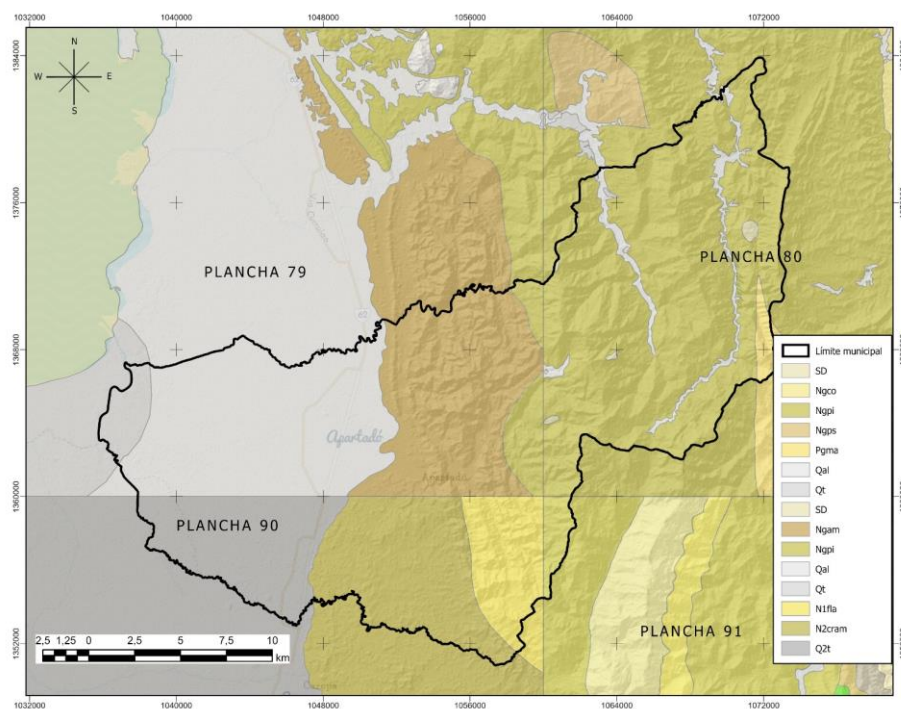


Figura 16. Geología 1:100.000 planchas 79, 80, 90 Y 91. Fuente: SGC (Antiguo INGEOMINAS)

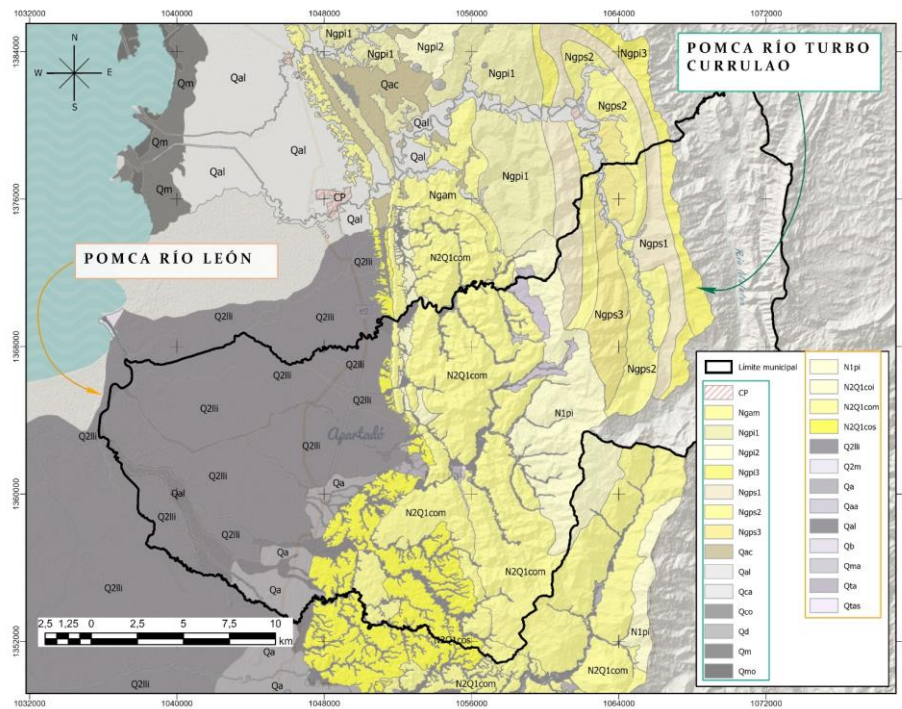


Figura 17. Geología básica. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

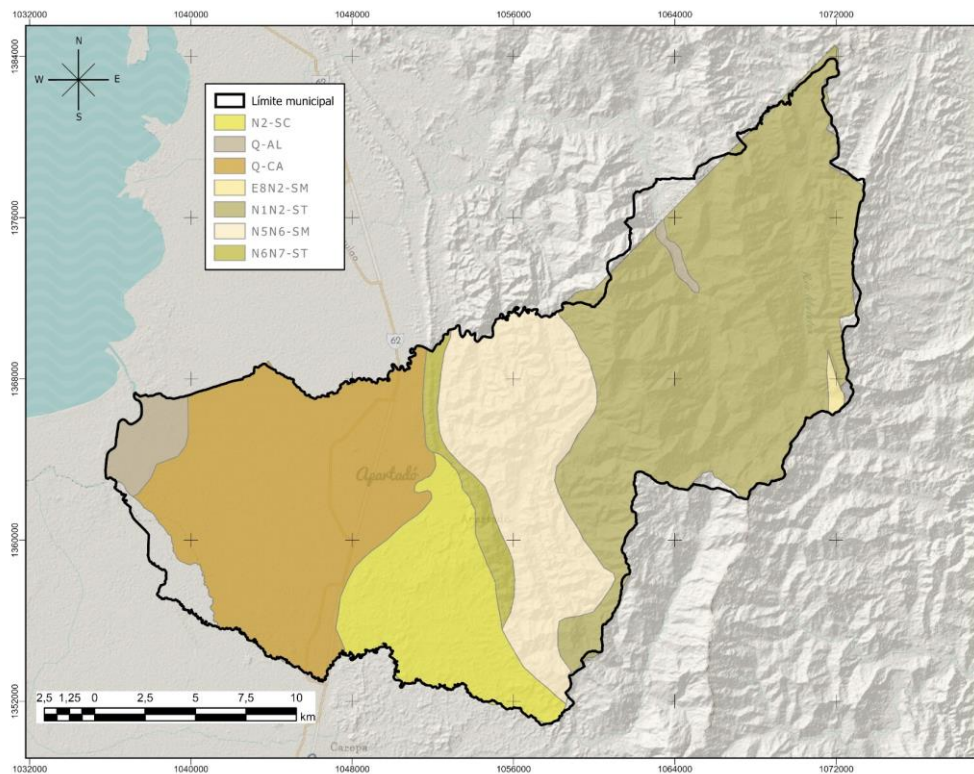


Figura 18. Geología básica. Fuente: (Consorcio Inypsa - Argea - Acceplan - Ur, 2018)

1.4 Unidades Geológicas Superficiales – UGS

Dentro de la información encontrada para este componente se resalta la interpretación de unidades geológicas superficiales generada en los POMCA río León y río Turbo Currulao la cual se describe en la Tabla 6 y muestra en la Figura 19, esta interpretación parte de la caracterización geomecánica de los materiales a través de muestreos geotécnicos y resume los parámetros de comportamiento de los materiales superficiales identificados.

Tabla 6. Relación información recopilada unidades geológicas superficiales

Título	Autor	Año	Relevancia
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río Turbo-Currulao – Capítulo UGS	UT POMCA río Turbo Currulao; CORPOURABA	2018	Definición en escala 1:25.000 o menor de la cartografía de unidades geológicas superficiales para la zona norte del municipio de Apartadó al este de la cuenca del río Turbo Currulao.
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río León – Capítulo UGS	ECOFORST; CORPOURABA	2019	Definición en escala 1:25.000 o menor de la cartografía de unidades de coberturas de la tierra definidas siguiendo la metodología Corine Land Cover el municipio de Apartadó se encuentra ubicado al norte de la cuenca del río Garagoa.
Consultoría para desarrollar la zonificación de amenazas y riesgos en las áreas urbanas de los municipios de Apartadó y Carepa, en el departamento de Antioquia	CONSORCIO ZONIFICACIÓN 2008; CORPOURABA	2011	Descripción geológica y geotécnica indicativa usada para la elaboración de los estudios básicos de riesgo urbanos vigentes del municipio de Apartadó.

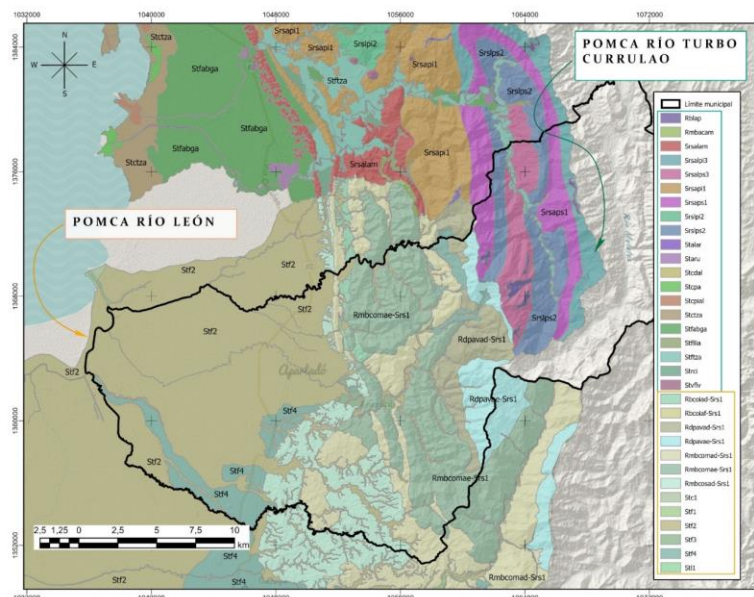


Figura 19. Unidades geológicas superficiales -UGS. Fuente: (CORPOURABA; ECOFORST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

1.5 Geomorfología

Con respecto a la información precedente en el municipio se encuentran diferentes estudios, en su mayoría con nomenclatura que cumple los estándares cartográficos emitidos por el Servicio Geológico Colombiano para mapas geomorfológicos con criterios morfogenéticos, los cuales se describen en la Tabla 7. Dentro de ellos se logró analizar y tomar como referente los realizados por el SGC en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín en escala 1:100.000 para la elaboración de mapas de amenaza por movimientos en masa a escala regional para las planchas 79 Turbo, 80 Tierralta, 90 Chigorodó y 91 Belencito como se muestra en la Figura 20, estos mapas caracterizan las geoformas a nivel de unidades geomorfológicas las cuales tienen un comportamiento predominantemente dominado por la dinámica estructural y tectónica (colores morados y rosados) en el municipio. De igual manera en la Figura 21 se muestra la interpretación de geoformas realizadas dentro del apoyo del programa POTS modernos, en donde se diferencian los aspectos macro geomorfológicos presentes en el municipio.

Como se planteó en el numeral anterior se revisa, en este caso, dentro de los POMCA existentes en el municipio la cartografía geomorfológica con criterios morfogenéticos la cual presenta una interpretación en escala semi intermedia de unidades y subunidades geomorfológicas para ordenamiento las cuales muestran una coherencia en dinámica frente los dos estudios analizados anteriormente como se observa en la Figura 22 y un mejor detalle en zonas con ambiente fluvial.

Tabla 7. Relación información recopilada geomorfología

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Evaluación de amenazas geológicas en el municipio de Apartadó	Ministerio de Minas y Energía; INGEOMINAS	1993	Breve descripción de la geomorfología del municipio de Apartadó, con respecto a los procesos morfodinámicos, actividad antrópica y sísmica.
Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa - Plancha 79 Turbo y memoria explicativa	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de las unidades geomorfológicas. Cubre el sector noroccidental del municipio de Apartadó, donde está ubicada la zona urbana.
Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa - Plancha 80 Tierralta y memoria explicativa	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de las unidades geomorfológicas. Abarca la zona nororiental del municipio de Apartadó.
Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa - Plancha 90 Chigorodó y memoria explicativa	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de las unidades geomorfológicas. Cubre parte del sector suroccidental del municipio de Apartadó.



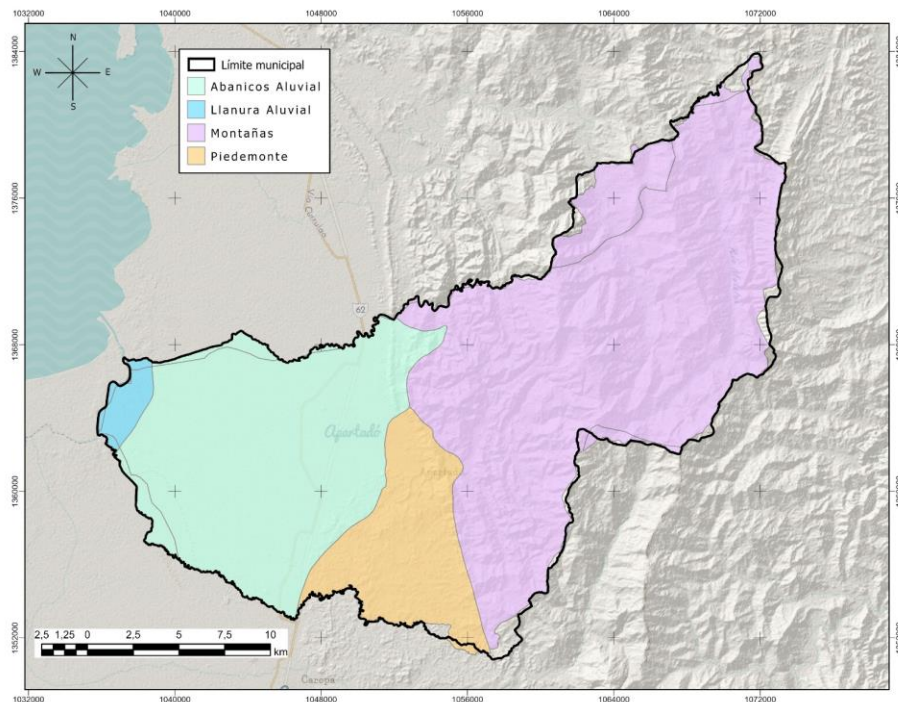


Figura 21. Geomorfología. Fuente: (Consortio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur, 2018)

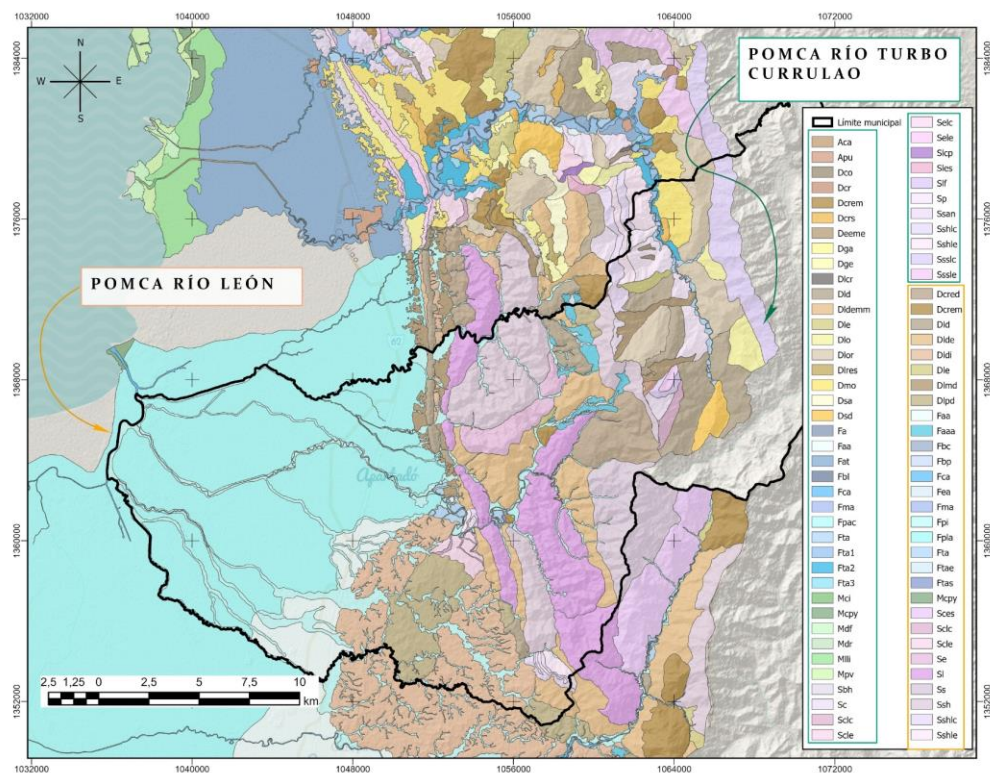


Figura 22. Geomorfología con criterios morfogenéticos. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

1.6 Coberturas y uso de la tierra

Dentro de la información encontrada para este componente se resalta la interpretación de coberturas y usos de la tierra generada en los POMCA y delimitada en escala 1:100.000 insumo IDEAM traído para los estudios POT modernos del municipio la cual se describe en la Tabla 8 y muestra en la Figura 23, esta interpretación se realiza usando es sistema de clasificación jerárquico Corine Land Cover, al analizar este insumo se evidencia la existencia de pastos limpios (231) predominantemente en la extensión del municipio.

Tabla 8. Relación información recopilada coberturas y uso de la tierra

Título	Autor	Año	Relevancia
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río Turbo-Currulao - Capítulo coberturas de la tierra y uso actual.	UT POMCA río Turbo Currulao; CORPOURABA	2018	Definición en escala 1:25.000 o menor de la cartografía de unidades de coberturas de la tierra definidas siguiendo la metodología Corine Land Cover el municipio se encuentra al sureste de la cuenca.
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río León - Capítulo coberturas de la tierra y uso actual.	ECOFORST; CORPOURABA	2019	Definición en escala 1:25.000 o menor de la cartografía de unidades de coberturas de la tierra definidas siguiendo la metodología Corine Land Cover el municipio se encuentra al norte de la cuenca.
Documento de diagnóstico que contiene la metodología, proceso y resultados de los estudios básicos para la incorporación de la gestión de riesgo en el POT. Programa POT modernos	Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur	2018	Descripción de coberturas Corine Land Cover 2012 1:100.000 usada para la elaboración de los estudios básicos de riesgo urbanos y rurales del municipio de Apartadó.

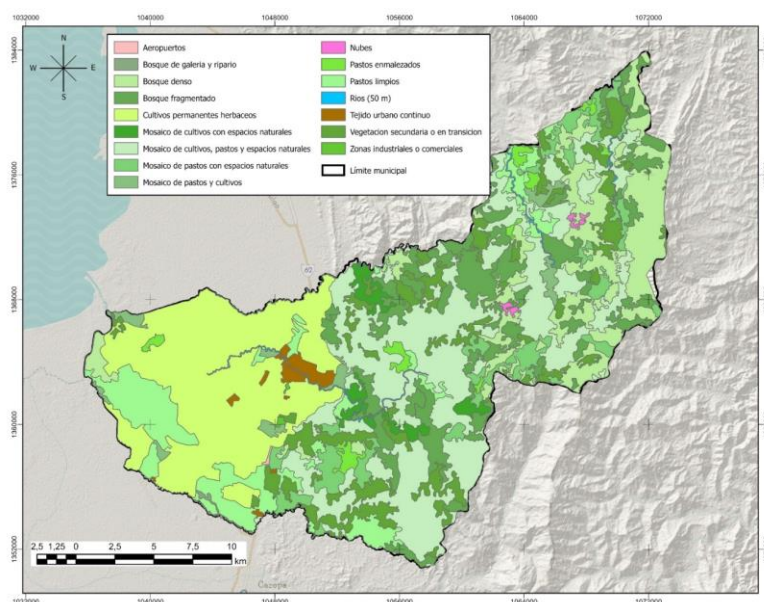


Figura 23. Coberturas y uso de la tierra. Fuente: (Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur , 2018)

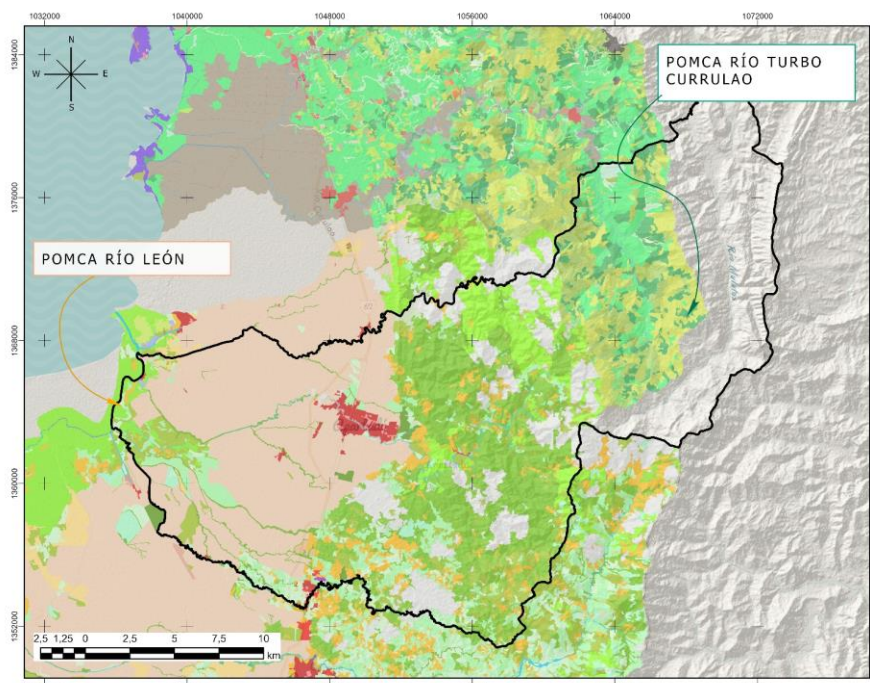


Figura 24. Coberturas y uso de la tierra. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

POMCA RLeón	
CODIGO, COBERTURA	
111, Tejido urbano continuo	311123, Palmar
112, Tejido urbano discontinuo	31121, Bosque denso bajo de tierra firme
121, Zonas industriales o comerciales	31122, Bosque denso bajo inundable
123, Zonas portuarias	31211, Bosque abierto alto de tierra firme
124, Aeropuertos	31311, Bosque fragmentado alto con pastos y cultivos
1315, Explotacion de materiales de construccion	31321, Bosque fragmentado alto con vegetacion secundaria
141, Zonas verdes urbanas	3141, Bosque de galeria alto
2213, Platano y banano	3142, Bosque de galeria bajo
2221, Otros cultivos permanentes arbustivos	3152, Plantacion de latifoliadas
2223, Cacao	321123, Arracachal
231, Pastos limpios	32121, Herbazal abierto arenoso
232, Pastos arbolados	3231, Vegetacion secundaria alta
233, Pastos enmalezados	3232, Vegetacion secundaria baja
242, Mosaico de pastos y cultivos	3331, Tierras erosionadas
2441, Mosaico de pastos con espacios naturales arboreos	334, Zonas quemadas
2442, Mosaico de pastos con espacios naturales arbustivos	411, Zonas pantanosas
31111, Bosque denso alto de tierra firme	413, Vegetacion acuatica sobre cuerpos de agua
311121, Bosque denso alto inundable heterogeneo	421, Pantanos costeros
	511, Rios
	99, Sin informacion

POMCA RTurbo	245	1212	3144
CoberturaTierra_UsoActual	411	1232	3152
NOMENCLAT	421	1241	3153
99	511	1315	3211
211	512	1324	3231
231	513	1422	3232
232	521	1423	3311
233	523	2213	3312
241	1112	2221	3332
242	1122	2231	12212
243	1131	3121	122111
244	1132	3142	122112
	1211	3143	

Figura 25. Leyenda coberturas y uso de la tierra. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

1.7 Geotecnia

Junto a la secretaría de planeación y ordenamiento territorial del municipio se realiza la recopilación y análisis de estudios de suelos, de diseños y mejoramiento de vías buscando generar una base de datos geotécnica integral útil para la evaluación de movimientos en masa y avenidas torrenciales. En la Tabla 9 se presentan los resultados de este proceso, también se recopila información de las caracterizaciones geomecánicas de los materiales identificados en las cuencas hidrográficas de los POMCA río Turbo Currulao y río León (Tabla 10) información de que complementa con caracterizaciones in situ en zonas con procesos de socavación, la espacialización de la información geotécnica recopilada se muestra en la Figura 26.

Tabla 9. Relación información recopilada geotecnia

Estudios de suelos Apartadó			
Nombre	Ubicación	Sondeos	Elaboró
Estudio geotécnico ARA	Cl 105 A # 108 65	3	
Manzanas 10 y 13 Ciudadela Maderos	Ciudadela Maderos	20	Consulcivil
Construcción edificación	Gualcalá	4	Ingeotecon
Compañía Aerofumigaciones Calima	Calima		Todo suelos
Diseño Bodegas Portón las Américas	Corregimiento Churidó	8	Construcciones Alib
Estudio geotécnico vivienda de tres pisos	Barrio 20 de enero	3	Isipro
Estudio Geotécnico y de suelos bodegas	Zona Franca Apartadó	3	Jorge Restrepo
Centro de acopio Parque Zungo	Parque Zungo	3	Oscar Rodríguez
Centro de acopio			
Nueva sede EPM	Cl 94 104	7	AIM Ingenieros Civiles
Sede Bancolombia	Cra 100 96	2	Pedro Serna
Complejo tecnológico agroindustrial SENA	Barrio estadio	3	Consorcio proceso CC
Plan Parcial el Porvenir		12	E&R
Puente peatonal	Calle 100	2	Vieco Ingeniería
Colegio UNIBAN	Colegio UNIBAN	3	Jorge Restrepo
Sede Sistema Gestión de Riesgo	Barrio Libertad	3	Lab suelos

Estudios de suelos Apartadó			
Nombre	Ubicación	Sondeos	Elaboró
Cubierta y graderías	Barrio Policarpa	3	José Luis Aldana
Proyecto Agrícola Santa María	KR 100 89	8	Consulcivil
Centro social comunitario	CL 103 92	6	Geofísica SAS
Sede Universidad de Antioquia	KR 100	8	Lab suelos
Bloques 1 piso Sede Antioquia	KR 100	8	Lab suelos
Espacio público parque lineal del río	KR 78 hasta KR 100	28	Compañía de estudios y diseños parque lineal río Apartadó
Estudio de suelos Centro Cultural	KR 93 96 A 13	4	John Jairo Botero
Puente peatonal barrio la Esmeralda	Barrio Esmeralda	2	Lab suelos
Institución educativa Mariano Ospina	Corregimiento San José de Apartadó	13	Lab suelos
Las Heliconias Etapa 1		6	EYR SAS
Diamante de softbol	Barrio Obrero	3	Jorge Humberto
Centro de integración ciudadana	CL 102 83	3	Luiz Gonzaga Montes
Sede Administrativa	KR 100 106 54	7	Jhon Botero
Plan parcial	Finca la Teca	4	Ramiro de Jesús Serna
Estadio Catherine Ibarguen	CL 103 Vía Alfonso López	6	Lab suelos
Etapa 3 Comfama	Cerca Ciudadela Curazaos	26	Consulcivil
Pavimento Rígido	Barrio Parroquia	13	Consultoría Geotecnia y ambiente
Institución educativa San Pedro Claver	Barrio Obrero	6	Jorge Restrepo
Institución educativa José Celestino Mutis	Serranía	4	Jorge Restrepo
Institución Heraclio Mena Padilla	CL 94 92 93	5	Consultorías Geotecnia y ambiente SAS
Zonificación a partir de potencial de licuación de la zona urbana del municipio de Apartadó	Apartadó	150	Tesis Adriana Cubides Cruz
Total		389	

Tabla 10. Relación información recopilada caracterización geotécnica POMCA

Tipo	Identificador	POMCA
Calicata	EG-09	Río Turbo Currulao
Calicata	EH-09A	Río Turbo Currulao
Sondeo	EG-09B	Río Turbo Currulao
Sondeo	EG-09C	Río Turbo Currulao
Apique	A4	Río Turbo Currulao
Apique	A6	Río Turbo Currulao
Apique	APPL24	Río León
Apique	APPL25	Río León
Apique	APPL26	Río León
Apique	APPL27	Río León
Apique	APPL28	Río León
Apique	APPL29	Río León

Tipo	Identificador	POMCA
Apique	APPL30	Río León
Sondeo	S001	Río León
Sondeo	S008	Río León
Sondeo	S010	Río León
Sondeo	S017	Río León

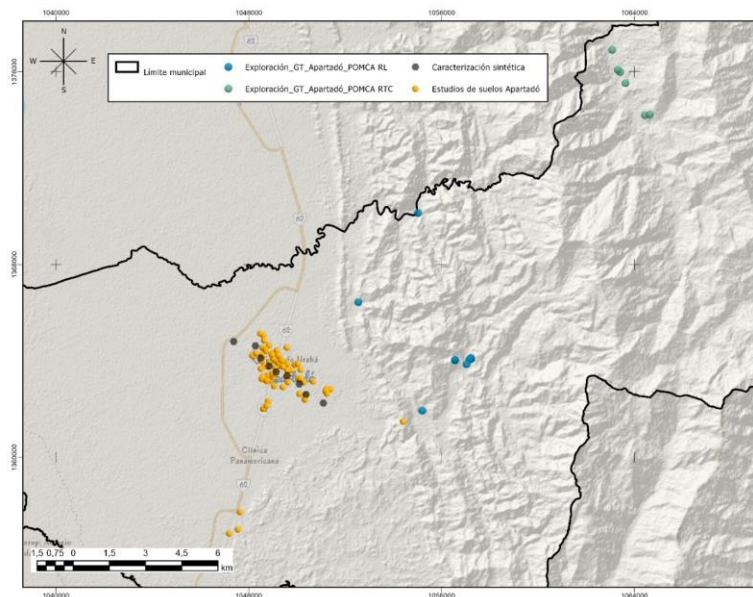


Figura 26. Información geotécnica recopilada

1.8 Estudios de amenaza y riesgo del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y otras entidades

Se empleó la base cartográfica, documental geológica y geomorfológica del SGC como punto de partida para la definición de unidades geológicas básicas y subunidades geomorfológicas, disponibles a escala 1:100.000, con respecto a estudios de amenaza y riesgo se encuentra la zonificación de amenaza por movimientos en masa de las planchas 79, 80, 90 y 91 elaboradas en escala 1:100.000 y las zonificaciones de amenaza por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones elaboradas por los POMCA existentes en el municipio, referenciadas en la Tabla 11 y mostradas en las Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

Tabla 11. Relación información recopilada estudios de amenaza y riesgo

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Evaluación de Amenazas Geológicas en el Municipio de Apartadó	Ministerio de Minas y Energía; INGEOMINAS	1993	Primera evaluación de amenazas geológicas en los municipios de Turbo, Apartadó, Carepa, Chigorodó, Murindó y Vigía del Fuerte, con respecto al análisis de la capacidad de uso del suelo.

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
El terremoto de Murindó de octubre 18 de 1992 - Evaluación de daños y mapa de isointensidades.	Coral, C.; Salcedo, E.; García, J.; Mejía, I.; Caballero, H.	1993	Observaciones de la magnitud de daños y efectos permanentes causados por el terremoto de Murindó del 18 de octubre de 1992.
Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa - Plancha 79 Turbo.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100000 de la cartografía de la susceptibilidad por movimientos en masa.
Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa - Plancha 79 Turbo.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de unidades geomorfológicas, geológicas e inventario de eventos.
Memoria Explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000 - Plancha 79 Turbo	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Integración de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa de la Plancha 79 Turbo, que corresponde a los municipios de Carepa, Apartadó, Turbo y Unguía.
Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa - Plancha 80 Tierralta.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100000 de la cartografía de la susceptibilidad por movimientos en masa.
Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa - Plancha 80 Tierralta.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de unidades geomorfológicas, geológicas e inventario de eventos.
Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 - Plancha 80 Tierralta	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Integración de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa de la Plancha 80 Tierralta, que corresponde a los municipios de Carepa, Apartadó, Turbo, San Pedro de Urabá, Tierralta, Valencia y Montelíbano.
Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa - Plancha 90 Chigorodó.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa - Plancha 90 Chigorodó.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de unidades geomorfológicas, geológicas e inventario de eventos.
Memoria Explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000 - Plancha 90 Chigorodó.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Integración de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa de la Plancha 90, que incluye los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó, Turbo y Riosucio.
Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa - Plancha 91 Belencito.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100.000 de la cartografía de unidades geomorfológicas, geológicas e inventario de eventos.
Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa - Plancha 91 Belencito.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Definición en escala 1:100000 de la cartografía de la susceptibilidad por movimientos en masa.
Memoria Explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000 - Plancha 91 Belencito.	Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia	2015	Integración de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa de la Plancha 91, que cubre parte de los municipios de Tierralta, Montelíbano, Apartadó, Carepa, Chigorodó, Mutatá.
Zonificación a partir del potencial de licuación de la zona urbana del municipio de Apartadó, Antioquia	Cubides, A	2017	Zonificación del potencial de licuación y de la magnitud de asentimientos esperados en el municipio de Apartadó.
Boletín de sismos Julio - diciembre de 2017	Servicio Geológico Colombiano	2018	Parámetros y localizaciones preliminares de los sismos registrados por la RSNC en el territorio colombiano durante julio a diciembre de 2017.
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río Turbo-Currulao - Capítulo caracterización de las condiciones de riesgo.	UT POMCA río Turbo Currulao; CORPOURABA	2018	Zonificación en escala 1:25.000 de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales el municipio se encuentra al sureste de la cuenca.

Título	Autor (es)	Año	Relevancia
Documento Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) – río León - Capítulo caracterización de las condiciones de riesgo.	ECOFORST; CORPOURABA	2019	Zonificación en escala 1:25.000 de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales el municipio se encuentra al norte de la cuenca.

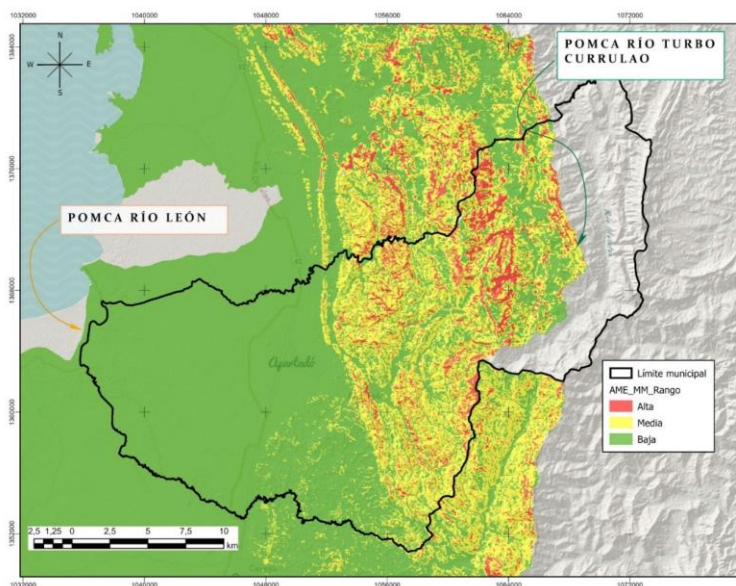


Figura 27. Amenaza por movimientos en masa. Fuente: (CORPOURABA; ECOFORST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

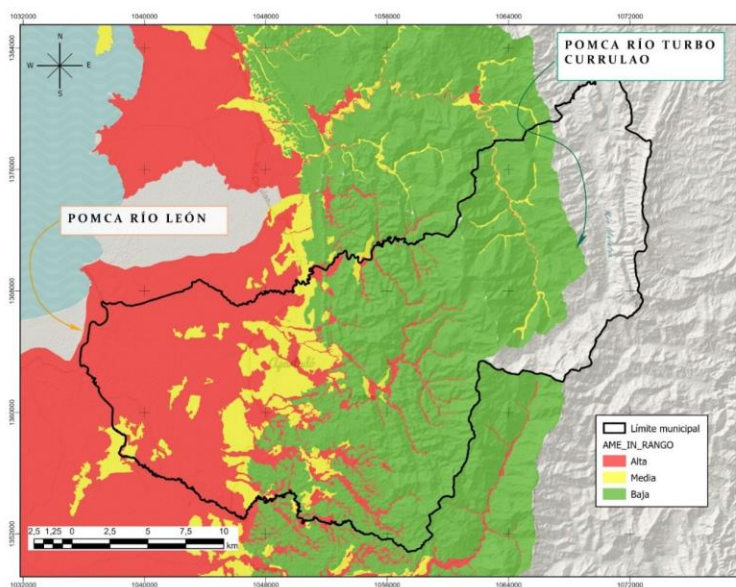


Figura 28. Amenaza por inundaciones. Fuente: (CORPOURABA; ECOFORST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

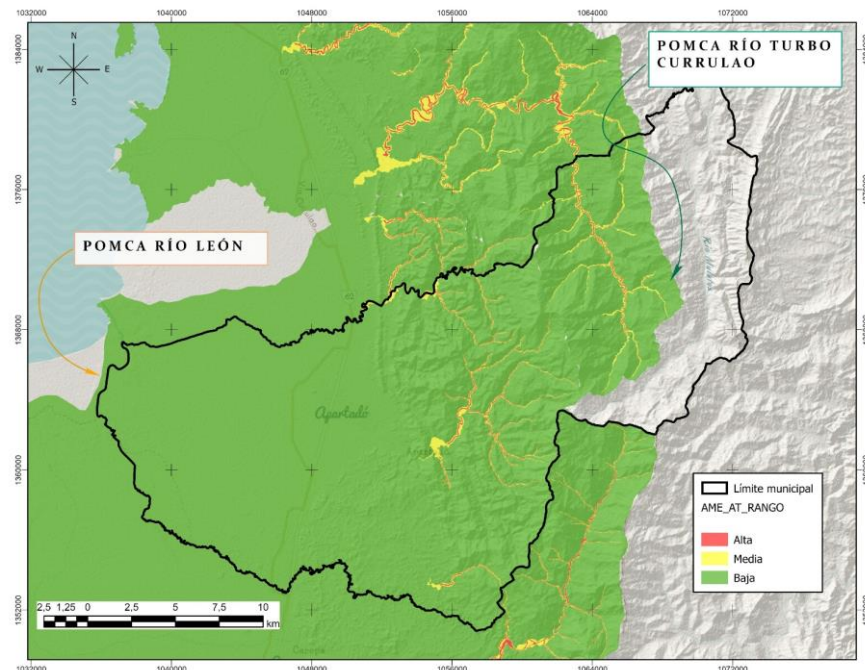


Figura 29. Amenaza por avenidas torrenciales. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) & (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018)

2. Trabajo de campo

Esta fase tuvo como objetivo acercar a los equipos de trabajo a las áreas de análisis y a la evaluación histórica de los fenómenos de estudio. Se realizaron diferentes salidas de campo con el objetivo de levantar información cartográfica, recolectar información sobre afectación de la población para determinar los factores físicos y sociales que configuran los diferentes escenarios de riesgo y comprender la realidad ambiental de las áreas con fenómenos activos o potenciales. En las Figura 30 y Tabla 12 se esquematizan las principales actividades realizadas en campo.

Estas actividades incluyeron campañas geológicas, geomorfológicas y de caracterización de eventos amenazantes realizadas en los meses de marzo y abril, campañas de exploración geotécnica y geofísica en áreas urbanas durante mayo, levantamientos topográficos en la cabecera municipal, áreas de expansión urbana y sitios críticos en el municipio.

Dentro de las visitas de campo (Figura 31) se realizaron recorridos de reconocimiento de procesos morfodinámicos, áreas urbanas y rurales, enfocadas en zonas en donde no existiera caracterización desde los POMCA, control en los ríos principales del municipio, condiciones morfométricas y toma de muestras para la caracterización de materiales en laboratorio y soporte técnico del comportamiento geomecánico de unidades litológicas. Todos estos trabajos de campo se soportan en el anexo filmográfico y fotográfico, ensayos de laboratorio, resultados de exploración del presente estudio.



Figura 30. Ilustración de las actividades realizadas durante la fase de campo

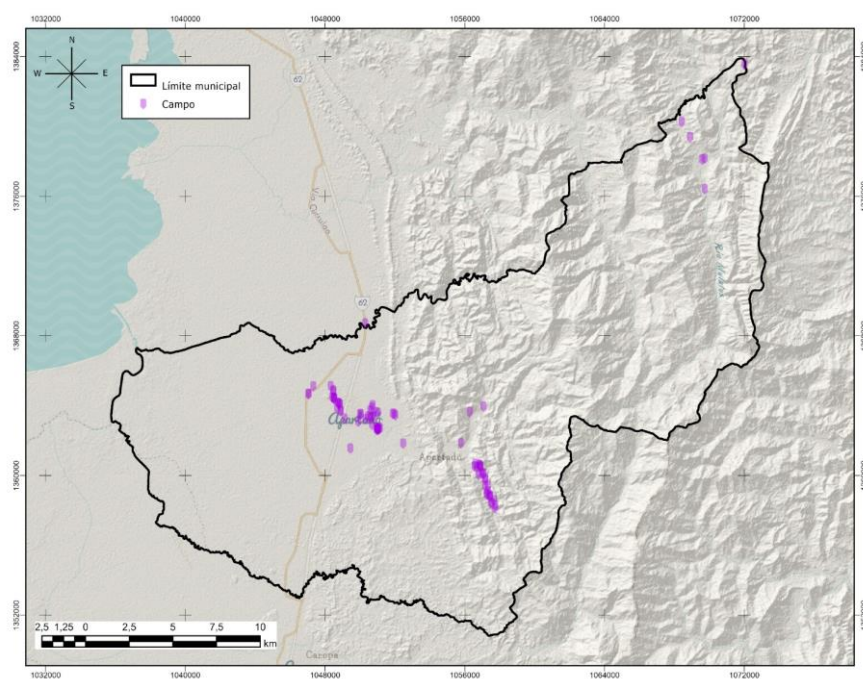





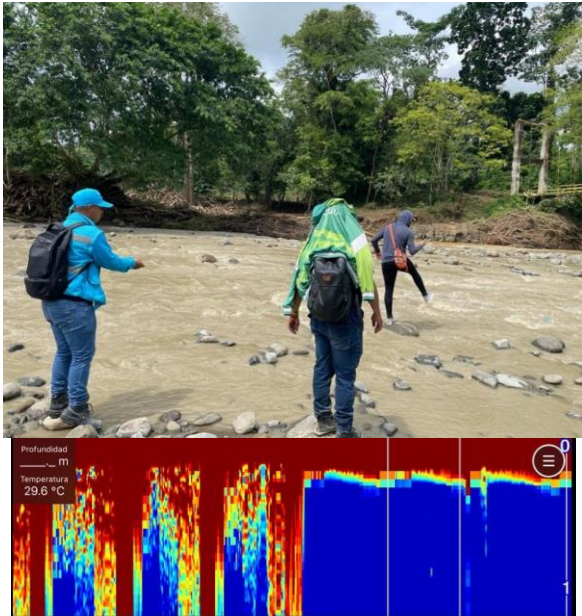



Figura 31. Ubicación puntos de campo



Tabla 12. Resumen actividades de campo

Actividad/ descripción	Representación
<p>Topografía y batimetría:</p> <p>Se realizaron campañas en zonas críticas, cabecera municipal y área de expansión y centros poblados priorizados por la existencia de eventos amenazantes, en estas comisiones se realizaron vuelos fotogramétricos, georreferenciación de puntos de control en tierra, información útil para generar modelos de relieve, principalmente a escala 1:5.000.</p> 	  

Actividad/ descripción	Representación
	 
<p>Geología:</p> <p>Se realizaron campañas, principalmente en el área rural, ellas se ubicaron, principalmente en donde se encontraban contactos litoestructurales. En las estaciones y puntos de control se levantó información litológica y estructural, en donde se logró encontrar algunos afloramientos de roca de muy mala calidad. De igual manera se realizaron caracterizaciones geológicas sumadas al estado físico químico de rocas y suelos residuales de las unidades aflorantes en el municipio.</p>	

Actividad/ descripción	Representación
	
<p>Geomorfología:</p> <p>Se realizaron campañas, principalmente en áreas con buena visibilidad como lo son las divisorias naturales del municipio, como apoyo se realizaron sobrevuelos usando equipos UAV. En las estaciones y puntos de observación se tomaron registros fotográficos y análisis de génesis que dan origen a las formas del terreno. De igual manera se realizaron levantamientos de procesos morfodinámicos existentes en el municipio.</p>	

Actividad/ descripción	Representación
	
<p>Geotecnia:</p> <p>Se realizaron campañas de caracterización y situ para suelos y rocas así como apiques en zonas rurales.</p> 	
<p>Geofísica:</p> <p>Se realizaron campañas para el entendimiento de los depósitos de suelo en el municipio de Apartadó en profundidad, se planteó la caracterización de los valores de V_s de T_n por medio de exploración geofísica. Para este estudio, se realizaron mediciones de H/V, o HVRS, para la determinación de valores de T_n y la caracterización de los diferentes sitios de la cabecera municipal.</p>	

Actividad/ descripción	Representación
	

3. Topografía detallada

Con el objetivo de complementar las labores contratadas se realizaron sobrevuelos con dron para la captura de imágenes con las cuales apoyar el proyecto en todas sus etapas. Antes de iniciar las tareas de topografía, se ejecutó la línea de vuelo específica para el sector objeto de análisis a una altura importante (entre 250 y 300 m por encima del nivel medio del terreno) pues los cambios de pendiente son importantes en la parte alta, sector con vegetación de gran altura. Para el posicionamiento de las imágenes se cuenta con sensor GPS en el dron, sin embargo, se tomaron puntos adicionales en tierra con estación GNSS para aumentar la precisión. Las fotografías y puntos de control (54) se procesaron mediante el software Agisoft Metashape, en el cual se calibraron y orientaron las capturas y se definió la nube de puntos inicial, la nube de puntos densa y la asignación de color RGB a cada uno de los 1789'127.044 puntos, como se muestra en la siguiente figura. Adicional al área de estudio urbana se priorizaron 10 Centros Poblados Rurales que presentan afectaciones dicientes por fenómenos amenazantes, los cuales serán evaluados en escala 1:5k y 2k por avenidas torrenciales, en caso que exista afectación a elementos expuestos por este amenaza.

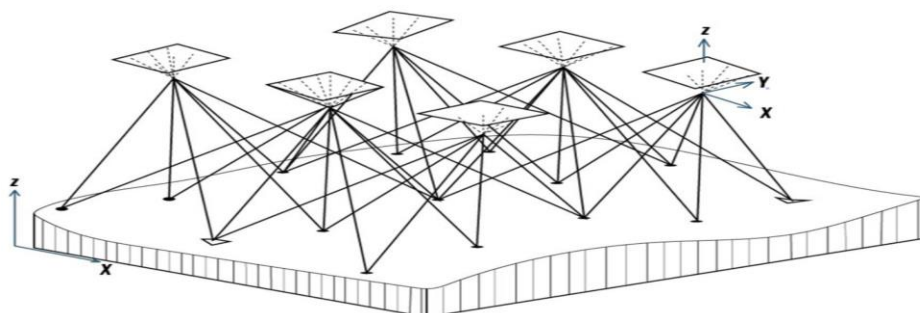


Figura 32. Esquema triangulación línea de vuelo

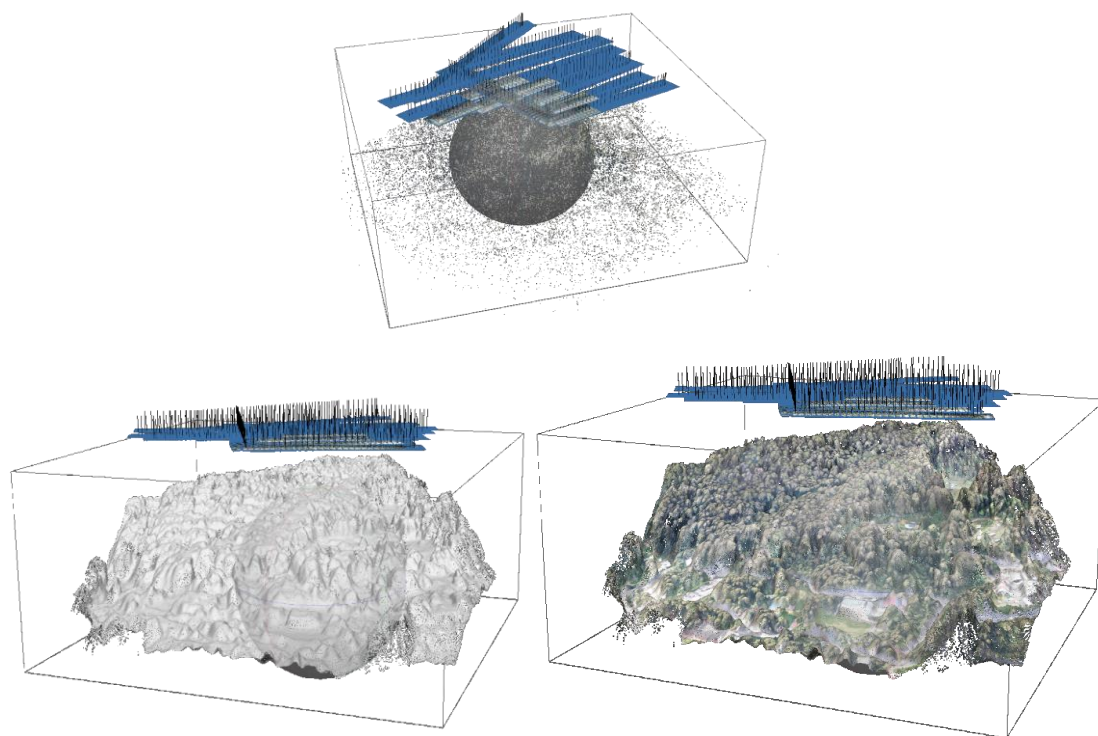


Figura 33. Línea de vuelo, orientación de fotografías, modelo tridimensional



Figura 34. Toma de datos en tierra usando GNSS



Figura 35. Renderización modelo 3D 5k urbano



Figura 36. Renderización modelo 3D 2k centro poblado de San José de Apartadó

Con el procesamiento fotogramétrico, se calculó el modelo de elevación de superficie (DSM), el modelo de elevación texturizado, el indicador de vegetación (NDVI) y el ortofotomosaico para el área urbana en escala 1:5k y para centros poblados con indicadores de torrencialidad en escala 2k, que abarca toda la geoforma con la que podrá elaborarse un modelo de estabilidad regional en el caso de considerarse necesario por el evaluador de amenazas y riesgos.

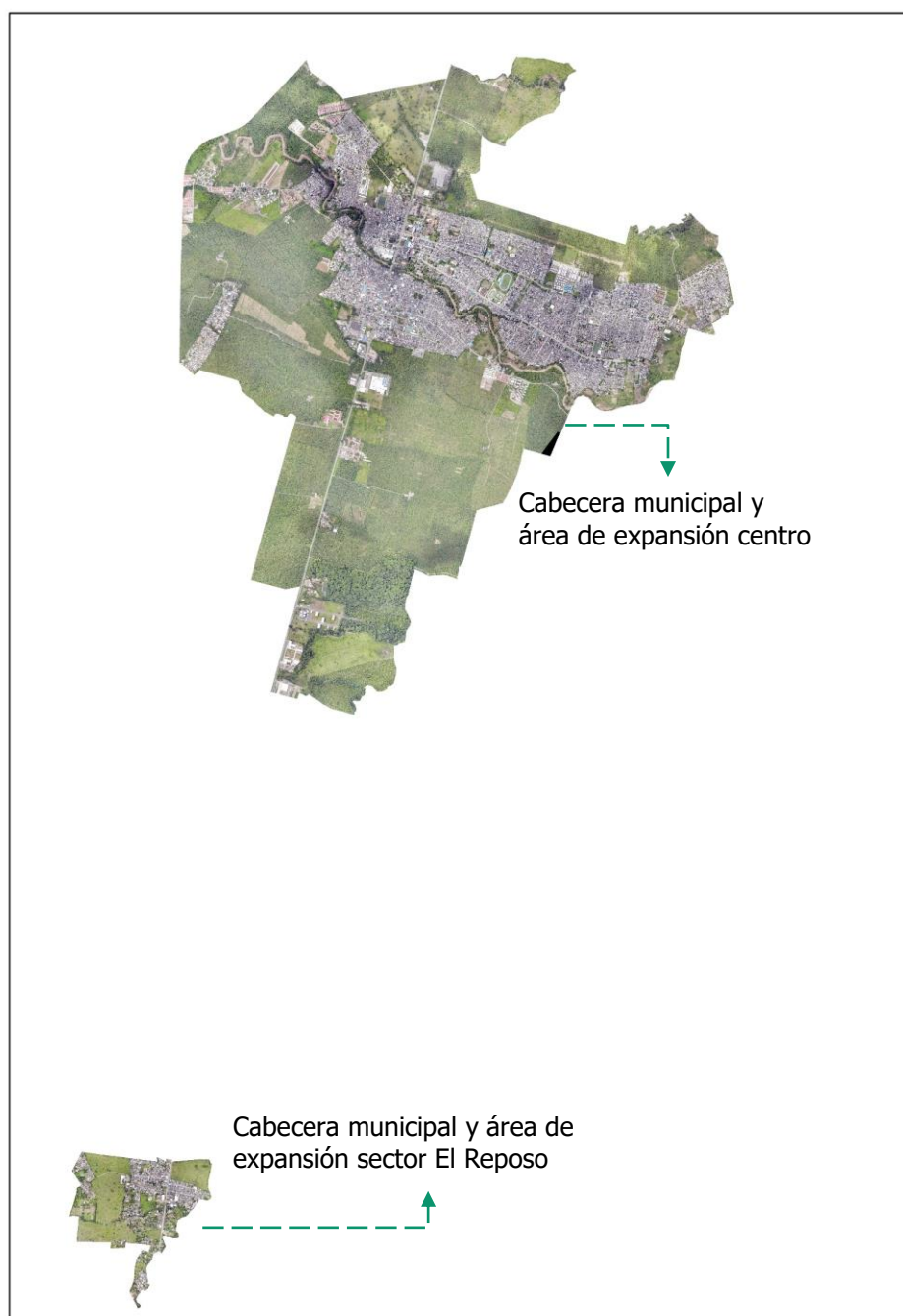


Figura 37. Modelo ortofotomosaico urbano



Figura 38. Modelo ortofotomosaico urbano regional

4. Coberturas

La identificación y delimitación de las coberturas de la tierra es un insumo vital para la identificación de factores de propensividad a incendios de la cobertura vegetal, regula la infiltración y retención potencial del suelo en donde se pueden presentar movimientos en masa al igual que en sectores con eventos torrenciales, por lo cual es necesario tener cartografía de coberturas actualizada y con adecuado detalle para las escalas de evaluación.

Para lograr esta caracterización se realiza un proceso de fotointerpretación sobre insumos recopilados de imágenes satelitales y ortofotos, que cumplen, debido a la rigurosidad del trabajo, con ciertos elementos y condiciones específicas (mayor escala, menor nubosidad, fecha actual, entre otros). Con base en lo anterior se realiza la identificación de los diferentes elementos que componen la imagen, como representación fiel de la realidad presentada en el área de estudio. Adicionalmente se revisa la información de Coberturas Naturales elaboradas en los POMCAS de los ríos León y Turbo-Currulao a escala 1:25.000, las cuales se actualizaron de acuerdo con la metodología CORINE LAND COVER que propone realizar el inventario de la cobertura y el uso de la tierra, información útil para la toma de decisiones en aspectos relacionados con el manejo y conservación de los recursos naturales, el ordenamiento territorial, así como también para el análisis sectorial pecuario, agrícola, forestal, etc. Para las áreas urbanas se realiza la fotointerpretación de ortofotografías levantadas para el ejercicio contractual a escala 1:5.000.

En la actualidad el programa está en su versión CLC 2000, que se fundamenta en las experiencias ganadas

en la aplicación de CLC90 y en la priorización de las necesidades del usuario. Una característica importante de la metodología es el uso de una leyenda jerárquica con categorías que permiten agregar datos a nivel nacional o, desagregarlo, para trabajar a nivel departamental, municipal o para áreas específicas. En la Tabla 14 se muestra la jerarquización utilizada para la interpretación sistemática de las coberturas naturales; teniendo en cuenta la escala de trabajo, y los insumos existentes se genera cartografía a escala 1:25.000, se estructuró una leyenda general hasta el sexto nivel. Los dos primeros niveles se mantienen constantes, según lo estipulado por CLC Europeo, y del tercer nivel en adelante se adaptó para las condiciones del área de estudio, acorde con lo establecido en CLC Colombia.

Las coberturas presentes en el municipio para suelos rurales y urbanos se muestran en las Figura 40 y Tabla 14, que describen a continuación. En términos generales, el municipio de Apartadó posee un 2% de cubrimiento de suelos en zonas artificializadas, un 43,9% constituido por áreas de uso agrícola, un 53,4% compuesto por bosques y áreas seminaturales, un porcentaje menor al 0,01% de áreas húmedas y un 0,65% correspondiente a superficies de agua.

4.1 Metodología

El desarrollo de la construcción del mapa de cobertura y uso de la tierra escala 1:25.000, se realiza bajo la adaptación del estándar Corine Land Cover para Colombia a escala 1:100.000 (2010), y con los estándares cartográficos y de la leyenda requeridos para la escala del proyecto. Para la obtención del mapa de coberturas de la tierra para el municipio de Apartadó se realizan los siguientes pasos (Figura 39):



Figura 39. Proceso para elaborar mapas de coberturas de la tierra

4.1.1 Adquisición de insumos

A continuación, se describen los insumos utilizados en la interpretación y ajuste de las coberturas de la tierra en el municipio de Apartadó.

4.1.1.1 Cartografía básica

En la cartografía base compilada se utiliza para la información espacial correspondiente a las temáticas de vías y drenajes, ya que permiten determinar la distribución espacial de las unidades de bosques de galería y/o ripario, las superficies de agua y la red vial y tejidos asociados. En este caso se utilizan modelos y bases cartográficas 1:25.000, fuente IGAC así como 1:5.000 levantadas para este proyecto.

4.1.1.2 Información secundaria coberturas de la tierra

Los Mapas de Cobertura de la Tierra Metodología Corine Land Cover escala 1:100.000 de Colombia, disponibles en el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) para los periodos 2005-2009, 2010-2012 y **2018** el mapa de coberturas los POMCA ríos León y Turbo-Currulao, los cuales constituyen uno de los insumos base de referencia para la elaboración del mapa de coberturas de la tierra a escala 1:25.000 para el municipio. De igual forma se tiene en cuenta el Mapa de Ecosistemas Continentales Costeros y Marinos (IDEAM et al., 2017), el cual permite integrar información de las coberturas de la Tierra Corine Land Cover 2005 con la leyenda de Nivel 4, información con la que es posible discriminar algunos tipos de cultivos en mayor detalle.

4.1.1.3 Sensores remotos

La información recopilada por sensores remotos constituye un insumo fundamental para la fotointerpretación y análisis de coberturas de la tierra; la interpretación de la temática varía en función de la resolución espectral, temporal y espacial del sensor. A continuación se describen algunos de los sensores empleados:

4.1.1.3.1 Imágenes satelitales Sentinel 2A

Las imágenes multiespectrales del satélite Sentinel2A de los años 2019 al 2021, se descargaron a través de la plataforma Copernicus Open Access Hub, presentan una resolución de 10 m en el visible y se descargaron 6 de las 13 bandas espectrales disponibles en la plataforma, correspondientes a las longitudes de onda del espectro visible, NIR, SWIR 1 y 2; ya que las bandas del rojo e infrarrojos (NIR, SWIR) permiten discriminar diferentes tipos de vegetación, sumadas al azul y verde, útiles en la identificación de otras coberturas como cuerpos de agua, vías y zonas sin vegetación. Las características de cada banda se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Longitudes de onda y resolución de las bandas trabajadas de las imágenes satelitales descargadas

No. Banda	Longitud de Onda(μm)	Resolución Espacial(m)
Banda 2 – Azul	0,45 – 0,52	10
Banda 3 - Verde	0,54 – 0,57	10
Banda 4 - Rojo	0,65 – 0,68	10
Banda 8 - NIR	0,78 – 0,9	10
Banda 11– SWIR 1	1,56 – 1,65	20
Banda 12– SWIR 2	2,10 – 2,28	20

Fuente: Autores a partir de información Mastergis (2019)

4.1.1.3.2 Fotografía aérea

Este insumo es brindado por el departamento de Boyacá, fue capturado y almacenado en 3 bandas (Rojo, Verde y Azul), para una resolución espacial de imágenes 3m, las imágenes utilizadas cubren la totalidad del área geográfica del municipio y fueron tomadas entre el 2014 y el 2016.

4.1.1.3.3 Imágenes satelitales Google Earth, Bing y Base Map de ESRI

La identificación y clasificación de las unidades de coberturas de la tierra se utiliza también como fuente de interpretación las imágenes de Google Earth, las cuales para gran parte del área de estudio son del año 1968 a 2019; igualmente, como información de apoyo, se emplearon los servicios de repositorio de imágenes de alta resolución de BING, y ESRI (Base Map online para ArcGis), que, si bien pueden estar

fuera del rango temporal, son útiles para verificar el tipo de coberturas presentes. Estas imágenes se usaron como apoyo, pero no son el insumo para digitalizar las coberturas de la Tierra.

4.1.2 Fotointerpretación de coberturas

La fotointerpretación y clasificación de las unidades de cobertura de la tierra se elabora de acuerdo con la leyenda propuesta en la metodología Corine Land Cover y los requerimientos técnicos establecidos, se realiza mediante interpretación visual y digitalización asistida siguiendo los aspectos metodológicos usados para levantamientos escala 1:25.000 aplicando los siguientes criterios rectores:

- ▽ La unidad mínima cartografiable para Territorios Artificializados es de 1000 m² y para Territorios Agrícolas, Bosques y Áreas seminaturales, Áreas Húmedas y Superficies de Agua respectivamente es de 1600 m².
- ▽ Las unidades de cobertura de posible distribución lineal como vías y ríos son cartografiables cuando presentan un ancho igual o mayor a 10 m.
- ▽ La asignación de la unidad de cobertura de la tierra se realiza con base en la observación y el análisis de la imagen más reciente.
- ▽ Para la digitalización de las unidades de cobertura se empleó como mínimo una escala de dibujo de 1:3500 a 1:2000.

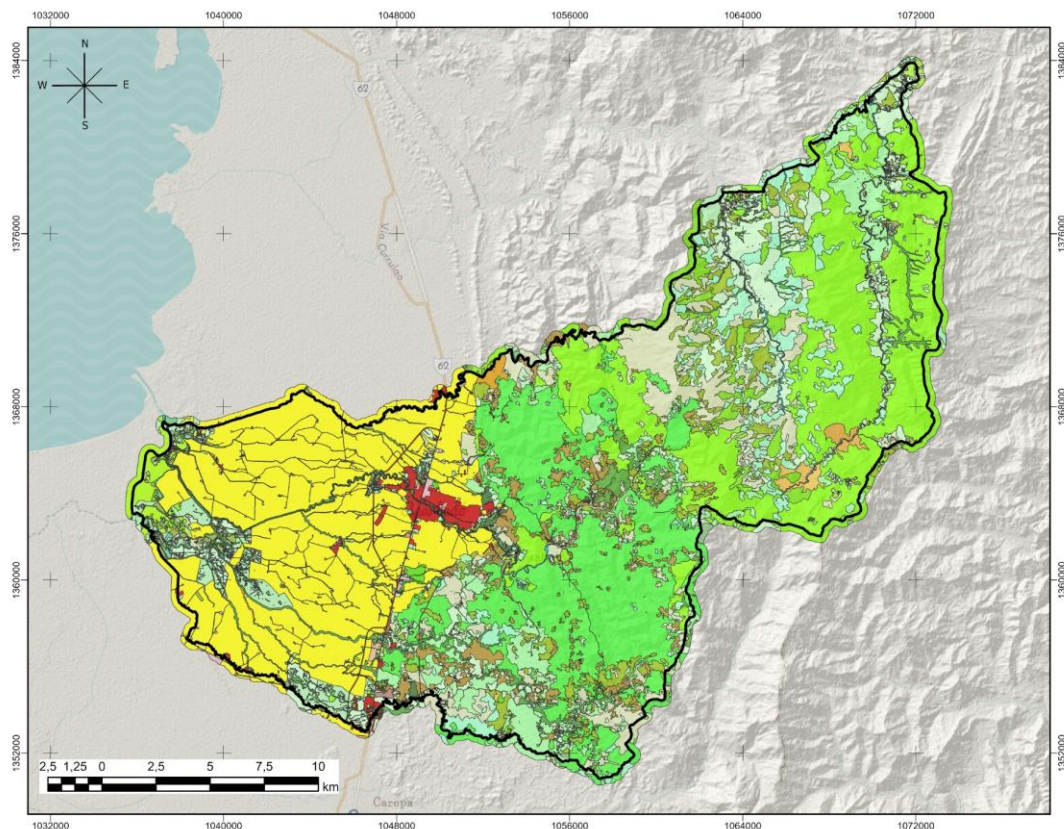
Posterior al proceso de fotointerpretación de la imagen como resultado se tiene a nivel cartográfico las coberturas de la tierra para el municipio en formato vector.

4.1.3 Control en campo

Los puntos de control en campo se seleccionan teniendo en cuenta:

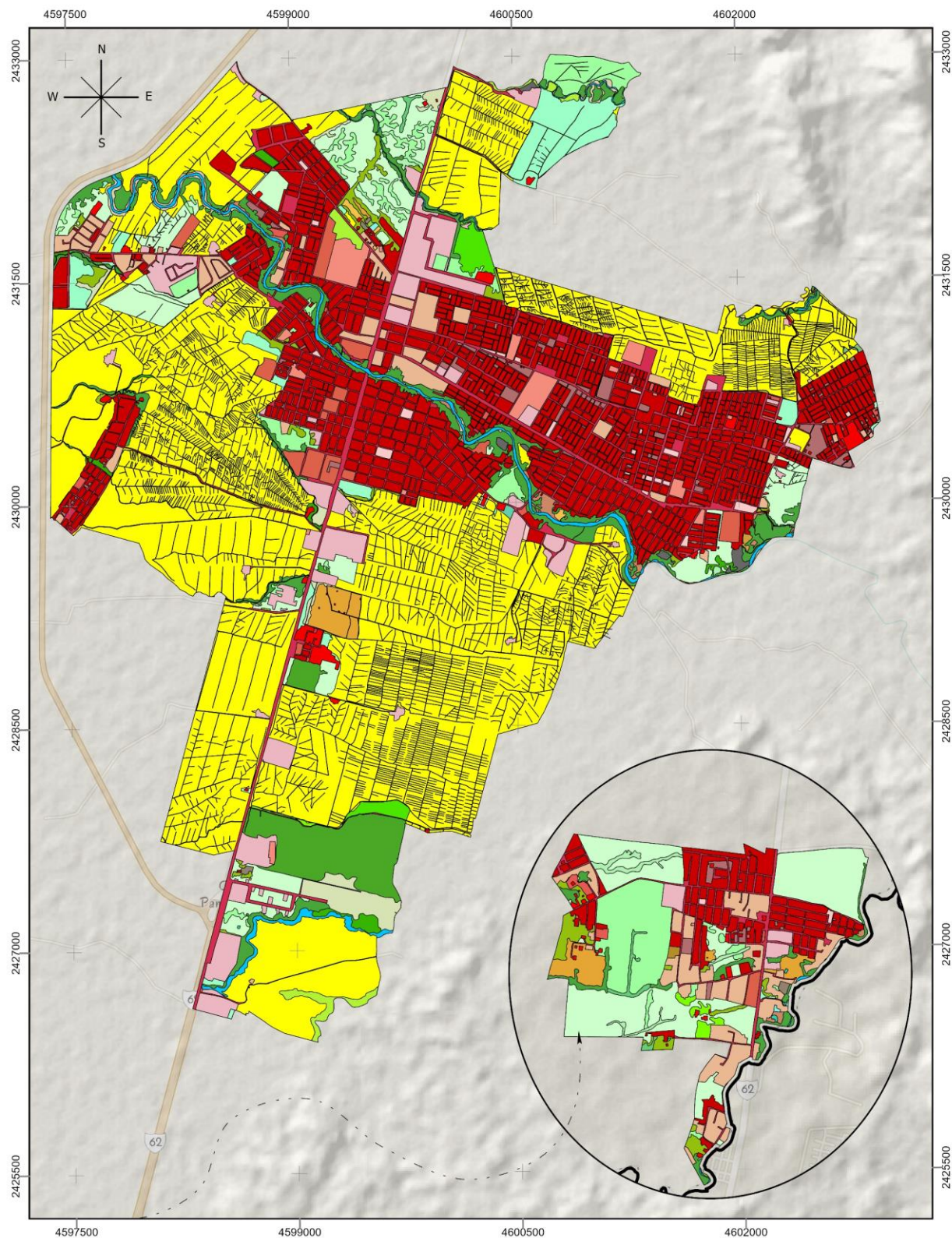
- ▽ Las unidades de cobertura identificadas.
- ▽ Polígonos por confirmar de coberturas.
- ▽ La accesibilidad a la cobertura de interés.

Para ello, se hicieron recorridos por el municipio en el cual se hizo un control mediante un registro fotográfico y la toma de las coordenadas. Las cuales permiten identificar unidades dudosas o confirmar la unidad interpretada. Finalmente se integra la información y se reportan las siguientes unidades de coberturas en el municipio.



Límite municipal	31111, Bosque denso alto de tierra firme
CODIGO, COBERTURA	31112, Bosque denso alto inundable
111, Tejido urbano continuo	31121, Bosque denso bajo de tierra firme
112, Tejido urbano discontinuo	31122, Bosque denso bajo inundable
113, Tejido urbano discontinuo con zonas verdes urbanas	31211, Bosque abierto alto de tierra firme
121, Zonas industriales o comerciales	31212, Bosque abierto alto inundable
1211, Zonas industriales	31221, Bosque abierto bajo de tierra firme
1212, Zonas comerciales	31222, Bosque abierto bajo inundable
1221, Red vial y territorios asociados	313, Bosque fragmentado
1241, Aeropuerto con infraestructura asociada	3131, Bosque fragmentado con pastos y cultivos
1315, Explotación de materiales de construcción	3132, Bosque fragmentado con vegetación secundaria
141, Zonas verdes urbanas	314, Bosque de galería y ripario
1411, Otras zonas verdes urbanas	3141, Bosque de galería y ripario abierto
142, Instalaciones recreativa	3142, Bosque de galería y ripario abierto con pastos
1422, Áreas deportivas	315, Plantación forestal
2213, Plátano y banano	3211, Herbazal denso
2221, Otros cultivos permanentes arbustivos	3221, Arbustal denso
2231, Otros cultivos permanentes arbóreos	3222, Arbustal abierto
225, Cultivos confinados	3231, Vegetación secundaria o en transición alta
231, Pastos limpios	32311, Vegetación secundaria o en transición alta inundable
2311, Pastos limpios inundables	3232, Vegetación secundaria o en transición baja
232, Pastos arbolados	32321, Vegetación secundaria o en transición baja inundable
2321, Pastos arbolados inundables	331, Zonas arenosas naturales
233, Pastos enmalezados	333, Tierras desnudas y degradadas
2331, Pastos enmalezados inundables	334, Zonas quemadas
241, Mosaico de cultivos	411, Zonas Pantanosas
243, Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	511, Ríos (50 m)
2431, Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales arbóreos	513, Canales
244, Mosaico de pastos con espacios naturales	5142, Lagunas de oxidación
2441, Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos	5143, Estanques para acuicultura continental
245, Mosaico de cultivos y espacios naturales	5144, Aljibes

Figura 40. Coberturas de la tierra rural



<p>▬ Límite municipal</p> <p>Cobertura_Urbano</p> <p>111, Tejido urbano continuo</p> <p>112, Tejido urbano discontinuo</p> <p>113, Tejido urbano discontinuo con zonas verdes urbanas</p> <p>121, Zonas industriales o comerciales</p> <p>1211, Zonas industriales</p> <p>1212, Zonas comerciales</p> <p>1221, Red vial y territorios asociados</p> <p>1241, Aeropuerto con infraestructura asociada</p> <p>1315, Explotación de materiales de construcción</p> <p>141, Zonas verdes urbanas</p> <p>1411, Otras zonas verdes urbanas</p> <p>142, Instalaciones recreativa</p> <p>1422, Áreas deportivas</p> <p>2213, Plátano y banano</p> <p>2221, Otros cultivos permanentes arbustivos</p> <p>2231, Otros cultivos permanentes arbóreos</p> <p>2431, Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales a*</p> <p>225, Cultivos confinados</p> <p>231, Pastos limpios</p>	<p>2311, Pastos limpios inundables</p> <p>232, Pastos arbolados</p> <p>2321, Pastos arbolados inundables</p> <p>233, Pastos enmalezados</p> <p>2331, Pastos enmalezados inundables</p> <p>241, Mosaico de cultivos</p> <p>243, Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales</p> <p>2431, Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales arbóreos</p> <p>244, Mosaico de pastos con espacios naturales</p> <p>2441, Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos</p> <p>245, Mosaico de cultivos y espacios naturales</p> <p>31111, Bosque denso alto de tierra firme</p> <p>31112, Bosque denso alto inundable</p> <p>31121, Bosque denso bajo de tierra firme</p> <p>31122, Bosque denso bajo inundable</p> <p>31211, Bosque abierto alto de tierra firme</p> <p>31212, Bosque abierto alto inundable</p> <p>31221, Bosque abierto bajo de tierra firme</p> <p>31222, Bosque abierto bajo inundable</p> <p>313, Bosque fragmentado</p> <p>3131, Bosque fragmentado con pastos y cultivos</p>	<p>3132, Bosque fragmentado con vegetación secundaria</p> <p>314, Bosque de galería y ripario</p> <p>3141, Bosque de galería y ripario abierto</p> <p>3142, Bosque de galería y ripario abierto con pastos</p> <p>315, Plantación forestal</p> <p>3211, Herbazal denso</p> <p>3221, Arbustal denso</p> <p>3222, Arbustal abierto</p> <p>3231, Vegetación secundaria o en transición alta</p> <p>32311, Vegetación secundaria o en transición alta inunda</p> <p>3232, Vegetación secundaria o en transición baja</p> <p>32321, Vegetación secundaria o en transición baja inund</p> <p>331, Zonas arenosas naturales</p> <p>333, Tierras desnudas y degradadas</p> <p>334, Zonas quemadas</p> <p>411, Zonas Pantanosas</p> <p>511, Ríos (50 m)</p> <p>513, Canales</p> <p>5142, Lagunas de oxidación</p> <p>5143, Estanques para acuicultura continental</p> <p>5144, Aljibes</p>
---	--	---

Figura 41. Coberturas de la tierra urbana

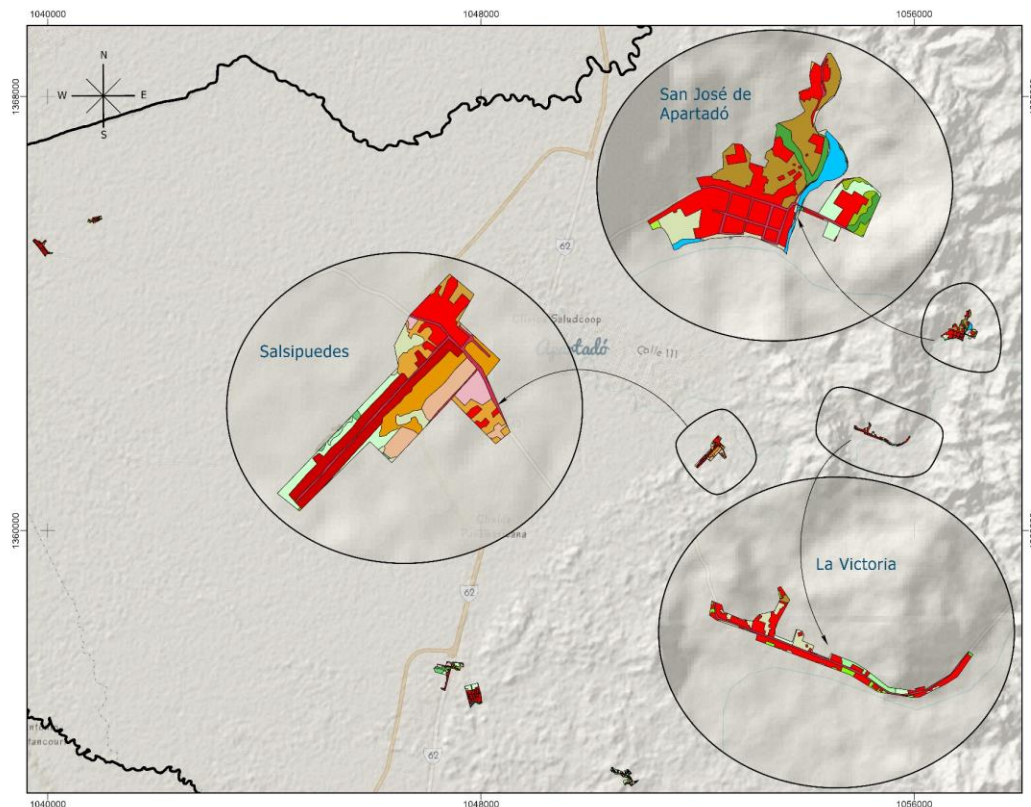


Figura 42. Coberturas centros poblados Salsipuedes, La Victoria y San José de Apartadó

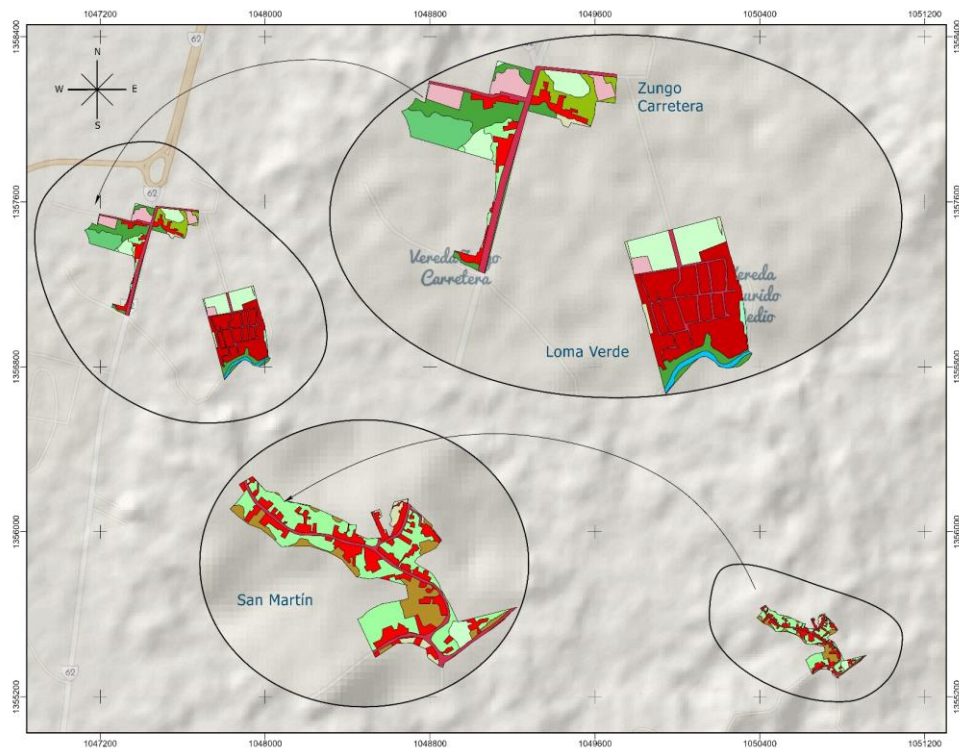


Figura 43. Coberturas centros poblados San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

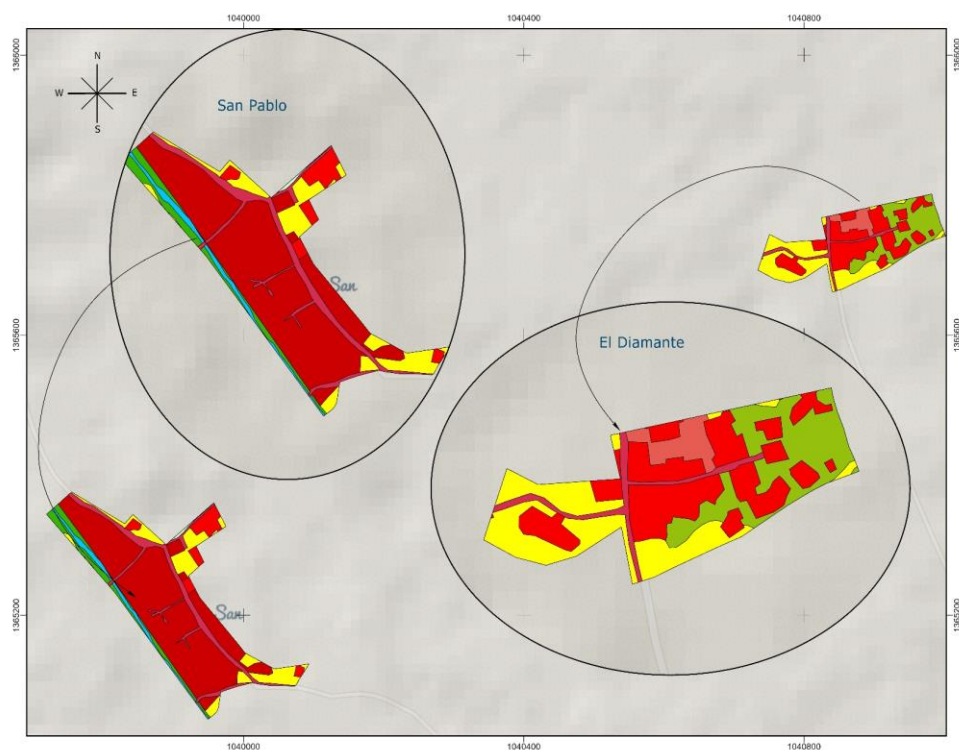


Figura 44. Coberturas centros poblados El Diamante y San Pablo

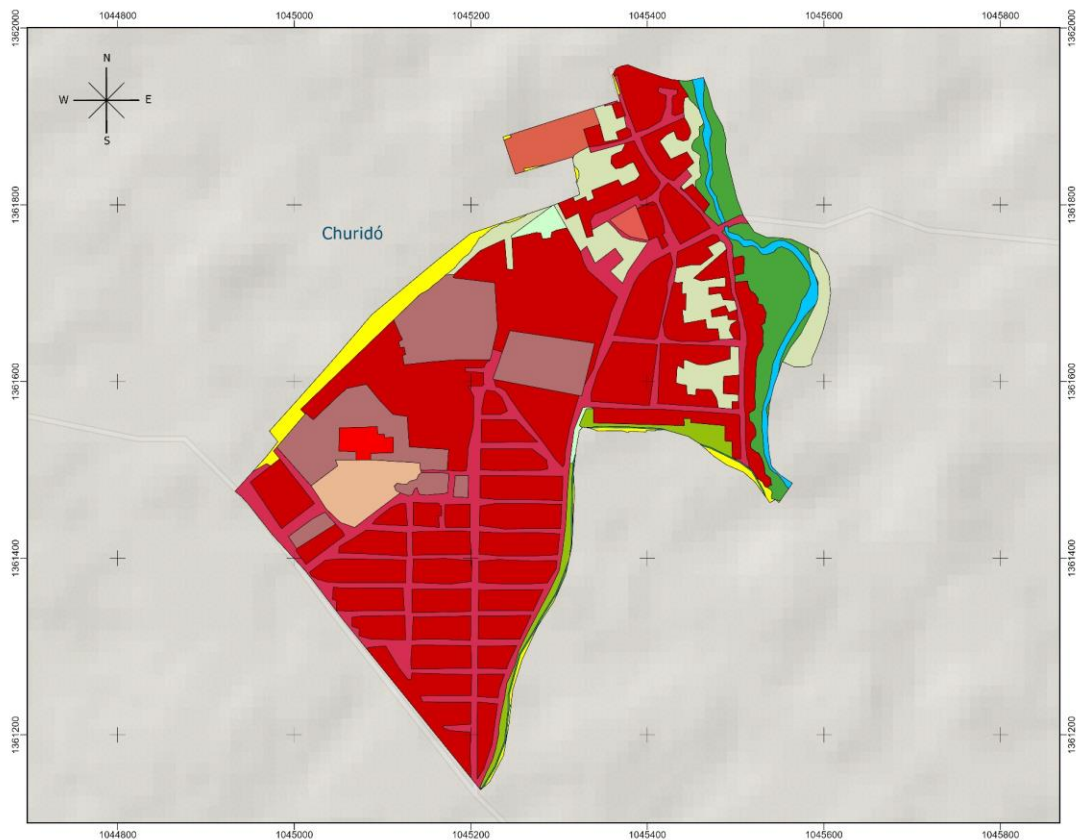


Figura 45. Coberturas centro poblado Churidó

Tabla 14. Leyenda coberturas de la tierra rural y urbana

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Código	Cobertura
1. Territorios artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	111				111	Tejido urbano continuo
		112				112	Tejido urbano discontinuo
		113				113	Tejido urbano discontinuo con zonas verdes urbanas
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	121				121	Zonas industriales o comerciales
			1211			1211	Zonas industriales
			1212			1212	Zonas comerciales
		122	1221			1221	Red vial y territorios asociados
		124	1241			1241	Aeropuerto con infraestructura asociada
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	131	1315			1315	Explotación de materiales de construcción
	1.4. Zonas verdes artificializadas no agrícolas	141				141	Zonas verdes urbanas
			1411			1411	Otras zonas verdes urbanas
		142				142	Instalaciones recreativas
			1422			1422	Áreas deportivas

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Código	Cobertura
2. Territorios agrícolas	2.2. Cultivos permanentes	221	2213			2213	Banano y plátano
		222	2221			2221	Otros cultivos permanentes arbustivos
		223	2231			2231	Otros cultivos permanentes arbóreos
		225				225	Cultivos confinados
	2.3. Pastos	231				231	Pastos limpios
			2311			2311	Pastos limpios inundables
		232				232	Pastos arbolados
			2321			2321	Pastos arbolados inundables
		233				233	Pastos enmalezados
			2331			2331	Pastos enmalezados inundables
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	241				241	Mosaico de cultivos
		243				243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
			2431			2431	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales arbóreos
		244				244	Mosaico de pastos con espacios naturales
			2441			2441	Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos
		245				245	Mosaico de cultivos y espacios naturales
3. Bosques y áreas seminaturales	3.1. Bosques	311	3111	31111		31111	Bosque denso alto de tierra firme
				31112		31112	Bosque denso alto inundable
			3112	31121		31121	Bosque denso bajo de tierra firme
				31122		31122	Bosque denso bajo inundable
		312	3121	31211		31211	Bosque abierto alto de tierra firme
				31212		31212	Bosque abierto alto inundable
			3122	31221		31221	Bosque abierto bajo de tierra firme
				31222		31222	Bosque abierto bajo inundable
		313				313	Bosque fragmentado
			3131			3131	Bosque fragmentado con pastos y cultivos
			3132			3132	Bosque fragmentado con vegetación secundaria
		314				314	Bosque de galería y ripario
			3141			3141	Bosques de galería y ripario abierto
			3142			3142	Bosques de galería y ripario abierto con pastos
		315				315	Plantación forestal
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/ o arbustiva	321	3211			3211	Herbazal denso
		322	3221			3221	Arbustal denso
			3222			3222	Arbustal abierto

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Código	Cobertura
		323	3231			3231	Vegetación secundaria o en transición alta
				32311		32311	Vegetación secundaria o en transición alta inundable
		3232	32321			3232	Vegetación secundaria o en transición baja
				32321		32321	Vegetación secundaria o en transición baja inundable
	3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	331				331	Zonas arenosas naturales
		333				333	Tierras desnudas y degradadas
		334				334	Zonas quemadas
4. Áreas húmedas	4.1 Áreas húmedas continentales	411				411	Zonas pantanosas
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales	511				511	Ríos (50 m)
		513				513	Canales
		514	5142			5142	Lagunas de oxidación
			5143			5143	Estanques para acuicultura continental
			5144			5144	Aljibes

4.2 Territorios artificializados (1.)

Comprende las áreas de las ciudades y las poblaciones y, aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

4.2.1 Zonas urbanizadas (1.1)

Las zonas urbanizadas incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran un tejido urbano.

4.2.1.1 Tejido urbano continuo (1.1.1)

Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más de 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano. La superficie de la unidad debe ser superior a cinco hectáreas. La presente cobertura se localiza en la zona centro-occidental y en el margen noroccidental y sur del municipio, predominantemente en las veredas Apartadó, El Salvador y Churidó y en menor medida en Vijagual, San Pablo y El Guaro; cubre un área aproximada de 538,88 ha (Figura 46).



Figura 46. Tejido urbano continuo

4.2.1.2 Tejido urbano discontinuo (1.1.2)

Son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas de tipo natural y seminatural se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas. Esta cobertura se encuentra principalmente en la zona centro y noroccidental del municipio, específicamente en las veredas Centro, El Salvador, El Tigre, La Balsa, Salsipuedes, La Victoria, Churidó Puente y Medio, El Cuchillo, Zungo Carretera, San Martín, Vijagual, Puerto Caribe, El Guaro, El Diamante y Punto Rojo cubriendo un área aproximada de 111,93 ha.



Figura 47. Tejido urbano discontinuo

4.2.1.3 Tejido urbano discontinuo con zonas verdes urbanas (1.1.3)

Son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas de tipo natural y seminatural se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas. Se asocia a pequeñas áreas rurales con desarrollo de infraestructura para vivienda o zonas urbanas donde se

conserva más del 50% de cobertura vegetal no nativa. Esta categoría de cobertura se presenta en la vereda Zungo Carretera, al sur del municipio, con un área de 27,87 ha aprox.



Figura 48. Tejido urbano discontinuo con zonas verdes y tejido urbano continuo

4.2.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación (1.2)

Comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicio y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad.

4.2.2.1 Zonas industriales o comerciales (1.2.1)

Son las áreas cubiertas por infraestructura artificial (terrenos cimentados, alquitranados, asfaltados o estabilizados), sin presencia de áreas verdes dominantes, las cuales se utilizan también para actividades comerciales o industriales. Incluyen parqueaderos, hospitales, universidades, centros comerciales, edificios industriales abandonados, entre otros. La cobertura cuenta con una reducida extensión de 2,61 ha, aproximadamente y su ubicación corresponde a la zona suroccidental de la vereda Apartadó. Como una subcategoría de esta cobertura se identificaron las "Zonas industriales (1.2.1.1)", distribuidas en gran parte de las veredas al oeste del municipio, con una extensión de 139,42 ha aprox., a manera de puntos aislados, con mayores áreas en Apartadó, Churidó Puente y El Osito. Por su parte, se identificó la subcategoría "Zonas comerciales (1.2.1.2)", localizada en la vereda El Salvador, con un área de 4,26 ha aprox.



Figura 49. Zonas comerciales

4.2.2.2 Red vial, ferroviaria y terrenos asociados (1.2.2)

Son espacios artificializados con infraestructuras de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexa y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicio, andenes, terraplenes y áreas verdes. La superficie debe ser mayor a cinco hectáreas y el ancho de la vía debe ser superior a 50 metros. Siempre se traza como una unidad continua, sin delimitar espacios pequeños o tramos con vegetación y zonas verdes asociadas.

4.2.2.2.1 Red vial y terrenos asociados (1.2.2.1)

Comprende las áreas cubiertas por la infraestructura vial, tales como carreteras, autopistas y puentes, así como las áreas asociadas como peajes, zonas verdes y de estacionamiento. Esta cobertura se encuentra en todas las veredas al oeste y centro del municipio, con un desarrollo reducido en las veredas La Resbalosa, La Esperanza, Playa Larga y Sabaleta, ubicadas al oriente y nororiente de Apartadó. Esta cobertura constituye un área de 259,85 ha aprox.

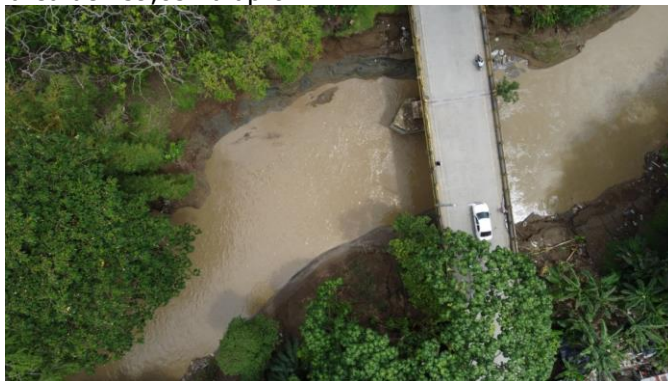


Figura 50. Red vial asociada

4.2.2.3 Aeropuertos (1.2.4)

Comprende la infraestructura donde funciona una terminal aérea. Incluye pistas de aterrizaje y carreteo, los edificios, las superficies libres, las zonas de amortiguación y la vegetación asociada. En esta categoría se incluye la cobertura denominada como "Aeropuerto con infraestructura asociada (1.2.4.1)", la cual comprende los aeropuertos con terminales de pasajeros y/o carga; esta cobertura se encuentra en la vereda Zungo Carretera, al centro-sur del municipio, en un área de 8,67 ha.

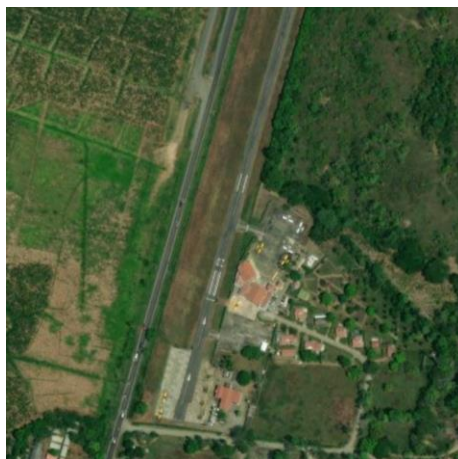


Figura 51. Aeropuertos

4.2.3 Zonas de extracción minera y escombreras (1.3)

Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen.

4.2.3.1 Zonas de extracción minera (1.3.1)

Son áreas dedicadas a la extracción de materiales minerales a cielo abierto. Para la zona de estudio se incluye un nivel 4 denominado "Explotación de materiales de construcción (1.3.1.5)". Estas actividades se realizan al sur del municipio en la vereda Vijagual y en la vereda Salsipuedes, donde la extensión es de aproximadamente 24,16 ha.



Figura 52. Extracción de materiales en la vereda Salsipuedes

4.2.4 Zonas verdes artificializados no agrícolas (1.4)

Comprende las zonas verdes localizadas en las áreas urbanas, sobre las cuales se desarrollan actividades comerciales, recreacionales, de conservación y amortiguación, donde los diferentes usos del suelo no requieren de infraestructura construida apreciable. En general, estas zonas verdes son áreas resultantes de procesos de planificación urbana o áreas que por los procesos de urbanización quedaron embebidas en el perímetro de la ciudad.

4.2.4.1 Zonas verdes urbanas (1.4.1)

Comprende las zonas cubiertas por vegetación dentro del tejido urbano, incluyendo parques urbanos y cementerios. Las zonas urbanas verdes también incluyen todas las áreas cubiertas por vegetación con un tamaño superior a cinco hectáreas y que se ubican dentro o adyacente al tejido urbano. Esta categoría se observa hacia el centro occidente del municipio, en la vereda Churidó con una extensión de área de 2,48 ha. En esta cobertura también se incluye la subcategoría "Otras zonas verdes urbanas (1.4.1.1)", que se observa en las veredas Apartadó y Churidó Puente, en un área de 4,14 ha.



Figura 53. Zonas verdes urbanas

4.2.4.2 Instalaciones recreativas (1.4.2)

Son los terrenos dedicados a las actividades de camping, deporte, parques de atracción, golf, hipódromos y otras actividades de recreación y esparcimiento, incluyendo los parques habilitados para esparcimiento, no incluidos dentro del tejido urbano. Esta cobertura se encuentra en la vereda Churidó, hacia el centro occidente del municipio, con una extensión de 0,17 ha. Dentro de este nivel se distinguen una categoría de nivel 4 que es "Áreas deportivas (1.4.2.2)". Esta cobertura se presenta en las veredas Apartadó, Churidó Puente y Zungo Carretera, ocupando un área de 20,64 ha.

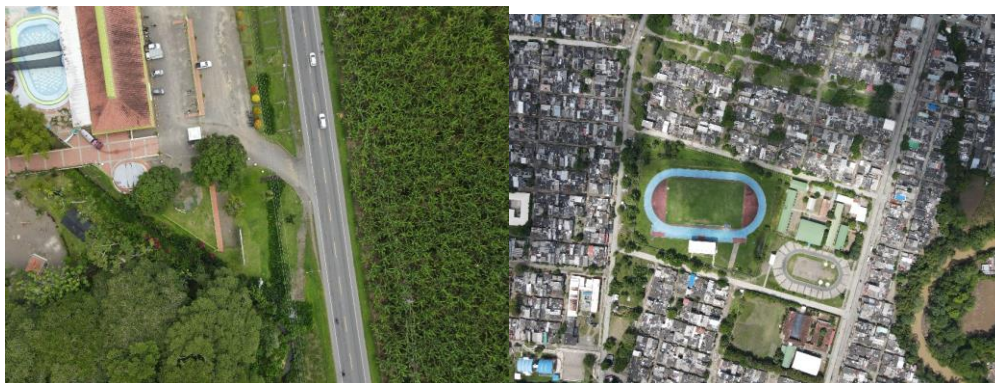


Figura 54. Zonas recreativas

4.3 Territorios Agrícolas (2.)

Son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas, en las cuales también se pueden dar usos pecuarios además de los agrícolas.

4.3.1 Cultivos permanentes (2.2)

Comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como

caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano, los cultivos arbustivos como café y cacao; y los cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales.

4.3.1.1 Cultivos permanentes herbáceos (2.2.1)

Cobertura compuesta principalmente por cultivos permanentes de hábito herbáceo como caña de azúcar y panelera, plátano, banano y tabaco. Las herbáceas son plantas que no presentan órganos leñosos, son verdes y con ciclo de vida vegetativo anual.

4.3.1.1.1 Banano y plátano (2.2.1.3)

Cobertura predominantemente compuesta por cultivo de banano (*Musa sapientum* L.) y /o plátano (*Musa paradisiaca* L.), planta herbácea perenne gigante de la familia Musaceae, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, de forma cónica y con altura entre 3,5 y 7,5 m de altura, que termina en una corona de hojas, las cuales son de gran amplitud y se disponen en forma de espiral. Esta cobertura ocupa casi la totalidad del oeste del municipio, con unas pocas zonas excluidas en la vereda Zungo Abajo; su área de extensión es de 11780,23 ha aprox (Figura 55).

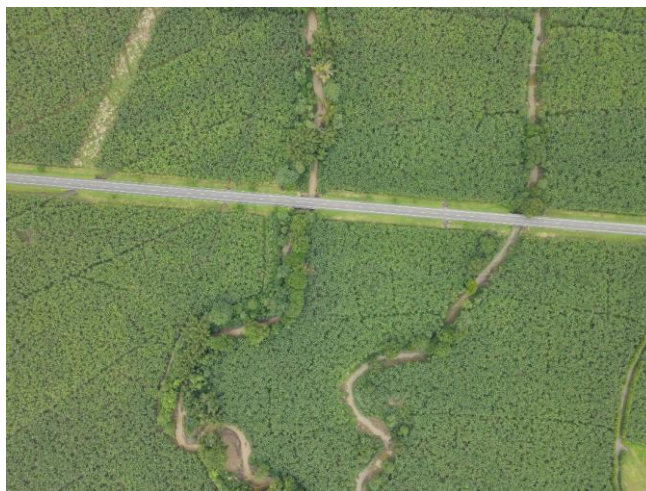


Figura 55. Cultivos permanentes herbáceos. Banano y plátano

4.3.1.2 Cultivos permanentes arbustivos (2.2.2)

Coberturas permanentes ocupadas principalmente por cultivos de hábito arbustivo como café, cacao, coca y viñedos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida.

4.3.1.2.1 Otros cultivos permanentes arbustivos (2.2.2.1)

Cobertura permanente de cultivos arbustivos de especies que no se encuentran especificadas en el apartado anterior, con superficie mayor a 25 ha y que sean identificables. También se incluyen los terrenos en preparación asociados a otros cultivos arbustivos. Este tipo de cultivos se presentan en zonas muy limitadas en las veredas El Porvenir y Playa Larga, al nororiente del municipio, con una extensión aproximada de 3,54 ha.



Figura 56. Otros cultivos permanentes arbustivos

4.3.1.3 Cultivos permanentes arbóreos (2.2.3)

Cobertura principalmente ocupada por cultivos de hábito arbóreo, diferentes de plantaciones forestales maderables o de recuperación, como cítricos, palma, mango, etc.

4.3.1.3.1 Otros cultivos permanentes arbóreos (2.2.3.1)

Cobertura permanente de cultivos arbóreos de especies diferentes a la palma de aceite, los cítricos y el mango. Este tipo de cultivos se observan en el suroccidente del área de estudio, en las veredas Zungo Abajo y Vijagual, con una extensión de aproximadamente 13,70 ha.



Figura 57. Otros cultivos permanentes arbóreos

4.3.1.4 Cultivos confinados (2.2.5)

Comprenden las tierras ocupadas por cultivos bajo infraestructuras de invernaderos, principalmente dedicadas al cultivo de flores, frutales y hortalizas. Incluye toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas en condiciones óptimas. Esta categoría de cultivos se observa en puntos específicos de las veredas Bajo del Oso y Salsipuedes, donde el área que cubre es de 0,50 ha.

4.3.2 Pastos (2.3)

Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por gramíneas, de la familia *Poaceae*, dedicadas a pastoreo permanente por un período de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente, y en el manejo posterior que se le hace.

4.3.2.1 Pastos limpios (2.3.1)

Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, encalamiento y/o fertilización, etc) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas. Esta cobertura constituye una gran extensión del área de estudio, puesto que ocupa alrededor de 3736,65 ha y se presenta al occidente, en la vereda Zungo Abajo, en todas las veredas del sur del municipio, así como en la totalidad de estas al nororiente del área de estudio. En esta cobertura también se considera la categoría de "Pastos limpios inundables (2.3.1.1)", la cual se observa mayormente hacia el occidente del municipio y en pequeños espacios en las veredas Playa Larga y Rodoxali, abarcando un área total de 848,58 ha.



Figura 58. Pastos limpios

4.3.2.2 Pastos arbolados (2.3.2)

Cobertura que incluye las tierras cubiertas por pastos, en las cuales se han estructurado potreros con presencia de árboles de altura superior a 5 m, distribuidos en forma dispersa. La cobertura de árboles debe ser mayor a 30% y menor a 50% del área total de la unidad de pastos. Este tipo de cobertura se presenta en zonas reducidas de la vereda Zungo Abajo, en extensiones importantes de todas las veredas del sur de Apartadó, áreas destacadas del centro norte, y en grandes espacios al nororiente como son las veredas Rodoxali y La Hoz. La extensión total de esta cobertura es aproximadamente 3110,49 ha. Dentro de esta categoría también se identificó la cobertura "Pastos arbolados inundables (2.3.2.1)", cuya ocurrencia predomina en la vereda Zungo Abajo, Punto Rojo y en un área reducida de Zungo Carretera; la extensión de esta categoría corresponde a 58,16 ha.



Figura 59. Pastos arbolados

4.3.2.3 Pastos enmalezados (2.3.3)

Son las coberturas representadas por tierras con pastos y malezas conformando asociaciones de vegetación secundaria, debido principalmente a la realización de escasas prácticas de manejo o la ocurrencia de procesos de abandono. En general, la altura de la vegetación secundaria es menor a 1,5 m. Para la identificación de esta cobertura se requiere del apoyo de información secundaria y control de campo. Esta cobertura se presenta en puntos destacados en la vereda Zungo Abajo, San Martín, en puntos aislados hacia el centro del municipio y en amplias extensiones en las veredas del nororiente de Apartadó; su extensión total son 2450,37 ha aprox. Dentro de esta categoría también se identificó la cobertura "Pastos enmalezados inundables (2.3.3.1)", cuya ocurrencia predomina en la vereda Zungo Abajo y Punto Rojo; la extensión de esta categoría corresponde a 62,50 ha.



Figura 60. Pastos enmalezados

4.3.3 Áreas agrícolas heterogéneas (2.4)

Son unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y naturales, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales; los arreglos geométricos están relacionados con el tamaño reducido de los predios, las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tenencia de la tierra.

4.3.3.1 Mosaico de cultivos (2.4.1)

Incluye las tierras ocupadas con cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 25 ha) y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual. El mosaico de cultivos presenta en la imagen arreglos geométricos característicos que facilitan su interpretación, como su amplia gama de colores y variadas prácticas de manejo. Este tipo de cultivos se observa en algunos puntos de las veredas Punto Rojo, El Diamante y San Pablo, al noroccidente del municipio, así mismo en algunos puntos de las veredas Bajo del Oso, Salsipuedes, San Martín y La Danta, al centro y sur, y en extensiones destacadas al sureste de Apartadó, en las veredas Mulatos Cabecera, Mulatos Medio y Las Nieves. Su extensión areal es de 224,03 ha aprox.

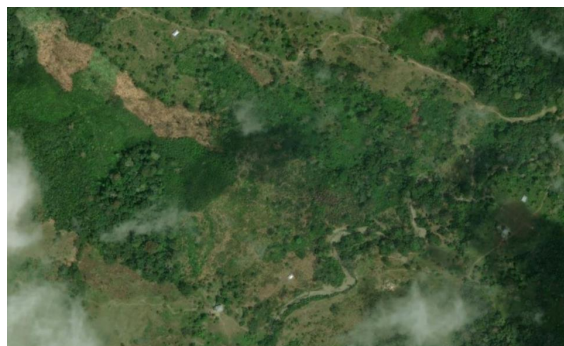


Figura 61. Mosaico de cultivos

4.3.3.2 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (2.4.3)

Comprende las superficies del territorio ocupadas principalmente por coberturas de cultivos y pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las coberturas no puede ser representado individualmente, como parcelas con tamaño mayor a 25 ha. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre 30% y 70% de la superficie total de la unidad. Los espacios naturales están constituidos por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas, que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural. Este tipo de cobertura se ubica entre las veredas Mulatos Medio y la Resbalosa, con una distribución de área de 136,97 ha. Esta cobertura incluye la subcategoría de "Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales arbóreos (2.4.3.1)", que se ubica hacia el norte del municipio en las veredas El Osito y Los Mandarinos, con una extensión de 100,86 ha.

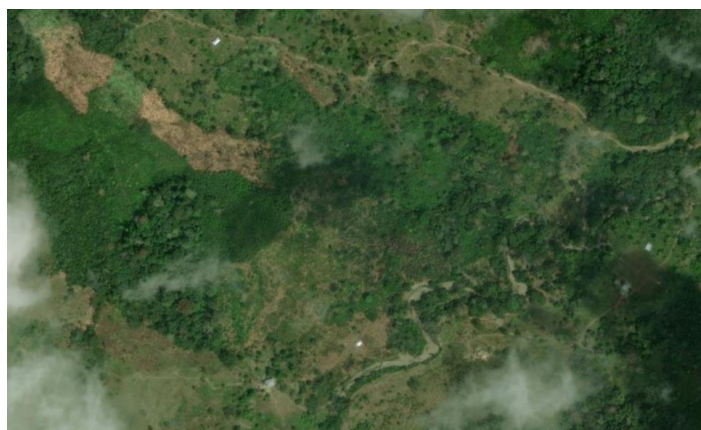


Figura 62. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

4.3.3.3 Mosaico de pastos con espacios naturales (2.4.4)

Constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las zonas de pastos y espacios naturales no puede ser representado individualmente y las parcelas de pastos presentan un área menor a 25 ha. Las coberturas de pastos representan entre 30 y 70% de la superficie total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustos y matorrales, bosque de galería y/o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas y que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural. Esta cobertura se observa en la vereda Salsipuedes, hacia el centro del municipio, donde la extensión total en el municipio corresponde a 2,41 ha. Esta cobertura incluye la subcategoría de "Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos (2.4.4.1)", y se encuentra en amplios espacios aislados, en una franja que abarca el centro del municipio, con una extensión de 1462,79 ha.

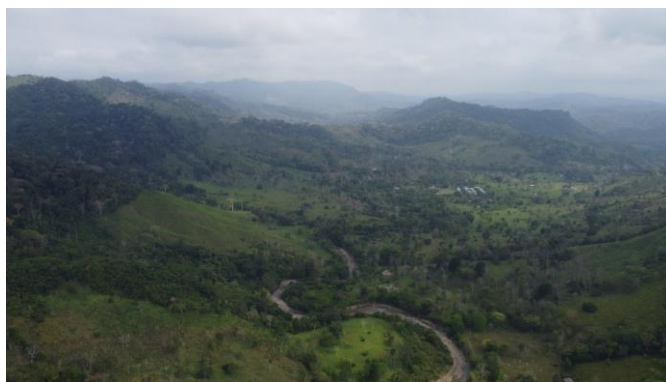


Figura 63. Mosaico de pastos con espacios naturales

4.3.3.4 Mosaico de cultivos y espacios naturales (2.4.5)

Corresponde a las superficies ocupadas principalmente por cultivos en combinación con espacios naturales, donde el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual. En esta unidad los espacios naturales se presentan como pequeños parches o relictos distribuidos en forma irregular y heterogénea, a veces entremezclada con las áreas de cultivos, dificultando su diferenciación. Las áreas de cultivos representan entre 30 y 70% de la superficie total de la unidad. Los parches y residuos de espacios naturales están conformados por aquellas áreas cubiertas por relictos de bosque, arbustales, bosque de galería y/o ripario, vegetación secundaria o en transición, zonas pantanosas u otras áreas no intervenidas o poco transformadas que permanecen en estado natural o casi natural. Este tipo de mosaico se observa en un punto al norte del municipio, en la vereda Playa Parga, y cuenta con un área aproximada de 0,59 ha.



Figura 64. Mosaico de cultivos y espacios naturales

4.4 Bosques y áreas seminaturales (3.)

Comprende el grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación. Para la leyenda de coberturas de la tierra de Colombia, en esta categoría se incluyen otras coberturas que son el resultado de un fuerte manejo antrópico, como son las plantaciones forestales y la vegetación secundaria o en transición.

4.4.1 Bosques (3.1)

Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tiene una copa más o menos definida. De acuerdo con FAO (2001), esta cobertura comprende los bosques naturales y las plantaciones. Para la leyenda de coberturas de la tierra de Colombia, en esta categoría se incluyen otras formas biológicas naturales, tales como la palma y la guadua.

Para efectos de clasificación de unidades de esta leyenda, los bosques son determinados por la presencia de árboles que deben alcanzar una altura del dosel superior a los cinco metros. Para su diferenciación los bosques fueron clasificados de acuerdo con tres criterios fisonómicos estructurales fácilmente observables en imágenes de sensores remotos como son la densidad y la altura, y un elemento interpretable del terreno que se puede inferir del sensor como es la condición de drenaje.

Para la interpretación de las coberturas de la tierra, los bosques se clasifican, a partir de la densidad de la cobertura arbórea, en densos y abiertos; de acuerdo con la altura del dosel, los bosques se clasifican en altos y bajos; y de acuerdo con la condición de inundabilidad del terreno donde ubican los bosques, se clasifican en inundables y de tierra firme.

4.4.1.1 Bosque denso (3.1.1)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, y con altura del dosel superior a cinco metros. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC, 1999). Se exceptúan de esta unidad los bosques fragmentados.

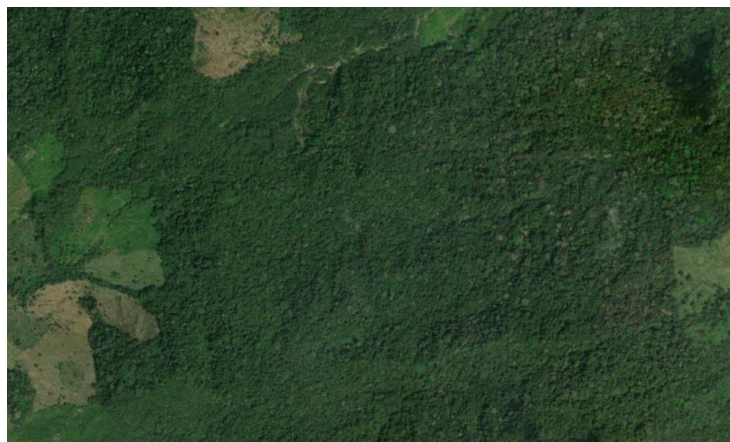


Figura 65. Bosque denso

4.4.1.1.1 Bosque denso alto (3.1.1.1)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, y que en promedio presentan una altura del dosel superior a los 15 metros.

▽ *Bosque denso alto de tierra firme (3.1.1.1.1)*

Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 15 m y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos. Este tipo de bosque se observa mayormente en las zonas centro oriente y nororiente del municipio, con una extensión de 10268,13 ha aprox.

▽ *Bosque denso alto inundable (3.1.1.1.2)*

Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura de dosel superior a 15 m y localizado en las franjas adyacentes a los cuerpos de agua (lóticos), los cuales corresponden a las vegas de divagación y llanuras de desborde con procesos de inundación periódicos con una duración mayor a dos meses. Este tipo de bosque se encuentra en la vereda Zungo Abajo, en el extremo occidental del municipio y cuenta con una extensión de 260,78 ha.

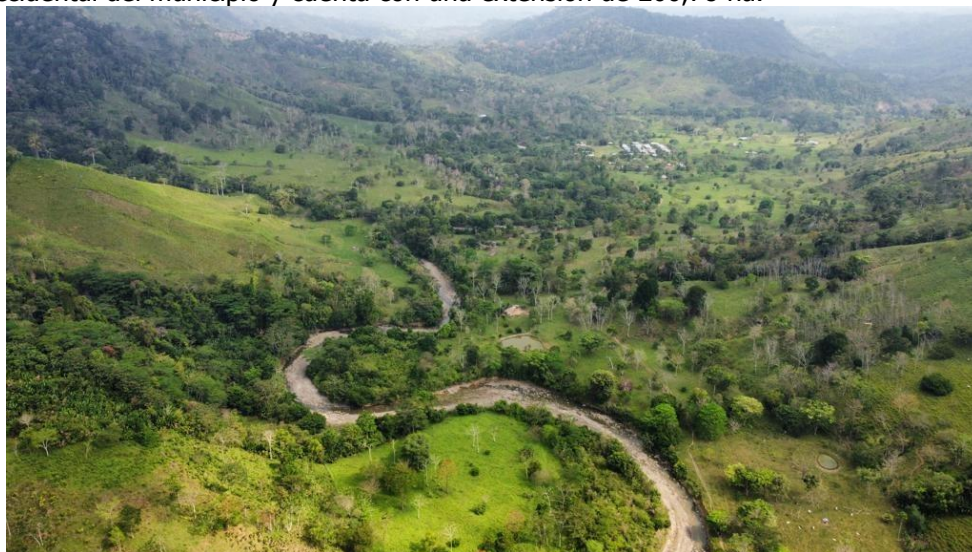


Figura 66. Bosques altos inundables

4.4.1.1.2 Bosque denso bajo (3.1.1.2)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo, cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 5 m, pero inferior a 15 m. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC, 1999).

▽ *Bosque denso bajo de tierra firme (3.1.1.2.1)*

Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, con altura

de dosel entre 5 y 15 m, localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos. Esta categoría de bosque se identifica en las veredas Zungo Abajo, Apartadó, Salsipuedes, Rodoxali y Las Flores, con un área que abarca 54,62 ha.

▽ *Bosque denso bajo inundable (3.1.1.2.2)*

Corresponde a las áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, con altura de dosel entre 5 y 15 m, localizada en franjas adyacentes a los cuerpos de agua (lóticos), los cuales corresponden a las vegas de divagación y llanuras de desborde con procesos de inundación periódicos con una duración mayor a dos meses. Este tipo de bosque se identifica en las veredas Zungo Abajo, Punto Rojo y San Pablo, con un área que abarca 54,12 ha.

4.4.1.2 *Bosque abierto (3.1.2)*

Cobertura constituida por la comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a cinco metros y cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales.



Figura 67. Bosque abierto

4.4.1.2.1 *Bosque abierto alto (3.1.2.1)*

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura de dosel superior a 15 metros, cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales.

▽ *Bosque abierto alto de tierra firme (3.1.2.1.1)*

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura superior a 15 metros, cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos. Esta cobertura tiene una extensión en área de 931,16 ha aprox. y se observa en las veredas Zungo Abajo y en una franja con dirección N-S hacia el oriente del municipio.

▽ *Bosque abierto alto inundable (3.1.2.1.2)*

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura superior a 15 metros, cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad y que se encuentra localizada en las franjas adyacentes a los cuerpos de agua (lóticos), las cuales corresponden principalmente a las vegas de divagación y llanuras de desborde con procesos de inundación periódicos con una duración de más de dos meses. La cobertura posee poca extensión en el municipio (16,65 ha aprox.) ya que solo se evidencia en las veredas Zungo Abajo y San Pablo.

4.4.1.2.2 Bosque abierto bajo (3.1.2.2)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a cinco metros e inferior a 15 metros, y cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales.

▽ *Bosque abierto bajo de tierra firme (3.1.2.2.1)*

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a cinco metros e inferior a 15 metros, y cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad y se encuentran localizadas en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos. Este tipo de bosque presenta una extensión de 79,22 ha y se localiza en puntos aislados en las veredas Zungo Abajo, Vijagual, San Martín, Zungo Arriba, La Danta, La Pedrosa y Apartadó, así como en un área más amplia en la vereda Churidó Puente, hacia el centro sur del municipio.

▽ *Bosque abierto bajo inundable (3.1.2.2.2)*

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo, con altura del dosel superior a cinco metros e inferior a 15 metros, cuya área de cobertura arbórea representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Se encuentra localizado en las franjas adyacentes a los cuerpos de agua (lóticos), las cuales corresponden principalmente a las vegas de divagación y llanuras de desborde con procesos de inundación periódicos con una duración de más de dos meses. Este tipo de bosque solo fue identificado en la zona suroriente de la vereda Zungo Abajo, con una extensión de 14,65 ha. aprox.

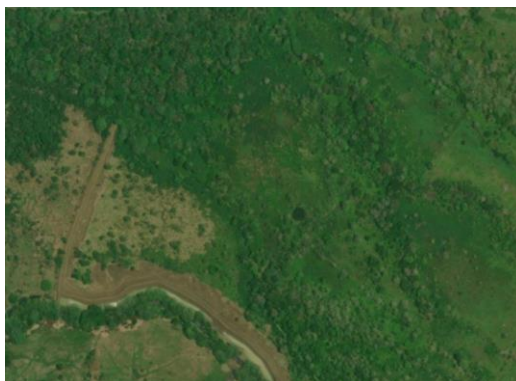


Figura 68. Bosque abierto bajo inundable

4.4.1.3 Bosque fragmentado (3.1.3)

Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos cuya continuidad horizontal está afectada por la inclusión de otros tipos de coberturas como pasto, cultivos, o vegetación en transición,

las cuales deben representar entre 5 y 30% del área total de la unidad de bosque natural. La distancia entre los fragmentos de intervención no debe ser mayor a 250 m. Por ser producto de la intervención humana, los parches de pastos, cultivos y minería tienen generalmente formas geométricas. Los bosques fragmentados tienden a presentarse en zonas de colonización, cerca de las áreas donde aún se conserva la matriz de bosque natural. Este tipo de bosque solo se observa al sur de la vereda Bellavista con una extensión de 26,26 ha.



Figura 69. Bosque fragmentado

4.4.1.3.1 Bosque fragmentado con pastos y cultivos (3.1.3.1)

Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se ha presentado intervención humana de tal manera que el bosque mantiene su estructura original. Las áreas de intervención están representadas en zonas de pastos y cultivos, las cuales se observan como parches de variadas formas y distribución irregular dentro de la matriz del bosque. Las áreas de pastos y cultivos deben representar entre 5 y 30% del área total de la unidad de bosque natural. La distancia entre fragmentos de intervención no debe ser mayor a 250 m. Esta categoría de bosques se identificó de manera muy extensa en la franja central del municipio, donde cuenta con una distribución de área de 8613,79 ha.

4.4.1.3.2 Bosque fragmentado con vegetación secundaria (3.1.3.2)

Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales donde se ha presentado intervención humana y recuperación del bosque, de tal manera que este mantiene su estructura original. Las áreas de intervención están representadas en zonas de vegetación secundaria, las cuales se observan como parches de variadas formas y distribución irregular dentro de la matriz del bosque. Se originan debido al abandono de áreas de pastos y cultivos, donde ocurre un proceso de regeneración natural del bosque en los primeros estados de sucesión vegetal. Los parches de intervención deben representar entre 5 y 30% del área total de la unidad. La distancia entre fragmentos de intervención no debe ser mayor a 250 m. Esta categoría posee una extensión de 334,39 ha, la cual se localiza hacia el centro norte del municipio, en las veredas El Cuchillo, La Unión, Buenos Aires, y una pequeña zona entre las veredas La Cristalina y Miramar, al sur del municipio.

4.4.1.4 Bosque de galería y/o ripario (3.1.4)

Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicadas en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales. Cuando la presencia de estas franjas de bosques ocurre en regiones de sabanas se conoce como bosque de galería o cañadas, las otras franjas de bosque en cursos de agua de zonas andinas son conocidas como bosque ripario. Para delimitar esta cobertura en la imagen de satélite, la unidad debe representar continuidad en cuanto a su forma y fisonomía (estructura del

bosque). Esta categoría se observa al oeste del municipio a lo largo de franjas extensas, así como al noreste del área de estudio, cuya área total es de 1336,52 ha. Esta cobertura incluye dos categorías; la denominada "Bosques de galería y ripario abierto (3.1.4.1)", la cual se observa en puntos aislados de las veredas Zungo Abajo y El Tigre, con una extensión de 3,26 ha. La otra categoría corresponde a "Bosque de galería y ripario abierto con pastos (3.1.4.2)", que presenta una extensión total de 133,84 ha aprox. y se encuentra en franjas alargadas al oeste del municipio (Veredas Zungo Abajo, Vijagual, San Pablo, El Diamante y El Guaro), puntos y franjas hacia las veredas Apartadó y Churidó Puente, junto con áreas importantes en las veredas Playa Larga, La Esperanza y Rodoxali, al oriente de Apartadó.



Figura 70. Bosque de galería o ripario

4.4.1.5 Plantación forestal (3.1.5)

Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante la plantación y/o siembra durante el proceso de forestación o reforestación, para la producción de madera (plantaciones comerciales) o bienes y servicios ambientales (plantaciones protectoras). Esta cobertura presenta en la imagen satélite un patrón geométrico regular, constituido por las hileras de árboles generalmente de la misma edad; para su identificación se requiere apoyo de información secundaria y control de campo. Este tipo de cobertura se presenta en las veredas El Tigre, Salsipuedes y Vijagual. La extensión de esta cobertura es de 73,01 ha aprox.



Figura 71. Plantación forestal

4.4.2 Áreas con vegetación herbácea y/ o arbustiva (3.2)

Comprende un grupo de coberturas vegetales del tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica. En esta clase se incluyen otros tipos de cobertura tales como las áreas cubiertas por vegetación principalmente arbustiva con dosel irregular y presencia de arbustos, palmas, enredaderas y vegetación del bajo porte.

4.4.2.1 Herbazal (3.2.1)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación) o abierta (30% - 70% de ocupación). Una hierba es una planta no lignificada o apenas lignificada, de manera que tiene consistencia blanda en todos sus órganos, tanto subterráneos como epigeos (Font Queur, 1982). Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC, 1999).

Para su diferenciación, los herbazales fueron clasificados de acuerdo con tres criterios: por la densidad de la cobertura herbácea, en densos y abiertos; de acuerdo con la condición de inundabilidad se clasifican en inundables y de tierra firme; y de acuerdo con la presencia de árboles y arbustos, en arbolados y no arbolados.

Los criterios utilizados para la diferenciación entre los diferentes tipos de herbazales tienen como fundamento los elementos pictóricos de las imágenes de sensores remotos, los cuales pueden ser identificados directamente en las imágenes, tales como la presencia de árboles y arbustos, o una característica inferida del terreno como es la condición de inundabilidad y densidad del herbazal.



Figura 72. Herbazal

4.4.2.1.1 Herbazal denso (3.2.1.1)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación). Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original ni sus características funcionales (IGAC, 1999). Este tipo de cobertura se presenta al sur del municipio, en las veredas Vijagual y San Martín, con una extensión aproximada de 5,20 ha.

4.4.2.2 Arbustal (3.2.2)

Comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5 metros, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida (FAO, 2001).



Figura 73. Arbustal

4.4.2.2.1 Arbustal denso (3.2.2.1)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbustivos, los cuales forman un dosel irregular, el cual representa más del 70% del área total de la unidad. La unidad puede contener elementos arbóreos dispersos. Esta formación vegetal no ha sido intervenida o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y sus características funcionales (IGAC, 1999). Este tipo de vegetación se encuentra expuesta en la zona sur del municipio, en las veredas Vijagual y Zungo Carretera; su extensión es de aproximadamente 3,84 ha.

4.4.2.2.2 Arbustal abierto (3.2.2.2)

Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos arbustivos regularmente distribuidos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) discontinuo y cuya cubierta representa entre 30% y 70% del área total de la unidad. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y sus características funcionales. Este tipo de cobertura posee una extensión muy reducida de 0,37 ha, únicamente observada en la zona central de la vereda Vijagual.

4.4.2.3 Vegetación secundaria o en transición (3.2.3)

Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida. No se presentan elementos intencionalmente introducidos por el hombre.



Figura 74. Vegetación secundaria

4.4.2.3.1 Vegetación secundaria o en transición alta (3.2.3.1)

Son aquellas áreas cubiertas por vegetación principalmente arbórea con dosel irregular y presencia ocasional de arbustos, palmas y enredaderas, que corresponde a los estadios intermedios de sucesión vegetal, después de presentarse un proceso de deforestación de los bosques o aforestación de los pastizales. Se desarrolla luego de varios años de la intervención original, generalmente después de la etapa secundaria baja. Según el tiempo transcurrido se podrán encontrar comunidades de árboles formadas por una sola especie o varias. Este tipo de vegetación posee una extensión de 2253,59 ha aprox. y se encuentra expuesta en la gran mayoría de veredas que se ubican hacia el sur, centro oriente y oriente del municipio, a manera de parches aislados, ocasionalmente extensos. La presente categoría también incluye la denominación "Vegetación secundaria o en transición alta inundable (3.2.3.1.1)", que se observa predominantemente en la vereda Zungo Abajo, Punto Rojo y Salsipuedes, en un área de aprox. 71,33 ha.

4.4.2.3.2 Vegetación secundaria o en transición baja (3.2.3.2)

Son aquellas áreas cubiertas por vegetación principalmente arbustiva y herbácea con dosel irregular y presencia ocasional de árboles y enredaderas, que corresponde a los estadios iniciales de la sucesión vegetal después de presentarse un proceso de deforestación de los bosques o aforestación de los pastizales. Se desarrolla posterior a la intervención original y, generalmente, están conformadas por comunidades de arbustos y herbáceas formadas por muchas especies. La cobertura está expuesta en todas grandes áreas del centro sur, norte y oriente del municipio, así como en zonas destacables de las veredas Punto Rojo y Zungo Abajo; su extensión areal corresponde a 4250,42 ha aprox. La presente categoría también incluye la denominación "Vegetación secundaria o en transición baja inundable (3.2.3.2.1)", que se observa predominantemente en la vereda Zungo Abajo, Churidó Puente, El Tigre y Rodoxali, en un área de aprox. de 68,35 ha.

La vegetación comúnmente corresponde a una vegetación de tipo arbustivo-herbáceo de ciclo corto, con alturas que no superan los cinco metros y de cobertura densa. Por lo general corresponde con una fase de colonización de inductores preclimáticos donde especies de una fase más avanzada se establecen y comienzan a emerger.

4.4.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación (3.3)

Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve.

4.4.3.1 Zonas arenosas naturales (3.3.1)

Son terrenos bajos y planos constituidos principalmente por suelos arenosos y pedregosos, por lo general desprovistos de vegetación o cubiertos por una vegetación arbustal ralo y bajo. Se encuentran conformando playas litorales, playas de ríos, bancos de arena de los ríos y campos de dunas. También se incluyen las superficies confirmadas por terrenos cubiertos por arenas, limos o guijarros ubicados en zonas planas de los ambientes litoral y continental, que actualmente no están asociadas con la actividad de los ríos, el mar o el viento. Esta cobertura se encuentra principalmente ubicada en los márgenes de los cauces principales que recorren el municipio de Apartadó; la extensión de estos afloramientos es de 264,00 ha aprox.

4.4.3.2 Tierras desnudas y degradadas (3.3.3)

Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas. La cobertura se encuentra entre las veredas Buenos Aires y Bellavista, donde la extensión areal es de 5,34 ha (Figura 19).

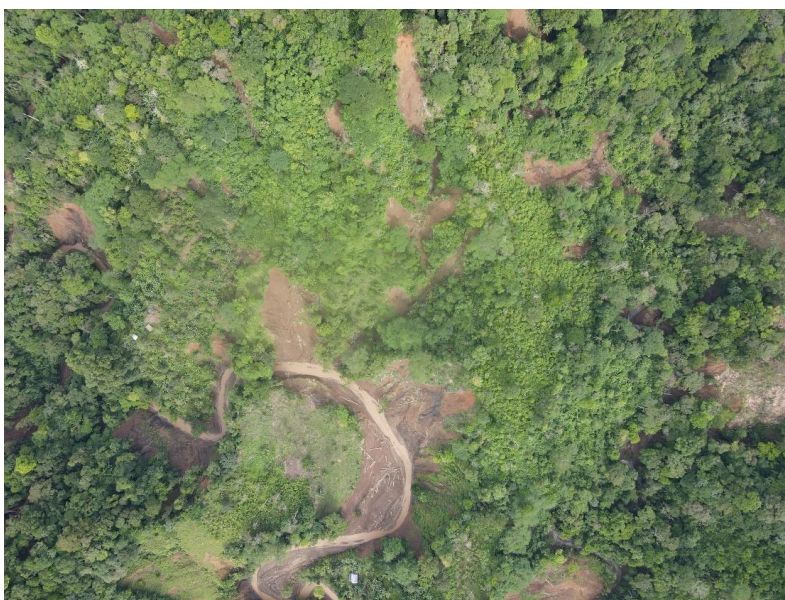


Figura 75. Tierras denudadas y degradadas

4.4.3.3 Zonas quemadas (3.3.4)

Comprende las zonas afectadas por incendios recientes, donde los materiales carbonizados todavía están presentes. Estas zonas hacen referencia a los territorios afectados por incendios localizados tanto en áreas naturales como seminaturales, tales como bosques, cultivos, sabanas y arbustales. Esta cobertura se observa en el centro de la vereda Rodoxali, al oriente del municipio, en una extensión de 34,64 ha.



Figura 76. Zonas quemadas

4.5 Áreas húmedas (4.)

Comprende aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática, localizados en los bordes marinos y al interior del continente.

4.5.1 Áreas húmedas continentales (4.1)

Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.

4.5.1.1 Zonas pantanosas (4.1.1)

Esta cobertura comprende las tierras bajas, que generalmente permanecen inundadas durante la mayor parte del año, pueden estar constituidas por zonas de divagación de cursos de agua, llanuras de inundación, antiguas vegas de divagación y depresiones naturales donde la capa freática aflora de manera permanente o estacional. Comprenden hondonadas donde se recogen y naturalmente se detienen las aguas, con fondos más o menos cenagosos. Dentro de los pantanos se pueden encontrar cuerpos de agua, algunos con cobertura parcial de vegetación acuática, con tamaño menor a 25 ha, y que en total representan menos de 30% del área total del pantano. Esta cobertura se observa en zonas puntuales de la vereda Churidó, con una extensión de 1,95 ha.

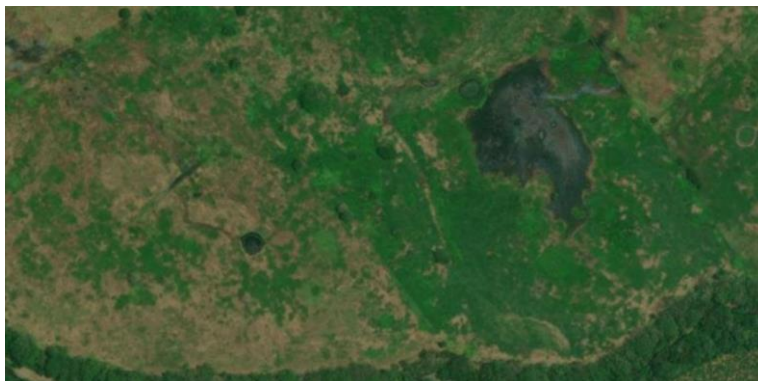


Figura 77. Zonas pantanosas

4.6 Superficies de agua (5.)

Son los cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente y los que bordean o se encuentran adyacentes a la línea de costa continental, como los mares. Se incluyen en esta clasificación los fondos asociados con los mares, cuya profundidad no supere los 12 metros.

4.6.1 Aguas continentales (5.1)

Son cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos, y estanques naturales o artificiales de agua dulce (no salina), embalses y cuerpos de agua en movimientos, como los ríos y canales.

4.6.1.1 Ríos (50m) (5.1.1)

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Se considera como unidad mínima cartografiable aquellos ríos que presenten un ancho del cauce mayor o igual a 50 metros. Esta cobertura conforma el límite entre varias veredas, así como el margen municipal al norte con el municipio de Turbo; posee una extensión areal de 267,39 ha (Figura 78). Dentro de los ríos principales del municipio de Apartadó se encuentra su homónimo, río Apartadó el cual atraviesa en sentido este – oeste su cabecera municipal, es esta misma dirección atraviesan al municipio el río Grande, caño Vijagual, río Churidó, caño Vijagualito, entre otros, hacia la zona de alta montaña los ríos transitan sobre el municipio en sentido sur-norte como el es caso del río Mulatos y río Currulao.



Figura 78. Mosaico de imágenes del río Apartadó



Figura 79. Panorámica del río Apartadó

4.6.1.2 Canales (5.1.3)

Cauce artificial abierto que contiene agua en movimiento de forma permanente, que tiene un ancho mínimo de 50 m y que puede enlazar o no dos masas de agua. Comprende canales de navegación y los de los distritos de riego. Este tipo de estructuras se observa mayormente en las veredas Zungo Abajo y Vijagual, con un área aproximada de 66,26 ha.



Figura 80. Canales

4.6.1.3 Cuerpos de agua artificiales (5.1.4)

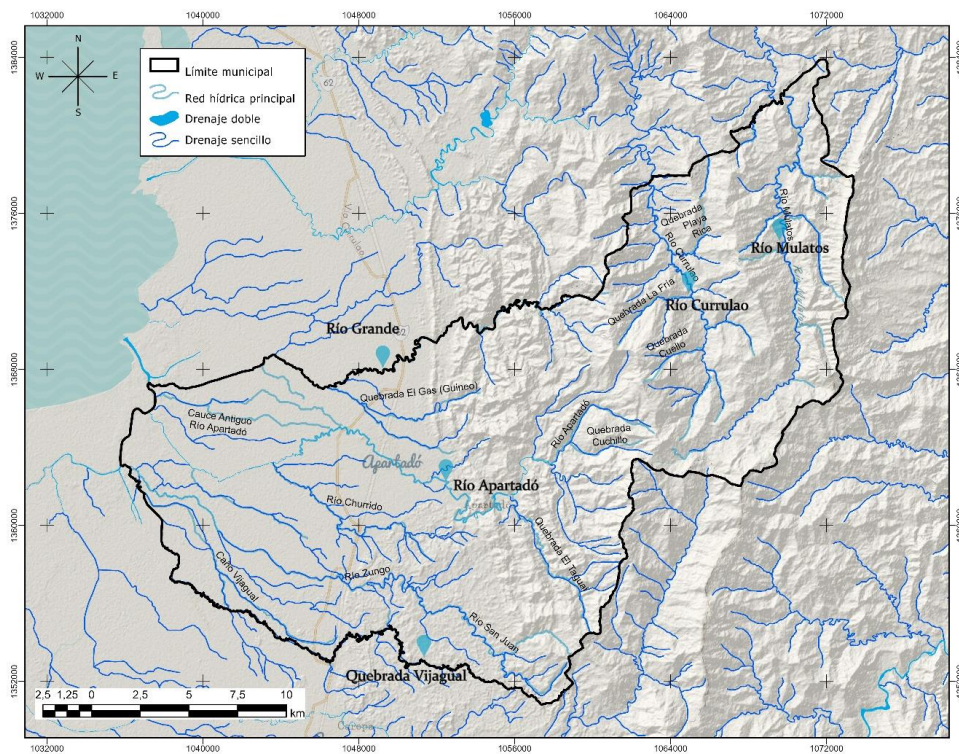
Esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial, que fueron creados por el hombre para almacenar agua usualmente con el propósito de generación de electricidad y abastecimiento de acueductos, aunque también para prestar otros servicios tales como control de caudales, inundaciones, abastecimiento de agua, riego y con fines turísticos o recreativos. Durante los períodos de nivel bajo de las aguas, dentro del proceso de manejo de los embalses, pueden quedar expuestas franjas de tierra seca que deben ser incluidas en esta unidad. Esta cobertura también incluye "Lagunas de oxidación (5.1.4.2)", presente al sur de la vereda Bajo del Oso (0,20 ha aprox.); "Estanques para acuicultura continental (5.1.4.3)", observados en la vereda Punto Rojo (0,65 ha aprox.); y "Aljibes (5.1.4.4)", identificados en varios puntos del municipio a manera de puntos, muchos de ellos concentrados en las veredas Zungo Abajo y Playa Larga, con una extensión total de 18,87 aprox.



Figura 81. Estanques

5. Hidrología y clima

En la Figura 83 se esquematizan las subcuencas principales del municipio de Apartadó, basándose entre otros aspectos en la zonificación hidrográfica realizada en los POMCA río León y río Turbo Currulao.



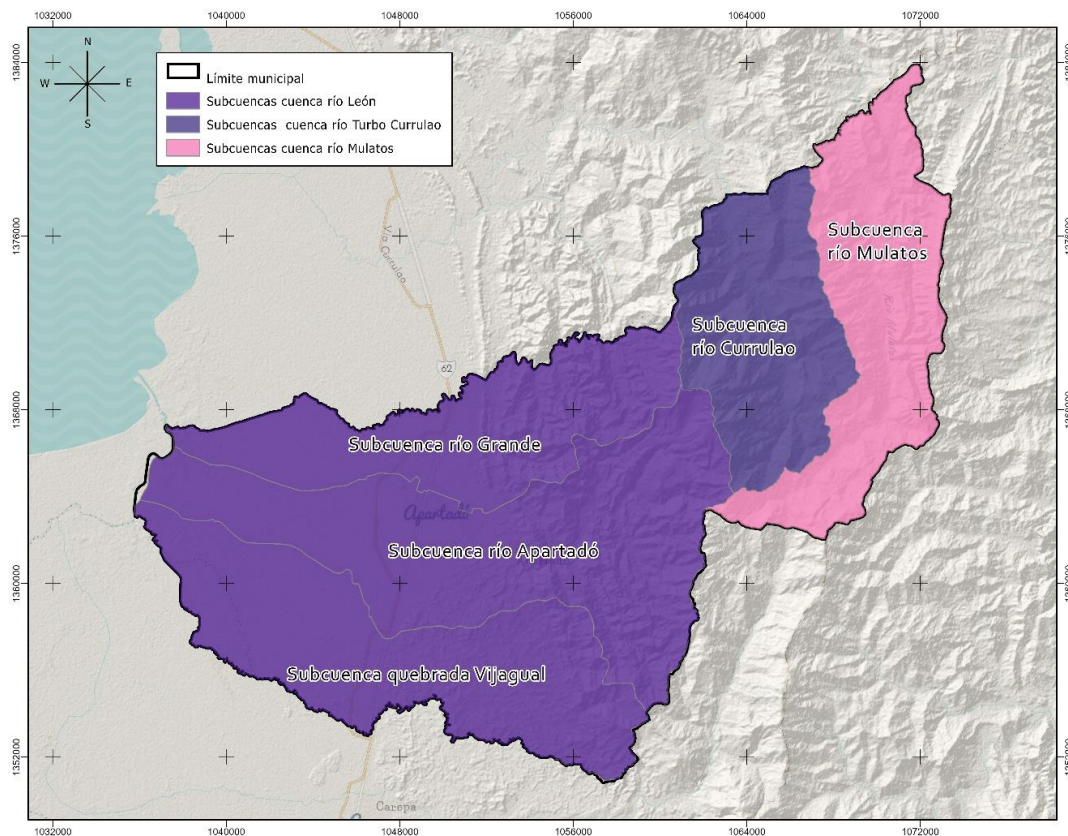


Figura 83. Subcuencas principales pertenecientes al municipio

El drenaje del municipio de Apartadó tiene dos tipos de patrones: uno dendrítico y uno contorneado. La parte dendrítica se presenta en la parte alta del municipio, donde se dan los nacimientos y en la que los drenajes están controlados principalmente por la orografía. En esta zona los flujos tienden a ser subcríticos con caudales bajos y un gran poder erosivo que favorece el arrastre de material fino granular y grueso debido a las pendientes y a la velocidad del agua. Respecto a la zona de drenaje contorneado, se presenta principalmente en la zona de sabana o llanura; en esta zona el control hidráulico lo genera la geología y suelen ser zonas en las que los ríos generan humedales y amplias llanuras de inundación, favoreciendo la formación de meandros y el transporte y deposición de material. El material fino granular suele depositarse en las zonas de llanura durante las recesiones de las crecientes, mientras que el material grueso suele asentarse en el fondo del cauce, comportamiento típico de zonas de abanicos fluviales.

Respecto a las subcuencas principales del municipio, su principal afluente es el río Apartadó que fluye desde lo alto de la cordillera y cruza el casco urbano hasta desembocar en el río León; hacia el sur se encuentran el río Vijagual y el río Grande que también desembocan en el río León. La parte norte del municipio tiene una vertiente importante hacia el río Mulatos y en el noreste la vertiente más importante es hacia el río Currulao. En la Tabla 15 se muestran las áreas de estos ríos pertenecientes a la jurisdicción del municipio de Apartadó.

Tabla 15. Áreas de las cuencas correspondientes al municipio de Apartadó

Río	Área (km ²)
Vijagual	165.97
Apartadó	158.66

Río	Área (km ²)
Grande	173.38
Mulatos	95.794
Currulao	81.64

Del componente climático del estudio de los POMCA río León y río Turbo-Currulao se recopiló información referente a las series temporales de las variables climáticas para el municipio. Los registros históricos de las estaciones disponibles cuentan con series mayores a quince (15) años, las cuales fueron sometidas a procesos de actualización y llenado de datos faltantes, consistencia y homogeneidad, esto con el objeto de realizar un análisis integral de las variables reportadas en cada una. En la Tabla 16 y Figura 84 se referencian las estaciones usadas para el presente estudio, además del periodo de información obtenida. En el anexo de estaciones se encuentra la información general (precipitación, temperatura y caudal) y su respectivo análisis y procesamiento.

Tabla 16. Estaciones climáticas usadas

Código	Cota	Nombre	Periodo de información
12010010	2360	Tormento El	1972 - 2021
12010060	2630	Lorena LA	1977 - 2021
12010170	2400	Nuevo Oriente	1991 - 2022
12010070	2115	Casco El	1977 - 2022
11135030	2300	Unguía AUT	1974 - 2022
25010010	2700	Puerto Libertador	1986 - 2021
13030010	2438	Tierralta	1971 - 2022

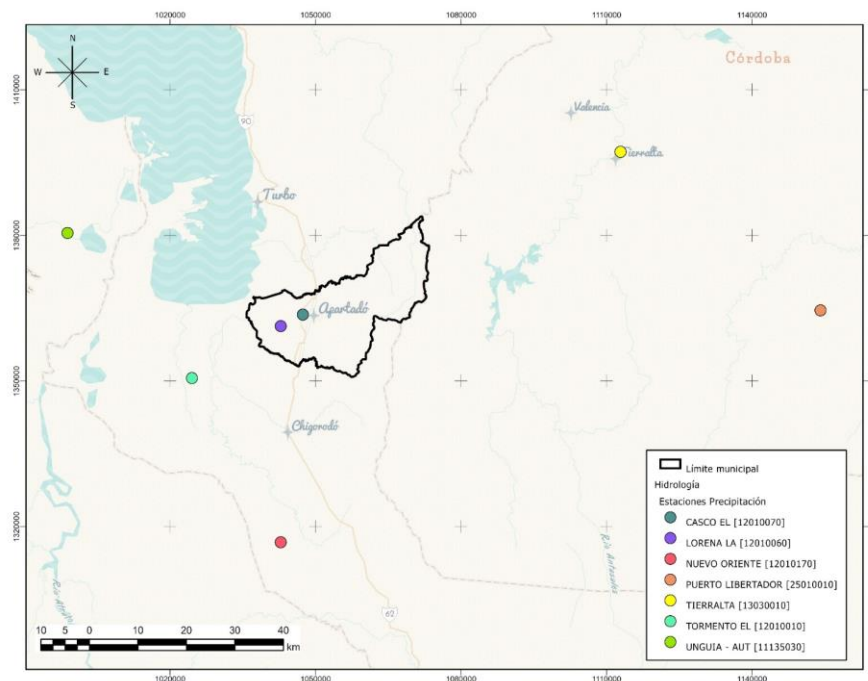


Figura 84. Localización de estaciones.

5.1.1 Precipitaciones medias mensuales

Las estaciones del área de interés evidencian precipitaciones medias anuales entre 1640 mm y 4128 mm respectivamente, de acuerdo con la distribución temporal de la precipitación en las estaciones analizadas. Con base en lo anterior se puede identificar un comportamiento bimodal que se enmarca en dos temporadas con registro de precipitaciones máximas y dos con precipitaciones mínimas; es así como típicamente en los meses de enero, febrero y marzo (primera temporada seca) se evidencian los valores de precipitación más bajos del año, con valores mínimos en promedio, contemplando todas las estaciones, del orden de 23 mm/mes, registrados en el mes de enero; la segunda temporada de precipitaciones mínimas se presenta en el mes de agosto, con valores promedio de 213 mm/mes.

Las precipitaciones máximas ocurren en los meses de abril a julio, siendo esta la temporada más crítica, con un valor máximo en promedio para todas las estaciones de 602 mm/mes, registrándose los valores más altos en la estación El Tormento con 913 mm/año de precipitación. Los meses que conforman la segunda temporada de lluvias del año son septiembre, octubre y noviembre, con un valor máximo en promedio para todas las estaciones de 617 mm/mes y con un valor máximo promedio de 1014 mm en el mes de septiembre. En la Tabla 17 y Figura 85 se muestran los ciclos anuales de precipitación para cada una de las estaciones en estudio. En el anexo de estaciones se encuentra la información de cada una de las estaciones de precipitación empleadas y su respectivo procesamiento.

Tabla 17. Precipitaciones medias mensuales

Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Tormento El	156.12	148.92	209.90	376.28	466.82	446.75	478.64	414.31	409.14	355.86	360.04	305.70	4128.47
Lorena LA	111.40	84.21	111.54	251.40	325.95	251.76	256.31	233.35	248.35	259.99	255.21	204.90	2594.38
Nuevo Oriente	135.50	53.40	156.88	286.15	413.95	423.86	411.06	394.77	462.88	402.60	414.68	338.80	3894.52
Casco El	91.19	72.89	102.92	232.86	325.86	260.40	238.89	253.88	264.92	259.65	244.36	204.50	2552.31
Unguia AUT	45.68	38.69	67.54	163.25	251.11	259.07	280.62	268.04	201.17	221.48	215.13	146.66	2158.42
Puerto Libertador	42.27	33.32	121.59	205.45	339.21	320.77	301.32	336.48	304.92	278.27	184.78	77.08	2545.46
Tierralta	23.25	28.59	58.97	135.01	238.92	212.24	200.61	213.06	186.81	173.91	109.97	59.24	1640.59

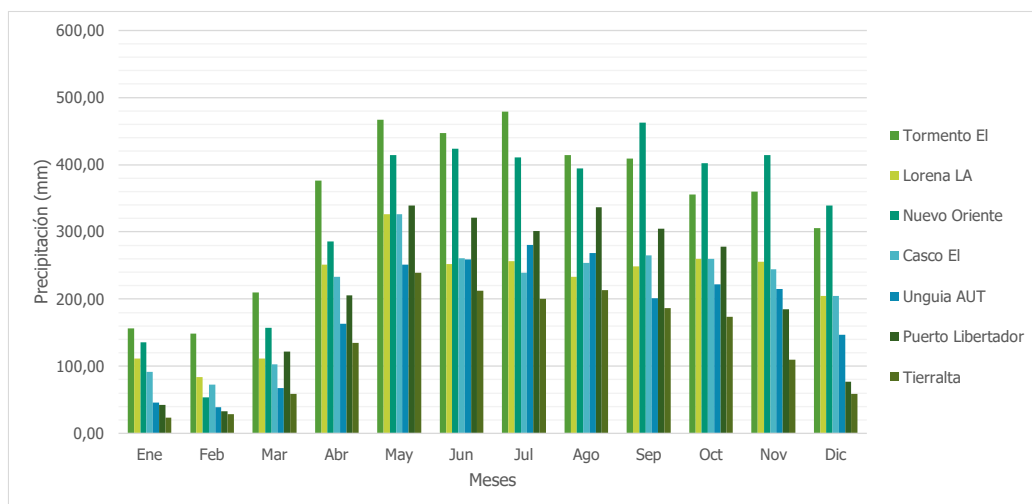


Figura 85. Precipitaciones totales mensuales.

Teniendo en cuenta que las precipitaciones se generan por el ciclo de elevación, enfriamiento y condensación del vapor de aire, se puede observar que la mayor precipitación se genera al occidente del municipio y va disminuyendo a medida que se avanza hacia el costado oriental.

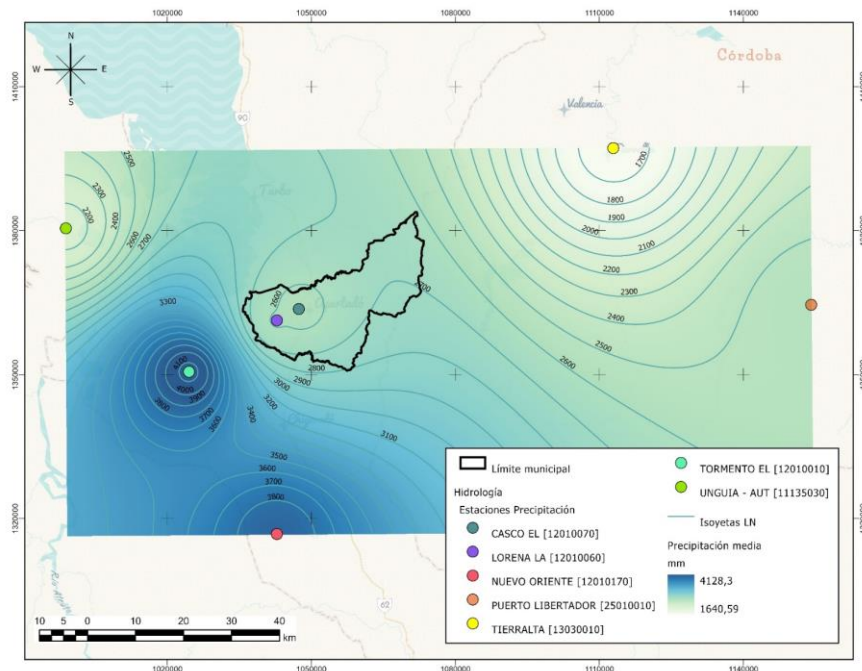


Figura 86. Isoyetas y precipitación media.

5.1.2 Valores de precipitación media, máxima y mínima mensual

El municipio presenta valores de precipitación máximos que en promedio superan las precipitaciones medias en hasta un 400%. En cuanto a las precipitaciones mínimas, se evidencia que los meses con los valores de precipitación más altos registran los valores medios mínimos. En la Figura 87 se muestran los valores de precipitación media, mínima y máxima mensual para el municipio de Apartadó, obtenidos de la estación El Casco.

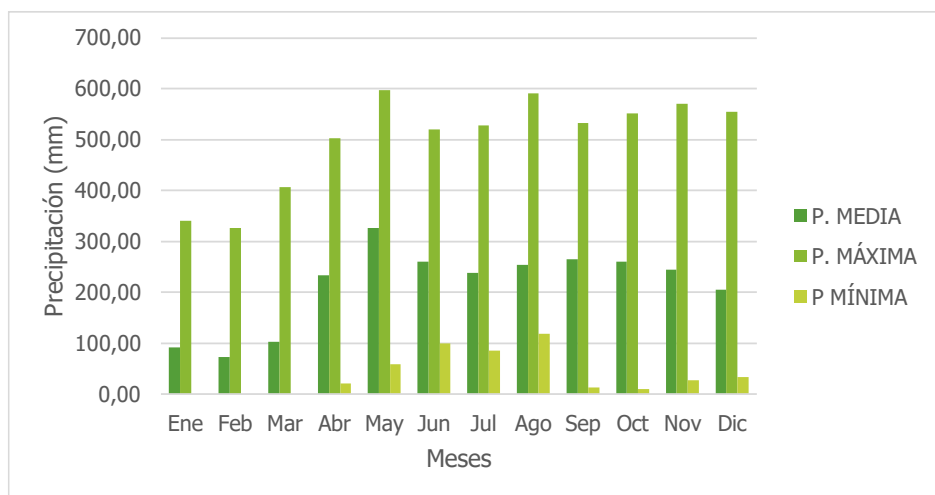


Figura 87. Precipitación media, máxima y mínima mensual.

5.1.3 Análisis de frecuencias para diferentes periodos de retorno

Se establecen como periodos de retorno de estudio 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, los cuales fueron analizados mediante la aplicación de la función que más se ajusta a eventos extremos, como es Gumbel, teniendo como resultado para las estaciones de interés del municipio la Tabla 18. En el anexo del análisis de frecuencia se muestra el procesamiento para obtener las precipitaciones máximas en diferentes periodos de retorno.

Tabla 18. Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno

Precipitaciones máximas en diferentes periodos de retorno							
Estación	Función	Periodos de retorno (Años)					
		2.33	5	10	25	50	100
Tormento El	Gumbel	11.37	27.14	39.97	56.19	68.23	80.17
Lorena LA	Gumbel	7.28	7.28	7.28	7.28	7.28	7.28
Nuevo Oriente	Gumbel	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66
Casco El	Gumbel	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01
Unguia AUT	Gumbel	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Puerto Libertador	Gumbel	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17
Tierralta	Gumbel	4.55	4.55	4.55	4.55	4.55	4.55

5.1.4 Número de días mensuales de precipitación

En el municipio de Apartadó el comportamiento arrojado por el número de días mensuales de precipitación indica que los valores mínimos que oscilan entre dos y seis registros los cuales se identifican en el mes de enero, los mayores registros ascienden desde el mes de abril hasta llegar al pico máximo que se evidencia en el mes de agosto, luego se observa un comportamiento descendiente desde el mes de septiembre. En la Tabla 19 se muestran los días mensuales con precipitación.

Tabla 19. Días mensuales con precipitación

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Tormento El	8	7	9	14	17	17	17	18	16	16	15	13
Lorena LA	4	3	5	9	11	11	11	11	10	10	10	8
Nuevo Oriente	5	3	7	11	15	15	16	16	15	14	14	11
Casco El	6	5	6	11	14	14	14	13	12	12	11	10
Unguia AUT	3	2	4	7	12	12	13	13	10	10	11	8
Puerto Libertador	2	2	4	8	12	12	12	12	11	11	8	4
Tierralta	2	2	3	8	11	11	12	11	10	10	7	4

5.1.5 Curvas IDF

Para la obtención de las curvas IDF se utilizó el método propuesto para Colombia por Vargas & Díaz Granados (1998), específicamente para la región Andina Colombiana, los cuales estuvieron basados en los trabajos de Kothyari y Garde y Bell, estableciendo diferentes ecuaciones que se ajustan al comportamiento de las 5 regiones del país, encontrándose que la de mayor confiabilidad corresponde a la propia de la

región Andina.

$$I = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e P T^f$$

Donde:

I = Intensidad

T= tiempo de retorno (años)

t= duración (horas)

M= valor máximo anual de precipitación diaria (mm)

N= promedio de número de días de lluvia al año

PT= precipitación media anual (mm)

a,b,c,d y f= coeficientes

Los coeficientes fueron calculados mediante análisis de regresión de las estaciones trabajadas (Vargas & Díaz Granados, 1998). Estos valores corresponden a: a= 1.61, b= 0.19, c= 0.65, d= 0.75, e= -0.15, f= 0.08. En la Tabla 20 se representan los valores base para la elaboración de las curvas IDF, dichos valores permiten identificar la correlación entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se analiza, dando como resultado la Figura 88.

Tabla 20. Valores base IDF

Estación	Valor máximo de precipitación diaria (M) - mm	Promedio número de días de lluvia al año (N) -días	Precipitación media anual (PT)- mm
El Casco	131.70	127.00	2552.31
La Lorena	136	102	2594.38

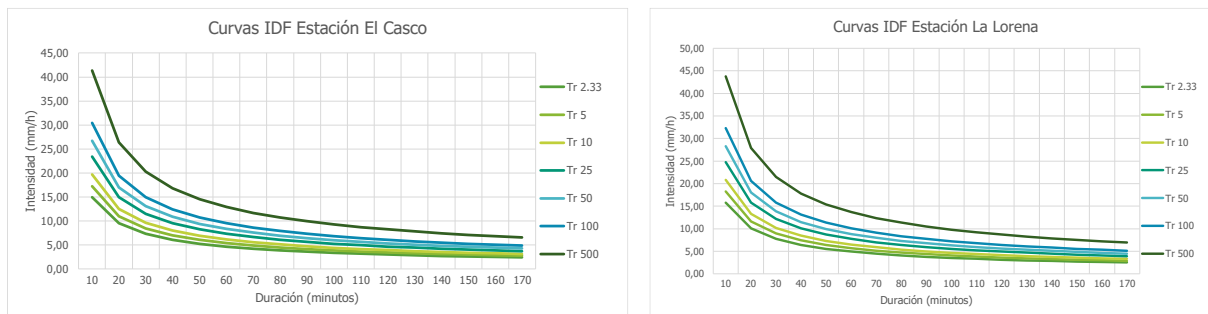


Figura 88. Curvas IDF.

5.2 Temperatura

Cerca del municipio de Apartadó se encuentra una estación climatológica que mide la temperatura, Aeropuerto Los Cedros (12015070); esta se encuentra ubicada en el municipio de Carepa. Al analizar sus datos se puede observar que la temperatura máxima mensual es de 26.47°C correspondiente al mes de junio (Tabla 21), las temperaturas más bajas se registran en el mes febrero y marzo, con valores promedio de 23.89°C (Tabla 21). En la Figura 89, se presenta la temperatura máxima, mínima y media mensual que registra la estación. En los anexos se adjunta la información de cada una de las estaciones de temperatura empleadas y su respectivo procesamiento.

Tabla 21. Temperatura máxima de la estación Aeropuerto Los Cedros (12015070)

Temperatura mensual	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Máxima	25.61	25.46	25.88	26.20	26.09	26.47	26.24	26.14	25.97	25.54	25.52	25.68
Media	24.67	24.62	24.79	25.19	25.31	25.29	25.14	25.22	24.98	24.85	24.85	24.85
Mínima	23.94	23.89	23.89	24.62	24.81	24.81	24.42	24.37	24.29	24.12	24.22	24.19

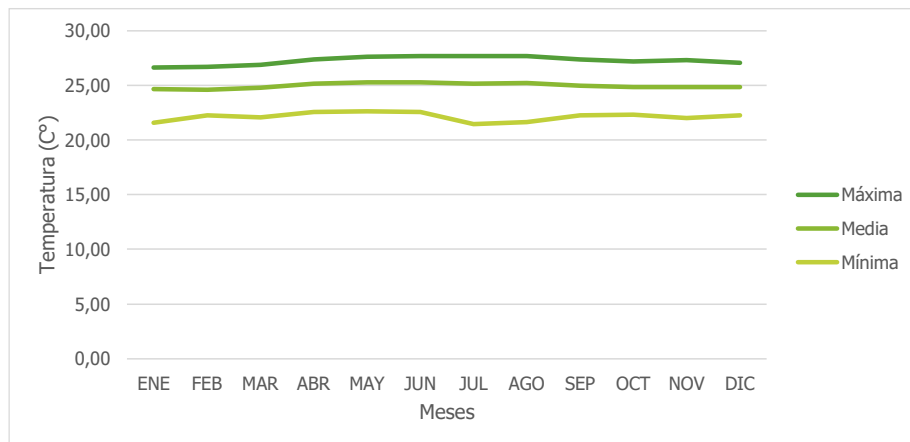


Figura 89. Temperatura media, máxima y mínima mensual de las temperaturas medias registradas por la estación Aeropuerto los Cedros.

La variación espacial de la temperatura en el municipio de Apartadó evidencia un valor promedio de 25°C (Figura 90).

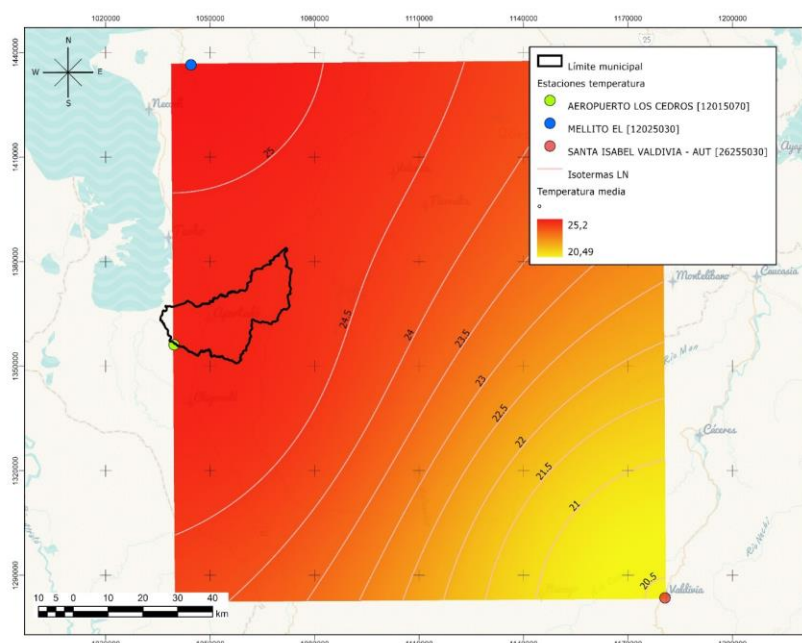


Figura 90. Isotermas y temperatura.

5.3 Balance hídrico

Tomando como referencia los valores de evapotranspiración mensual estimado a partir del método de Thornthwaite y los datos de la estación *El Casco*, se observa que de enero a marzo el suelo presenta déficit de agua, pues la evapotranspiración supera a la precipitación por lo tanto el suelo pierde humedad; en adición Se evidencia que en la zona se mantiene una recarga la mayor parte del año, exceptuando el primer trimestre. En enero se identifica que la infiltración es poca y el proceso de descarga de acuíferos pronunciado, pues se pasa de un exceso de 94,8 mm en diciembre a un déficit de -15,9 en enero. En este mes comienza el déficit de agua con un valor máximo de 33,5 mm en el mes de febrero. En marzo comienza la recarga ya que el déficit se reduce considerablemente alcanzando los 5,9 mm. El valor anual del balance es de 1213,5 mm lo que es lógico debido a la gran humedad y régimen de precipitación de la zona. En la Figura 91 y Figura 92 se muestra el balance mencionado.

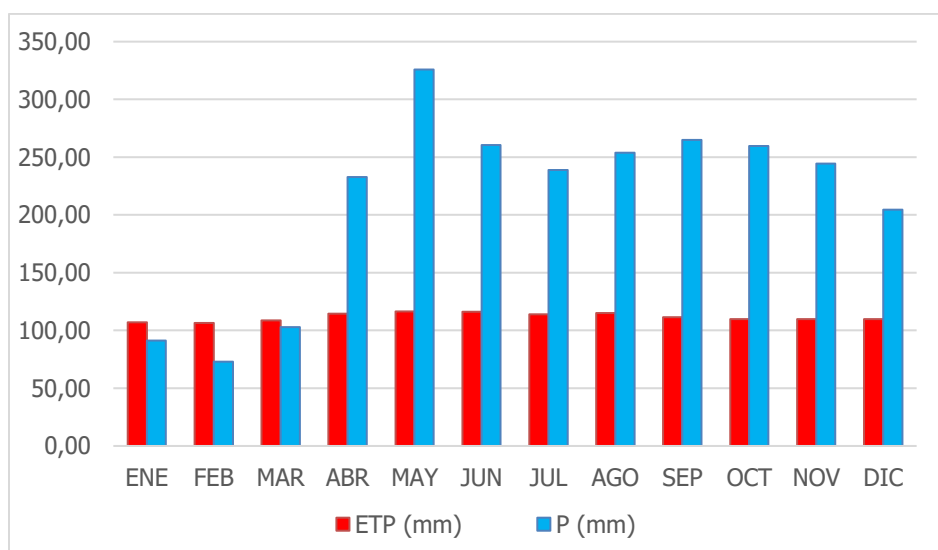


Figura 91. Comparación entre la precipitación y la evapotranspiración Apartadó.

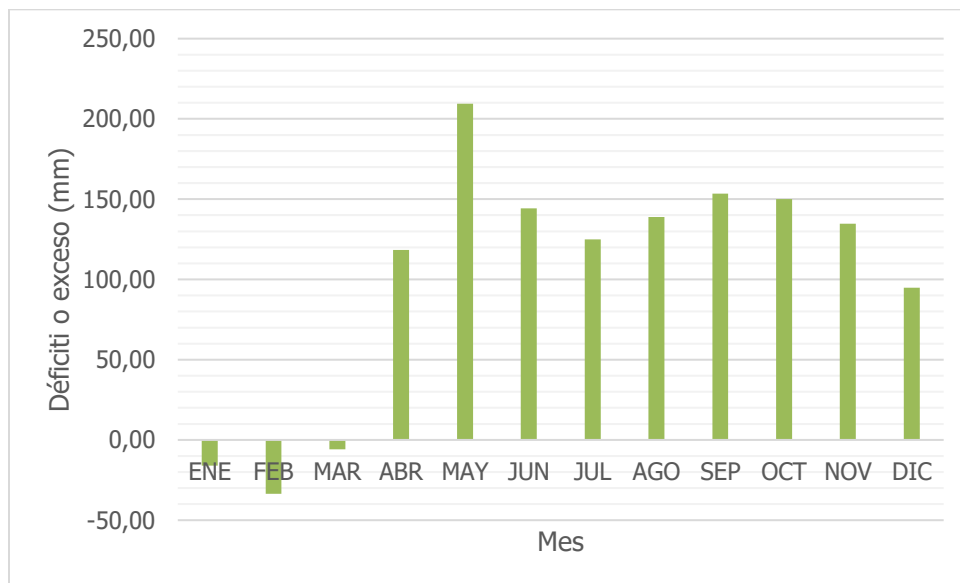


Figura 92. Déficit y exceso en el balance hídrico

5.4 Caudales cuencas municipio de Apartadó

5.4.1 Caudales medios

El análisis de los caudales medios se hace en dos enfoques, un primer enfoque asociado a la cuenca del río Apartadó hasta la cabecera municipal y el segundo asociado a las subcuencas que pertenecen al municipio. Las subcuencas se toman de los respectivos POMCAS (río León y río Turbo Currulao), delimitando la cuenca faltante del río Mulatos, para los análisis específicos asociados a la cabecera municipal, esta cuenca es delimitada usando el Modelo Digital de Elevación DEM, por sus siglas en inglés.

Para trazar la cuenca se contó con modelos de elevación, curvas de nivel del sitio de interés en escala 1:25000. Adicional a la red de drenaje con resolución espacial semejante, para esta tarea; el procedimiento empleado fue el siguiente:

- Trazar la cuenca a partir de la información obtenida de las curvas de nivel.
- Ubicar el punto de salida de la cuenca de interés.
- Usar las herramientas de creación de polígono para trazar la cuenca.
- Corregir la topología.

El resultado es la cuenca del río Apartadó hasta el punto de interés (cabecera municipal) y se muestran en Figura 93.

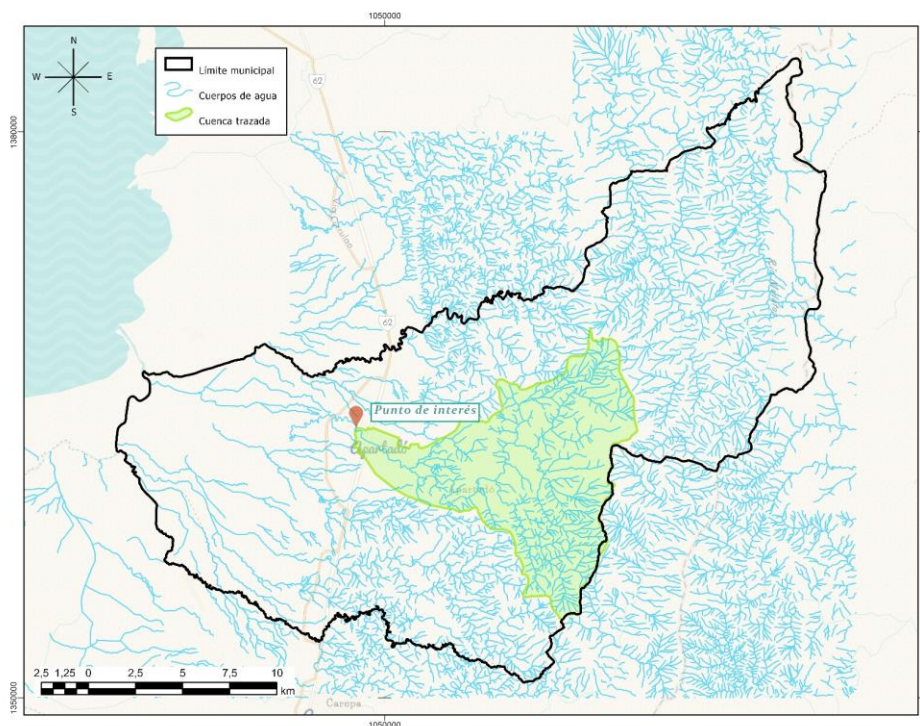


Figura 93. Trazado de la cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal

Para obtener los caudales medios diarios se utilizó el mismo modelo del POMCA del río León, el cual consiste en un modelo de tanques que genera una serie sintética de caudales diarios, a partir de la

precipitación diaria, las características morfológicas de la cuenca y los parámetros de conductividad hidráulica del suelo. Los resultados se exponen en la Tabla 22 y la Figura 94 para la cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal y en la Figura 95 se muestran los caudales medios de las subcuencas del municipio; se evidencia que los caudales máximos se contemplan en los meses de julio y diciembre a agosto con valores de hasta 19,93 m³/s. En el anexo de hidrología se encuentra la información del modelo de caudal empleado y su respectivo procesamiento.

Tabla 22. Caudales mensuales cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal

Caudal (m ³ /s)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
MIN	0.70	0.28	0.16	1.14	2.47	2.65	2.54	3.10	3.48	3.84	3.40	2.92	2.22
MED	3.46	1.86	1.96	4.13	7.54	6.40	6.60	6.13	6.34	6.56	7.01	6.25	7.43
MAX	15.70	9.66	6.46	8.19	14.82	11.87	16.27	11.11	10.70	10.00	13.89	19.93	12.38

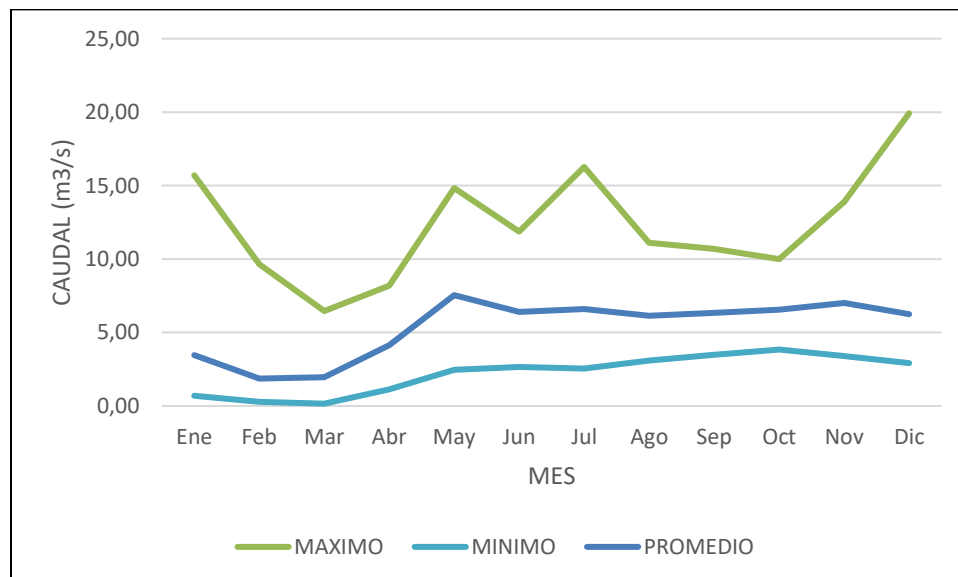


Figura 94. Caudales estimados cuenca río Apartadó hasta la cabecera municipal

Respecto a la zona rural, se implementó el mismo modelo aplicado a las 5 grandes subcuencas mencionadas anteriormente. El modelo muestra que todas las corrientes tienen un caudal de un orden de magnitud de la unidad de metros cúbicos. En general las cuencas cuentan con una buena capacidad de absorción de agua por parte de los suelos, excepto en las zonas donde se pueden presentar estratos de arcilla que reducen la permeabilidad. Las precipitaciones en la zona son intensas, sin embargo la capacidad de absorción del suelo reduce la acumulación de agua en la cuenca, generando poca precipitación efectiva que es la que ocasiona las grandes crecientes y tiene un efecto en los caudales medios. En la Tabla 23 se muestran los caudales para la zona rural

Tabla 23. Caudales medios de las cuencas de la zona rural

Río	Vijagual	Apartadó	Grande	Mulatos	Currulao
Caudal medio (m ³ /s)	9.25	8.85	9.67	5.34	4.55

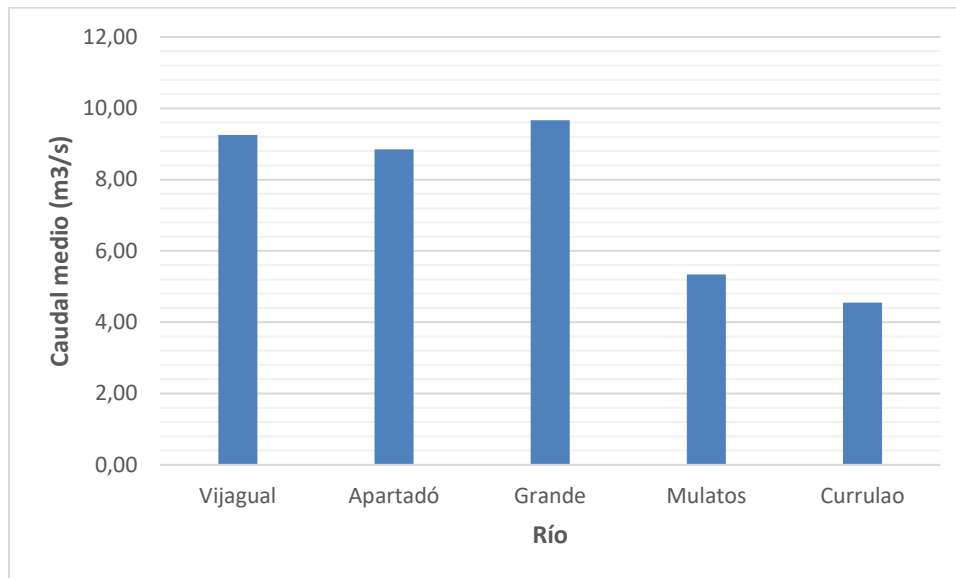


Figura 95. Caudales medios de las macrocuencas del municipio

Tabla 24. Caudales por periodos de retorno

Río	Área (km²)	Q medio (m³/s)	Q medio máximos (m³/s)	Desviación estándar máximos (m³/s)	2,33	5	10	25	50	100
Vijagual	165,97	9,25	32,94	12,36	32,95	41,83	49,06	58,20	64,97	71,70
Apartadó	158,66	8,85	31,49	11,81	31,50	39,99	46,90	55,63	62,11	68,54
Grande	173,38	9,67	34,41	12,91	34,43	43,70	51,25	60,79	67,87	74,90
Mulatos	95,794	5,34	19,01	7,13	19,02	24,14	28,32	33,59	37,50	41,38
Currulao	81,64	4,55	16,20	6,08	16,21	20,58	24,13	28,63	31,96	35,27

5.4.2 Caudales máximos instantáneos cuenca río Apartadó

5.4.2.1 Morfometría

El primer paso para estimar los caudales es hacer un análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje, de tal manera que se conozcan los parámetros básicos para hacer la modelación hidrológica. En este capítulo se muestran los datos, metodologías y procedimientos llevados a cabo para estimar la morfometría.

Una vez se obtiene la información se estiman los parámetros morfométricos más importantes. En la Tabla 25 se muestran los parámetros morfométricos.

Tabla 25. Parámetros morfométricos de la cuenca río Apartadó

Cuenca	río Apartadó
Área cuenca (km²)	96.78
Perímetro (km)	57.25
Longitud de la cuenca (km)	14.9
Ancho de la cuenca (km)	6.50

Cuenca	río Apartadó
Cota máxima Cuenca (msnm)	1107
Cota salida cuenca (msnm)	34
Elevación media de la cuenca (msnm)	349.2
Longitud cauce ppal [km]	19.54
Cota mayor cauce ppal (msnm)	166
Cota menor cauce ppal (msnm)	41
Pendiente media cauce (%)	0.64
Pendiente media de la cuenca (%)	16.77

Con estos parámetros se calcula el tiempo de concentración, el cual será el parámetro morfométrico más importante para la modelación hidrológica. Para el cálculo de estos tiempos se utilizan los métodos de Témez, Kirpich, California Culverts Practice y Giandotti cuyas ecuaciones se muestran a continuación en ese mismo orden. Estos tiempos son los sugeridos en el libro Hidrología de Antioquia y se usan para ríos de montaña como lo es este caso (Smith & Vélez, 1997)

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.75}$$

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{S_o^{0.5}} \right)^{0.77}$$

$$T_c = 0.01 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS_o}}$$

Donde: T_c es el tiempo de concentración en horas, L : Longitud del cauce principal en kilómetros, S_o : Diferencia de cotas extremas sobre la longitud, H : Diferencia de cotas entre el punto de interés y la divisoria, A : Área de la cuenca en kilómetros cuadrados. En la Figura 96 se muestran los resultados.

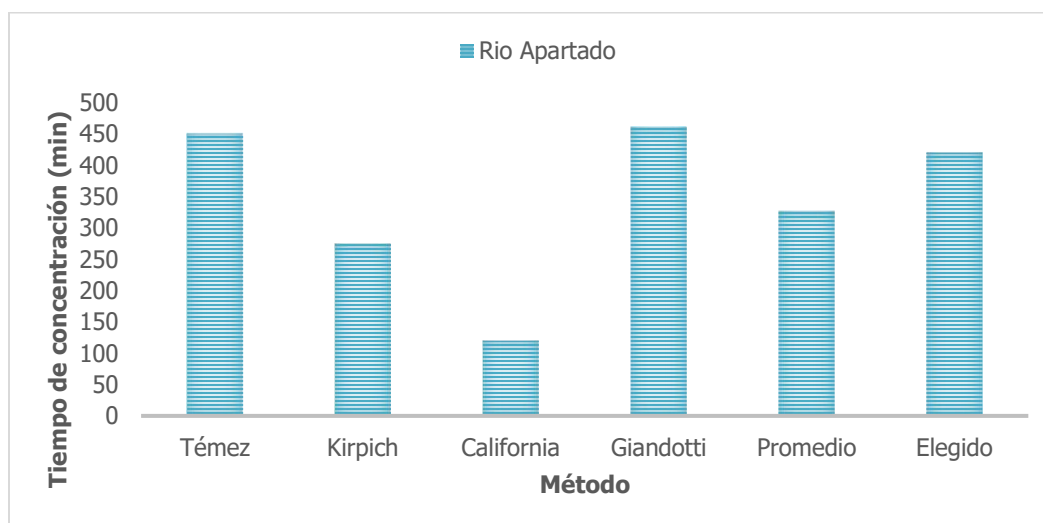


Figura 96. Resultados del tiempo de concentración

Usando la curva IDF El Casco y asumiendo una duración de lluvia igual al tiempo de concentración se estiman las intensidades de la lluvia y sus respectivos acumulados, luego se distribuyen en el tiempo y así se obtienen los hietogramas de precipitación total. En la Figura 97 se muestra el hietograma para distintos periodos de retorno para la cuenca.

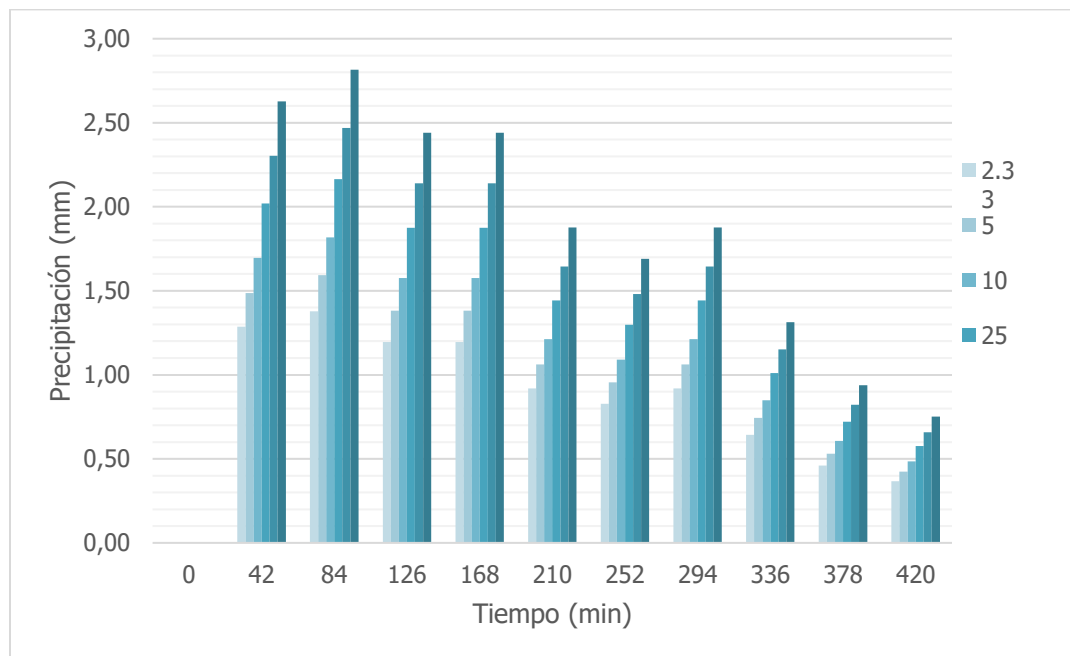


Figura 97. Hietograma de precipitación para el río Apartadó

5.4.2.2 Modelación lluvia - escorrentía

Una vez se tiene el análisis de la precipitación se procede a hacer la modelación lluvia-escorrentía, para ello se usó el modelo HEC-HMS el cual está diseñado para transitar crecientes y estimar caudales al pico tomando en cuenta el método de las hidrógrafas (hidrogramas) unitarios. Este procedimiento consiste en estimar la precipitación efectiva, determinar un caudal base y calcular la hidrógrafa a partir de las características morfométricas de la cuenca.

5.4.2.2.1 Metodología de las hidrógrafas unitarias

El método de las hidrógrafas unitarias es un método que estima la respuesta de una cuenca en términos de caudal cuando sobre esta se da un evento de precipitación, tomando como referencia los parámetros morfométricos de la cuenca, principalmente el área y el tiempo de concentración. Con esta información y el hietograma de precipitación efectiva se puede estimar el caudal que produce cada pulso de lluvia usando la siguiente ecuación.

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m U_{n-m+1}$$

Q_n : Caudal en el tiempo n

P_m : Precipitación en el intervalo m

U_{n-m+1} : Ordenada del hidrograma obtenido

El Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos propuso una hidrógrafa unitaria sintética la cual se basa en hidrógrafas unitarias promedio obtenidas del estudio de la escorrentía en cuencas pequeñas. Para entender este método se deben aclarar 3 conceptos claves como son: Tiempo de rezago, Tiempo al pico, Caudal al pico. Estos conceptos se describen a continuación según lo plantea (Chow *et al.*, 1994)

▽ Tiempo de rezago

Se define como el tiempo entre el centroide del hietograma de precipitación efectiva y el pico del hidrograma de escorrentía directa. Se asume que es constante debido a que depende de la morfometría de la cuenca y se puede estimar como:

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

Donde

T_c : Tiempo de concentración

T_R : Tiempo de rezago

Es decir que el tiempo de rezago se considera como el 60% del tiempo de concentración

▽ Tiempo al pico

El tiempo al pico se refiere al tiempo que le toma a la cuenca alcanzar el caudal pico o caudal máximo durante un evento de precipitación y se estima como el tiempo de rezago más la mitad de la duración de la lluvia así:

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

T_P : Tiempo al pico

T_R : Tiempo de rezago

T : Tiempo de duración de la lluvia efectiva

▽ Caudal pico

El caudal pico es el caudal máximo que se presenta durante el evento de precipitación y se estima como:

$$U_p = \frac{482A_c}{T_p}$$

T_P : Tiempo al pico

A_c : Área de la cuenca en millas cuadradas

U_p : Caudal pico (ft³/s)

5.4.2.2.2 Configuración del modelo HEC-HMS

El software HEC-HMS utiliza las ecuaciones de precipitación efectiva y número de curva para estimar la precipitación total (USACE, 2016). Después se define el hidrograma unitario para generar las crecientes y estimar el caudal pico, en este caso se usa el hidrograma de la SCS el cual requiere como parámetros de entrada el tiempo de rezago, que es equivalente el 60% del tiempo de concentración, y la precipitación efectiva calculada con anterioridad; finalmente se asume un valor de recesión de 90% del tiempo. Se realiza el modelamiento con otras metodologías, en este caso se aplican el método de Clark además del SCS. Los resultados de la modelación se muestran en Tabla 26, y Figura 98.

Tabla 26. Resultados de caudal para la subcuenca río Apartadó

Tr años	SCS	CLARK
2.33	28.9	15.1
5	32.3	16.3
10	35.9	17.6
25	41.3	19.6
50	44.7	21.4

Tr años	SCS	CLARK
100	51.7	23.4

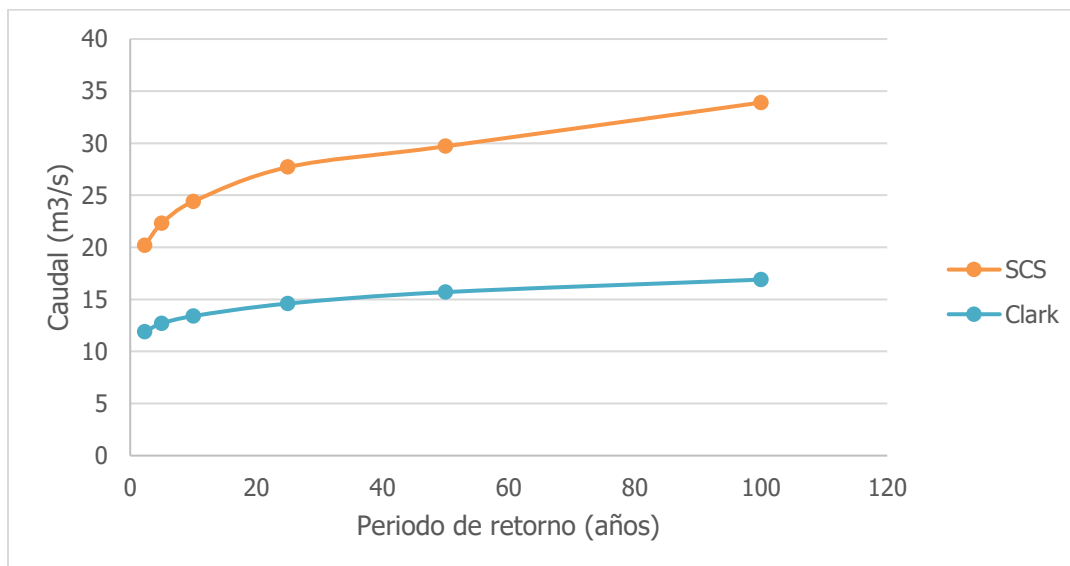


Figura 98. Resultados del caudal

6. Geología

La zona de estudio presenta una historia geológica enmarcada en el contexto regional del extremo norte de la Cordillera Occidental, lugar en el cual interactúan las placas Suramericana y Caribe (ANH, 2009). Si bien la geología del área comprende unidades cenozoicas de características relativamente homogéneas en toda la zona, los autores que han desarrollado la caracterización litoestratigráfica de esta región han determinado nomenclatura distinta para las unidades dependiendo el área del municipio que se analice, por lo cual se tendrán en cuenta las correlaciones desarrolladas por los diferentes trabajos cartográficos del SGC en esta zona del país.

Con base en la cartografía oficial, el área del municipio de Apartadó se distribuye en cuatro planchas geológicas, donde el norte del área de estudio se encuentra contemplada en las planchas 79-Turbo y 80-Tierralta, en las cuales afloran unidades datadas desde el Mioceno inferior al Holoceno, de acuerdo con lo descrito por GEOTEC LTDA (2003). Por su parte, la zona suroccidental de Apartadó se encuentra parcialmente en la Plancha 90-Chigorodó en la cual afloran las unidades correlacionables a aquellas observadas en las dos planchas al norte, descritas anteriormente; la cartografía de esta zona fue realizada por INGEOMINAS e IGAC (2005). Finalmente, una reducida fracción del área al suroriente del municipio se encuentra dentro del polígono cubierto por la Plancha 91-Belencito, cartografía realizada por GRP & SGC (2019).

Tomando como base la continuidad de las unidades litológicas que afloran en la región y la información geológica más actualizada para el área de estudio, se realizará una cartografía fundamentada en las denominaciones propias de los autores de cada una de las litologías presentes en el área, sin ahondar en el detalle de las posibles correlaciones estratigráficas que puedan existir, puesto que este aspecto no hace parte del objetivo principal del presente trabajo; no obstante, se tendrán en cuenta las propuestas de

correlación que fuentes oficiales hayan registrado para las unidades que afloran en jurisdicción del municipio.

Geológicamente, el municipio de Apartadó se encuentra entre los terrenos denominados Calima y Cuna (Toussaint & Restrepo, 2020) sobre unidades que datan desde el Mioceno inferior (formaciones Pavo Inferior y Superior – Formación Floresanto), pasando por el Mioceno Superior al Plioceno (Unidad Arenas Monas, Formación Corpa) hasta el Holoceno, caracterizado por depósitos de origen aluvial y coluvial, resultantes de los erosivos que han afectado la región en épocas actuales. En los siguientes apartados se llevará a cabo una descripción del marco geológico regional y la litología local en detalle, en cuanto a sus características principales y su apariencia general actual en la zona de estudio.

6.1 Geología regional

Regionalmente, el desarrollo y configuración actual de las Placas Suramericana, el Bloque Chocó-Panamá y el Norandino, presenta una interacción evolutiva a través de la historia geológica debido a procesos geodinámicos progresivos, tal como se aprecia en el Esquema Geotectónico del noroccidente de Sur América (Figura 99). Las placas mayores de Cocos, Nazca, Suramericana y Caribe (ANH, 2009) presentan una interacción mediante límites convergentes con subducción oceánica (Placa de Nazca bajo el Bloque Andes Norte) y la convergencia entre placas continentales, (Bloque Andes Norte y Placa de Suramérica), los cuales a su vez presentan límites transcurrentes (Bloque Panamá y Placa de Nazca), según lo propuesto por Kellog & Vega (1995) y Gutscher *et al.* (1999). El Bloque Andes Norte se localiza en el extremo noroccidental de Suramérica y comprende la terminación norte del Sistema Cordillerano de los Andes en Ecuador, Colombia y Venezuela, dicho bloque está limitado al oriente por el Sistema de Fallas de Guayaquil- Dolores-Algeciras- Frente Llanero Boconó (Figura 99).

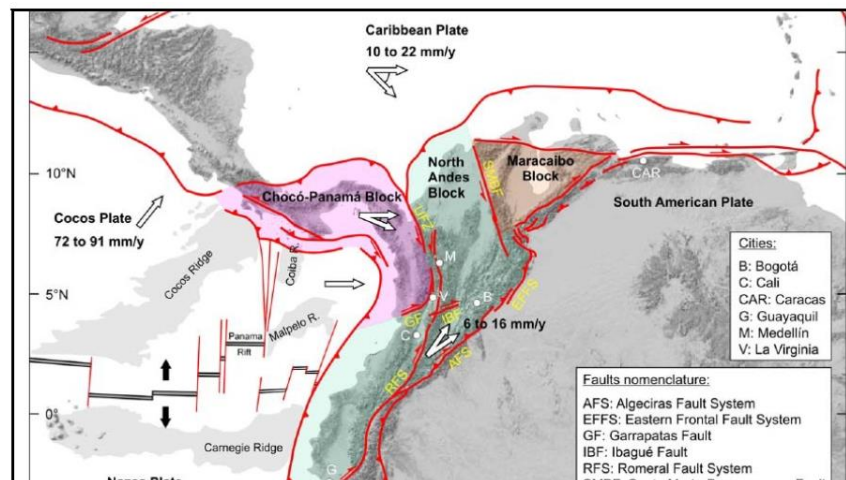


Figura 99. Configuración actual de las Placas Suramericana y Caribe con un desplazamiento de 10-22 mm/año, en sentido este – oeste. Fuente: ANH (2009).

El área de estudio se encuentra en cercanías a la zona de sutura entre lo que denomina ANH (2009) como el Bloque Chocó-Panamá y el Bloque de los Andes del Norte, que a su vez se localiza en las estribaciones del límite norte de la Cordillera Occidental. En esta región afloran rocas predominantemente sedimentarias, datadas desde el Mioceno hasta el Holoceno, cuyo paleo-ambiente de depositación corresponde a la transición de una zona marina a un terreno con influencia continental.

El municipio de Apartadó se ubica en un área incluida en las planchas 79 Turbo, 80 Tierralta, 90 Chigorodó y 91 Belencito, desarrolladas por el INGEOMINAS, actual SGC. En esta región la sucesión litoestratigráfica

presente en el área de estudio reposa sobre la unidad denominada Formación Cansona, datada en el Cretácico superior, específicamente en el Campaniano, cuyo ambiente de formación corresponde a un escenario de mar abierto en un medio nerítico medio a batial (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Para el caso de la cuenca de Urabá, la evolución geológica y tectónica está directamente relacionada a eventos de acreción que dieron origen a la Cordillera Occidental, como resultado del evento de choque entre las placas Caribe y Suramericana, ocurrido durante el Cretácico superior y el Paleoceno (ANH, 2009). Durante este periodo, la Placa Caribe comienza un movimiento continuo en sentido SW-NE a lo largo una zona de fallas con la misma orientación, donde tuvo lugar una deformación de tipo transpresivo con componente dextral, que permitió la generación del basamento de la cuenca Caribe (ANH, 2009) (Figura 100).

Sobre las rocas básicas de origen oceánico, acrecionadas al occidente del margen activo, se depositaron los sedimentos finos de la Formación Cansona (Campaniano – Maastrichtiano) que infrayace a la Formación San Cayetano del Paleoceno, caracterizada por arenitas y conglomerados de ambientes turbidíticos (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003); unidades que afloran al este de la zona de estudio y corresponden a la base de la secuencia litoestratigráfica que se observa en el área.

Posteriormente se presenta un hiato sedimentario durante el Eoceno inferior, el cual sugiere una actividad tectónica importante, seguida por un periodo de vulcanismo que se registra por la sedimentación silíceo de aguas profundas y el depósito de material tobáceo de las formaciones denominadas como Chert de Candelaria y Chert de Aguas Blancas, observadas en la cuenca Sinú – San Jacinto (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). Durante la parte media del Eoceno, tiene lugar una época de relativa calma tectónica en la cual ocurre la sedimentación marina de aguas más someras, donde se forman las unidades Chalán/La Risa. Finalmente, para el final del Eoceno, se presentan episodios de acreción de la cuña sedimentaria, que se manifiestan por la irregularidad en la sedimentación de formaciones El Floral/Areniscas de Manantial (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Para el Oligoceno, la depositación de la secuencia ocurre en un ambiente marino, conformado por las formaciones Maralú y la parte superior de El Floral; mientras que en el Mioceno temprano sobreviene un evento de aumento en el nivel del mar, que cubre los depósitos más someros, que corresponde a las unidades Pavo y Campano. Ya durante el Plioceno, la orogenia se manifiesta a manera de discordancias que permitieron la sedimentación de unidades como Arenas Monas y la Formación Corpa (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

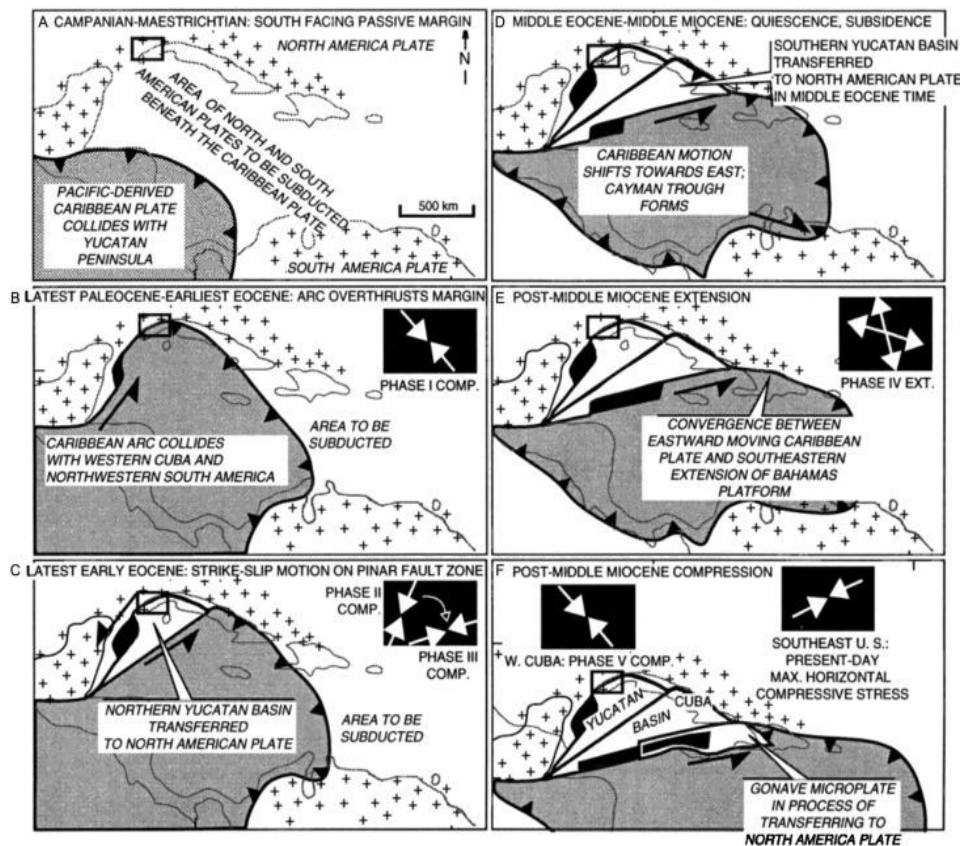


Figura 100. Modelo secuencial del movimiento de la Placa Caribe desde el Cretácico superior hasta el Mioceno. Fuente: Mann, Edwards & Ku (1995).

6.2 Litología local

La zona de estudio presenta una historia geológica enmarcada en contexto regional de la Cordillera Occidental y la interacción entre la placa Caribe y Suramericana. Si bien la geología del área comprende unidades cenozoicas de características relativamente homogéneas en toda la zona, los autores que han desarrollado la caracterización litoestratigráfica de esta región han determinado nomenclatura distinta para las unidades dependiendo el área del municipio que se analice, por lo cual se tendrán en cuenta las correlaciones desarrolladas por los diferentes trabajos cartográficos del SGC en esta zona del país.

Geológicamente, el municipio de Apartadó se encuentra entre los terrenos denominados Calima y Cuna (Toussaint & Restrepo, 2020) sobre unidades que datan desde el Mioceno inferior (formaciones Pavo Inferior y Superior – Formación Floresanto), pasando por el Mioceno Superior al Plioceno (Unidad Arenas Monas, Formación Corpa) hasta el Holoceno, caracterizado por depósitos de origen aluvial y coluvial, resultantes de los erosivos que han afectado la región en épocas actuales. En los siguientes apartados se llevará a cabo una descripción de la litoestratigrafía local detallada, en cuanto a sus características principales y su apariencia general actual en la zona de estudio.

Con base en lo expuesto anteriormente, Figura 101 presenta la correlación litoestratigráfica y la nomenclatura desarrollada por los diferentes autores que han realizado trabajos cartográficos y estratigráficos en la cuenca de Urabá, junto con los cinturones plegados de Sinú San Jacinto. La Tabla 27 y Figura 102 muestra de manera resumida las características litológicas de las unidades presentes en la zona de estudio, con respecto a su edad reportada por los autores citados a continuación.



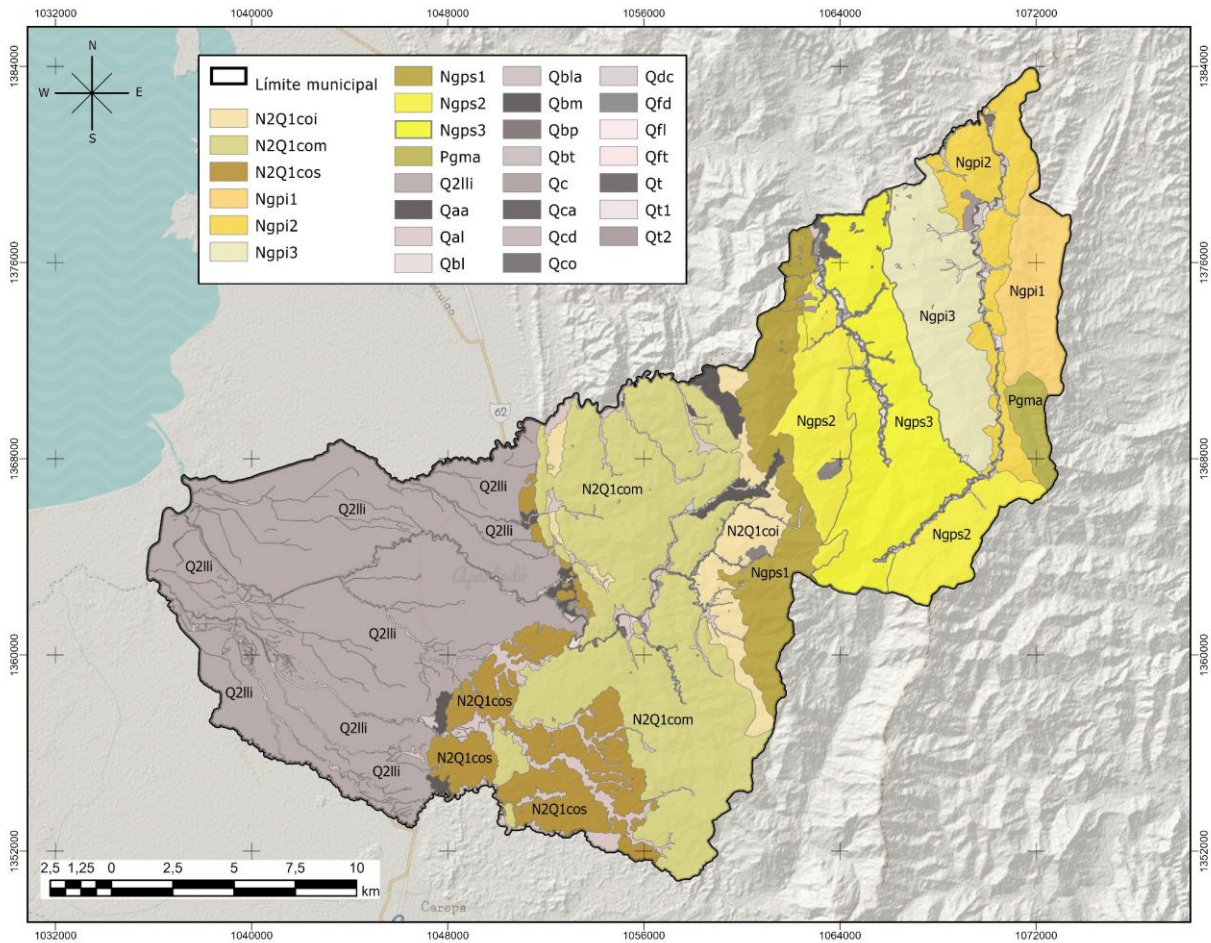


Figura 102. Unidades geológicas identificados en la zona rural

Tabla 27. Unidades litológicas aflorantes en la zona de estudio

Era	Periodo	Época	Nomenclatura	Unidad	Segmento	Descripción
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qfd	Depósitos de flujo de lodo		Conos de lodo de hasta 30 m de altura que emergen de manera aislada, principalmente a lo largo de fallas. Su actividad constante ha generado depósitos de espesores importantes, los cuales en muchas zonas no permiten observar la litología adyacente.
			Qc	Depósitos coluviales		Depósitos de pendientes o de laderas, de origen local, que forman unidades de conos coluviales, conos de talus y lóbulos de solifluxión. Están conformados por bloques angulares a subangulares de variado tamaño, embebidos en una matriz de composición arcillosa.

Era	Período	Época	Nomenclatura	Unidad	Segmento	Descripción
			Qt1, Qt2	Depósitos de terrazas aluviales		Compuestos por material detrítico, de carácter polimíctico, suelto a compacto, mal seleccionado, con granulometría variable y predominio de la fracción gruesa, embebida en una matriz de arena, limo y arcilla. Suelen presentar estratificación gradada, cruzada y lenticular con espesores mayores a los 30 m. Las diferencias entre terrazas aluviales bajas (Qt1) y altas (Qt2) radican en su altura topográfica y su antigüedad, donde las bajas son recientes y las altas fueron originadas previamente.
			Qal, Q2lli	Depósitos de llanura de inundación		Presentan topografías prácticamente planas, al mismo nivel de depósitos actuales de los ríos, con extensiones simétricas a ambos costados de los cauces. La composición del depósito es mayormente fina, con tamaños de partícula en el rango limo-arcilla. Esta categoría también incluye los depósitos de llanura de inundación recientes (Q2lli), cuyas características y origen son idénticos a los depósitos de llanura de inundación activa, con los primeros generados en eventos más antiguos.
			Qca	Depósitos de cauce activo		Depósitos de canales actuales que representan el aporte detrítico proveniente tanto de la erosión de suelos, como del material desprendido de laderas de los valles estrechos. Estos depósitos carecen de litificación y son de carácter detrítico, polimícticos, mal seleccionados, con clastos de formas redondeadas y aplanadas. Granulometría variable, con predominio de tamaños gravas y arenas en los diques y arcillas-limos en los bajos. Son comunes las estratificaciones lenticulares, gradadas y cruzadas.
			Qabp, Qbm, Qbla, Qbp, Qbt	Depósitos de barras		Depósitos de los canales actuales que carecen de litificación y son de carácter detrítico, polimícticos, mal seleccionados, con clastos de formas redondeadas y aplanadas. Su granulometría es variable, con predominio de tamaños gravas y arenas y se ubican en zonas donde el flujo permite una mayor precipitación de partículas. Entre estos depósitos de diferencian aquellos derivados de barras puntuales (Qabp), barras marginales (Qbm), barras longitudinales (Qbla), barras puntuales (Qbp) y barras transversales (Qbt); los cuales se distinguen dependiendo de su ubicación y disposición al interior o al margen de los cauces.
			Qft	Depósitos fluvio-torrenciales		Producto de eventos excepcionales de avenidas torrenciales. Constituidos por depósitos no consolidados compuestos de material clástico de granulometría gruesa, que incluye bloques, guijos, guijarros y gravas con poca redondez, polimícticos, mal seleccionados, embebidos en una matriz areno-conglomerática.

Era	Periodo	Época	Nomenclatura	Unidad	Segmento	Descripción
Neógeno			Qta/Qtan	Depósitos fluvio-lacustres		Depósitos de materiales acumulados por la acción de la dinámica fluvial y las acumulaciones netamente lacustres, desarrolladas en cercanías de los principales ríos de la zona. Los depósitos son clásticos, sueltos, compuestos por partículas arcillosas y limosas bien seleccionadas.
			Qaa	Depósitos de abanicos aluviales		Conos constituidos por gravas y gravas arenosas sueltas con capas delgadas de arena. Las partes proximales carecen de estratificación interna, sin embargo, distalmente presentan un decrecimiento hacia arriba en el tamaño de grano y ocasionalmente exhiben gravas arenosas bien seleccionadas de estratificación cruzada que rellenan canales antiguos. Esta descripción también contempla depósitos como conos de deyección o conos aluviales (Qcd), los cuales poseen una génesis y morfología similar pero una dimensión más reducida.
	Neógeno	Plioceno	N2Q1cos	Formación Corpa	Superior	Lodolitas grises de tono azulado, que reposan sobre un nivel de conglomerados de tamaño guijo y un nivel de limolitas de tono amarillento hacia el tope.
			N2Q1com		Medio	Arenitas polimígticas finas intercaladas con arenitas conglomeráticas y algunos niveles de lodolitas compactas en capas muy finas.
			N2Q1coi		Inferior	Arenitas amarillas y grises finas intercaladas con lodolitas negras en capas delgadas con zonas de laminación evidente.
			Ngps3	Formación Pavo Superior	Tres	Arenitas en paquetes de capas gruesas, tabulares, plano paralelas, de color pardo grisáceo, bien cementadas con lodolitas oscuras cementadas.
			Ngps2		Dos	Lodolitas de tonos gris oscuro, en capas plano paralelas, con intercalaciones de arenitas con ignofósiles hacia el tope.
			Ngps1		Uno	Arenitas de tamaño fino, tonos pardos amarillentos, en capas planas y tabulares, con cemento calcáreo, intercaladas con lodolitas grises hacia la base.
			Ngpi3	Formación Pavo Inferior	Tres	Intercalación de arenitas cementadas por material calcáreo y con laminación cruzada, y lodolitas de color gris oscuro con algunos icnofósiles.
			Ngpi2		Dos	Lodolitas grises oscuras, nódulos de siderita, y costras de óxido como relleno, intercaladas con arenitas cuarzosas marrones en capas delgadas, finas a medias y restos de materia orgánica.
			Ngpi1		Uno	Arenitas de grano fino amedio, color pardo rojizo, con vestigios de materia vegetal, intercaladas con lodolitas de colores gris pscuro verdoso y nódulos de limolitas calcáreas.
	Mioceno		Pgma	Formación Maralú		Arcillolitas grises, localmente limosas y micáceas, con presencia de margas ricas en foraminíferos y con

Era	Periodo	Época	Nomenclatura	Unidad	Segmento	Descripción
	Paleógeno	Oligoceno				presencia de hidrocarburos. Posibles fenómenos de erosión kárstica.

6.2.1 Formación Maralú (E3m)

Autor(es): Según GRP & SGC (2019), la Formación Maralú fue definida por Haffer (1967) pero no cuenta con una sección tipo debido a la falta de información en cuanto a su posición estratigráfica y litología claramente identificable (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Litología: Secuencia predominantemente arcillosa, localmente limosa y micácea, con presencia de margas blancas ricas en foraminíferos en la parte basal (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). Está constituida por arcillolitas grisáceas, macizas con interestratificaciones de limolitas y areniscas, que en algunos puntos poseen un componente lítico importante, grano fino y evidencias de presencia de hidrocarburos (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Espesor: Haffer (1967) en González (2001) asignan un espesor de aproximadamente 1000 metros. A lo largo de la Quebrada El Tigre en la Serranía de Abibe, se estima un espesor de 600 metros (GRP; SGC, 2019), no obstante, en la zona de estudio no se ha determinado un espesor estimado para la unidad.

Contactos: La formación Maralú infrayace de manera discordante la Formación Pavo y suprayace de manera discordante a la Formación Resbalosa (GRP; SGC, 2019). Al norte de la Plancha 91-Belencito está limitada por la Falla Río Verde.

Edad y correlación: Se asigna una edad del Oligoceno al Mioceno inferior a partir de los fósiles de foraminíferos encontrados por Haffer (1967), generada en un ambiente marino somero, posiblemente en una plataforma subsidente (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). La Formación Maralú es correlacionable con las formaciones El Carmen y Ciénaga de Oro del Cinturón Plegado de San Jacinto (GRP; SGC, 2019).

En el área de estudio la Formación Maralú no fue identificada en ningún punto de control, no obstante se infiere su presencia al extremo sureste del municipio, con base en la cartografía oficial del SGC, en la que corresponde a la unidad más antigua observada en el área de Apartadó. De acuerdo con su litología, esta formación genera relieves de una topografía suave, debido a la poca dureza del tipo de roca que conforma la unidad. Así mismo, dada la importante presencia de material calcáreo en sus niveles, posiblemente la Formación Maralú genera algunos patrones de erosión kárstica, enmascarados por la abundante vegetación del sector donde posiblemente aflora.

6.2.2 Formación Pavo Inferior (Ngpi)

Autor(es): Fue nombrada Arenas del Pavo por Haffer (1967) y es considerada por INGEOMINAS & IGAC (2005) como Formación Pavo Inferior.

Litología: En el área de estudio predomina el miembro inferior esta unidad, la cual está constituida en general por capas gruesas de arenitas líticas a sublíticas, coloración entre gris azulado y gris medio, con un tamaño de grano medio predominante, y en menor medida fino y grueso (ocasionalmente se encuentran guijos subredondeados y subangulosos de selección moderada). Estas arenitas se encuentran

interestratificadas con capas delgadas de lutitas de color gris verdoso a pardo, en las que se muestra esporádicamente restos de plantas, concreciones ferruginosas y capas delgadas de arenitas arcillosas.

Los contactos entre capas de arenitas es neto plano a gradacional, conformando una geometría tabular que en el caso de los niveles conglomeráticos es lenticular con disposición ondulosa no paralela (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). Por su parte, las estructuras sedimentarias incluyen estratificación cruzada de escala variable, laminación ondulosa discontinua, acanalamiento, turboglifos, además de icnofósiles y bioturbación (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Espesor: INGEOMINAS & GEOTEC (2003) asignan un espesor aproximado de 600 a 1300 metros para esta formación, pero SGC & GRP (2019) estiman un espesor mayor de 2400 m para el área al oeste de la Plancha 91-Belencito.

Contactos: Se encuentra en contacto tanto gradacional y concordante con la Unidad Pavo Superior, como fallado con la misma unidad hacia el techo, mientras que el contacto hacia la base puede ser fallado y difícil de identificar (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Edad y correlación: De acuerdo con Haffer (1967), la unidad pertenece al Mioceno inferior a medio. Por otra parte, INGEOMINAS & GEOTEC (2003) identifican un rango de edad entre Mioceno temprano hasta Plioceno inferior, puntualizando que las edades más antiguas se obtienen en la parte central de la unidad y las más recientes hacia el oeste.

De acuerdo con su registro de facies, el ambiente de formación refleja un ambiente deltaico progradante, donde se observan canales tributarios, zonas externas cenagosas y de marismas (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). En cuanto a su correlación, la Formación Pavo Inferior es parcialmente correlacionable con la Formación Floresanto (INGEOMINAS; IGAC, 2005), que se describe a continuación.

En la zona de estudio, la Formación Pavo Inferior aflora hacia la región central y el margen oriental del municipio. De acuerdo con las observaciones de CORPOURABA & ECOFOREST (2019), la unidad aflora a lo largo de la Serranía de Abibe y corresponde a la parte más alta y competente de la estructura; los autores describen la presencia arenitas líticas de grano medio y color gris, con cemento calcáreo, dispuestas en capas gruesas, con laminación visible gracias a la ocurrencia de láminas de lodolitas negras (Figura 103A).

La estructura de las rocas es estratificada, donde se observa diaclasamiento en dos direcciones, el cual genera una partición relativamente hexagonal en las litologías. Los niveles de lodolitas negras son fisiles, acompañados por algunas capas de lodolitas grises con partición concoidea, que sugiere procesos de silificación, dándole mayor dureza a la roca y por lo tanto un grado superior de competencia (Figura 103B) (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019); de estas observaciones también se puede inferir falta de plasticidad y friabilidad en las litologías que componen la formación.



Figura 103. Afloramiento de la Formación Pavo Inferior en la zona central del municipio. A. Arenas líticas de tono gris con cemento calcáreo. B. Fragmentos de arenitas grises con silicificación y fractura concoidea. Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)

Por su parte, CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) identifican esta unidad también hacia el margen nororiental del municipio de Apartadó y describen la formación como fajas o trenes con tendencia norte a sur que destacan por su alta competencia dada la abundancia de arenitas (70%) sobre lodolitas (30%). Sumado a esto, los autores mencionados dividen la formación en tres subunidades, similares a las aquellas diferenciadas por INGEOMINAS & GEOTEC (2003).

Para la primera subunidad "Paquete Pavo inferior 1", CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) describen la presencia de arenitas intercaladas con lodolitas, en capas con espesores entre 0,2 y 2 m, con morfología plana tabular y contactos inferiores erosivos. Las arenitas son de grano fino a medio, color pardo rojizo, grisáceo y amarillento, compuestas principalmente por cuarzo, fragmentos líticos, trazas de muscovita y con presencia de vestigios de materia vegetal en la base de algunas capas (Figura 104). En cuanto a las lodolitas, estas suelen encontrarse intercaladas con los niveles de arenitas, ocasionalmente en paquetes gruesos, de colores gris oscuro a verdoso, con nódulos alargados de limolitas calcáreas.

Las rocas de este paquete poseen una dureza moderada a alta debido a los fenómenos de cementación extendidos en algunos niveles, que a su vez sugiere bajas porosidades y permeabilidades (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018). Así mismo, dadas estas observaciones se infiere un grado de plasticidad bajo, con friabilidad también reducida, y presencia de diaclasamiento posiblemente frágil debido a los materiales que componen la roca.



Figura 104. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Pavo Inferior. A. Capas de espesor medio a grueso de arenitas grises. B. Presencia de tallos y raíces oxidadas en la base de las capas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

Con referencia al “Paquete Pavo inferior 2”, CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) señala un predominio de lodolitas sobre arenitas en una proporción respectiva de 65/35. Se describe que estas litologías se encuentran a manera de bancos de hasta 15 m de espesor, de color gris oscuro y aumento relativo del contenido de arena en algunos niveles. Además, se observan nódulos de siderita concordantes con la laminación y costras de óxidos como relleno de fracturas (Figura 105A). Por otro lado, las intercalaciones de arenita suelen ser cuarzosas, en capas delgadas de tonos marrones, granulometría fina a media y restos de materia vegetal. En ocasiones, dichos niveles pueden presentar morfologías lenticulares bien cementadas por material calcáreo (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

Basado en las observaciones de CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018), se identifica que este paquete posee una menor resistencia a la meteorización dado el material que componen esta parte de la secuencia. Se observa que las lodolitas presentan un alto grado de friabilidad y se diaclasan con facilidad. En contraste, los niveles arenosos pueden presentar mayor dureza, no obstante, su resistencia se ve disminuida por la facilidad en la desintegración de las capas finogranulares que los embeben. Sumado a esto, los autores indican que gracias a la abundancia de material de tamaño lodo, el “Paquete Pavo inferior 2” genera suelos residuales que suelen ser muy espesos (Figura 105B).



Figura 105. Afloramiento del paquete intermedio de la Formación Pavo Inferior. A. Capas de lodolitas fisiles con presencia de nódulos de siderita. B. Presencia de suelos residuales resultado de la meteorización de lodolitas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

En cuanto a lo que CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) denominan como “Paquete Pavo inferior 3”, se describe una intercalación de arenitas y lodolitas con predominancia de las primeras, con características similares a las de los otros paquetes, pero con un aumento leve de granulometría y algunas zonas con líticos; su color es pardo rojizo y amarillento, en capas gruesas con contactos planos u ondulados, netos o transicionales con las lodolitas (Figura 106A). Los niveles de arenitas suelen presentar alta dureza debido al cemento calcáreo, donde también se observan estructuras como laminación cruzada, contactos inferiores erosivos, calcos de carga y horizontes con bioclastos. Por otra parte, las lodolitas poseen un color gris oscuro, conformando paquetes hasta de 6 m de espesor intercalados con las capas de arenitas, donde ocasionalmente se identifican icnofósiles (Figura 106B) (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

Con fundamento en las descripciones realizadas por CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018), se identifica que este paquete posee buena resistencia a la meteorización, dado el componente calcáreo que ha cimentado los diferentes niveles, otorgando una mayor dureza a los niveles areníticos, y una disminución en la porosidad y permeabilidad de la litología. Así mismo, se observa poco desarrollo de diaclasamiento, lo que indica poca deformación en las estructuras. Las características observadas permiten inferir baja plasticidad y friabilidad en la roca, que puede llegar a aumentar en los horizontes con mayor abundancia de material tamaño lodo. Finalmente, no se observa formación de minerales secundarios en la roca, lo cual puede indicar un grado bajo de alteración en estos niveles superiores de la unidad.



Figura 106. Afloramiento del paquete superior de la Formación Pavo Inferior. A. Capas tabulares gruesas de arenitas cementadas con material calcáreo. B. Presencia de icnofósiles en las bases de las capas de la unidad. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

6.2.3 Formación Pavo Superior (Ngps)

Autor(es): Fue nombrada por un grupo de geólogos de la Sinú Oil Company (Oppenheim, 1957) y como Arenas del Pavo por Haffer (1967) en González (2001); es considerada por INGEOMINAS & IGAC (2005) como la Formación Pavo.

Litología: Se compone de lutitas principalmente (70-80%) con presencia de niveles arenosos basales (20-30%). Los niveles finogranulares son varicoloreados, de aspecto macizo, con abundancia de materia carbonosa, en los que ocasionalmente se observan lentes de carbón entre 1 y 2,2 m de espesor. Por su parte, las arenitas se encuentran intercaladas en niveles de tonos pardos y amarillos, cuyo componente principal son fragmentos de cuarzo de grano fino, subangular o subredondeado, bien seleccionado, poco poroso o permeable, y con cementación silíceá local. Otros componentes que se observan en estas capas

son chert negro, restos de plantas e intraclastos de lutitas. En algunas zonas se presentan bioclastos de ostras y madrigueras verticales y tubiformes (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Espesor: Con base en las observaciones de INGEOMINAS & GEOTEC (2003), la Formación Pavo Superior puede tener un rango de espesor entre los 550 y 1500 m.

Contactos: En algunas zonas del área el contacto inferior es fallado, en el cual se observa un cabalgamiento parcial de la Unidad Pavo Inferior sobre la Unidad Pavo Superior (INGEOMINAS; IGAC, 2005). Por otra parte, el contacto superior corresponde a una inconformidad de la Formación Corpa sobre las litologías de toda la Unidad Pavo (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Edad y correlación: De acuerdo con Haffer (1967), la unidad pertenece al Mioceno inferior a medio. Por otra parte, INGEOMINAS & GEOTEC (2003) identifican un rango de edad entre Mioceno temprano hasta Plioceno inferior, puntualizando que las edades más antiguas se obtienen en la parte central de la unidad y las más recientes hacia el oeste.

De acuerdo con su registro de facies, el ambiente de formación refleja un ambiente deltaico progradante, donde se observan canales tributarios, zonas externas cenagosas y de marismas (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

En el municipio de Apartadó la Formación Pavo Superior se encuentra hacia el centro del área de estudio, con litologías donde predominan las granulometrías de tamaño fino y una tendencia decreciente de base a techo. CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) diferencian cuatro paquetes principales al interior de la unidad, no obstante, para el área de interés se identificó la presencia de los dos paquetes inferiores de la formación, por lo cual solo se tendrá en cuenta la descripción de dichos niveles para el presente estudio.

De acuerdo con CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018), se denomina "Pavo Superior 1" a la subunidad más basal de la Formación Pavo Superior, la cual es la más competente puesto que consta de horizontes de arenitas de tamaño fino a muy fino, de tonos pardos amarillentos y rojizos, en capas medias planas y tabulares, con contactos netos y cemento calcáreo; estas capas se encuentran intercaladas con lodolitas de tonos gris oscuro en paquetes de espesores más delgados (Figura 107).

Con base en la descripción anterior y en las observaciones litológicas realizadas por CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018), se observa que las rocas de este paquete no poseen porosidad ni permeabilidad destacada, gracias al proceso de cementación de la roca, sumado a ausencia de plasticidad dados los componentes que la conforman. Adicionalmente, el paquete basal de la formación no posee un grado importante de deformación; aunque la secuencia en el punto de observación se encuentra basculada, se denota el desarrollo de diaclasamiento leve en algunos niveles más frágiles. Finalmente, se observa que la roca posee desarrollo mínimo de minerales de alteración, presentando solamente algunos parches de oxidación incipiente.



Figura 107. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Pavo Superior. Secuencia de arenitas plano paralelas y tabulares, basculada con poco diaclasamiento. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

El siguiente paquete de la formación corresponde a la subunidad denominada por CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) como "Pavo superior 2", la cual consta de bancos potentes de lodolitas que se intercalan con arenitas en una proporción 60/40; las lodolitas se encuentran en paquetes hasta de 30 m de espesor, en capas plano-paralelas, de tonos grises oscuros, levemente arenosas, con algunos contactos erosivos con las arenitas e icnofósiles. Por su parte las arenitas se encuentran en capas con espesores variables, de composición sublítica, grano fino a muy fino, colores pardos de tonos amarillos o grises y con alta dureza debido a la cementación calcárea; también presentan esporádicas láminas continuas de materia orgánica (Figura 108) (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

Teniendo como base las observaciones de los autores mencionados, se infiere que este paquete cuenta con un alto nivel de friabilidad, y posible plasticidad, dadas sus características litológicas. En contraste, se encuentra que la unidad posee deformación leve, dada la poca presencia de diaclasas, pero si una posición basculada de la secuencia, posiblemente los niveles areníticos poseen un grado de diaclasamiento y deformación mayor que el resto del paquete, dado su proceso de cementación y fragilidad resultante. Con referencia a la alteración, no se observa desarrollo de minerales con este origen.



Figura 108. Afloramiento del segundo paquete de la Formación Pavo Superior. Secuencia de lodolitas grises intercaladas con arenitas sublíticas con cementación calcárea. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

El tercer segmento observado en el área de interés es el denominado “Pavo superior 3”, de acuerdo con las descripciones de CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018). Este paquete consta de arenitas en capas muy gruesas, plano paralelas tabulares, de color pardo grisáceo, con tamaño de grano fino a medio, bien cementadas, y zonas con ondulitas unidireccionales. Se encuentran intercaladas con paquetes de capas gruesas de lodolitas oscuras bien cementadas (Figura 109).

Con base en las observaciones de los autores mencionados se infiere que este segmento de la unidad posee una friabilidad baja o muy baja como resultado de la cementación, lo cual también disminuye su porosidad y permeabilidad. Dadas sus características también se infiere un nivel de plasticidad bajo y una tendencia a la deformación frágil, donde las capas presentan basculamiento, pero zonas escasas de plegamiento. Los niveles de lodolitas posiblemente poseen una mayor tendencia a desarrollar micropliegues y facilidad para la formación de suelos residuales.



Figura 109. Afloramiento del tercer paquete de la Formación Pavo Superior. Secuencia de arenitas grises y lodolitas oscuras cementadas. Fuente: CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018)

6.2.4 Formación Floresanto (N1fla)

Autor(es): Fue nombrada por un grupo de geólogos de la Sinú Oil Company (Oppenheim, 1957) y como Arenas del Pavo por Haffer (1967) en González (2001); es considerada por INGEOMINAS & IGAC (2005) como la Formación Pavo.

Litología: Se compone de capas gruesas de areniscas líticas de color grisáceo y de grano fino a medio, localmente con conglomerados y areniscas conglomeráticas, donde los clastos se componen de cuarzo, chert negro, fragmentos de lutitas, rocas volcánicas, restos vegetales y material carbonoso, los cuales se encuentran embebidos en un cemento calcáreo o una matriz arcillosa; esta parte de la unidad correspondería a la Formación Pavo Inferior (INGEOMINAS; IGAC, 2005). En la parte superior la formación está constituida por lutitas con frecuentes niveles arenosos en la parte inferior. Se observa también presencia de yeso y jarosita en las fracturas y los planos de estratificación. Las lutitas son abigarradas, de aspecto macizo y con abundante materia carbonosa, en contraste los niveles arenosos son de tono pardo amarillento, de grano fino, con componentes como cuarzo, chert negro, restos de plantas y fragmentos de carbón; esta sección de la unidad correspondería a la Formación Pavo Superior (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Espesor: Haffer (1967) en González (2001) reporta un espesor de aproximadamente 2600 metros, que hacia el norte puede alcanzar los 4000 m en el río Turbo (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Contactos: En algunas zonas el contacto es normal hacia la base con la Formación Maralú y hacia el techo con la Formación Pajuil, sin embargo se observa también en algunas zonas del área que el contacto inferior es fallado, cabalgando parcialmente la Unidad Pavo Inferior sobre la Unidad Pavo Superior (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Edad y correlación: Se reporta una edad de Mioceno inferior a medio (Haffer, 1967), de acuerdo con INGEOMINAS & IGAC (2005), datación que es concordante con los estudios palinológicos reportados por INGEOMINAS & GEOTEC (2003). Como se mencionó previamente, la Formación Floresanto es correlacionable con la Formación Pavo, pero otros autores señalan una relación parcial con la Formación Pavo Inferior (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Con base en la cartografía oficial del SGC (INGEOMINAS; IGAC, 2005), la Formación Floresanto aflora en el área al suroccidente del municipio de Apartadó, sin embargo, la cartografía actualizada propone que dicha unidad se correlaciona parcialmente con la Formación Pavo Inferior, por lo cual para el presente documento, la zona donde aflora la Formación Floresanto se representará como concerniente a las litologías previamente descritas de formación a la cual se correlaciona.

6.2.5 Unidad Arenas Monas (Ngam)

Autor(es): De acuerdo con la denominación de Haffer (1967), la unidad Arenas Monas es propuesta como un miembro de la Formación Corpa, junto con el miembro Morrocoy - El Pantano (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Litología: Esta unidad se compone de una secuencia de carácter grano decreciente, que van desde conglomerados arenosos en la base hasta arenitas conglomeráticas, arenitas y lutitas hacia el techo. Los conglomerados arenosos presentan guijos de hasta 6 cm embebidos en una matriz de arenita de grano medio a grueso, y están compuestos esencialmente de cuarzo, fragmentos líticos y chert negro. Las arenitas conglomeráticas y arenitas son de grano fino a grueso y contienen guijos pequeños (hasta 1 cm), y tienen una composición similar al de los conglomerados, con contenido de moscovita e intraclastos de arcilla. Las lutitas son blandas, macizas, en sectores propiamente limolitas, de composición calcárea y micácea (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Espesor: INGEOMINAS & GEOTEC (2003) reportan un espesor aproximado de 900 metros, con un aumento a 1300 m en la quebrada La Arenosa.

Contactos: Los contactos no se observan directamente, sin embargo, se deduce un contacto inferior de tipo inconforme con la unidad Morrocoy - El Pantano y un contacto de la misma naturaleza con los depósitos cuaternarios (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Edad y correlación: Con base en el análisis de foraminíferos, la edad de la unidad se determina entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003). Por su carácter litológico y distribución, posiblemente corresponde al resultado de actividad tectónica en el área, donde tuvieron lugar procesos de sedimentación en corrientes de alta energía al principio de cada evento, que finalizan con materiales finos, propios de zonas interdistributarias. La correlación de esta unidad no es clara, puesto que INGEOMINAS & GEOTEC (2003) proponen una equivalencia estratigráfica parcial con la Formación Corpa en algunos niveles, no obstante, señalan que la Unidad Arenas Monas infrayace a tal formación por lo que no es posible determinar una correlación directa. Por otro lado, INGEOMINAS & IGAC (2005) describen a la unidad como la sección superior de la Formación Corpa y la correlacionan con la Formación Quibdó en la cuenca del Atrato y con la parte superior de las formaciones Cerrito, Zambrano y Tubará, en los anticlinales de San Jerónimo y San Jacinto, al noreste de la zona de estudio.

La Unidad Arenas Monas puede aflorar en la zona suroccidental del área de estudio, no obstante, dada su potencial correlación parcial con la Formación Corpa, es probable que no llegue a distinguirse de manera clara. Por otra parte, las observaciones realizadas por CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) para esta unidad no se encuentran relacionadas a zonas dentro del municipio de Apartadó, sin embargo serán tenidas en cuenta dada la continuidad lateral de las formaciones en esta región y como registro de las características que podrían llegar a observarse en algún punto del área de análisis.

Su litología consta de conglomerados y arenitas de tamaño grueso; los niveles conglomeráticos son oligomíticos, con guijos redondeados subesféricos en una matriz de arena media y gruesa. Por su parte, las capas de arenita son delgadas a medias, tabulares y planas, con fracciones ocasionales de tipo lodo, pero es común que sean conglomeráticas. Las estructuras que se pueden observar en la Unidad Arenas Monas son de alta energía como laminación convoluta, calcos de carga y estratificación cruzada. En algunas zonas se observa presencia de paleocanales y secuencias sedimentológicas que indican divagación los ríos de mediana a alta energía (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

Con fundamento en las descripciones de los autores previamente mencionados, se determina que la unidad posee gran facilidad friabilidad en algunas zonas, así como un grado de fragilidad intermedio dada la distribución de sus componentes. Es posible también establecer que la unidad presenta amplio desarrollo de suelos residuales de granulometría gruesa, tendiendo en cuenta la distribución de los clastos en la roca, que a su vez sugiere una presencia importante de porosidad y permeabilidad, y desarrollo de minerales arcillosos de origen supérgeno.

6.2.6 Formación Corpa (N2Q1co)

Autor(es): Esta unidad fue nombrada por Haffer (1967) a las capas sedimentarias que afloran en el río Corpa, al noroccidente de Montería (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Litología: Está constituida por lodolitas y arcillolitas de color crema a gris, meteorizadas y pobremente estratificadas. De acuerdo con INGEOMINAS & IGAC (2005), la formación se subdivide en dos unidades: una basal denominada como Morrocay-El Pantano y una superior conocida como Arenas Monas. La unidad inferior se compone de capas de arenitas líticas, con gradaciones laterales y verticales a lutitas, limonitas y conglomerados arenosos fosilíferos. Las capas poseen geometrías onduladas lenticulares, con estratificación gradada normal y cruzada en artesa. La unidad superior consiste en una secuencia rítmica granodrecreciente que incluye a la base conglomerados arenosos de guijos que varían a arenitas conglomeráticas, arenitas y lutitas al techo, donde los clastos se encuentran cementados por material calcáreo y constan de fragmentos de cuarzo, líticos y chert negro (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Espesor: Haffer (1967) estima un espesor aproximado de 2000 y 4000 metros (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Contactos: El contacto inferior de la Formación Corpa es inconforme al sur del Urabá, en los ríos Chigorodó y León, con la Formación Floresanto (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003), pero es normal en la parte central de la cuenca (ríos Apartado y Grande). Por otra parte, el contacto superior suele no presentarse al encontrar la unidad en superficie, o infrayaciendo depósitos recientes.

Edad y correlación: Se le asigna una edad relativa entre el Mioceno Superior y el Plioceno, de acuerdo a su posición estratigráfica. De acuerdo con sus características litológicas, su ambiente de formación corresponde a abanicos aluviales que se originaron por un rápido levantamiento en el sur, posiblemente relacionado a importantes eventos tectónicos del Plioceno (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

Con respecto a su correlación, la Formación Corpa puede relacionarse a la Formación Quibdó en la cuenca

del río Atrato. Por otra parte, como fue mencionado previamente, la correlación con la Unidad Arenas Monas no es del todo clara, puesto que INGEOMINAS & GEOTEC (2003) establecen una diferencia estratigráfica entre la Unidad Arenas Monas, y dividen a la Formación Corpa como las Unidades Cachaco (Corpa Inferior) y Unidad Loma del Muerto (Corpa Superior), no obstante estas últimas dos no poseen información palinológica detallada que permita determinar claramente su edad, y solo se les asigna un rango de sedimentación durante el Plioceno, con base en su posición estratigráfica (INGEOMINAS; GEOTEC, 2003).

La Formación Corpa aflora predominantemente en un cinturón con dirección aproximada N-S en la zona central del municipio; esta fue descrita por los autores INGEOMINAS & GEOTEC (2003) e INGEOMINAS & IGAC (2005) como una unidad que se conforma de dos subunidades con características litológicas contrastantes, lo que permite su diferenciación; sin embargo, CORPOURABA & ECOFOREST (2019) identifican que la unidad se puede subdividir en tres segmentos cartográficamente diferenciables, por lo cual esta será la denominación que se utilizará como base para la descripción litológica de la formación en cuestión.

El segmento inferior de la Formación Corpa en la zona de estudio, según la diferenciación mencionada anteriormente, presenta capas medias de arenitas de colores amarillo y gris, con granulometría muy fina, intercaladas con lodolitas negras en capas delgadas a media, donde algunos de estos niveles poseen laminación evidente (Figura 110).

Con base las observaciones realizadas por CORPOURABA & ECOFOREST (2019), se infiere que esta subunidad puede presentar cierta facilidad a la friabilidad, dada su poca o nula cimentación; por su parte, con base en su alto contenido de partículas tamaños arena se sugiere bajo nivel de plasticidad, pero si facilidad para el diaclasamiento, sumado a una posible existencia de porosidad y permeabilidad importante, natural en este tipo de roca. Con respecto a la alteración, no se identifica abundancia de minerales de alteración, solamente algunos parches de óxidos generados por actividad supérgena.



Figura 110. Afloramiento del paquete inferior de la Formación Corpa, donde se observan niveles de arenitas de tono grises con parches de oxidación: Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)

La parte media de la Formación Corpa corresponde a arenitas polimígticas, de grano muy fino que varía hasta grano medio, con clastos subangulares, dispuestas en capas media a gruesas, intercaladas con arenitas conglomeráticas de tamaño granulo a guijo, de un origen también diverso (Figura 111A), y presencia de algunas lodolitas grises compactas, en capas muy finas (Figura 111B) (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019).

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas por los autores antes citados, se observa que la roca tiende a desarrollar suelos residuales con facilidad, dado el contraste granulométrico con el que cuenta la formación, sumado a la falta de cementación. Por otro lado, se infiere bajo grado de plasticidad como resultado de la abundancia de material grueso sobre material tipo lodo; asociado con el contraste de tamaño de grano, es posible considerar que esta parte de la Formación Corpa posea un alto índice de porosidad y permeabilidad, aumentado por el posible diaclasamiento en la roca. Finalmente y como se observa en la Figura 111, la roca posee un alto nivel de intemperismo, observado gracias a la abundancia de minerales de origen supérgeno, como óxidos y arcillas, que se han desarrollado a lo largo de su litología.



Figura 111. Afloramiento del paquete intermedio de la Formación Corpa. A. Arenitas conglomeráticas con clastos tamaño gránulo, muy deleznales y con presencia de minerales de oxidación. B. Niveles de lodolitas grises muy diaclasadas y con abundante presencia de alteración supérgena a minerales de arcilla. Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)

CORPOURABA & ECOFOREST (2019) describen el tercer segmento de la Formación Corpa como una sucesión de lodolitas de color gris azulado (Figura 113A), que reposa sobre un nivel de conglomerados polimígticos con clastos de tamaño guijo, y con un nivel de limolitas de tonos amarillentos hacia el tope. Este paquete también suele poseer un límite superior correspondiente a un contacto erosivo con los depósitos cuaternarios (Figura 113B).



Figura 112. Afloramiento Formación Corpa, quebrada el Muerto

Con fundamento en las descripciones realizadas por los autores mencionados, el paquete superior de la Formación Corpa posee tendencia a la friabilidad, basada en su poco grado de compactación; así mismo se infiere una porosidad y permeabilidad baja a media, dada su granulometría fina, y una plasticidad intermedia con base en estos mismos componentes de tamaño muy fino. Se observa que la litología presente en este segmento posee desarrollo de diaclasamiento, pero baja deformación por actividad tectónica, puesto que se identifica la orientación horizontal original de la estratificación. Finalmente, se encuentra que la actividad meteórica ha tenido efectos importantes en la roca, puesto que se encuentra amplio desarrollo de óxidos y minerales de arcilla al interior y en los contactos de las capas (Figura 113).



Figura 113. Afloramiento del paquete superior de la Formación Corpa. A. Lodolitas de color gris azulado con intenso diaclasamiento y meteorización. B. Contacto erosivo entre depósitos cuaternarios y lodolitas gris azulosas, PS (Paquete superior). Fuente: CORPOURABA & ECOFOREST (2019)

6.2.7 Depósitos de abanico aluvial (Qaa)

Litología: Conos de origen complejo, aluviales a torrenciales, constituidos por gravas y gravas arenosas sueltas con capas delgadas de arena. Las partes proximales carecen de estratificación interna, sin embargo, distalmente presentan un decrecimiento hacia arriba en el tamaño de grano y ocasionalmente exhiben gravas arenosas bien seleccionadas de estratificación cruzada que rellenan canales antiguos. Su edad es principalmente del Holoceno, aunque algunos pueden ser ligeramente más antiguos (INGEOMINAS; IGAC, 2005). Esta descripción también contempla depósitos como conos de deyección o conos aluviales (Qcd), los cuales poseen una génesis y morfología similar pero una dimensión más reducida.

6.2.8 Depósitos fluvio-lacustres (Qfl)

Litología: Representan los depósitos de materiales acumulados por la acción de la dinámica fluvial y las acumulaciones netamente lacustres, desarrolladas en cercanías de los principales ríos de la zona. Los depósitos son clásticos, sueltos, compuestos por partículas arcillosas y limosas bien seleccionadas. Mineralógicamente predominan las micas y el cuarzo muy fino, sedimentados en las áreas de desborde de los ríos, durante las fases crecientes (Servicio Geológico Colombiano, 2013).

6.2.9 Depósitos Fluvio-torrenciales (Qft)

Litología: Son producto de eventos excepcionales de avenidas torrenciales, los cuales se generan por causas meteorológicas o represamiento y posterior liberación de las aguas de ríos provenientes de las zonas montañosas. La gran cantidad de energía acumulada en estos eventos genera el arrastre de materiales superficiales de las laderas de los valles intramontanos, los cuales al abandonar los cauces estrechos y encontrar zonas de topografía más plana, se desplazan, formando abanicos de piedemonte (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

Generalmente están constituidos por depósitos no consolidados compuestos de material clástico de granulometría gruesa, que incluye bloques, guijos, guijarros y gravas con poca redondez, polimícticos, mal seleccionados, embebidos en una matriz areno-conglomerática. Su único grado de selección se observa en las granulometrías más gruesas en las zonas proximales y más fina en áreas distales, con ausencia de estructuras sedimentarias (INGEOMINAS; IGAC, 2005).

6.2.10 Depósitos de barras (Qabp, Qbm, Qbla, Qbp, Qbt)

Litología: Son depósitos de los canales actuales que representan el aporte detrítico proveniente tanto de la erosión de suelos, como del material desprendido de laderas de los valles estrechos. Estos depósitos carecen de litificación y son de carácter detrítico, polimícticos, mal seleccionados, con clastos de formas redondeadas y aplanadas. Su granulometría es variable, con predominio de tamaños gravas y arenas y se ubican en zonas donde el flujo permite una mayor precipitación de partículas, gracias a la merma en la velocidad del cauce. Entre estos depósitos de diferencian aquellos derivados de barras puntuales (Qabp), barras marginales (Qbm), barras longitudinales (Qbla), barras puntuales (Qbp) y barras transversales (Qbt); los cuales se distinguen dependiendo de su ubicación y disposición al interior o al margen de los cauces.

6.2.11 Depósitos de cauce activo (Qca)

Litología: Los depósitos de los canales actuales representan el aporte detrítico proveniente tanto de la erosión de suelos, como del material desprendido de laderas de los valles estrechos. Estos depósitos carecen de litificación y son de carácter detrítico, polimícticos, mal seleccionados, con clastos de formas redondeadas y aplanadas. Su granulometría es variable, con predominio de tamaños gravas y arenas en los diques y arcillas-limos en los bajos. Son comunes las estratificaciones lenticulares, gradadas y cruzadas. Su espesor tiende a aumentar debido a la depositación actual a lo largo de canales de flujo y zonas aledañas sometidas a inundaciones periódicas (INGEOMINAS; IGAC, 2005).



Figura 114. Depósitos de cauce activo del río Apartadó

6.2.12 Depósitos de llanura de inundación (Qal, Q2lli)

Litología: Los depósitos de llanuras de inundación son unidades de desborde que se han formado durante prolongados regímenes pluviométricos, que permiten la saturación de los ríos y la ruptura de sus cauces,

inundando las zonas laterales más alejadas. Presentan topografías prácticamente planas, al mismo nivel de depósitos actuales de los ríos, con extensiones simétricas a ambos costados de los cauces. La composición del depósito es mayormente fina, con tamaños de partícula en el rango limo-arcilla (INGEOMINAS, 2010). Esta categoría también incluye los depósitos de llanura de inundación recientes (Q2lli), cuyas características y origen son idénticos a los depósitos de llanura de inundación activa, con los primeros generados en eventos más antiguos.

6.2.13 Depósitos de terrazas aluviales (Qt1, Qt2)

Litología: Se componen de material detrítico, de carácter polimíctico, suelto a compacto, mal seleccionado, con granulometría variable y predominio de la fracción gruesa, embebida en una matriz de arena, limo y arcilla. Están asociados a las antiguas planicies aluviales de los ríos de la región, en particular en las zonas de transición entre las áreas montañosas y el piedemonte. Suelen presentar estratificación gradada, cruzada y lenticular con espesores mayores a los 30 m (INGEOMINAS; IGAC, 2005). Las diferencias entre terrazas aluviales bajas (Qt1) y altas (Qt2) radican en su altura topográfica y su antigüedad, donde las bajas son recientes y las altas fueron originadas previamente.

6.2.14 Depósitos coluviales (Qc)

Litología: Depósitos de vertiente que se localizan en zonas donde existen cambios de pendiente, sin presencia de drenajes que los distribuyan, lo que provoca una acumulación por efecto de gravedad. Están conformados por clastos angulares de tamaño variable entre guijos y bloques, mal clasificados, ocasionalmente embebidos por una matriz arcillosa, sin estratificación (Servicio Geológico Colombiano, 2015)



Figura 115. Depósitos coluviales quebrada el Muerto

6.2.15 Depósitos de flujo de lodo (Qfd)

Litología: Corresponden a conos de lodo de hasta 30 m de altura que emergen de manera aislada, principalmente a lo largo de fallas. Los volcanes de lodo se presentan con una tendencia general N-NE y su actividad constante ha generado depósitos de espesores importantes, los cuales en muchas zonas no permiten observar la litología adyacente. Su origen se asocia a la acreción de corteza oceánica en márgenes subductivos de bajo ángulo (ANH, 2009). Genéticamente, Duque-Caro (1984) proponen que el peso gravimétrico de sedimentos turbidíticos sobre sedimentos menos densos de tipo pelágicos y hemipelágicos generó el diapirismo a lo largo de fosas marginales durante la acreción de terrenos. Si bien son descritos por ANH y SGC, no fueron encontrados dichos depósitos en campo.

Con base en la información expuesta anteriormente y la cartografía geológica realizada durante la construcción del presente estudio, se elaboraron dos perfiles geológicos con el fin de ilustrar de manera detallada, la distribución de las unidades geológicas mencionadas y las principales estructuras, tanto en la zona norte como en el sur del municipio de Apartadó. En la Figura 116 se observa la localización de los perfiles geológicos construidos para el área de estudio, el corte A-A' corresponde a la parte centro del municipio y el corte B-B' se encuentra en la zona norte.

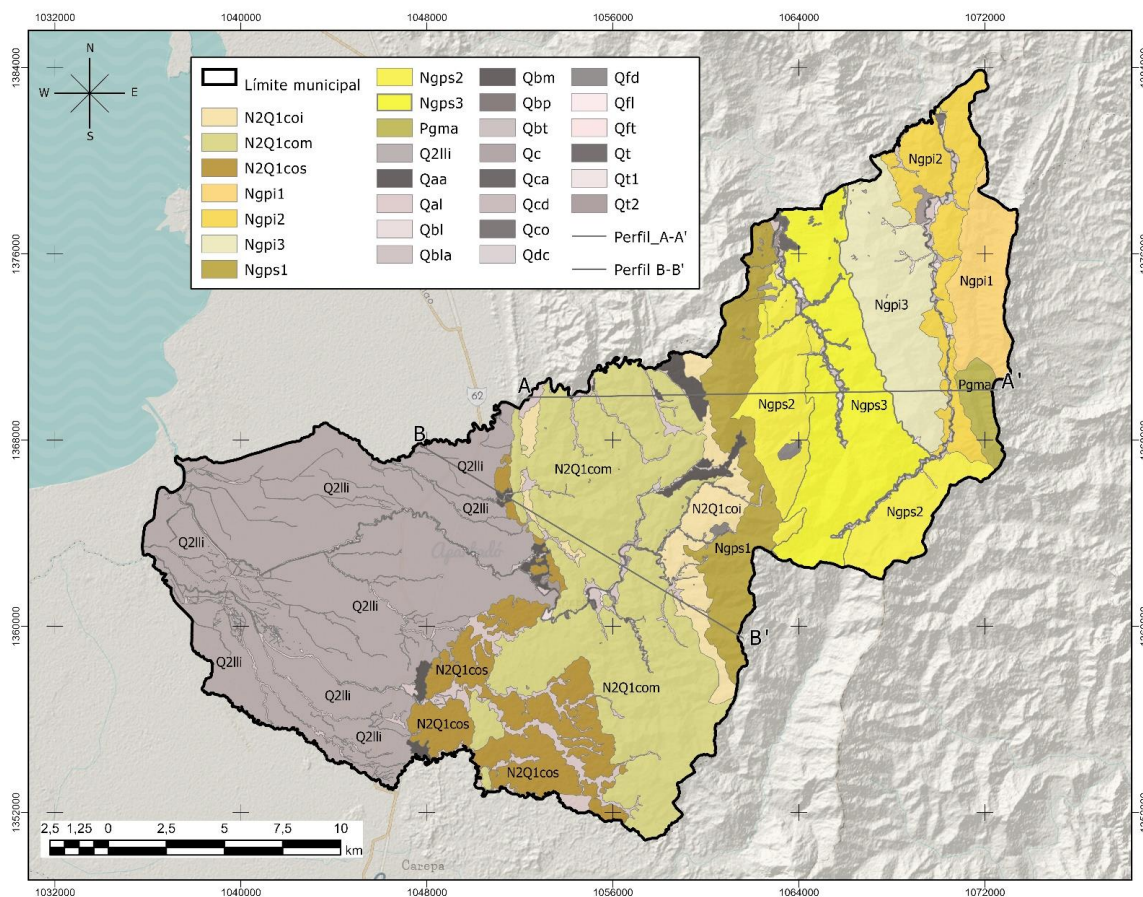


Figura 116. Ubicación cortes estructurales

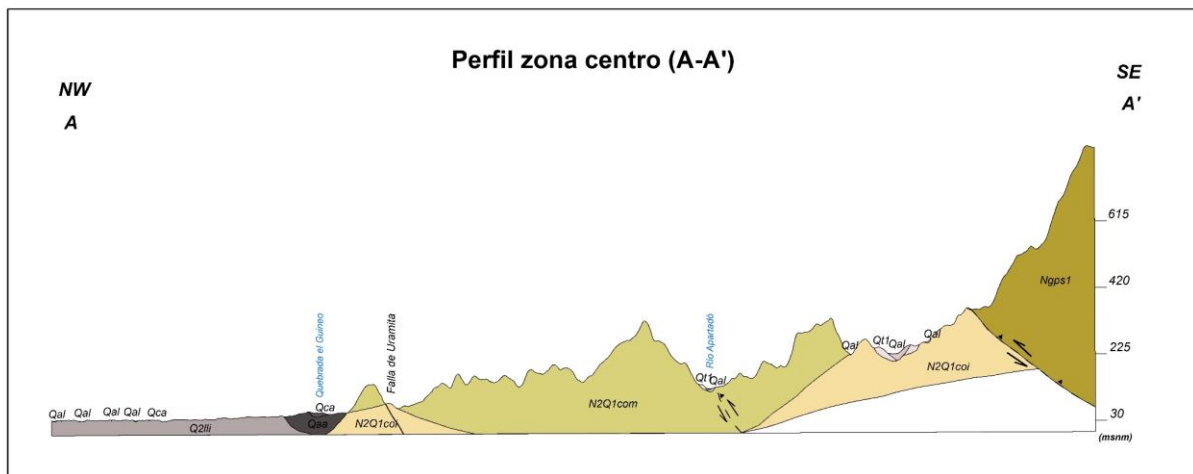


Figura 117. Perfil A-A'

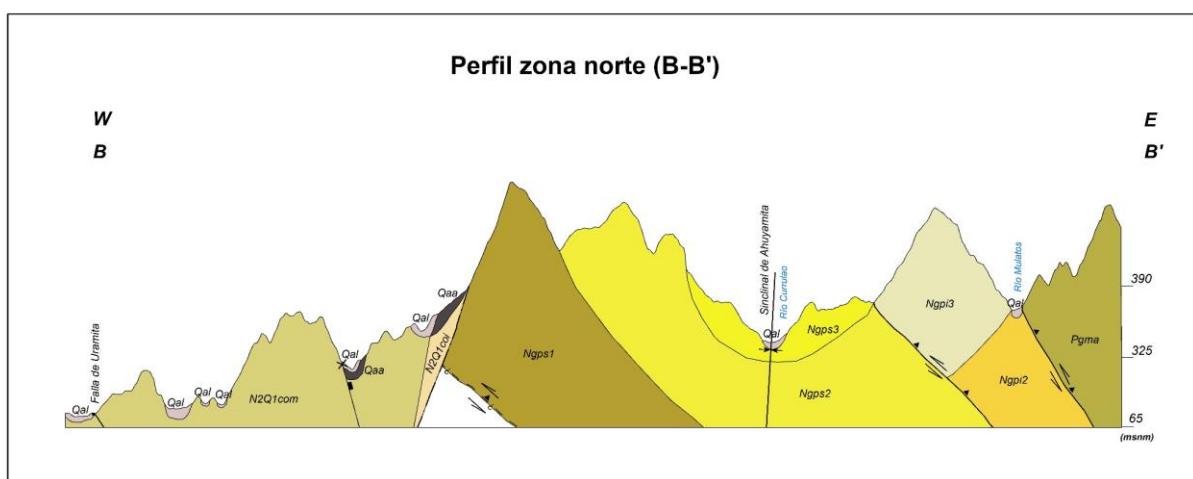


Figura 118. Perfil B-B'

6.3 Geología estructural

Como se ha mencionado previamente, el régimen tectónico presente en el municipio de Apartadó obedece a la interacción entre la Placa Sudamericana y la Placa Caribe, la cual dio origen a la formación de una cuenca de margen de placa, de edad cenozoica, en donde se resaltan dos fajas o estructuras regionales adyacentes a la zona de estudio, correspondientes a el Cinturón Plegado de San Jacinto, acrecionado al margen norte de Colombia en el Paleógeno, y el Cinturón Plegado del Sinú, emplazado en el margen oeste del Cinturón de San Jacinto durante el Neógeno (ANH, 2009).

Para el caso del Cinturón Plegado del Sinú, que es aquel con presencia parcial en la región oriental del área de estudio, las rocas que conforman su estructura afloran principalmente costa afuera y solo la parte sur se observa costa adentro (ANH, 2009). De acuerdo con Duque-Caro (1978), la estructura se considera como una fase posterior de acreción de corteza oceánica que continua en la actualidad y cuyo rasgo más representativo es la presencia de diapirismo y vulcanismo de lodo (ANH, 2009).

[illegible]

Con base en la cartografía oficial del SGC, así como los trabajos realizados por CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) y CORPOURABA & ECOFOREST (2019), se identifica que las estructuras presentes en el municipio de Apartadó poseen dos tendencias estructurales principales. Hacia el sur y centro del área de estudio fueron identificados pliegues y fallas con rumbos cercanos a la orientación N-S, en contraste con la tendencia de rumbo NW-SE (310-350°) observada hacia el norte y noreste del municipio. Sumada a estas dos orientaciones, se encuentra una tercera disposición de estructuras, la cual se presenta con menor extensión hacia el NE del municipio, donde el rumbo de las estructuras es NE-SW, en un rango aproximado de (60-80°).



Entre los pliegues más destacados en la zona de estudio se encuentran el Anticlinal de Chigorodó, el Sinclinal de Chigorodó, el Anticlinal de San José, el Sinclinal de San José y el Sinclinal de la Ahuyamita. El Anticlinal de Chigorodó corresponde a una estructura aparentemente simétrica, con dirección N25°W hacia el sur y N10°E hacia el norte, donde los flancos poseen un buzamiento aproximado entre 35 y 40°; el flanco occidental se encuentra cubierto por sedimentos cuaternarios, donde la morfología tiende a suavizarse (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019). El núcleo del anticlinal lo conforman las rocas de la Formación Arenas Monas, el cual alcanza los 40 km de longitud. Hacia el norte del municipio se presenta la estructura denominada Anticlinal de San José, que conforme a su dirección y características podría corresponder a la extensión del Anticlinal de Chigorodó (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019), cuyo límite norte es la zona de la geoforma que se encuentra al interior del área de estudio, al sur de Apartadó.

Por su parte, el Sinclinal de Chigorodó constituye una estructura paralela a la anteriormente descrita, que se desarrolla hacia el este del anticlinal. La longitud de la estructura es de alrededor de 30 km, con un núcleo conformado por rocas de la Formación Corpa y se encuentra cubierto parcialmente por depósitos cuaternarios (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019). El flanco oriental de la estructura presenta afectación por causa del fallamiento del piedemonte de la Serranía de Abibe. De manera similar al Anticlinal de Chigorodó, hacia el norte de Apartadó tiene lugar la presencia del Sinclinal de Jan José, cuya morfología sugiere la posibilidad de ser la extensión hacia el norte del Sinclinal de Chigorodó (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019); así mismo esta estructura se identifica solamente en el margen sur del municipio objeto del presente documento.

El último pliegue por destacar en el municipio de Apartadó corresponde al Sinclinal de Ahuyamita, este corresponde a una estructura estrecha y alargada en sentido N-S que se presenta al NE del área de estudio, con un cierre emergente cuyo eje posee una flexión en dirección N15°W (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018). El pliegue se encuentra limitado al sur por la Falla de Currulao, que a su vez está acompañada por fallas transversales de corta extensión, donde en conjunto con la falla más extensa, repiten, desplazan e invierten la secuencia de las rocas de la Formación Pavo (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018), la cual constituye el núcleo de la geoforma sinclinal.

Con respecto al fallamiento, en el municipio de Apartadó se cuenta con tres sistemas de fallas o tendencias principales. El más relevante corresponde a las fallas y lineamientos con orientación NW-SE que se presentan predominantemente hacia el centro y noreste del área de estudio; a este sistema pertenecen las estructuras más destacadas en la zona como son la Falla Uramita, la Falla de Apartadó y la Falla Ahuyamita. Con referencia a la Falla Uramita, esta corresponde a una estructura de tipo regional, que constituye la sutura entre el norte suramericano y Centroamérica (Bloque Chocó) (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019) y define el límite occidental del Cinturón Plegado del Sinú (SGC; Universidad Nacional de Colombia, 2015); esta falla posee un rumbo N60°W, buzando hacia al oriente, y se extiende desde la zona cercana al municipio de Ciudad Bolívar en Antioquia hasta el margen oriental del Golfo de Urabá (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019).

La Falla de Apartadó corresponde a una estructura que posee una extensión regional de tipo inverso y bajo ángulo, con un rumbo que varía entre N-S y N30°W, buzando hacia el NE, y truncamiento hacia el norte por causa de fallamiento menor (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019). Por su parte, la Falla Ahuyamita constituye una estructura de cabalgamiento que buza hacia el NE y cuenta con un rumbo ondulante de N10°W. La estructura posee una longitud de 15 km y se encuentra hacia el margen NE del municipio, donde pone en contacto la Formación Pavo Inferior con la Formación Pavo Superior (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

Con referencia al sistema de fallas N-S, las estructuras más destacadas que hacen parte de esta tendencia son la Falla de Currulao Alto, la Falla Quimary, la Falla El Bilete y algunos lineamientos mayores sin

denominación. La Falla Currulao Alto posee un rumbo aproximado N-S y una extensión de 13 km, que junto con varios lineamientos transversales, han afectado la continuidad del Sinclinal de Currulao, al punto que han disectado la geoforma en varias secciones, dando lugar a una situación caótica en cuanto a la continuidad de la secuencia. La Falla de Currulao Alto afecta principalmente a las rocas de la Formación Pavo Superior (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018).

La última tendencia estructural por resaltar consiste en el sistema de fallas NE-SW, el cual posee una menor frecuencia, donde solo se destaca la presencia de la Falla La Fría, la cual se ubica hacia el extremo NE de la zona de estudio, segmentando el Sinclinal de Ahuyamita en un sentido con rumbo aproximado N60°E; la estructura se encuentra afectando predominantemente las rocas de la Formación Pavo Superior (CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao, 2018). La Figura 121 muestra las tres tendencias identificadas en el área de estudio, donde la principal corresponde a la dirección NW-SE (300 a 355°), una subordinada entre 295 y 300° y aquella menos frecuente, en dirección NE-SW.

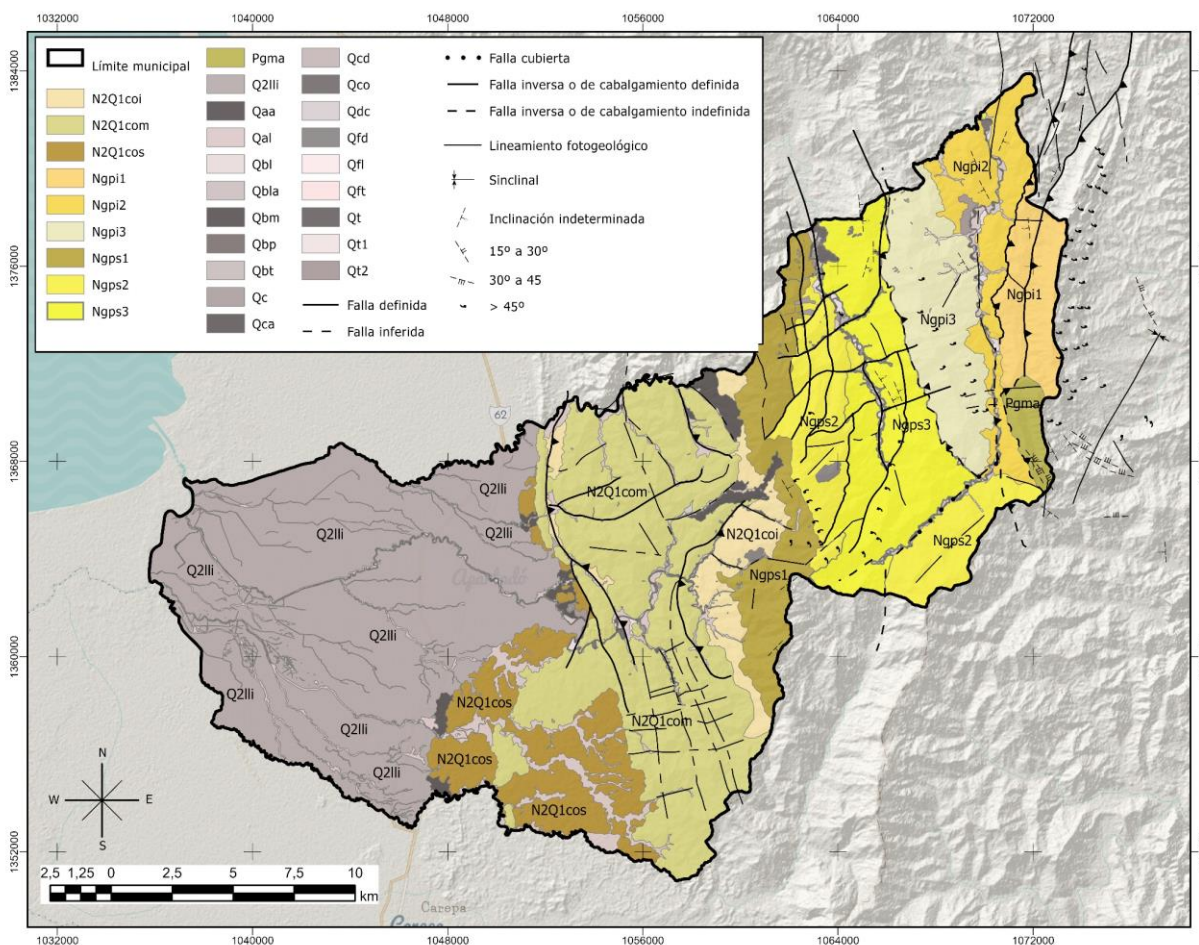


Figura 120. Estructuras geológicas presentes en el municipio

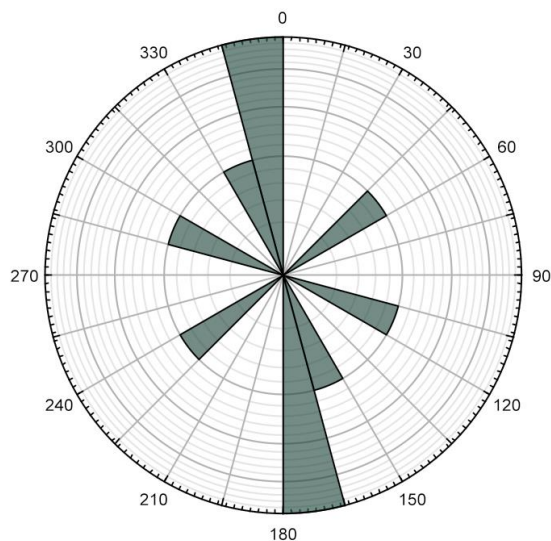


Figura 121. Diagrama de rosas de las tendencias estructurales de fallas y pliegues

En cuanto a las características estructurales de las unidades que afloran en el área de estudio, se observa una tendencia ligeramente destacada con dirección 300 a 315°, sin embargo también se presentan múltiples tendencias en diversas direcciones, lo que evidencia la complejidad estructural que enmarca la región. La Figura 122 presenta la multiplicidad de orientaciones de las capas, cuyos datos fueron recopilados de los trabajos de INGEOMINAS & GEOTEC (2003), INGEOMINAS & IGAC (2005), SGC & GRP (2019), CORPOURABA & UT POMCA Río Turbo Currulao (2018) y CORPOURABA & ECOFOREST (2019).

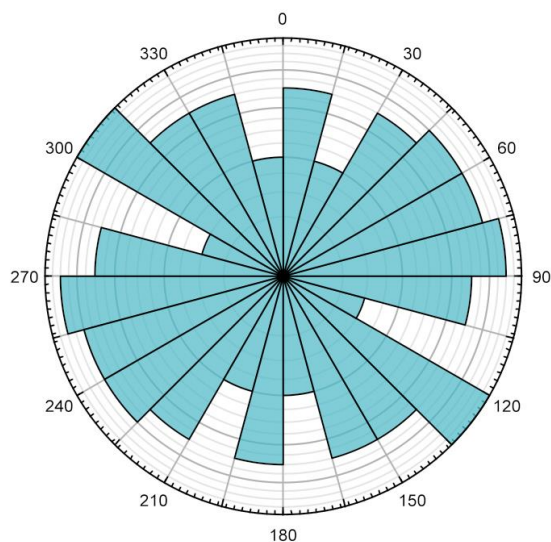


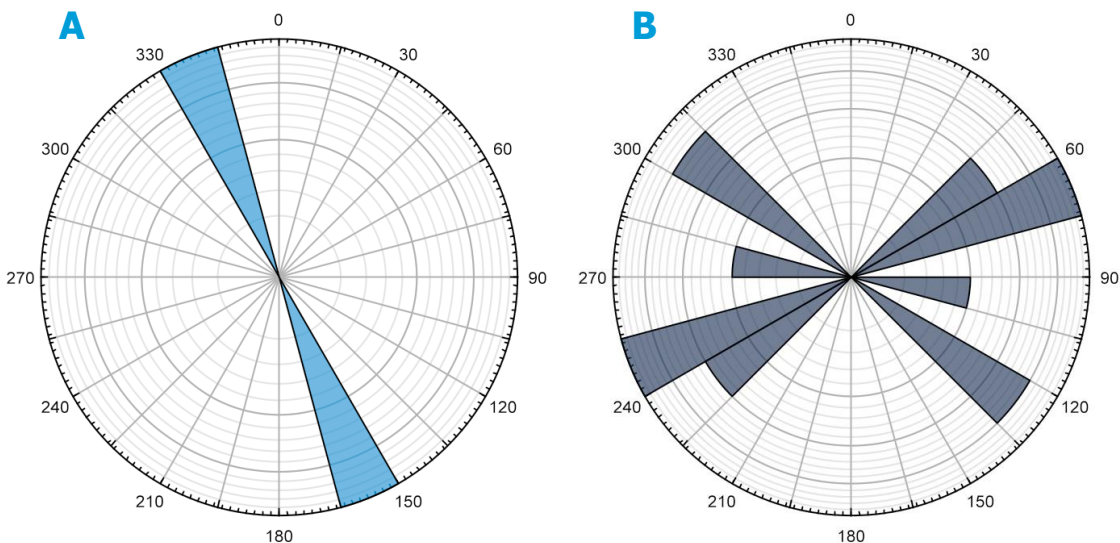
Figura 122. Diagrama de rosas de las tendencias estructurales de las unidades litológicas

Con referencia a las características estructurales de cada una de las unidades que aflora en la zona de estudio (Figura 124), se observa que cada una posee comportamientos distintos dependiendo de sus propiedades composicionales y su respuesta a los esfuerzos. La Figura 123A muestra la tendencia de la Formación Maralú, la cual es la más antigua dentro de las unidades presentes en Apartadó y se observa que su orientación es acorde a la tendencia NW-SE que se destaca en el área. No obstante dada la poca

cantidad de información con que se cuenta, no es posible realizar un análisis más profundo que exponga su respuesta a los esfuerzos.

Respecto a la Formación Pavo Inferior se identifica que posee dos tendencias muy marcadas en la orientación de sus planos; la primera y más destacada corresponde a la orientación NE-SW (45-75°/225-255°) y la segunda con orientación NW-SE (120-135°/300-315°). Estas dos orientaciones muy marcadas pueden asociarse al régimen frágil al que se ven sometidas gran parte de las rocas de esta unidad, dado que la litología más abundante de la Fm. Pavo Inferior son las arenitas de grano fino, algunas de ellas con silicificación en algunos niveles de lodolitas, lo que permite un desarrollo mayor de fracturas y fallas que predominan sobre la deformación (Figura 123B). Un fenómeno similar se observa en la Formación Pavo Superior, que expone dos tendencias también marcadas (NW-SE y NEE-SWW), sin embargo se observa una mayor variabilidad de orientaciones en la segunda tendencia, dado que el rango de rumbos va desde los 60 hasta los 115°, comportamiento que puede deberse a la presencia de mayor proporción de niveles de lodolitas, cuya respuesta a los esfuerzos tiende más a la deformación que al fracturamiento, lo que conlleva a diversidad en la disposición de los planos de estratificación (Figura 123C).

Finalmente, el comportamiento estructural de la Formación Corpa es notablemente heterogéneo, lo cual se observa en la Figura 123D, donde no se destaca ninguna tendencia estructural más que algunas orientaciones E-W. Este comportamiento puede atribuirse al bajo grado de compactación que posee la roca, puesto que constituye la unidad lítica más reciente dentro de la columna estratigráfica en la zona, en la cual es común observar un alto grado de meteorización, desarrollo de parches óxidos y facilidad para disgregarse, lo que facilita el desarrollo de fracturas y aperturas que conllevan a un mayor desarrollo rotación y basculamiento de bloques, como resultado del intercambio de esfuerzos, muy común en la zona.



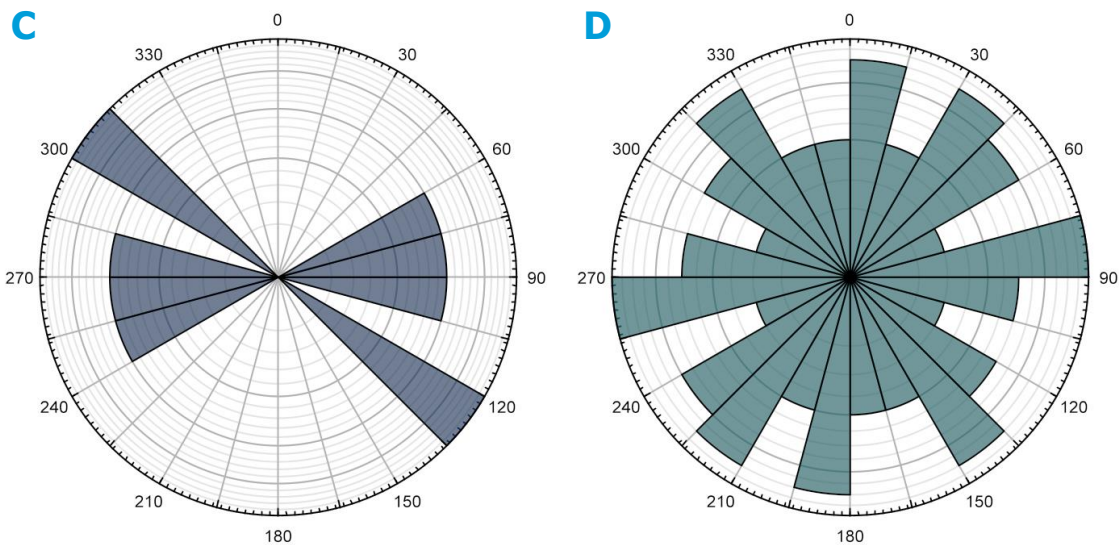


Figura 123. Diagramas de rosas diferenciados para las unidades aflorantes. A Fm. Maralú. B. Fm. Pavo Inferior. C. Fm. Pavo Superior. D. Fm. Corpa

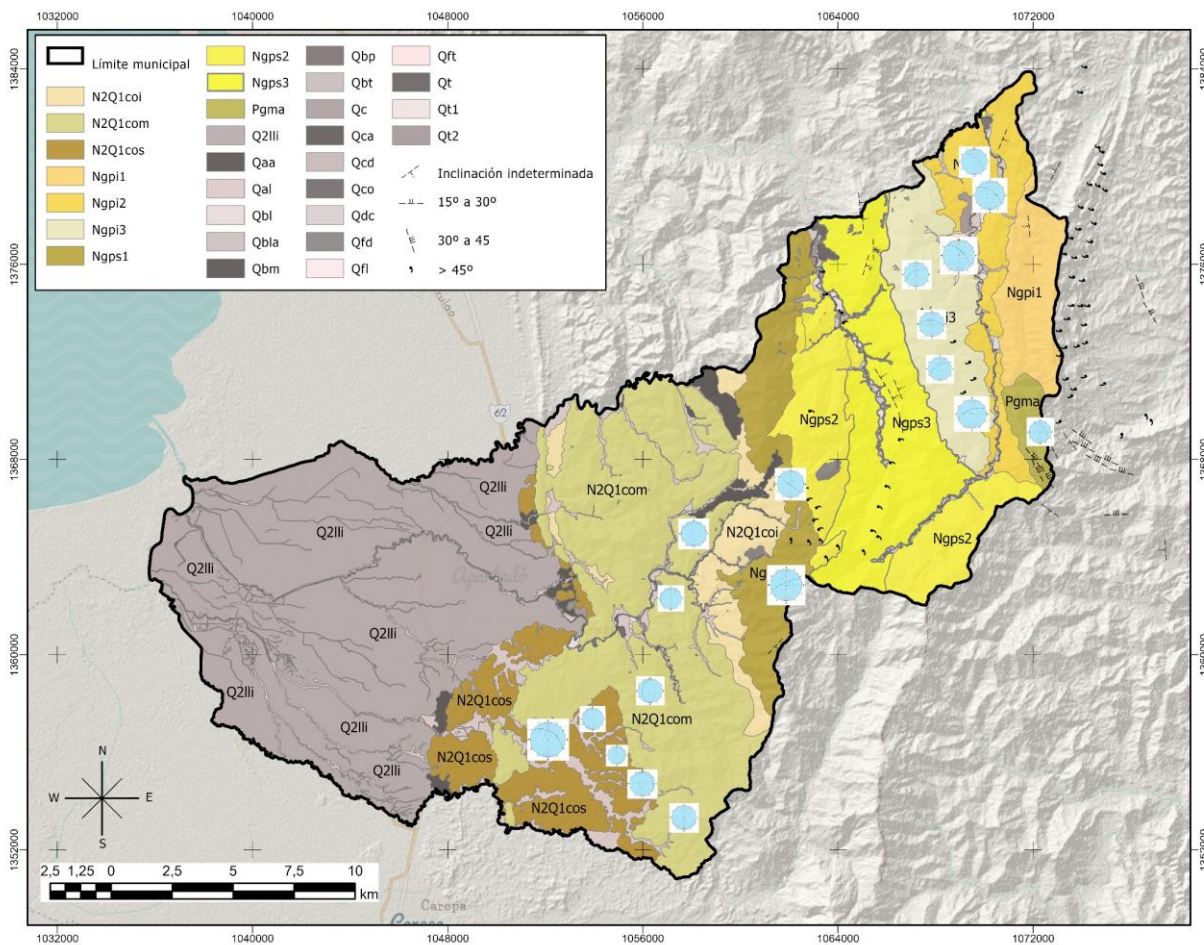


Figura 124. Orientaciones estructurales de las unidades litoestratigráficas

7. Geofísica

La información geofísica es una herramienta que permite la exploración de zonas de gran extensión a un costo menor que las perforaciones (Delgado, et al., 2000), que requiere calibración y complemento con información geotécnica y geológica detallada para la construcción de modelos y la validación de los resultados obtenidos. En términos de estudios de respuesta sísmica, las propiedades de mayor importancia a la hora de describir zonas homogéneas y caracterizar depósitos de suelo son la configuración de las capas de suelo y sus espesores, la densidad, la velocidad de onda P (V_p) y la velocidad de onda S (V_s) (Caielli, et al., 2020), asimismo, se puede adicionar un estudio de resonancia del suelo, con ruido ambiental o con datos provenientes de sismos, por métodos como el H/V que permiten estimar el periodo fundamental de los depósitos (T_n) y atar la información cuantitativa local con la información regional (Albarelo, et al., 2011).

7.1 Metodología

La técnica H/V, o HVSR, fue desarrollada principalmente por Nakamura (1989) y consiste en el registro de microtemores, o ruido ambiental, en las dos componentes horizontales y la componente vertical; con los registros se realiza el cociente entre las componentes horizontales y la vertical en términos de frecuencia a manera de espectros de Fourier (espectro de H/V) y de una manera casi empírica, cuestionada ampliamente por no tener una base teórica robusta, relaciona el espectro de H/V con la función de amplificación de las ondas sísmicas y la resonancia en el sitio de estudio. Con lo anterior, el pico del espectro de H/V, en donde se presenta la máxima amplitud, se relaciona con la frecuencia predominante del sitio de estudio.

Muchos estudios alrededor del mundo han demostrado la estabilidad del método de H/V y su aplicación para la descripción de los depósitos de suelo y su potencial amplificación ante terremotos. Entre estos estudios se encuentran los realizados por Paudyal *et al.* (2012), Amanti *et al.* (2020), Parolai *et al.* (2002), Stanko & Marsukic (2020) y Panzera *et al.* (2019). En Colombia esta técnica se ha utilizado en algunas ciudades, debido a la necesidad de realizar microzonificación sísmica en ciudades capitales o en ciudades de más de 100.000 habitantes en zonas de amenaza media o alta, así que con la confiabilidad que tiene este método se utilizó para explorar los depósitos de la zona de estudio.

Adicional a la técnica H/V para determinar la frecuencia fundamental del suelo, se utilizaron tres diferentes metodologías para determinar el perfil de Vs: i) refracción sísmica (Redpath B. , 1973), ii) SASW (análisis espectral de ondas superficiales) (Heisey, Stokoe, & Meyer, 1982; Stokoe & Nazarian, 1983; Stokoe & Nazarian, 1985; Nazarian & Stokoe, 1984; Nazarian & Stokoe, 1986; Stokoe, John, & Woods, 2004) y iii) la inversión de espectros de H/V (Sánchez-Sesma, 2017; Arai & Tokimatsu, 2004).

Para los métodos i) y ii), así como para métodos como MASW y CSW, típicamente se necesita un arreglo de sensores en un arreglo, típicamente lineal, con un distanciamiento conocido, y una fuente de energía activa al final del tendido, con el fin de analizar los diferentes arribos de las ondas provocadas por la fuente activa entre los diferentes receptores (ver Figura 125).

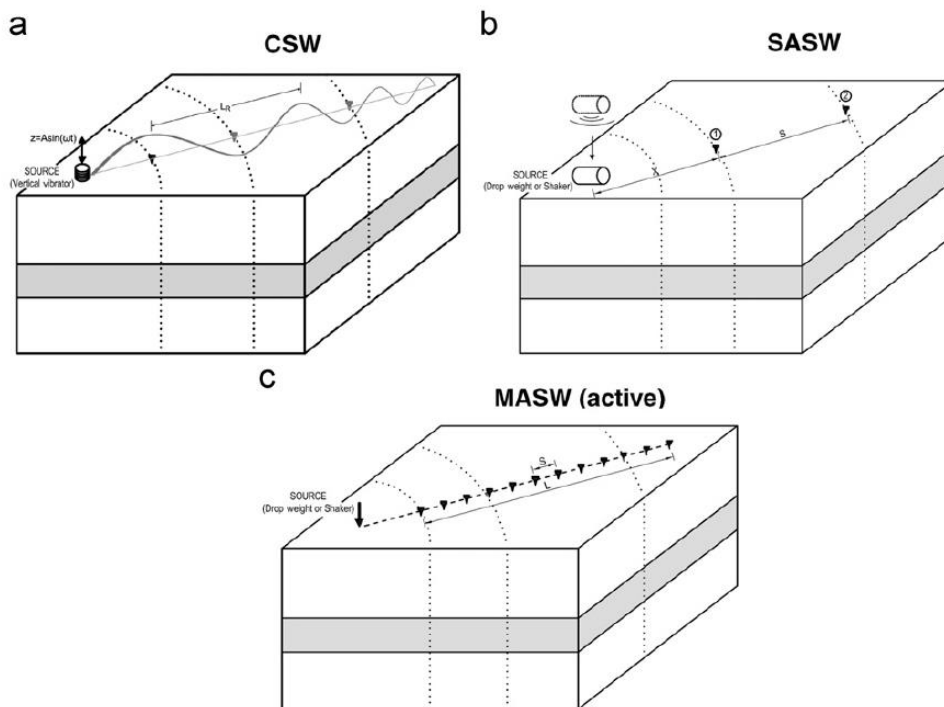


Figura 125. Esquema típico de métodos para la determinación de perfiles de Vs con una fuente activa. Tomado de (Pelekis & Athanasopoulos, 2011)

Para este caso en particular, para los métodos i) y ii) se utilizó únicamente un sensor y un detonador de radio, así que en vez de tener un tendido con x sensores, se utilizó la fuente activa un número x de veces, una vez en cada posición en donde se tendría instalado cada uno de los x sensores de los arreglos tradicionales, generando un efecto similar, reportando los arribos de las ondas generadas por la fuente activa a diferentes distancias. Para el caso del método SASW, se realiza la comparación de la diferencia de fases en los arribos de las ondas de la fuente activa, procesadas en términos de la transformada de Fourier, para determinar la curva de dispersión del subsuelo, y de esa manera un perfil de Vs que se ajuste a la curva obtenida. Por otro lado, la refracción sísmica correlaciona los tiempos de arribo directamente para obtener un modelo simplificado de la estructura del subsuelo en términos de las velocidades de propagación de ondas cortante y longitudinales. Finalmente, para el método iii), la metodología utilizada, permite determinar, a partir de un perfil de suelo semilla (en términos de Vs, Vp y densidades), un perfil de suelo con un espectro H/V teórico cercano al H/V medido en campo utilizando el principio de Occa'm Razor.

7.1.1 Equipo y software utilizados

El equipo utilizado fue un Tromino, de la marca Moho Sciece & Technology. Las especificaciones básicas del equipo se presentan en la Tabla 28, y los canales de registro y entrada se presentan en la Tabla 29.

Tabla 28. Especificaciones generales del equipo Tromino.

Propiedad	Descripción
Rango dinámico de velocímetros	de +-0.5 mm/s a 5 cm/s
Rango dinámico de acelerómetros	Hasta +-2g
Rango de operación	de 0.1 a 1024 Hz

Propiedad	Descripción
GPS	Interno o externo
Tamaño	10 x 14 x 8 cm
Peso	1 kh
Batería	Interna de Litio

Tabla 29. Canales del equipo Tromino.

Tipo de canales	Descripción
Canales de velocidad	3 canales ortogonales
Canales de aceleraciones	3 canales ortogonales
GPS	Un canal para una antena
Canal análogo	Canal adicional para accesorios como el trigger
Canal para sincronización de radio	Un canal adicional

Para el procesamiento de los datos, se utilizó el software licenciado GRILLA desarrollado por Moho, que permite análisis de H/V, análisis modal de estructuras, modelación 2D y 3D de H/V, análisis de vibraciones, inversiones conjuntas, procesamiento de ensayos tipo SASW y MASW, entre otros.

7.2 Protocolo para las mediciones geofísicas superficiales

A continuación se presenta el procedimiento simplificado para la realización de las mediciones geofísicas tipo H/V para la medición del periodo fundamental del suelo y tipo MASW-SASW para la medición del perfil de velocidad de onda cortante en el suelo.

7.2.1 H/V

En términos generales, para realizar una medición de H/V, se debe seguir el protocolo presentado a continuación:

- ▽ Adaptar los picos según el tipo de superficie, dependiendo si es suelo blando o una superficie rígida como el pavimento.
- ▽ Anclar el sensor a la superficie del terreno.
- ▽ Nivelar el equipo tomando como referencia el ojo de pollo.
- ▽ Asegurar las patas para eliminar problemas en la medición.
- ▽ Encender el equipo y revisar que la configuración sea la adecuada.
- ▽ Iniciar la medición.
- ▽ Esperar el tiempo deseado para la medición intentando hacer el menor ruido sobre la superficie. Se recomienda que este tiempo sea mayor a media hora y depende del tipo del depósito objetivo.
- ▽ Detener el equipo.

En la Figura 126 se presenta una foto de un equipo emplazado correctamente en el terreno.



Figura 126. Emplazamiento de sensor para medición tipo H/V.

7.2.2 Medición tipo MASW-SASW

En términos generales, para realizar una medición de este estilo, se debe seguir el protocolo presentado a continuación:

- ▽ Adaptar los picos según el tipo de superficie, dependiendo si es suelo blando o una superficie rígida como el pavimento.
- ▽ Anclar el sensor a la superficie del terreno.
- ▽ Nivelar el equipo tomando como referencia el ojo de pollo.
- ▽ Asegurar las patas para eliminar problemas en la medición.
- ▽ Encender el equipo y revisar que la configuración sea la adecuada, habilitando el radio trigger.
- ▽ Definir un trazado lineal desde el equipo hasta la distancia deseada en donde se realizarán las mediciones y se generará la fuente activa.
- ▽ Para la primera estación, a una distancia x , se ancla el radio trigger al suelo y se enciende. Paso seguido, se golpea el suelo con un mazo (lo que se denomina generación de una fuente activa) y se verifica que la conexión entre el equipo y el radio trigger sea la correcta.
- ▽ Desplazar a la siguiente estación dentro del trazado lineal definido, a una distancia x de la estación anterior y repetir el procedimiento para la generación de la fuente activa.
- ▽ Repetir el procedimiento anterior las veces que sean necesarias.
- ▽ Detener el equipo.



Figura 127. Emplazamiento de sensor y mazo utilizado para la generación de fuente activa.

7.3 Puntos H/V

Este literal se divide en 3 partes, la primera es la presentación del protocolo de procesamiento, la segunda la descripción de cada uno de los sitios de medición, y la tercera, conclusiones y resumen de resultados.

7.3.1 Protocolo general para el procesamiento

Con el fin de obtener los mejores resultados posibles para cada medición, el procesamiento de los espectros H/V fue un proceso iterativo en donde se buscó cumplir con la mayoría de criterios y recomendaciones propuestas por el proyecto SESAME (European comission - Research General Directorate, 2004). Con lo anterior, para cada uno de los puntos en donde se realizó un ensayo de tipo H/V, se anexa una ficha generada en el software Grilla con los parámetros utilizados para el procesamiento (ventana de cálculo, filtro, componente horizontal, etc.) y se resaltan los criterios o recomendaciones cumplidas para cada medición. En general, para los espectros no planos se lograron cumplir con todos los criterios del proyecto SESAME, generando confianza en los resultados obtenidos.

7.3.2 Resumen de las mediciones realizadas

En este literal se presenta el resumen de los espectros H/V en cada uno de los 5 sitios en donde únicamente se realizó este tipo de ensayo. Para cada sitio se presenta su localización en coordenadas del sistema WGS84 y la fecha y hora del comienzo y del final de la medición, en hora UTC. La Figura 125 presenta la localización de los sitios en donde se realizaron estas mediciones.

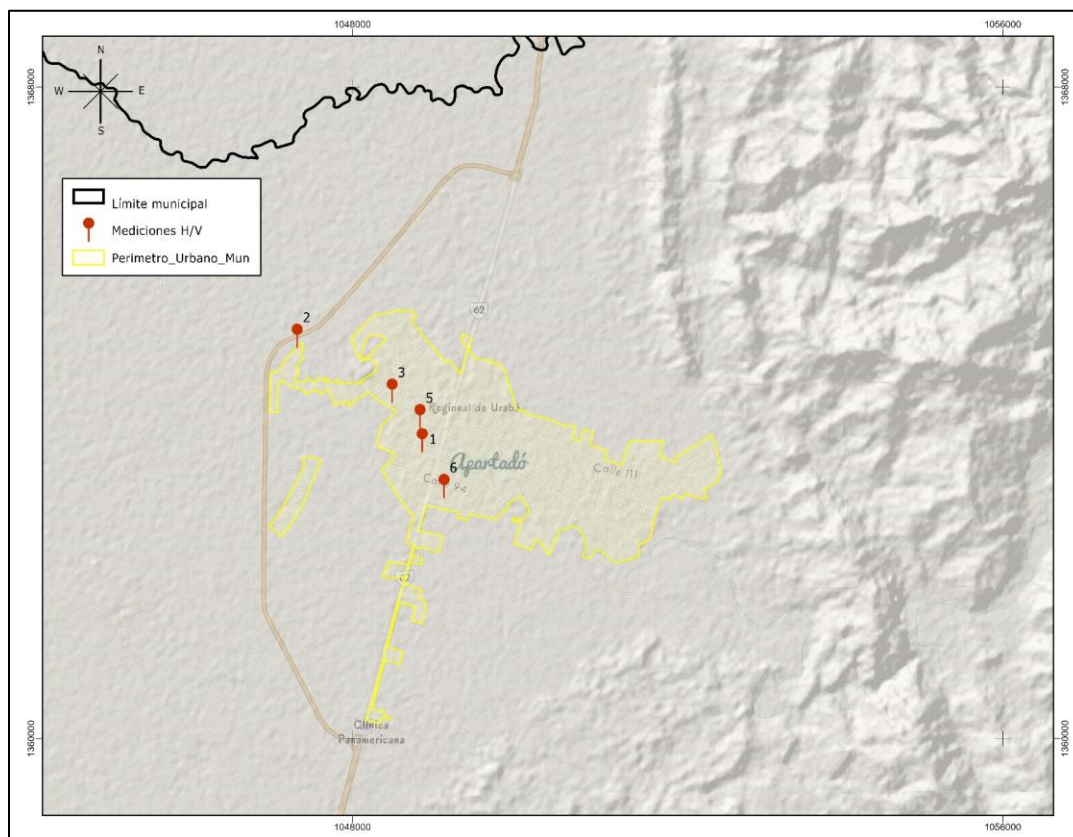


Figura 128. Localización de mediciones de tipo H/V.

7.3.2.1 Punto 1

La medición del punto 1 fue realizada en la calle frente al hotel Carolina real, sobre la calle 98 en el área urbana de Apartadó. Los detalles de la localización y hora de la medición se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Resumen de propiedades generales del punto 1.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	38.0667	-76.634445			
Latitud	7	52.9778	7.882963333			
Información de tiempo de medición						
	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	15	6	2022	13	54	48
Tiempo Final	15	6	2022	14	34	48

Al observar el espectro de H/V (ver Figura 129), se observa un pico a los 100 Hz, que está fuera del rango esperado, así que puede referirse a ruido antrópico. Asimismo, se encontró un espectro de baja amplitud hasta los 10 Hz con valores menores a 2, que podría presumirse como un espectro plano relacionado con suelos de alta rigidez, o depósitos aluviales granulares.

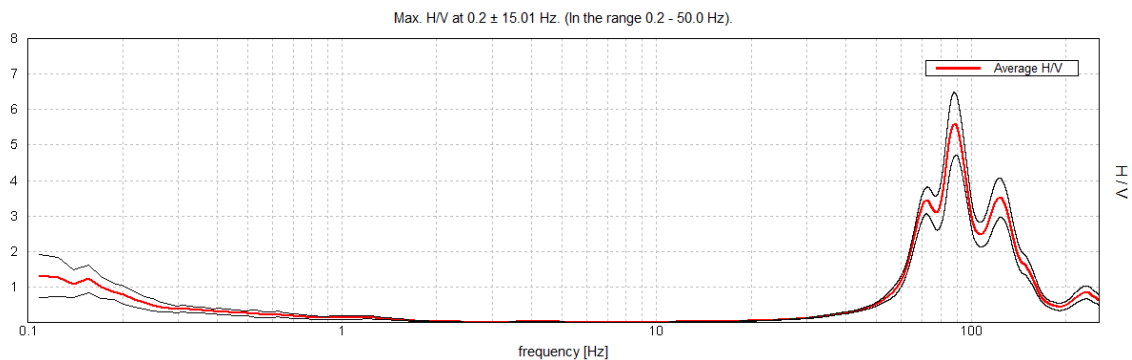


Figura 129. Espectro H/V para el punto 1.

7.3.2.1 Punto 2

La medición del punto 2 fue realizada sobre la terraza alta del río Apartadó al noroccidente del casco urbano sobre la variante. Los detalles de la localización y hora de medición se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. Resumen de propiedades generales del punto 2.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	38.9032	-76.64838667			

Latitud	7	53.6744	7.894573333			
Información de tiempo de medición						
	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	15	6	2022	15	45	13
Tiempo Final	15	6	2022	16	25	13

Para este punto, aunque se obtuvo un espectro ligeramente plano, debido quizás a los depósitos aluviales presentes en la zona, se observó un pico claro alrededor de los 1.25 Hz, que corresponde a 0.8 s (ver Figura 130).

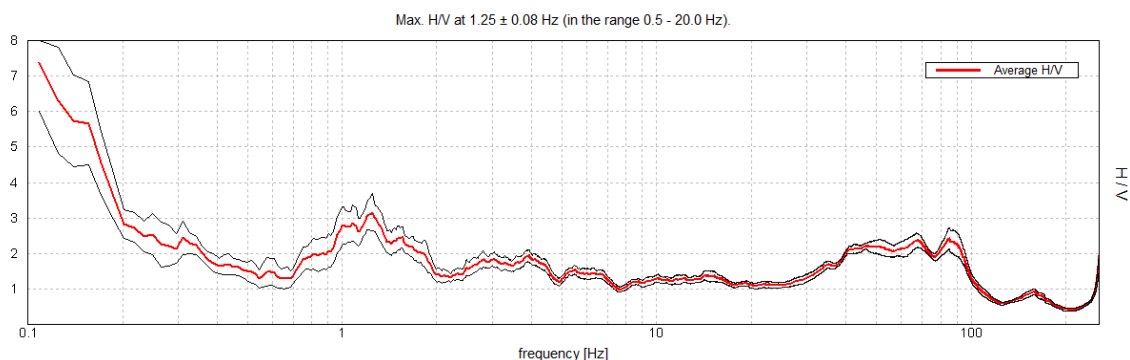


Figura 130. Espectro H/V para el punto 2.

Para este punto, fue posible realizar la inversión del espectro de H/V, obteniendo un H/V teórico que concuerda con el medido en términos de la frecuencia fundamental, como se puede observar en la Figura 131. Con la inversión realizada, se obtuvo un perfil de velocidades de 4 capas que puede observarse en la Figura 132, con una capa superior muy blanda con un valor de V_s de $120 \frac{m}{s}$ y un valor de V_{s30} de $220 \frac{m}{s}$.

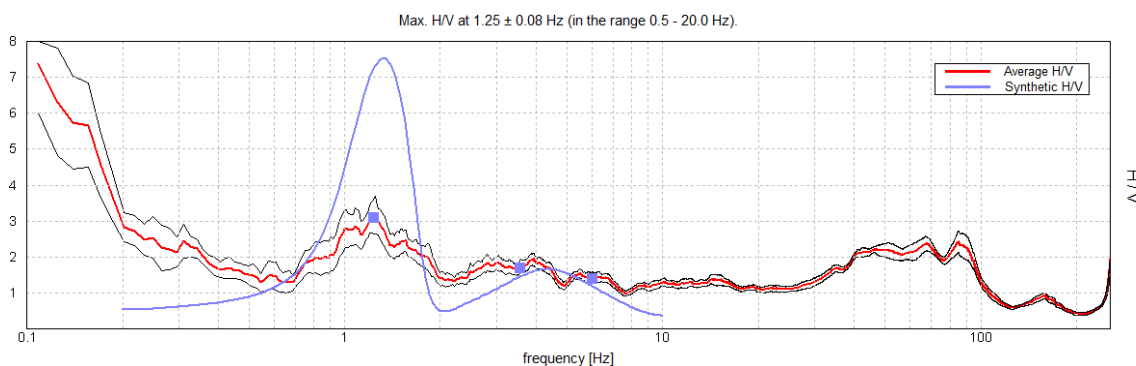


Figura 131. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 2.

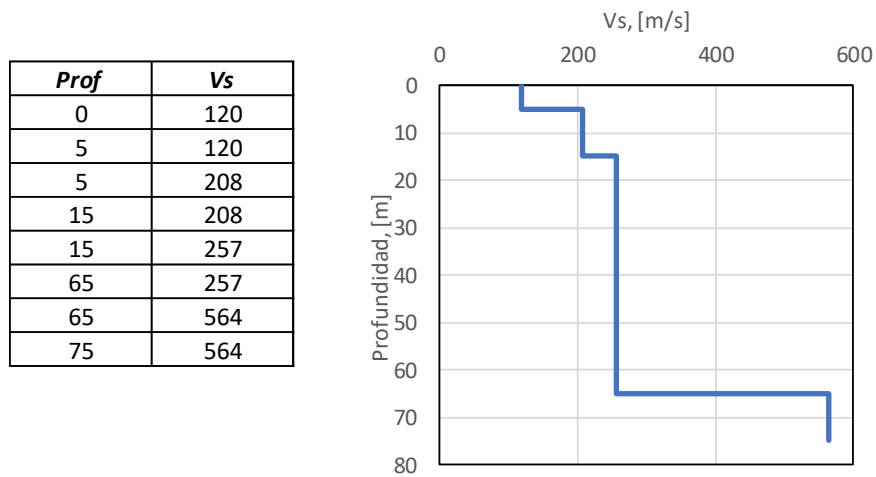


Figura 132. Perfil de velocidades obtenido para el punto 2 con la inversión del espectro de H/V.

7.3.2.2 Punto 3

La medición del punto 3 fue realizada en el parque situado sobre la carrera 108 con diagonal 100, sobre la terraza del río Apartadó en el área cercana al barrio La Libertad. Los detalles de la localización y hora de medición se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Resumen de propiedades generales del punto 3.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	38.2676	-76.63779333			
Latitud	7	53.308	7.888466667			
Información de tiempo de medición						
	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	15	6	2022	17	49	40
Tiempo Final	15	6	2022	18	23	40

Para este punto, se obtuvo un espectro con un pico claro alrededor de los 0.89 Hz, que corresponde a 1.12 s (ver Figura 133).

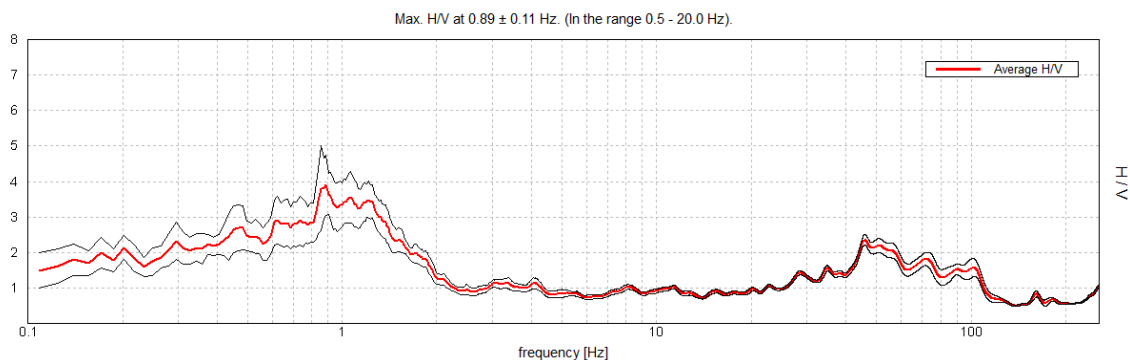


Figura 133. Espectro H/V para el punto 3.

Para este punto, fue posible realizar la inversión del espectro de H/V, obteniendo un H/V teórico que concuerda con el medido en términos de la frecuencia fundamental y amplitudes, como se puede observar en la Figura 134. Con la inversión realizada, se obtuvo un perfil de velocidades de 4 capas que puede observarse en la Figura 135, con una capa superior muy blanda con un valor de V_s de $160 \frac{m}{s}$ y un valor de V_{s30} de $214 \frac{m}{s}$.

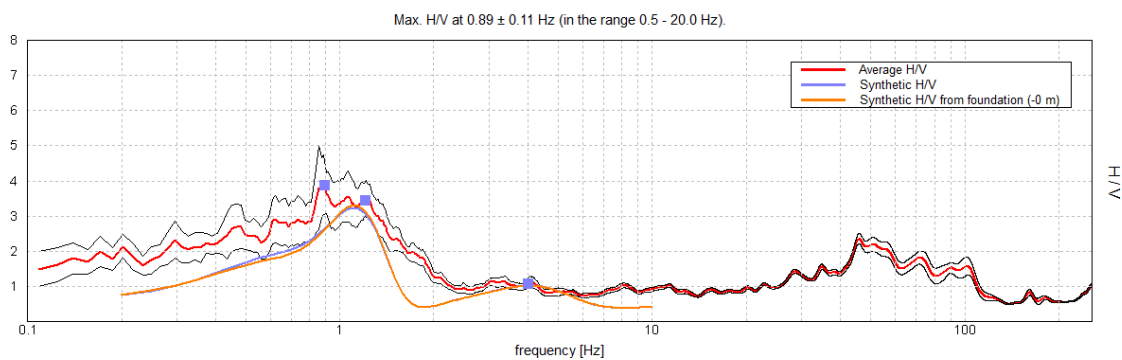


Figura 134. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 3.

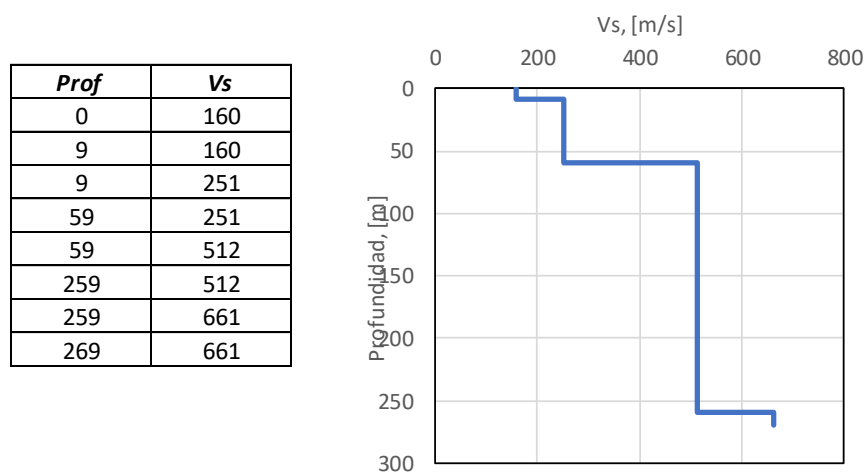


Figura 135. Perfil de velocidades obtenido para el punto 3 con la inversión del espectro de H/V.

7.3.2.3 Punto 5

La medición del punto 5 fue realizada en el parque situado sobre la carrera 104 con calle 101, cerca al puente peatonal sobre el río Apartadó. Los detalles de la localización y hora de medición se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33. Resumen de propiedades generales del punto 5.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	38.0813	-76.63468833			
Latitud	7	53.1381	7.885635			
Información de tiempo de medición						
	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	15	6	2022	21	5	47
Tiempo Final	15	6	2022	21	39	47

Para este punto, se obtuvo un espectro de H/V plano con varios picos entre 0.3 y 2 Hz, resultado de la complejidad de los depósitos aluviales en la zona de estudio (ver Figura 136).

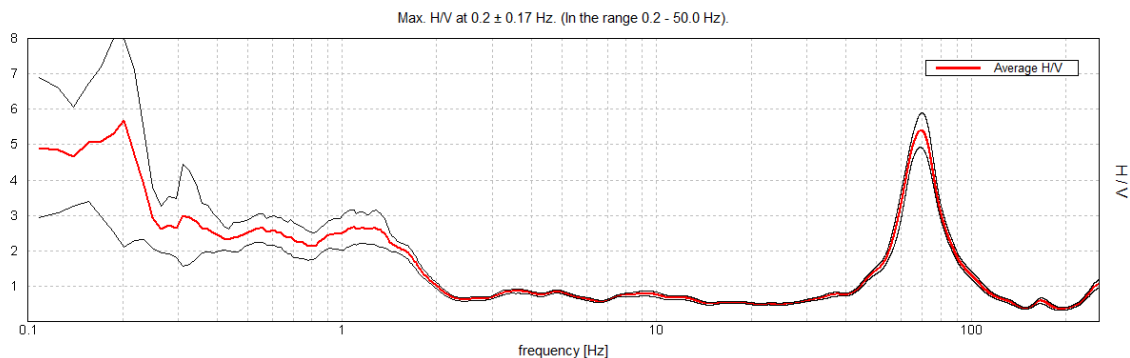


Figura 136. Espectro H/V para el punto 5.

7.3.2.4 Punto 6

La medición del punto 6 fue realizada en la zona verde frente a CORPOURABA sobre la calle 92. Los detalles de la localización y hora de medición se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Resumen de propiedades generales del punto 6.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	37.9211	-76.63201833			
Latitud	7	52.6726	7.877876667			
Información de tiempo de medición						

	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	16	6	2022	21	20	5
Tiempo Final	16	6	2022	21	54	5

Para este punto, se obtuvo un espectro con un pico claro alrededor de los 0.86 Hz, que corresponde a 1.163 s (ver Figura 137).

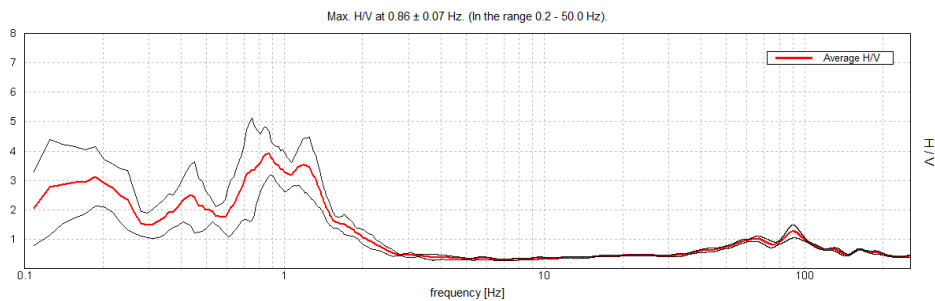


Figura 137. Espectro H/V para el punto 6.

Para este punto, fue posible realizar la inversión del espectro de H/V, obteniendo un H/V teórico que concuerda con el medido en términos de la frecuencia fundamental y amplitudes, como se puede observar en la Figura 138. Con la inversión realizada, se obtuvo un perfil de velocidades de 4 capas que puede observarse en la Figura 139, con una capa superior muy blanda con un valor de V_s de $150 \frac{m}{s}$ y un valor de V_{s30} de $190.5 \frac{m}{s}$.

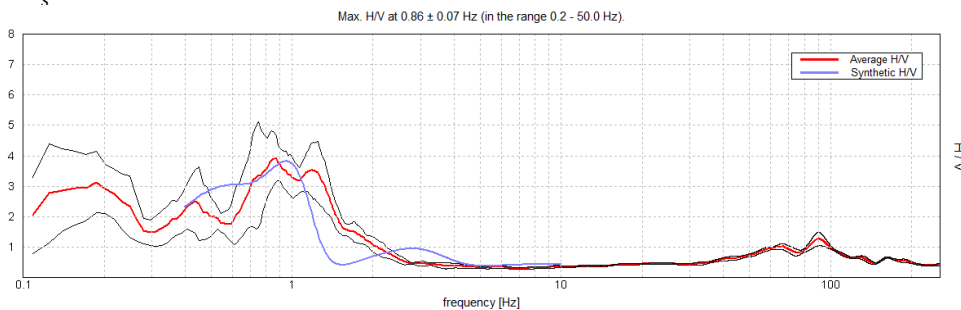


Figura 138. Espectro H/V medido y H/V teórico del perfil ajustado en la inversión en el punto 6.

Prof	V_s
0	150
13	150
13	240
68	240
68	500
268	500
268	700
278	700

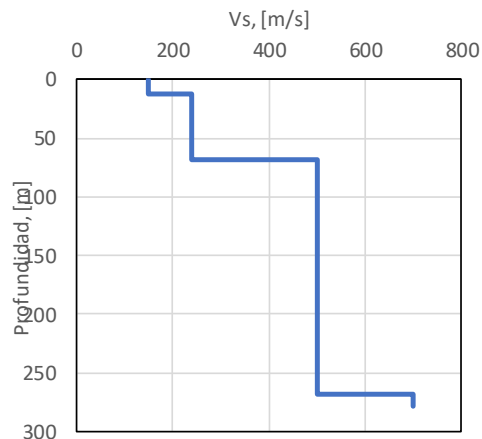


Figura 139. Perfil de velocidades obtenido para el punto 6 con la inversión del espectro de H/V.

7.3.3 3.2. Resumen de resultados

Los espectros de H/V, permitieron determinar dos tipos de sitios, en el primer tipo se encuentran los depósitos rígidos con un espectro plano y en el segundo, sitios con capas superficiales blandas con valores de V_s menor a $180 \frac{m}{s}$ y periodos fundamentales de suelo entre 0.8 y 1.2 segundos, como se puede observar en la Tabla 35. Los resultados espacializados se presentan en la Figura 140.

Tabla 35. Resumen de resultados de sitios de medición H/V.

ID	Long, [°]	Lat, [°]	Fr, [Hz]	T, [s]	Vs30, [m/s]
1	-76.634445	7.88296333	Espectro plano	Espectro plano	-
2	-76.648387	7.89457333	1.25	0.8	203
3	-76.637793	7.88846667	0.89	1.123	214
5	-76.634688	7.885635	Espectro plano	Espectro plano	-
6	-76.632018	7.87787667	0.86	1.163	190

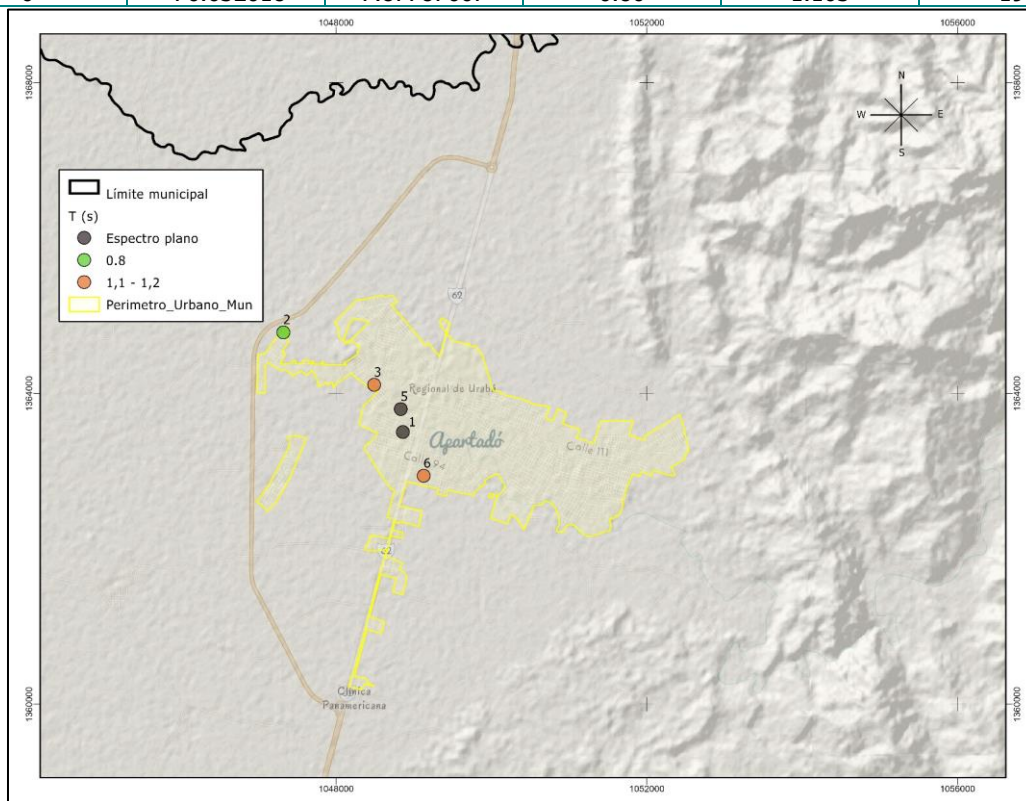


Figura 140. Resumen de periodos obtenidos por H/V en los puntos de estudio.

7.4 Punto H/V y SASW

En la parte trasera del supermercado ARA de la calle 105 A con carrera 108 se realizaron dos ensayos tipo SASW y uno tipo H/V, a continuación se presentan los resultados obtenidos. El punto en donde se realizaron estos ensayos se conoce como punto 4.

7.4.1 Ensayo H/V

La medición del punto 6 fue realizada en la zona verde frente a CORPOURABA sobre la calle 92. Los detalles de la localización y hora de medición se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36. Resumen de propiedades generales del punto 4.

Resumen propiedades						
Información de la localización						
	Grados	Minutos	Grados decimales			
Longitud	-76	37.9211	-76.63201833			
Latitud	7	52.6726	7.877876667			
Información de tiempo de medición						
	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo
Tiempo Inicial	16	6	2022	21	20	5
Tiempo Final	16	6	2022	21	54	5

Para este punto, se obtuvo un espectro con un pico claro cerca a los 0.17 Hz, sin embargo, se considera que es un espectro plano por las bajas amplitudes, característico de depósitos aluviales y de gran rigidez.

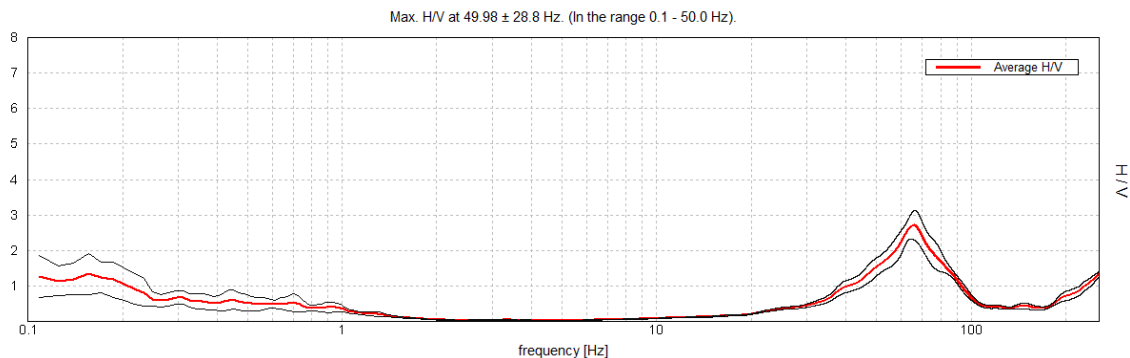


Figura 141. Espectro H/V para el punto 4.

7.4.2 Determinación del perfil de velocidades

En este numeral se presentan las mediciones y resultados para la determinación del perfil de velocidad de onda cortante en el punto 4.

7.4.2.1 Procedimiento de medición

Como se mencionó previamente, para la medición del perfil de velocidades se utilizó un único sensor Tromino y el accesorio radio trigger. Para este caso, se escogió un distanciamiento de 3 metros entre los diferentes puntos en donde se generaron fuentes activas. En el área de estudio del punto 4 se realizaron dos diferentes trazados lineales, que se presentan en la Figura 142. La línea de medición 1 tuvo una longitud final de 36 metros, con un total de 12 golpes de martillo distanciados cada 3 metros, y la línea de medición 2 contó con una longitud de 39 metros, con un total de 13 golpes de martillo, o fuentes activas, distanciadas cada 3 metros.

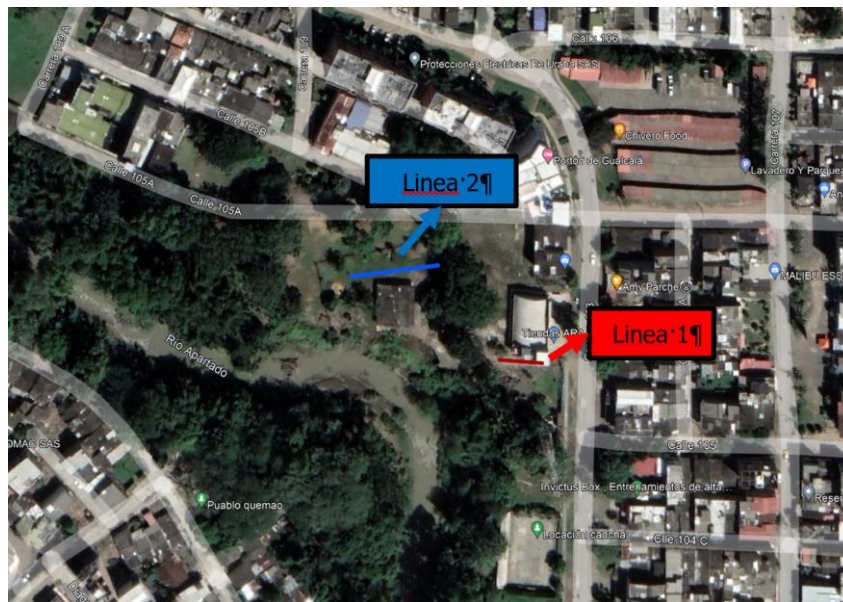


Figura 142. Ubicación de las dos líneas de medición.

7.4.2.2 Resultados de refracción sísmica

Con las dos líneas de medición realizadas, se realizó el procesamiento en el software Grilla y se identificaron los tiempos de arribo de cada uno de los golpes de martillo, o fuentes activas, al receptor, que en este caso es el sensor tromino. El ensayo de refracción sísmica se utilizó de manera indicativa para determinar la velocidad de onda cortante en la capa más somera.

El resumen de los resultados para las dos líneas se puede observar en la Figura 143 y en la Figura 144, y en los dos casos se obtuvo que en la parte más somera de los depósitos se esperan valores de V_s menores a $180 \frac{m}{s}$, con profundidades que superan los 20 metros, siendo un resultado compatible con los perfiles hallados en la inversión de los espectros de H/V, que sirven de validación.

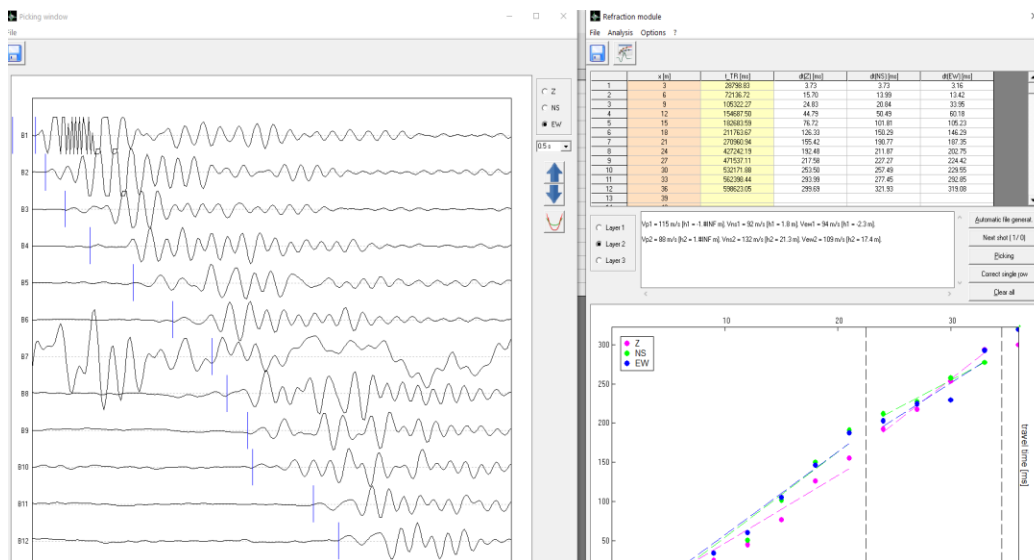


Figura 143. Resultados de refracción sísmica en el programa Grilla para el lineamiento 1.

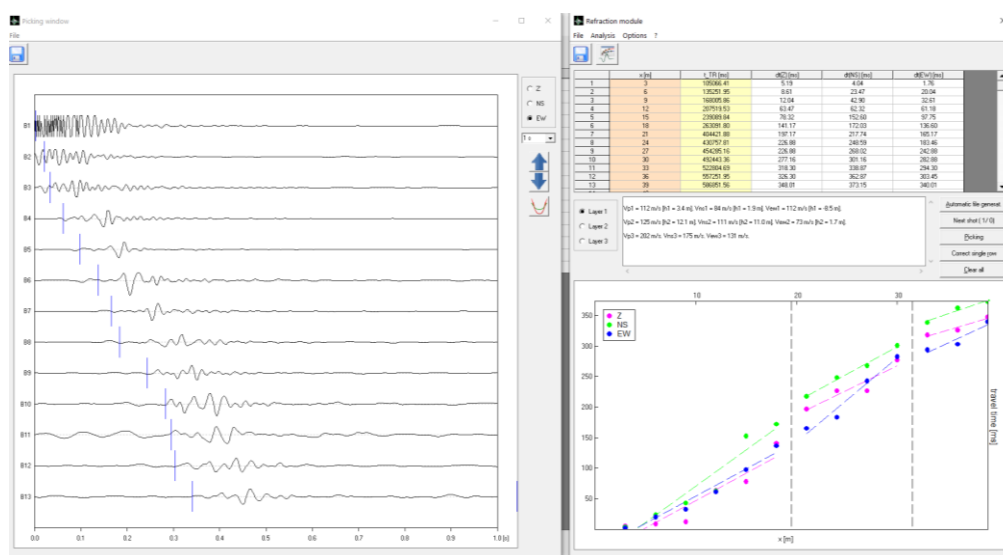


Figura 144. Resultados de refracción sísmica en el programa Grilla para el lineamiento 2.

7.4.2.3 Resultados de ensayo tipo SASW o MASW

Con los mismos registros de los arribos de las ondas generadas por la fuente activa, se generaron las imágenes promedio de los espectros de las velocidades de fase encontradas, promediando para cada línea las ventanas de mejor resolución. Con las imágenes generadas en el software grilla y con la información superficial del ensayo de refracción, se generaron perfiles de velocidad que se ajustaran a las curvas de dispersión interpretadas. En la Figura 145 y en la Figura 146 se presentan las imágenes generadas como espectros de curvas de fase y las curvas de dispersión de los perfiles de velocidad ajustados a estos resultados representadas como puntos verdes en la figura.

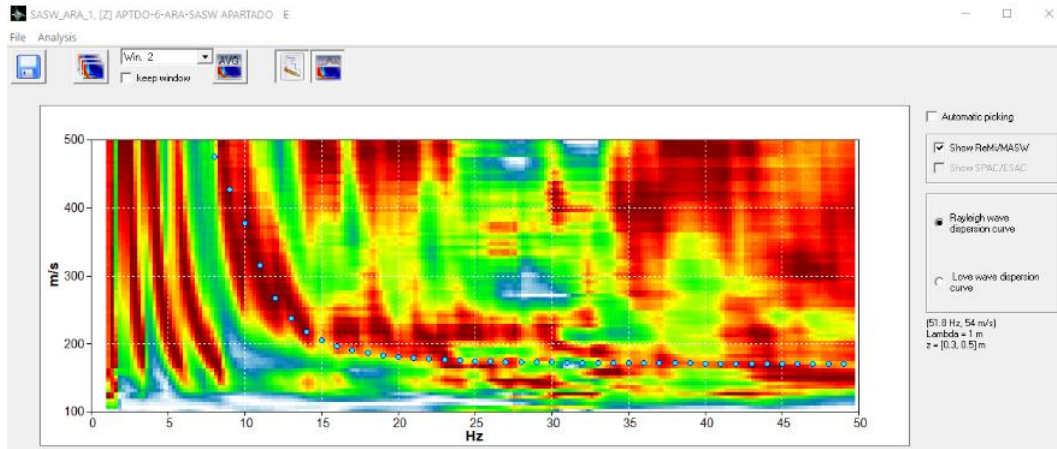


Figura 145. Imagen del espectro de velocidades de fase hallada para el lineamiento 1.

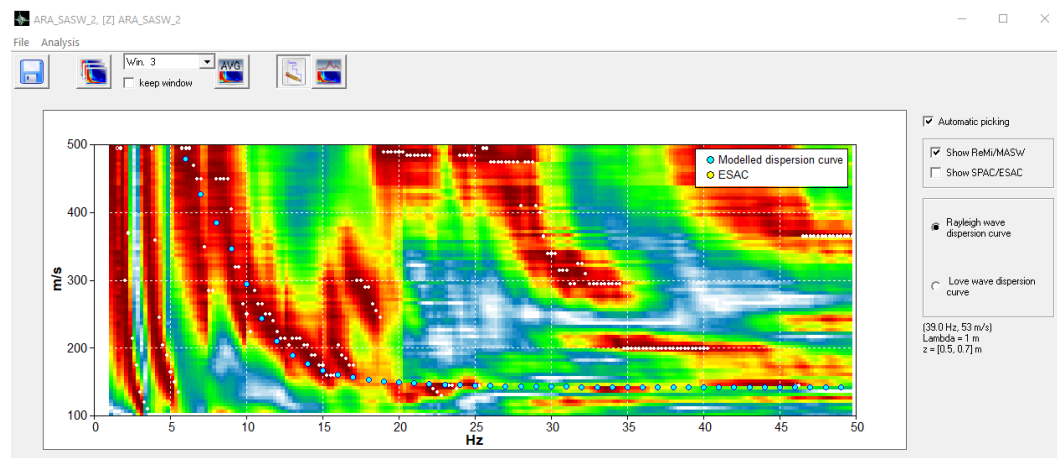


Figura 146. Imagen del espectro de velocidades de fase hallada para el lineamiento 2.

Línea 1	
Prof	Vs
0	180
6	180
6	320
12	320
12	500
16	500
16	900
20	900

Línea 2	
Prof	Vs
0	150
5	150
5	260
10	260
10	450
20	450
20	650
30	650

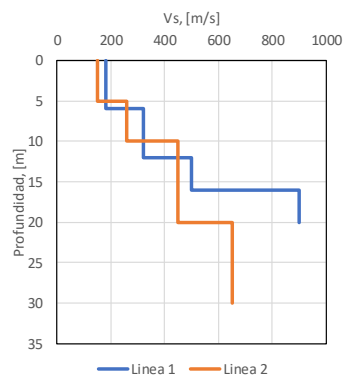


Figura 147. Perfiles determinados e el punto 4 por el método SASW.

8. Unidades Geológicas Superficiales - Geotecnia

Representa las zonas geotécnicas de comportamiento homogéneo, contiene polígonos que simbolizan rocas y suelos en superficie clasificados según lo propuesto por la IAEG (1981), Montero, González, Ángel (1982) y la "Propuesta metodológica para la cartografía geológica aplicada a geomecánica", desarrollada dentro del "Proyecto Compilación de la Información Geomecánica", elaborado por INGEOMINAS (2005), hoy SGC. Cada zona geotécnica homogénea generaliza materiales que dan origen a las formaciones superficiales y el suelo que resulta de la degradación o transporte de los mismos.

La caracterización geológica de los macizos rocosos y de los materiales superficiales del área de estudio corresponde con los análisis básicos para el estudio del comportamiento geomecánico de los terrenos, útiles en la evaluación de amenazas por movimientos en masa para el condicionamiento al uso del suelo, entre otros instrumentos de ordenamiento territorial. La información temática se obtiene a partir del procesamiento de la geología y geomorfología básica que permite caracterizar las condiciones físicas de los suelos, rocas y materiales de superficie, lo cual resulta en el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) o de geología para ingeniería.

La clasificación de rocas y suelos debe considerar que las propiedades físicas de dichos materiales en su estado actual dependen de la combinación de diversos elementos como el origen, la diagénesis, la historia tectónica, el metamorfismo y los procesos de meteorización, los cuales gobiernan en el comportamiento mecánico de dichos materiales. El comportamiento geomecánico de las rocas y suelos está determinado principalmente por propiedades físicas como origen, litología, composición mineralógica, textura, dureza, condición estructural, grado de fracturamiento y de meteorización, granulometría, humedad y consistencia. Los mapas de geología para ingeniería constituyen la base cartográfica temática para la elaboración de mapas de zonificación geomecánica y otros documentos de utilidad para ingeniería.

En suelos es posible estimar mediante mediciones en campo con instrumentos como el penetrómetro, la resistencia a la compresión no confinada. Si se considera en un diagrama de relación de esfuerzos axiales y cortantes, el esfuerzo principal menor como cero, se tiene un esfuerzo cortante constante, por lo que la cohesión en resistencia al corte no drenado sería la mitad del radio del círculo en un diagrama de círculo de Mohr, es decir, el esfuerzo de compresión inconfundido dividido dos. Si bien este tipo de caracterización de suelos no es recomendable para estimar resistencia al corte en análisis detallados, para obtener de manera sinóptica los parámetros de comportamiento del suelo a escalas regionales sí resulta beneficioso al eliminarse la alteración por muestreo, almacenamiento y transporte de materiales. Hay por lo menos seis factores que influyen en por qué la resistencia de las muestras medidas en el laboratorio es diferente a la resistencia en el campo (Skempton y Hutchinson, 1969). Entre ellas se encuentra la técnica del muestreo, orientación de la muestra, tamaño de muestra, rata de corte, ablandamiento después de remover la carga y falla progresiva.

La resistencia de las rocas se determinó con la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial, la cual se midió con ensayo no destructivo esclerométrico con el martillo de Schmidt, así como la definición de la calidad del macizo y del GSI, que corresponden a parámetros de evaluación de la resistencia de la masa rocosa y evalúan la calidad del macizo rocoso en función del grado y características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. La determinación del GSI permite calificar el macizo rocoso entre 0 y 100, dependiendo de la variación del entramamiento y la calidad de la roca en la superficie. Con estos parámetros fue posible estimar la resistencia general del macizo rocoso mediante el criterio de falla de Hoek & Brown y homologar a parámetros de resistencia al corte por criterio de falla de Mohr – Coulomb (ángulo de fricción interna y cohesión).



Figura 148. Mediciones geotécnicas en campo

Para el caso de materiales residuales y transportados se realizaron apiques y se tomaron muestras representativas para la práctica de ensayo de granulometría, densidad, límites de consistencia, y humedad, útiles para la caracterización de los suelos y estimación de su comportamiento geomecánico. Complementariamente, entendiendo que la medición directa de parámetros sobre la masa del suelo es más representativa que el muestreo mismo, se amplió la información mediante mediciones de resistencia al corte no drenada con penetrómetro de bolsillo y se emplearon las correlaciones realizadas por A. Bucci (empresa COPAINS) para obtener parámetros de resistencia al corte drenada bajo criterio de resistencia de Mohr-Coulumb (cohesión y ángulo de fricción interna) para diferentes tipos de suelos según su gradación.



Figura 149. Mediciones tomadas con penetrómetro de bolsillo

Sumado a esto se incorporan al análisis las caracterizaciones del comportamiento geotécnico de los materiales de los POMCA vigentes en el municipio, se recopila información de las caracterizaciones

geomecánicas de los materiales identificados en las cuencas hidrográficas de los POMCA río Turbo Currulao y río León (Tabla 37) información de que complementa con caracterizaciones in situ en zonas con procesos de socavación, la espacialización de la información geotécnica recopilada se muestra en la Figura 150.

Tabla 37. Relación información recopilada caracterización geotécnica POMCA

Tipo	Identificador	POMCA
Calicata	EG-09	Río Turbo Currulao
Calicata	EH-09A	Río Turbo Currulao
Sondeo	EG-09B	Río Turbo Currulao
Sondeo	EG-09C	Río Turbo Currulao
Apique	A4	Río Turbo Currulao
Apique	A6	Río Turbo Currulao
Apique	APPL24	Río León
Apique	APPL25	Río León
Apique	APPL26	Río León
Apique	APPL27	Río León
Apique	APPL28	Río León
Apique	APPL29	Río León
Apique	APPL30	Río León
Sondeo	S001	Río León
Sondeo	S008	Río León
Sondeo	S010	Río León
Sondeo	S017	Río León

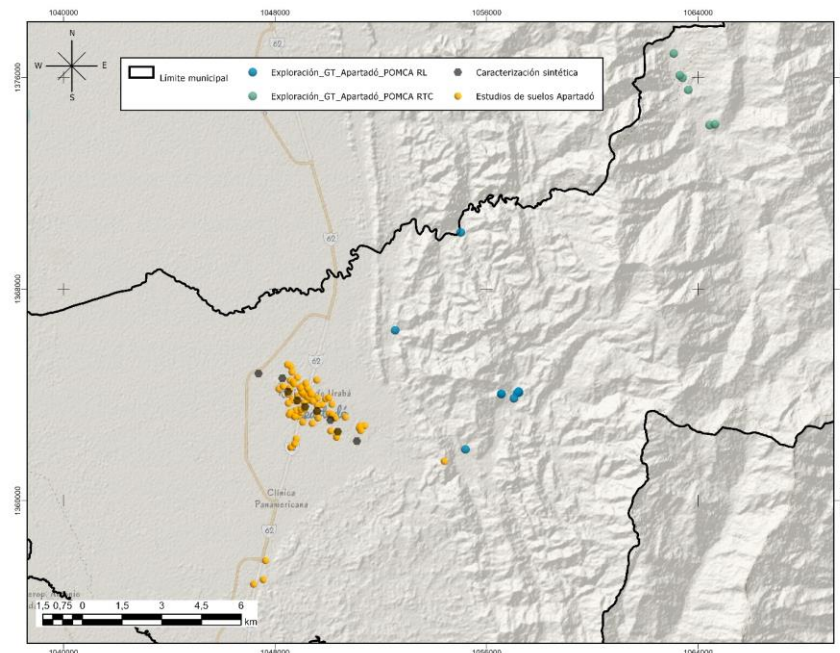


Figura 150. Información geotécnica recopilada

A continuación se muestran las zonificaciones geomecánicas de los materiales (UGS) y parámetros determinados es escala rural para el área de estudio.



UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Rbfn2ad, Dcr/l/d/m	16,00	26,36	19,12	8,81
Rbfn2ad, Fe	17,05	28,31	18,35	11,92
Rbfn2ad, Fp	16,68	29,27	19,01	14,67
Rbfn2ae, Se/s/l	15,02	33,48	18,44	10,67
Rbfn2ad, Dcr/l/d/m	17,53	32,00	19,06	12,49
Rbfn2ad, Fe	17,01	30,83	18,56	9,89
Rbfn2ad, Fp	16,15	32,71	17,26	8,10
Rbfn2ad, Ft	16,56	32,22	18,34	9,17
Rbfn2ae, Se/s/l	15,89	32,43	19,82	10,06
Rbfn2ae, Dcr/l/d/m	17,94	27,99	19,86	9,34
Rbfn2ad, Fe	15,72	30,47	17,75	14,87
Rbfn2ad, Fp	15,89	27,35	18,22	12,53
Rbfn2ad, Ft	15,44	33,49	17,45	11,74
Rbfn2ae, Se/s/l	15,92	30,45	19,23	8,77
Rmfngpad, Fp	23,93	31,11	18,73	12,14
Rmfngpae, Se/s/l	21,90	26,52	18,41	7,44
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	24,43	27,22	18,24	10,94
Rmfngpad, Fp	24,61	32,19	19,42	11,33
Rmfngpae, Se/s/l	22,02	27,43	17,60	12,08

UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	22,69	32,24	17,24	8,30
Rmfngpad, Fe	23,08	28,26	18,22	7,54
Rmfngpad, Fp	23,14	27,55	18,79	12,18
Rmfngpae, Se/s/l	23,53	26,41	19,36	8,98
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	23,43	28,35	18,97	9,09
Rmfngpad, Ft	22,10	25,89	17,21	13,27
Rmfngpae, Se/s/l	22,34	31,50	17,62	7,18
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	21,64	29,94	19,47	14,06
Rmfngpad, Fp	20,27	33,97	19,73	7,70
Rmfngpad, Ft	21,09	33,24	17,86	7,62
Rmfngpae, Se/s/l	23,52	28,08	18,30	14,23
Rmdfpgmad, Dcr/l/d/m	23,11	30,48	17,31	12,46
Rmdfpgmad, Fp	22,49	32,95	18,40	8,13
Rmdfpgm, Se/s/l	23,33	30,31	18,93	8,43
Strl-pdmte, Dcr/l/d/m	16,85	23,50	18,86	14,53
Stf2, Fe	27,62	10,72	19,24	8,54
Stf2, Fp	25,50	13,52	19,88	37,36
Stf2, Ft	26,47	14,47	19,30	13,57
Stf, Dcr/l/d/m	25,87	15,31	19,38	9,41
Stf, Fe	27,98	11,41	18,47	12,95
Stf, Fp	27,56	13,19	17,79	9,67
Stf, Ft	25,01	14,77	17,85	11,87
Stf, Se/s/l	27,69	12,87	19,67	12,89
Stf1, Dcr/l/d/m	32,94	14,33	18,73	12,78
Stf1, Fe	32,72	14,77	19,94	11,01
Stf1, Fp	30,97	17,62	19,75	19,68
Stf1, Ft	31,72	15,74	18,72	14,47
Stf1, Se/s/l	30,82	8,99	19,88	14,03
Stf, Fe	25,38	8,41	19,69	8,18
Stf, Fp	26,45	11,51	19,40	7,19
Stf, Ft	25,53	16,52	18,45	14,09
Stf, Fp	25,69	8,36	17,56	12,71
Stf, Ft	27,77	8,01	18,59	13,46
Stf, Fe	27,98	11,35	18,36	13,47
Stf, Fp	27,05	15,89	18,02	10,43
Stf, Ft	26,28	9,26	18,99	13,39
Stlc, Dco	16,42	11,29	18,23	8,53
Stlc, Dcr/l/d/m	14,78	14,32	18,67	10,38
Stlc, Se/s/l	14,27	16,11	19,54	9,19
Stf1, Dcr/l/d/m	28,64	8,33	18,89	9,14

UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Stf1, Fe	29,80	13,21	17,83	16,81
Stf1, Fp	29,86	16,01	19,84	14,98
Stf1, Ft	29,30	14,13	19,19	11,70
Stf1, Se/s/l	28,87	8,83	18,87	10,24
Stf, Dcr/l/d/m	25,20	16,75	19,60	7,52
Stf, Fp	25,75	14,27	19,91	14,17
Stf, Ft	27,83	10,99	19,69	7,22
Stf, Se/s/l	27,29	8,65	19,02	7,72
Stf, Dcr/l/d/m	25,78	10,07	18,11	7,33
Stf, Fe	26,16	13,95	18,88	13,06
Stf, Fp	25,51	9,09	17,10	10,58
Strl-pdmte, Dcr/l/d/m	16,11	23,24	17,21	12,74
Stf-lac, Fp	27,40	14,87	17,95	13,54
Stf3, Dcr/l/d/m	25,13	14,23	18,89	10,87
Stf3, Fp	25,67	10,07	18,92	7,05
Stf3, Se/s/l	26,62	13,79	19,84	8,00
Stf3, Dcr/l/d/m	27,25	15,07	19,88	10,61
Stf3, Ft	27,95	10,40	19,48	12,58
Stf3, Dcr/l/d/m	25,53	12,38	19,52	14,55
Stf3, Fp	27,90	11,03	18,30	13,25
Stf3, Ft	27,43	10,80	19,61	10,66
Stf3, Se/s/l	25,39	10,72	17,21	11,84
Stf3, Dcr/l/d/m	27,00	9,07	19,70	14,24
Stf3, Fe	27,87	17,47	19,25	10,68
Stf3, Fp	27,15	13,50	19,58	14,23
Stf3, Ft	25,14	11,80	17,16	9,55
Stf3, Se/s/l	25,57	12,47	19,58	7,86

Junto a la secretaría de planeación y ordenamiento territorial del municipio se realiza la recopilación y análisis de estudios de suelos, de diseños y mejoramiento de vías buscando generar una base de datos geotécnica integral útil para la evaluación de movimientos en masa y avenidas torrenciales. En la Tabla 39 se presentan los resultados de este proceso.

Tabla 39. Relación información recopilada geotecnia

Estudios de suelos Apartadó			
Nombre	Ubicación	Sondeos	Elaboró
Estudio geotécnico ARA	Cl 105 A # 108 65	3	
Manzanas 10 y 13 Ciudadela Maderos	Ciudadela Maderos	20	Consulcivil
Construcción edificación	Gualcalá	4	Ingeotecon
Compañía Aerofumigaciones Calima	Calima		Todo suelos

Estudios de suelos Apartadó			
Nombre	Ubicación	Sondeos	Elaboró
Diseño Bodegas Portón las Américas	Corregimiento Churidó	8	Construcciones Alib
Estudio geotécnico vivienda de tres pisos	Barrio 20 de enero	3	Isipro
Estudio Geotécnico y de suelos bodegas	Zona Franca Apartadó	3	Jorge Restrepo
Centro de acopio Parque Zungo	Parque Zungo	3	Oscar Rodríguez
Centro de acopio			
Nueva sede EPM	Cl 94 104	7	AIM Ingenieros Civiles
Sede Bancolombia	Cra 100 96	2	Pedro Serna
Complejo tecnológico agroindustrial SENA	Barrio estadio	3	Consortio proceso CC
Plan Parcial el Porvenir		12	E&R
Puente peatonal	Calle 100	2	Vieco Ingeniería
Colegio UNIBAN	Colegio UNIBAN	3	Jorge Restrepo
Sede Sistema Gestión de Riesgo	Barrio Libertad	3	Lab suelos
Cubierta y graderías	Barrio Policarpa	3	José Luis Aldana
Proyecto Agrícola Santa María	KR 100 89	8	Consulcivil
Centro social comunitario	CL 103 92	6	Geofísica SAS
Sede Universidad de Antioquia	KR 100	8	Lab suelos
Bloques 1 piso Sede Antioquia	KR 100	8	Lab suelos
Espacio público parque lineal del río	KR 78 hasta KR 100	28	Compañía de estudios y diseños parque lineal rio Apartadó
Estudio de suelos Centro Cultural	KR 93 96 A 13	4	John Jairo Botero
Puente peatonal barrio la Esmeralda	Barrio Esmeralda	2	Lab suelos
Institución educativa Mariano Ospina	Corregimiento San José de Apartadó	13	Lab suelos
Las Heliconias Etapa 1		6	EYR SAS
Diamante de softbol	Barrio Obrero	3	Jorge Humberto
Centro de integración ciudadana	CL 102 83	3	Luiz Gonzaga Montes
Sede Administrativa	KR 100 106 54	7	Jhon Botero
Plan parcial	Finca la Teca	4	Ramiro de Jesús Serna
Estadio Catherine Ibarguen	CL 103 Vía Alfonso López	6	Lab suelos
Etapa 3 Comfama	Cerca Ciudadela Curazaos	26	Consulcivil
Pavimento Rígido	Barrio Parroquia	13	Consultoría Geotecnia y ambiente
Institución educativa San Pedro Claver	Barrio Obrero	6	Jorge Restrepo
Institución educativa José Celestino Mutis	Serranía	4	Jorge Restrepo
Institución Heraclio Mena Padilla	CL 94 92 93	5	Consultorías Geotecnia y ambiente SAS
Zonificación a partir de potencial de licuación de la zona urbana del municipio de Apartadó	Apartadó	150	Tesis Adriana Cubides Cruz
Total		389	

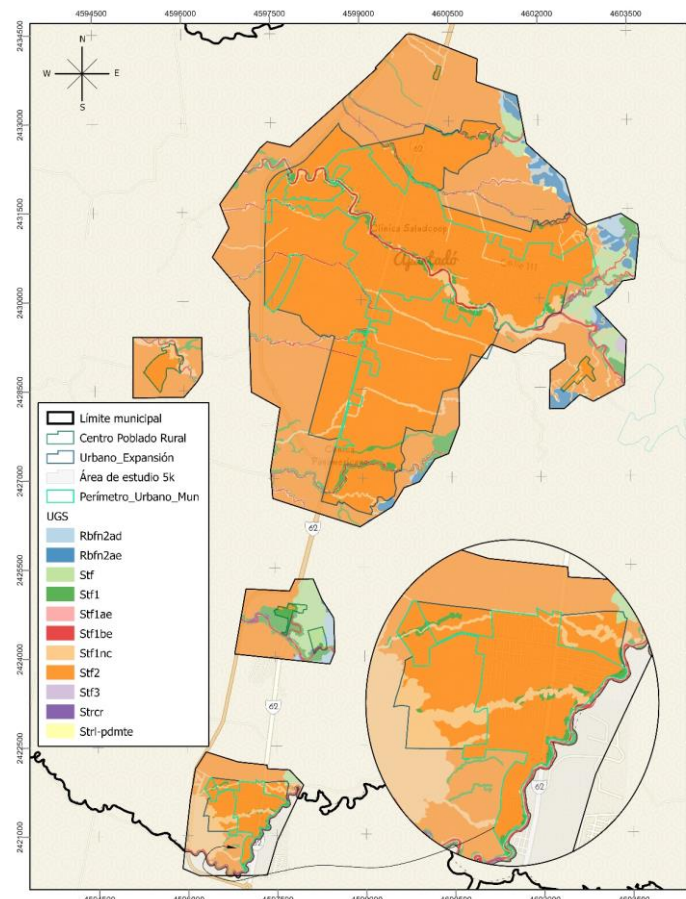


Figura 152. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano

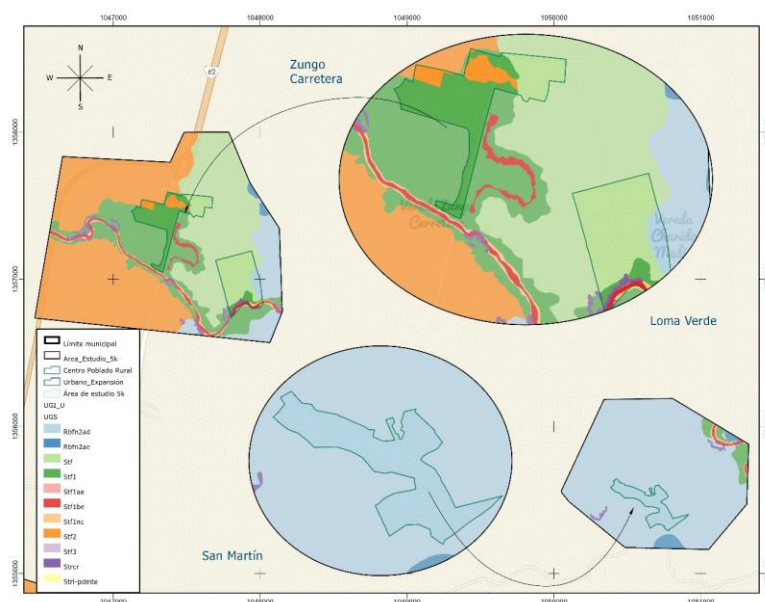


Figura 153. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

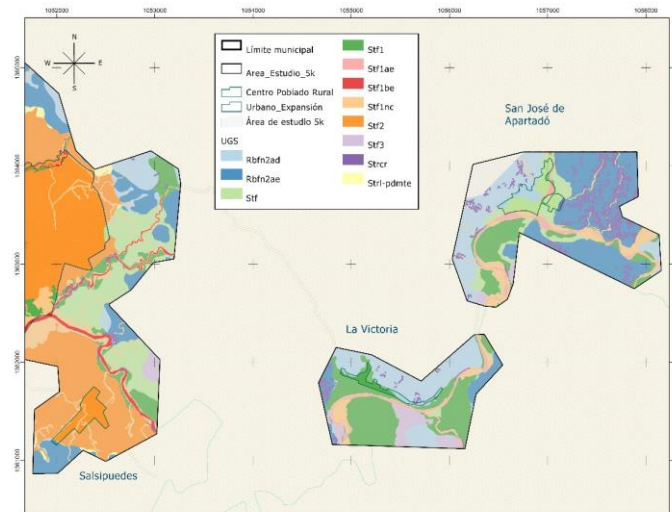


Figura 154. UGS -Zonas de comportamiento geotécnico urbano en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

Tabla 40. Parámetros de comportamiento de los materiales presentes en superficie en suelo urbano y centros poblados evaluados en escala 1:5.000

UGS	Phi	C	gamma	espesor
Strl-pdmte	16,846	23,504	18,859	14,532
Strcr	22,969	16,616	15,750	5,675
Stf3	27,902	11,034	18,303	13,248
Stf3	27,428	10,799	19,615	10,664
Stf3	25,389	10,716	17,215	11,840
Stf3	26,996	9,071	19,695	14,235
Stf3	27,871	17,473	19,250	10,683
Stf3	27,149	13,503	19,578	14,228
Stf3	25,142	11,799	17,162	9,549
Stf2	27,623	10,717	19,239	8,538
Stf2	25,500	13,522	19,883	37,356
Stf2	26,467	14,470	19,304	13,566
Stf1nc	28,943	18,445	19,733	29,435
Stf1be	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1be	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1ae	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1	32,944	14,334	18,729	12,776
Stf1	32,725	14,767	19,935	11,006
Stf1	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1	31,715	15,743	18,723	14,474
Stf1	30,819	8,990	19,880	14,030
Stf1	28,642	8,334	18,893	9,138
Stf1	29,799	13,214	17,834	16,811

UGS	Phi	C	gamma	espesor
Stf1	29,864	16,007	19,844	14,982
Stf1	29,300	14,133	19,193	11,703
Stf1	28,875	8,830	18,866	10,244
Stf	25,867	15,312	19,376	9,406
Stf	27,978	11,412	18,475	12,945
Stf	27,563	13,188	17,789	9,673
Stf	25,012	14,769	17,846	11,870
Stf	27,691	12,869	19,669	12,886
Stf	25,694	8,356	17,562	12,714
Stf	27,045	15,888	18,017	10,434
Stf	25,204	16,748	19,598	7,521
Stf	25,747	14,267	19,908	14,172
Stf	27,293	8,652	19,015	7,718
Rbfn2ae	15,886	32,434	19,821	10,064
Rbfn2ae	17,936	27,991	19,862	9,344
Rbfn2ad	16,000	26,359	19,123	8,810
Rbfn2ad	16,680	29,272	19,013	14,670
Rbfn2ad	17,531	31,999	19,062	12,493
Rbfn2ad	16,149	32,711	17,256	8,103
Rbfn2ad	16,556	32,219	18,342	9,174
Rbfn2ad	15,887	27,353	18,219	12,534
Rbfn2ad	15,439	33,491	17,451	11,738

9. Geomorfología

Dentro de la caracterización de las condiciones de riesgo es fundamental analizar los procesos que generan las formas del relieve, los cuales ayudan a determinar origen, ambiente, intensidad y a entender las fuerzas que permiten la formación de las formas del terreno sobre la que se asienta actualmente el ser humano; entender este tipo de procesos permite identificar y prever eventos posgenéticos y singenéticos. Una de las aplicaciones más usadas en el análisis de las formas del terreno es la identificación de áreas propensas o afectadas por eventos amenazantes naturales como lo son avenidas torrenciales, movimientos en masa e inundaciones, entre otros.

La evaluación del componente geomorfológico se elabora utilizando los criterios para cartografiar geoformas mediante aspectos morfogenéticos (Carvajal, 2012), metodología oficialmente utilizada para caracterizar unidades geomorfológicas por el Servicio Geológico Colombiano – SGC. La interpretación se realiza hasta llegar al nivel de componente geomorfológico, en escala 1:10.000, logrando identificar 48 tipos de unidades, subunidades y elementos geomorfológicos en el área rural del municipio.

Este ejercicio parte de un análisis de información precedente, a la que se suma la caracterización previa de unidades geológicas, lo cual permite elaborar un análisis geológico geomorfológico evolutivo, realizar una fotointerpretación geomorfológica que se retroalimenta con las observaciones geológicas y geomorfológicas locales, generadas en oficina y campo. Con respecto a las labores de campo se identifican y caracterizan formas del terreno al nivel de subunidad y componente geomorfológico. En general se

observan geoformas de origen fluvial, estructural y denudacional, grandes mesetas y valles y unidades sedimentarias falladas y deformadas.

9.1 Geomorfología regional

La zona de estudio se ubica en el noroccidente colombiano, dentro del extremo norte del departamento de Antioquia, hacia la parte septentrional de la Cordillera Occidental, en lo que geográficamente se denomina la Serranía de Abibe y la zona sur del Golfo de Urabá (Bahía Colombia), al cual drenan sus aguas el río León y Turbo.

Geológicamente, el municipio de Apartadó se ubica principalmente en el límite occidental del Cinturón Plegado del Sinú (hacia el margen oriental de la zona de estudio), en el que se presentan rocas sedimentarias detríticas, calcáreas e ígneas cuyas edades van desde el Neógeno hasta el Plioceno y que corresponden a un prisma acrecido. Debido al complejo estilo tectónico presente en esta región del país, las rocas han estado sometidas a procesos de deformación dúctil y frágil dejando en el terreno, a nivel regional, una morfología característica, siendo los rasgos lineales, arqueamientos y plegamientos de las estructuras, elementos frecuentes en el área.

La zona que corresponde al Cinturón Plegado de Sinú presenta un relieve montañoso y colinado, el cual recorre de norte a sur el margen oriental del municipio, con elevaciones hasta de 1100 msnm. En este sector se encuentran unidades geomorfológicas que responden a una génesis denudacional tales como laderas, cerros residuales, lomos y sierras denudadas; un ambiente estructural el cual agrupa cuevas, pliegues homoclinales, anticlinales, sierras, lomos y colinas estructurales, los cuales se encuentran alineados en una tendencia regional en dirección N-S, con claras expresiones lineales y arqueamiento de las estructuras debido al estilo tectónico de la región.

La zona de piedemonte está caracterizada por un corredor de lomeríos que da paso a un conjunto de abanicos coalescentes para luego continuar hacia el occidente del municipio, dominada por una topografía de bajo relieve producto de la dinámica fluvial de los ríos que drenan el área como lo son el río Grande, Apartadó, Vijagual, Currulao y Mulatos, entre otros, los cuales vierten sus aguas en los ríos León y Turbo, que finalmente desembocan en el sur del Golfo de Urabá.

En el área de planicies, la génesis de las geoformas corresponde a un ambiente fluvial, donde se presentan dentro de la zona de inundación de los cauces, terrazas aluviales, planos lacustres, zonas de divagación de cauce activo, meandros abandonados, lagunas y planos anegadizos. Los drenajes en estas zonas planas han desarrollado patrones meándricos con alto potencial de socavación y un complejo sistema de barras de canal, las cuales en algunos sitios son explotadas como materiales de construcción. Los cauces muestran un comportamiento muy dinámico, favorecido por el régimen climático de la zona, dándose migración y socavación de las márgenes y en la mayoría de los casos el desbordamiento de las aguas.

Los procesos morfodinámicos imperantes están relacionados a la acción de las aguas, actuando como detonante para la ocurrencia de procesos de erosión, la desestabilización de las laderas bien sea en forma de deslizamientos o flujos, o a través de los eventos de inundación.

9.2 Proceso metodológico

Para la obtención del mapa geomorfológico a nivel de "*componente*", que responde a las necesidades de la zonificación de la gestión de riesgo, se siguió la metodología propuesta por Carvajal (2012), quien sugiere un análisis del terreno desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local, siendo la *Subunidad Geomorfológica* y el *Componente Geomorfológico* las unidades de cartografía. La definición de cada uno de estos rangos de clasificación se presenta en los siguientes apartados.

Geomorfoestructura: extensas áreas geográficas o amplios espacios continentales o intercontinentales, caracterizados por estructuras geológicas y topográficas regionales. Ejemplo de esta categoría son cratones, escudos, plataformas, grandes cuencas, cinturones orogénicos y valles en rift. Escala de trabajo: < 1:2'500.000.

Provincia Geomorfológica: regiones que agrupan geoformas similares definidas por un macro relieve y una génesis geológica similar. Localmente corresponden a las regiones naturales y los terrenos geológicos de Colombia, demarcados por fallas regionales y continentales definidas o inferidas. Se definen los términos tales como: cinturones montañosos, llanuras, peneplanicies, cordilleras y serranías. Escala de trabajo entre 1:1'000.000 y 1:500.000.

Región Geomorfológica: geoformas asociadas a la génesis de los paisajes, definidas dentro de un ambiente morfogenético específico y afectados por procesos dinámicos parecidos. Permite agrupar áreas equivalentes a vertientes contenidas en una provincia geomorfológica que representen un ambiente genético particular con condiciones climáticas homogéneas. Escala de trabajo entre 1:250.000 y 1:500.000.

Unidad Geomorfológica: componen la categoría anterior y corresponden a formas genéticamente homogéneas a partir de un proceso constructivo o destructivo dentro de un ambiente geomorfológico particular. Agrupan los elementos básicos que constituyen un paisaje, definidos con criterios genéticos, morfológicos y geométricos. Escala de trabajo entre 1:50.000 y 1:100.000.

Subunidad Geomorfológica: definidas por diferencias morfológicas y morfométricas que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, expresados por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación. Escala de trabajo entre 1:10.000 y 1:25.000.

9.2.1 Ambientes Morfogenéticos

Un ambiente morfogenético agrupa las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las que se dio el desarrollo de las unidades geomorfológicas. Su determinación se realiza a través de la interpretación de los procesos morfológicos expresados en el terreno, los cuales dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las geoformas existentes. Estos se agrupan en nueve (9) categorías cuya distinción cartográfica se hace a partir de colores.

9.2.1.1 Ambiente Morfoestructural

Geoformas originadas por la dinámica interna de la tierra, asociadas a plegamientos y fallamientos. Abarca a su vez las formas originadas por la tectónica activa que se ha extendido hasta el Cuaternario. Se emplean tonos púrpuras para su representación.

9.2.1.2 Ambiente Volcánico

Asociado a las regiones donde predominan las geoformas volcánicas por la emisión de material efusivo procedente del interior de la tierra. Se emplean los tonos rojos para su representación.

9.2.1.3 Ambiente Denudacional

Determinado por procesos de meteorización y erosión, particularmente aquellos que involucran la erosión de tipo hídrica y por los fenómenos de transposición o de movimientos en masa que ejercen su acción sobre las geoformas preexistentes. Se emplean los tonos marrones para su representación.

9.2.1.4 Ambiente Fluvial

Agrupar las geoformas generadas por los procesos propios de la dinámica de las corrientes fluviales encausadas. Se emplean los tonos azules para su representación.

9.2.1.5 Ambiente Marino Profundo y Costero

Geoformas producto de la actividad de las corrientes marinas y el oleaje costero. Se emplean los tonos verdes para su representación.

9.2.1.6 Ambiente Glacial

Geoformas originadas por la acción de los glaciares, tanto de los casquetes polares como en las altas montañas. Se emplean los tonos grises para su representación.

9.2.1.7 Ambiente Eólico

Geoformas originadas por la acción del viento como agente modelador del paisaje, principalmente en zonas desérticas. Se emplean los tonos amarillos para su representación.

9.2.1.8 Ambiente Kárstico

Geoformas producto de la meteorización y disolución de rocas y materiales propensos a estos procesos en ambientes húmedos y cálidos, tales como las calizas y la salares. Se emplean los tonos naranjas para su representación.

9.2.1.9 Ambiente Antropogénico y/o Biológico

Geoformas producto de la actividad del hombre que modifica la superficie del terreno. Se emplean tonos marrones oscuros para su representación.

9.2.2 Atributos para la caracterización del relieve

La valoración del relieve se realiza a través de atributos cuantificables que permiten la caracterización de las diferentes subunidades dentro de un ambiente geomorfológico particular. Los parámetros principales evaluados en la estandarización de los componentes del terreno propuestos en la metodología de Carvajal (2012) y Leiva *et al.* (2012) son:

Morfología: corresponde a los gradientes topográficos y las formas relativas.

Morfometría: son los aspectos cuantitativos de la longitud, forma, pendientes y la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales. Los componentes del terreno para su descripción son:

- a) **Contraste de relieve o relieve relativo:** es la diferencia de la altitud en la geoforma entre la parte más alta y la más baja de esta. No está relacionado con la altura respecto a nivel del mar (Tabla 41).

Tabla 41. Rangos de intervalos de altura o relieve relativo. Fuente: Leiva *et al.* (2012)

Índice de relieve	Descripción del relieve	Resistencia relativa del material
< 50 m	Muy bajo	Materiales muy blandos y erosionables
50 – 250 m	Bajo	Blando erosionable
250 – 500 m	Moderado	Moderadamente blando y erosión alta
500 – 1000 m	Alto	Resistente y erosión moderada
1000 – 2500 m	Muy Alto	Muy resistente y erosión moderada
> 2500 m	Extremadamente Alto	Extremadamente resistente y erosión muy baja

- b) Longitud de la ladera:** es un indicador de la homogeneidad del material que constituye la geoforma (Tabla 42).

Tabla 42. Rango de longitud de ladera Fuente: Leiva et al. (2012)

Longitud (metros)	Descripción
< 50	Muy corta
50 - 250	Corta
250 - 500	Moderadamente larga
500 - 1000	Larga
1000 - 2500	Muy larga
> 2500	Extremadamente larga

- c) Inclclinación de la ladera:** ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal.

Tabla 43. Rangos de pendientes para estudios geomorfológicos. Fuente: Leiva et al. (2012)

Inclinación (grados)	Descripción	Características del material y comportamiento
0 – 5	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a los movimientos en masa (MM)
6 – 10	Inclinada	Blanda y baja susceptibilidad a MM
11 – 15	Muy Inclinada	Moderadamente blanda y Moderada susceptibilidad a MM
16 – 20	Abrupta	Moderadamente resistente y Moderada susceptibilidad a MM
21 – 30	Muy Abrupta	Resistente y Alta susceptibilidad a MM
31 – 45	Escarpada	Muy resistente y Alta susceptibilidad a MM
45 – 90	Muy Escarpada	Extremadamente resistente, Alta susceptibilidad a MM

- d) Forma de la ladera:** parámetro que refleja la homogeneidad de la resistencia de los materiales o control de estructuras geológicas y condiciona los tipos de movimientos en masa que puedan desarrollarse (Tabla 44).

Tabla 44. Clasificación forma de la ladera. Fuente: Leiva et al. (2012)

Clase	Características materiales	Movimientos en masa asociados
Recta	Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente	Movimiento Traslacional
Cóncava	Material blando y disposición estructural no diferenciada	Deslizamiento Rotacional
Convexa	Materiales blandos y disposición estructural casi horizontal	Meteorización y Erosión. Pequeños Deslizamientos Rotacionales
Irregular / Escalonada	Materiales con resistencia variada Disposición estructural en contra de la pendiente	Caída de Bloques Erosión Diferencial
Compleja	Mezcla de materiales. Disposición estructural no definida	Deslizamientos Complejos

- e) Patrón del drenaje:** es la distribución de todos los canales de drenaje superficiales en un área ocupada o no por aguas permanentes (Figura 155).

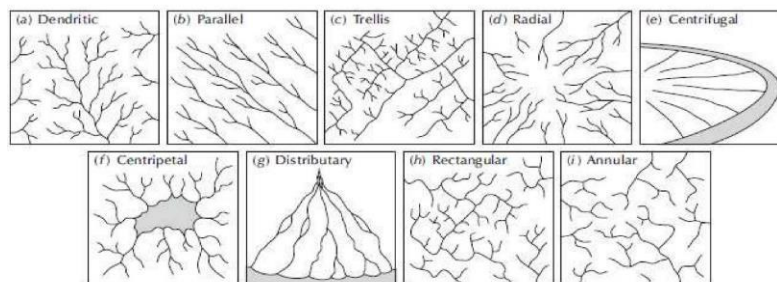


Figura 155. Patrón de drenaje controlado por estructura o pendiente. Fuente: Leiva et al. (2012)

- f) **Forma de crestas y valles:** corresponde a la divergencia entre las formas características que presenta el relieve, es un parámetro de agrupamiento establecido en la apariencia superficial de la geoforma (Tabla 45).

Tabla 45. Forma de cresta y valle. Fuente: Leiva et al. (2012)

Forma de cresta	Forma de valle
Aguda	Artesa
Redondeada	Forma de V
Convexa amplia	Forma de U
Convexa plana	
Plana	
Plana disectada	

Morfogénesis: implica el origen de las formas del terreno, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje, estas variables dependen de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos que actúan sobre la superficie terrestre.

Morfoestructura y litología: indica el modelaje del relieve según composición, disposición y dinámica interna de la tierra. Esta variable incide en el modelaje del paisaje según su condición pasiva o activa.

Morfocronología: indica la edad relativa o absoluta de cada una de las geoformas del terreno, la cual puede ser el tiempo de su formación o de los procesos que marcaron su desarrollo posterior. En general, las geoformas más grandes son más duraderas, mientras que las pequeñas son rápidamente construidas o destruidas.

Morfografía: corresponde a una descripción cualitativa de las geoformas (Tabla 46).

Tabla 46. Calificación del atributo morfografía. Fuente: (Carvajal, 2012)

Morfografía	Pendientes (%)	Elevaciones (m)
Plano o casi plano	0 - 2	< 5
Ondulado / Suavemente inclinado	3 - 7	5 - 50
Ondulado redondeado/ Inclinado	8 - 13	25 -75
Colinado - redondeado / Moderadamente empinado	14 - 20	50 - 200
Colinado fuertemente disectado / Empinado	21 - 55	200 - 500
Fuertemente disectado -montañoso/ Muy empinado	56 - 140	500 - 1000
Montañoso /Extremadamente empinado	> 140	> 1000

Morfodinámica: trata los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve, son los responsables del estado actual del paisaje.

Para que se tenga transporte, arrastre y sedimentación de los productos originados por la meteorización y la erosión, se requieren agentes morfodinámicos, donde los más importantes son la escorrentía del agua lluvia, las olas, corrientes costeras y de marea, los glaciales, el viento y medios antrópicos. En este mismo atributo se establece el criterio del modelado, el cual tiene en cuenta el aspecto de construcción (agradación) y destrucción (degradación) de la geoforma. Estos procesos hacen referencia a los cambios físicos y químicos que generan modificación de los materiales y las formas superficiales de la Tierra,

definiendo un equilibrio dinámico de las geoformas; siendo específicos de cada ambiente morfogenético, afectando y modelando la superficie del terreno con diferentes grados de intensidad. Bajo esta dinámica natural, intervienen procesos morfodinámicos en el modelado del relieve que agrupan los eventos de inundación, avenidas torrenciales y la erosión fluvial que varía desde laminar hasta barrancos.

9.2.2.1 Pendientes

Según los rangos de clasificación requeridos para la interpretación de subunidades geomorfológicas (Figura 156) los relieves oscilan entre planos, en la gran mayoría del área de estudio a suavemente inclinados, lo que es claramente coherente con las unidades de planicie y su respectiva transición de piedemonte.

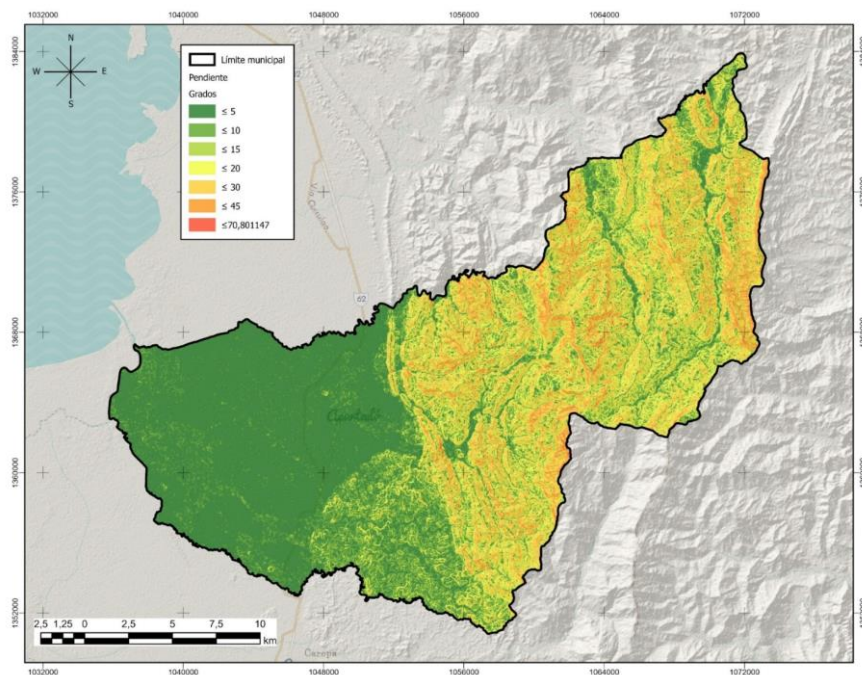


Figura 156. Pendientes

9.3 Geomorfología local

Dentro de la caracterización de las condiciones de riesgo es fundamental analizar los procesos que generan las formas del relieve los cual ayudan a determinar origen, ambiente, intensidad y a entender las fuerzas que permiten la formación de las formas del terreno sobre la que se asienta actualmente el ser humano, entender este tipo de procesos permite identificar y prever eventos posgenéticos y singenéticos. Una de las aplicaciones más usadas en el análisis de las formas del terreno es la identificación de áreas propensas o afectadas por eventos amenazantes naturales como lo son avenidas torrenciales, movimientos en masa e inundaciones, entre otros.

La evaluación del componente geomorfológico se elabora utilizando la metodología geomorfológica con criterios morfogenéticos (Carvajal, 2012), metodología oficialmente utilizada para caracterizar unidades geomorfológicas por el Servicio Geológico Colombiano – SGC. La interpretación se realiza hasta llegar al nivel de componente geomorfológico, en escala 1:10.000, logrando identificar 47 tipos de geoformas en el municipio. Este ejercicio parte de un análisis geológico geomorfológico evolutivo, que se retroalimenta con las observaciones geológicas locales, generadas en oficina y campo. Con respecto a las labores de campo se identifican y caracterizan formas del terreno al nivel de subunidad y componente geomorfológico; en general se observan geoformas de origen fluvial, estructural y denudacional, grandes



Tabla 47. Subunidades geomorfológicas identificadas en el área rural

Provincia	Región	Unidad	Subunidad	Componente	Código	
Planicies y fosas del Pacifico Provincia Sinú	Sierra Estructural	Cuestas estructurales	Cuesta	Cuesta	Sc	
				Ladera estructural de cuesta	Scle	
				Ladera de contrapendiente de cuesta	Sclc	
		Colina estructural				Sces
		Espinazo				Se
		Lomos				Sl
		Plancha				Sp
		Sierra				Ss
		Sierra Anticlinal	Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal		Ssalc	
			Ladera estructural de sierra anticlinal		Ssale	
		Sierra Homoclinal	Sierra homoclinal		Ssh	
			Ladera estructural de sierra homoclinal		Sshle	
			Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal		Sshlc	
		Sierra Sinclinal	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal		Ssslc	
			Ladera estructural de sierra sinclinal		Sssle	
	Ladera Estructural	Laderas	Ladera estructural		Sle	
	Sierra Denudacional	Cono o Lóbulo Coluvial	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión		Dco	
		Loma	Colina remanente disectada		Dcred	
		Cerros	Cerro remanente o relicto		Dcrem	
			Cerro residual		Dcrs	
		Loma	Loma denudada	Loma denudada	Dld	
				Loma denudada suavemente inclinada	Dldsi	
			Loma residual	Loma residual	Dlor	
		Lomo	Lomo denudado	Lomo denudado	DIde	
				Lomo denudado bajo de longitud corta	DIdebc	

Provincia	Región	Unidad	Subunidad	Componente	Código
				Lomo denudado moderado de longitud media	Dldemm
		Lomeríos	Lomerío disectado	Lomeríos disectados	Dldi
				Lomeríos muy disectados	Dlmd
				Lomeríos poco disectados	Dlpd
		Laderas	Ladera erosiva	Ladera erosiva	Dle
			Ladera ondulada	Ladera ondulada	Dlo
		Montículos	Montículos denudacionales	Montículo y ondulaciones denudacionales	Dmo
		Sierras	Sierra denudada		Dsd
Planicies y fosas del Pacífico Provincia Urabá	Planicies Aluviales	Abanico	Abanico	Abanico fluviotorrencial	Faa
				Escarpe de abanico fluvial	Fea
				Abanico aluvial antiguo	Faaa
		Valle	Barras	Barra compuesta	Fbc
				Barra puntual	Fbp
			Cauce aluvial		Fca
			Meandro abandonado		Fma
			Plano o llanura de inundación		Fpi
			Planicie y delta lacustre		Fpla
		Terrazas	Terraza de acumulación	Terraza de acumulación	Fta
				Terraza de acumulación antigua	Ftan
				Escarpe de terraza de acumulación	Ftae
				Terraza de acumulación sub-reciente	Ftas

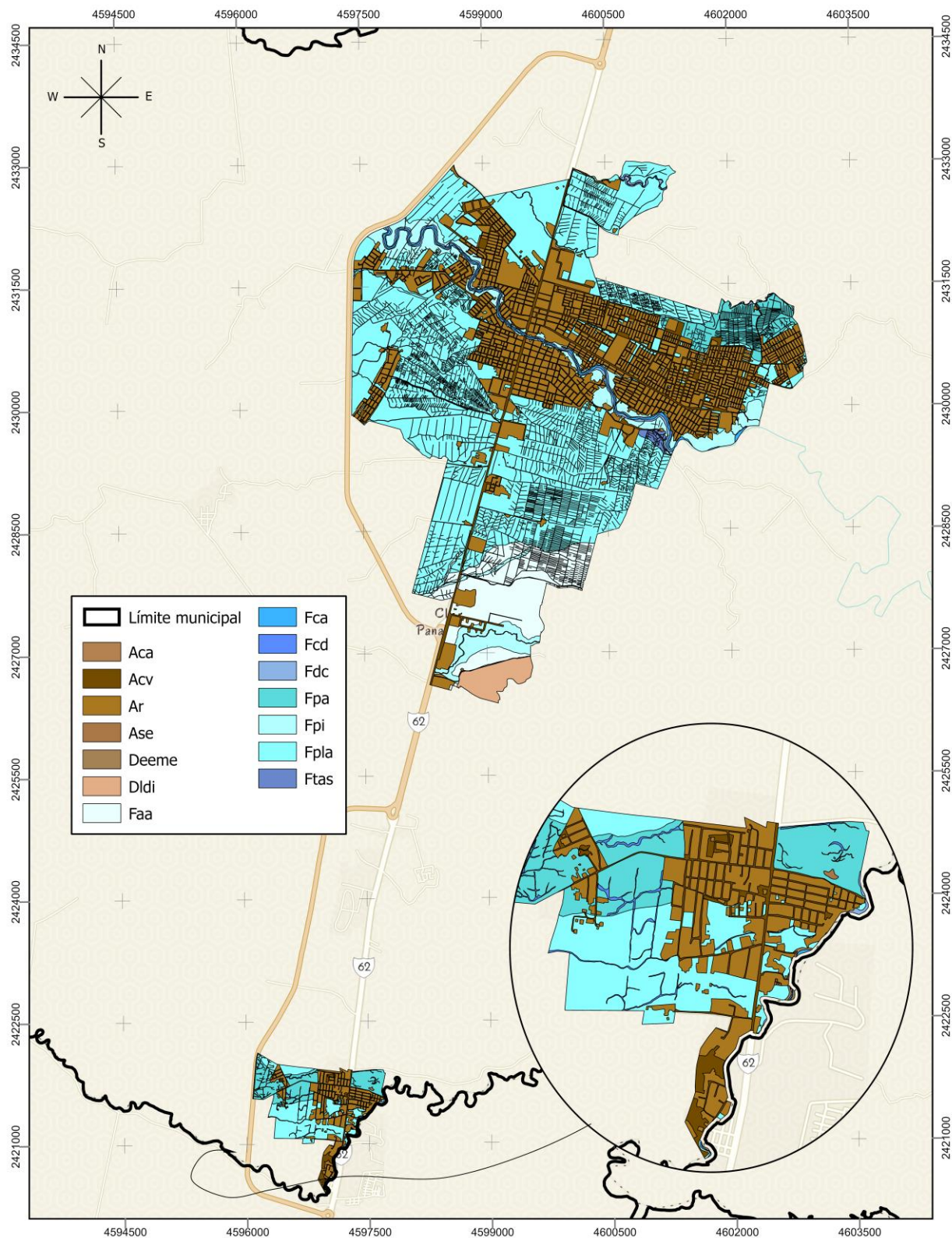


Figura 158. Geomorfología urbana

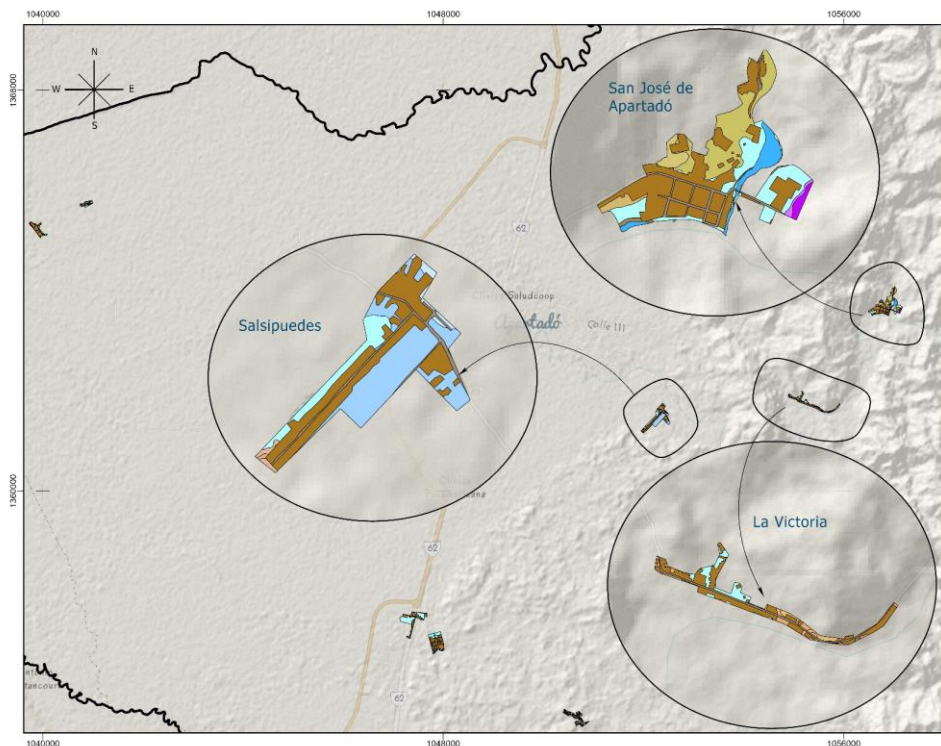


Figura 159. Geomorfología centros poblados Salsipuedes, La Victoria y San José de Apartadó

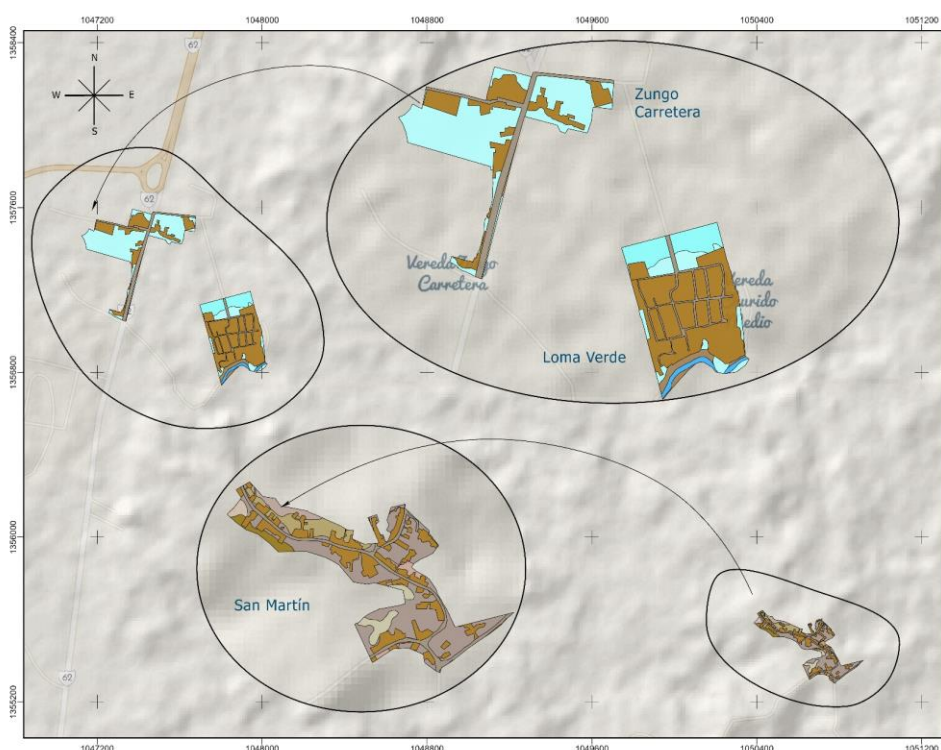


Figura 160. Geomorfología centros poblados San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

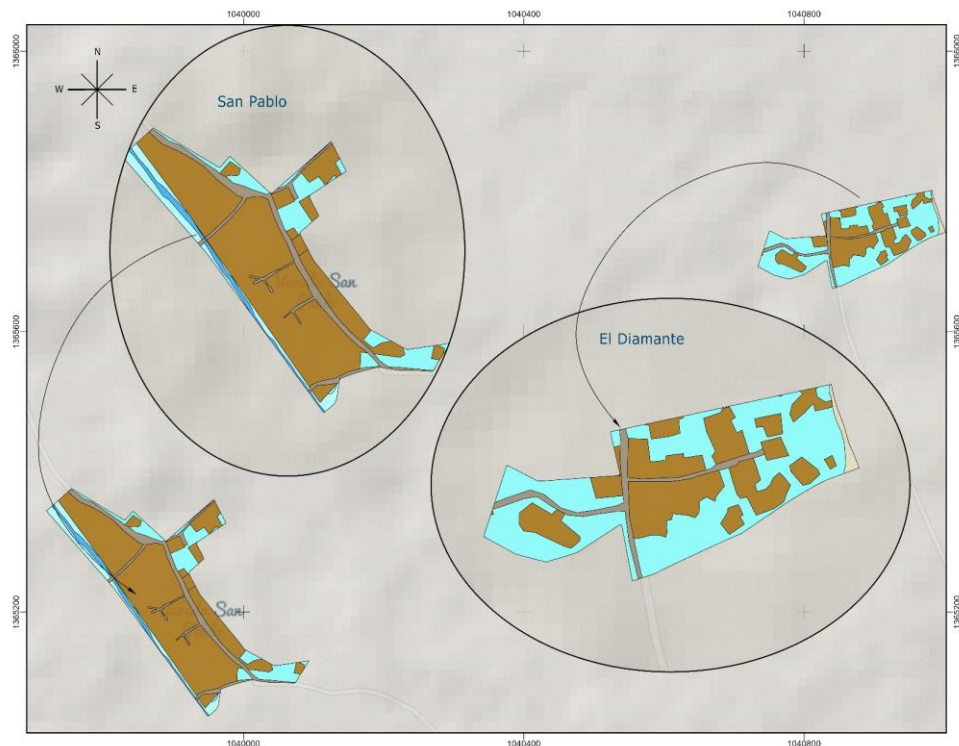


Figura 161. Geomorfología centros poblados El Diamante y San Pablo

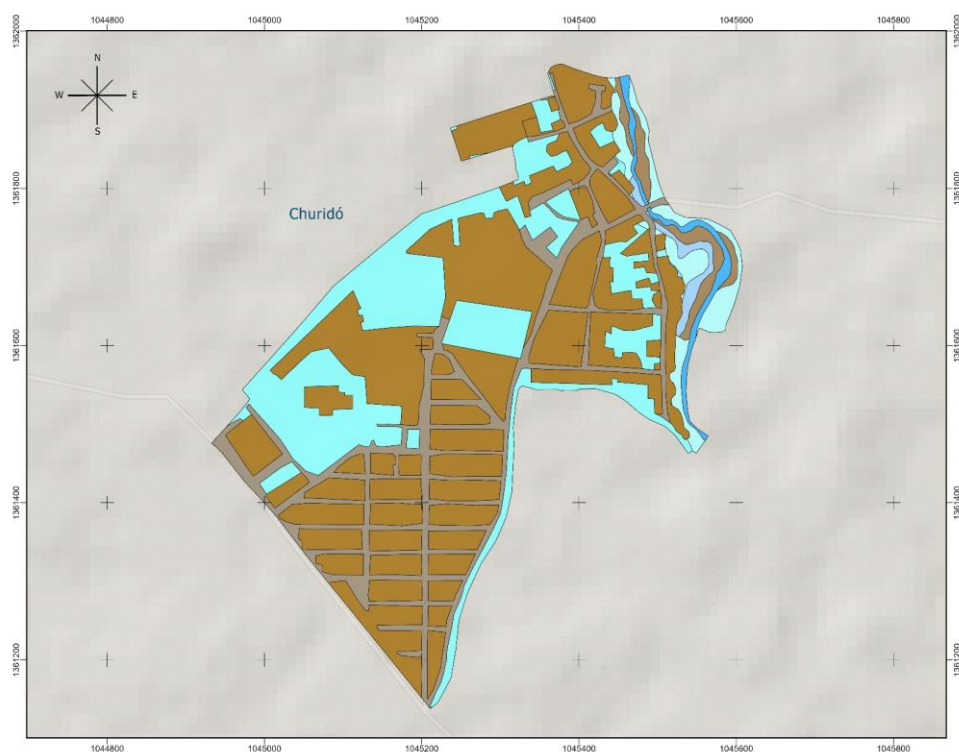


Figura 162. Geomorfología centro poblado Churidó

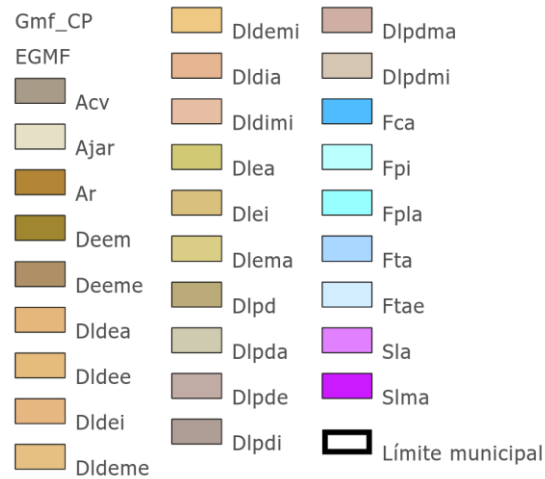


Figura 163. Leyenda geomorfología centros poblados

Tabla 48. Subunidades geomorfológicas identificadas en el área urbana y CP evaluados en escala 1:5.000

Provincia	Región	Unidad	Subunidad	Componente	Código
Planicies y fosas del Pacífico Provincia Sinú	Sierra Estructural	Lomos		Lomos abruptos	Sla
		Lomos		Lomos muy abruptos	Slma
	Sierra Denudacional	Lomo	Lomo denudado	Lomo denudado inclinado	Dldei
				Lomo denudado muy inclinado	Dldemi
				Lomo denudado abrupto	Dldea
				Lomo denudado escarpado	Dldee
				Lomo denudado muy escarpado	Dldeme
		Lomeríos	Lomerío disectado	Lomeríos disectados	Dldi
				Lomeríos disectados abruptos	Dldia
				Lomeríos disectados muy inclinados	Dldimi
			Lomerío poco disectado	Lomeríos poco disectados	Dlpd
				Lomeríos poco disectados abruptos	Dlpda
				Lomeríos poco disectados muy abruptos	Dlpdma
				Lomeríos poco disectados inclinados	Dlpdi
				Lomeríos poco disectados muy inclinados	Dlpdmi
				Lomeríos poco disectados escarpados	Dlpde
		Laderas	Ladera erosiva	Ladera erosiva inclinada	Dlei
				Ladera erosiva abrupta	Dlea

Provincia	Región	Unidad	Subunidad	Componente	Código	
Planicies y fosas del Pacífico Provincia Urabá				Ladera erosiva muy abrupta	Dlema	
			Esparpes erosivos	Escarpe de erosión menor	Deeme	
				Escarpe de erosión mayor	Deem	
	Planicies Antrópicas	Canteras			Aca	
		Campos de llenos antrópicos			Ar	
		Talud vial			Acv	
		Jarillón			Ajar	
		Excavación			Asemc	
	Planicies Aluviales	Abanico	Abanico	Abanico fluviotorrencial		Faa
		Valle	Cauce aluvial			Fca
			Cuenca de decantación			Fcd
			Divagación de cauce activo			Fdc
			Plano anegadizo			Fpa
			Plano o llanura de inundación			Fpi
			Planicie y delta lacustre			Fpla
		Terrazas	Terraza de acumulación	Terraza de acumulación		Fta
				Escarpe de terraza de acumulación		Ftae
				Terraza de acumulación sub-reciente		Ftas

9.3.1 Ambiente antropogénico

Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno. Las geoformas de este tipo de ambiente se localizan mayormente hacia el centro oeste del municipio, en donde se limitan los caseríos, centros poblados y zonas industriales.

9.3.1.1 Campos de llenos antrópicos (Ar)

Planos hechos artificialmente con material de relleno para acondicionar terrenos anegadizos para la construcción de viviendas. Técnicamente son de gravas, bloques y arena bien compactados, sin embargo comúnmente son de escombros y desechos de construcción. Esta geoforma se presenta en cada centro poblado rural y en la cabecera municipal.



Figura 164. Rellenos antrópicos en la cabecera municipal

9.3.1.2 Canal Artificial (Aca)

Canales construidos para dragado, rectificación de cauces para facilitar la navegación, para la canalización de ríos o quebradas en zonas urbanas y localmente para el abastecimiento de agua. Esta geoforma se presenta en las veredas El Diamante, San Pablo, Zungo Carretera y principalmente en el área de expansión urbana.

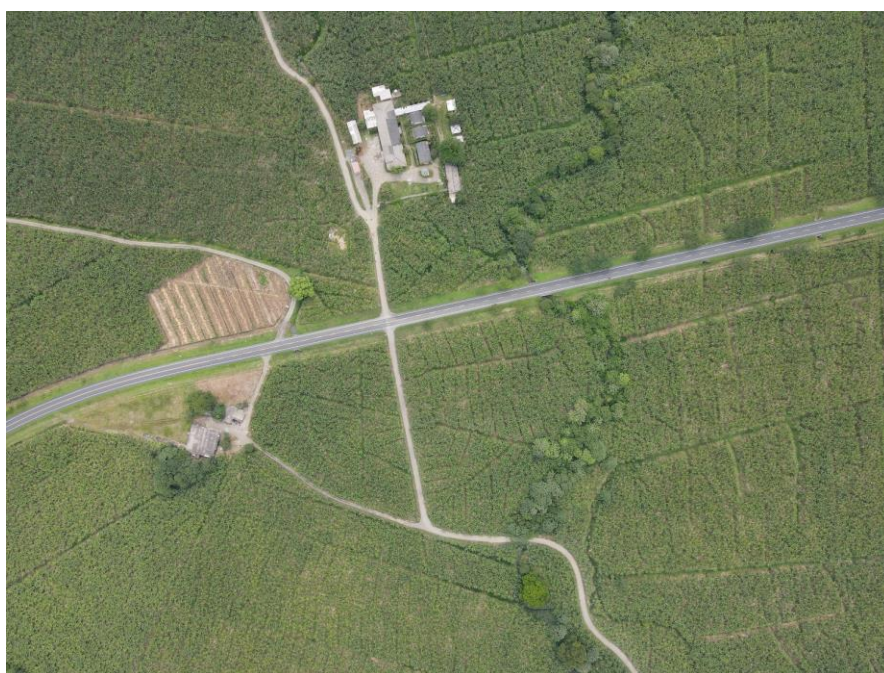


Figura 165. Canales artificiales en área de expansión urbana

9.3.1.3 Talud vial (Acv)

Cortes de laderas y adecuaciones de taludes para el desarrollo de las vías de infraestructura y desarrollo. Esta geoforma se presenta en cada centro poblado rural y en la cabecera municipal.



Figura 166. Red vial en la cabecera municipal

9.3.1.4 Jarillones (Ajar)

Relleno utilizado como barrera hecha de tierra y materiales desechables para evitar desbordamientos de ríos. Esta geoforma se observa en la parte baja del municipio, algunas hacia el margen izquierdo del río Grande.



Figura 167. Jarillón río Grande, vereda Puerto Girón. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019)

9.3.1.5 Excavaciones muy corta (Asemc)

Huecos de gran extensión y de profundidad variada entre 2 – 20 m, hechos de manera manual o con maquinaria pesada, son de paredes verticales. Esta geoforma en el caso del municipio de Apartadó se asocia a excavaciones de pequeña extensión para realizar reservorios de agua, principalmente para

adecuación de cultivos piscícolas o tanques, se observa en las veredas El Diamante, San Pablo, Zungo Carretera.



Figura 168. Excavaciones

9.3.2 Ambiente denudacional

Incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos. Las geoformas de este tipo de ambiente se localizan mayormente hacia el centro sur del municipio, en una franja estrecha en sentido N-S hacia el norte de Apartadó, en la región suroriente y hacia el límite noreste del área de estudio.

9.3.2.1 Cerro remanente o relicto (Dcrem)

Prominencias topográficas aisladas de morfología colinada, alomada o montañosa que sobresalen de la topografía circundante. La unidad presenta cimas agudas a redondeadas, laderas de longitud moderadamente corta a larga de forma convexa. Su origen se asocia a procesos de erosión y meteorización diferencial acentuada y antigua. Incluye los cerros semienterrados en sedimentos recientes. Esta geoforma se observa en las veredas La Balsa, La Victoria, La Unión y Arenas Bajas (Figura 169).



Figura 169. Cerro remanente o relicto

9.3.2.2 Colina remanente disectada (Dcred)

Prominencias topográficas aisladas con una altura entre 200 y 399 metros sobre su nivel de base local, que presenta una cima redondeada y estrecha limitada por laderas cortas a moderadamente largas de forma convexa y pendientes abruptas a escarpadas, un alto grado de disección de los drenajes, desarrollo de valles en U y un índice de relieve bajo a moderado. Su origen es relacionado a procesos de denudación intensos. La geoforma se encuentra expuesta entre las veredas La Unión y Buenos Aires (Figura 170).



Figura 170. Colina remanente disectada

9.3.2.3 Cerro residual (Dcrs)

Prominencia topográfica sobresaliente y aislada con morfología alomada o colinada, cimas redondeadas a planas y algunas veces onduladas con laderas rectas a convexas, largas a muy largas. La unidad presenta pendientes escarpadas asociadas a unidades competentes y el desarrollo de suelos residuales gruesos. Su origen se asocia a procesos intensos de meteorización diferencial que han actuado en climas tropicales húmedos. Este tipo de geoforma se encuentra exclusivamente en la zona central de la vereda Playa Larga (Figura 171).



Figura 171. Cerro residual

9.3.2.4 Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)

Estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja. Su origen es relacionado a procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidro-gravitacionales en suelos saturados y no saturados. Su depósito está constituido por bloques y fragmentos heterométricos de rocas preexistentes, embebidos en una matriz arcillosa a areno limo-arcillosa. Esta categoría de geoforma se encuentra distribuida en numerosos puntos a lo largo del municipio: hacia el sur en las veredas San Martín, Zungo Arriba y Churidó Sinaí; hacia el centro en las veredas Los Mandarinos, El Gas, El Guineo, Guineo Alto, Arenas Altas, El Cuchillo, La Unión, Buenos Aires, La Linda y Bellavista; y hacia el noreste en las veredas Playa Larga, Rodoxali y Sabaleta (Figura 172).



Figura 172. Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión

9.3.2.5 Escarpes erosivos (De)

Ladera abrupta de altura variable que puede formarse por distintas causas: tectónicas, por la abrasión (erosión fluvial), por procesos gravitacionales, glaciales, tectógenos. Eventualmente de longitud corta a larga, de forma recta, con pendiente escarpada a muy escarpada. En esta subunidad se incluyen los componentes de **Escarpe de erosión mayor (Deem)** y **Escarpe de erosión menor (Deeme)**, el primero definido como una ladera abrupta o a desplome de altura variable que puede formarse por

distintas causas: tectónicas, por la abrasión (erosión fluvial y marina), por procesos gravitacionales, glaciales, tectógenos. Eventualmente de longitud corta a larga, de forma cóncava, convexa y recta, con pendiente escarpada a muy escarpada. Y el último definido como una ladera abrupta o a desplome de longitud corta a larga, de forma cóncavoconvexa y eventualmente recta, con pendiente escarpada a muy escarpada, originado por socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje

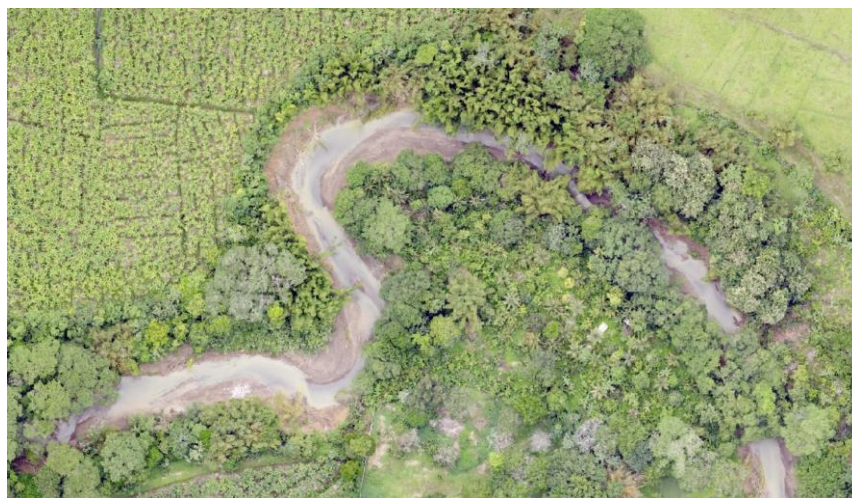


Figura 173. Escarpes de erosión menor en el río Zungo

9.3.2.6 Loma denudada (Dld)

Prominencia topográfica con una altura menor de 200 metros sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada, laderas cortas a muy cortas, convexas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas. Su origen es relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial. Se caracteriza por presentar movimientos en masa y procesos erosivos intensos. Esta geoforma se encuentra a manera de fajas alargadas principalmente en sentido N-S y se localiza al norte de Apartadó, entre las veredas El Osito, El Guineo, El Tigre, Arenas Altas, Arenas Bajas, La Unión y La Balsa; al sur entre las veredas La Miranda, La Plancha y La Pedrosa; al sureste entre las veredas La Esperanza, Las Nieves, Mulatos Cabecera y Mulatos Medio; así como en las veredas Rodoxali, La Hoz y Las Flores al nororiente del área de estudio (Figura 174).



Figura 174. Loma denudada

9.3.2.7 Loma denudada suavemente inclinada (Dldsi)

Prominencia topográfica con una altura menor de 200 metros sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada, laderas cortas a muy cortas, convexas y pendientes que no superan los cinco grados de inclinación. Su origen es relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial. Se caracteriza por presentar movimientos en masa y procesos erosivos intensos. Se observa hacia el centro de la vereda Las Flores (Figura 175).



Figura 175. Loma denudada suavemente inclinada

9.3.2.8 Lomo denudado (Dlde)

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico. Este tipo de geoforma se observa a manera de fajas, predominantemente orientadas en sentido NW-SE, ubicadas hacia el centro sur del municipio, en las veredas La Balsa, El Cuchillo, Salsipuedes, La Victoria, Churidó Sinaí, La Plancha, La Miranda, La Linda, Buenos Aires, La Cristalina, Miramar, La Pedrosa y La Danta; y en zonas dispersas de las veredas La Unión, Arenas Bajas, Mulatos Medio, La Resbalosa y Rodoxali (Figura 176). En el área de estudio incluye los componentes de: **Lomo denudado inclinado (Dldei)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo ligeramente bajo y pendientes entre los 6-10°; **Lomo denudado muy inclinado (Dldemi)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo ligeramente bajo y pendientes entre los 10-15°, **Lomo denudado abrupto (Dldea)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo bajo y pendientes entre los 16-20°; y **Lomo denudado escarpado (Dldee)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo moderado y pendientes entre los 31-45°.



Figura 176. Lomo desnudo

9.3.2.9 Lomo desnudo bajo de longitud corta (Dldebc)

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor que 250 m y la longitud del eje principal es menor que 250 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico. Este tipo de geoforma solo se observa al sur de la vereda La Danta (Figura 177).



Figura 177. Lomo desnudo bajo de longitud corta

9.3.2.10 Lomo desnudo moderado de longitud media (Dldemm)

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y el eje principal tiene una longitud entre 250 m y 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico. Este tipo de rasgo geomorfológico solo se observa al sur de la vereda La Danta (Figura 178).



Figura 178. Lomo denudado moderado de longitud media

9.3.2.11 Lomeríos disectados (Dldi)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas redondeadas y amplias, de laderas cortas a moderadamente largas de forma rectas, cóncavas y convexas, con pendientes muy inclinadas a muy abruptas, con índice de relieve bajo. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la moderada disección, generando valles en U con fondo redondeado a plano. Se presentan movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional con superficie de falla poco profundos. La geoforma se observa mayormente hacia el sur del municipio, entre las veredas Salsipuedes, Churidó Medio, Vijagual, La Plancha, San Martín, Zungo Arriba y La Danta; aunque también se identifica al norte entre las veredas El Osito y El Guineo; al sureste entre las veredas La Hoz, La Resbaloza, Mulatos Medio y Mulatos Cabecera; y al norte entre Rodoxali y Sabaleta (Figura 179). En el área de estudio incluye los componentes de: **Lomerío disectado muy inclinado (Dldimi)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo ligeramente bajo y pendientes entre los 10-15° y **Lomerío disectado abrupto (Dldia)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo bajo y pendientes entre los 16-20°.



Figura 179. Lomeríos disectados

9.3.2.12 Ladera erosiva (Dle)

Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o

una estructura. Esta geoforma se presenta exclusivamente entre las veredas Guineo Alto, Arenas Altas y La Unión (Figura 180).

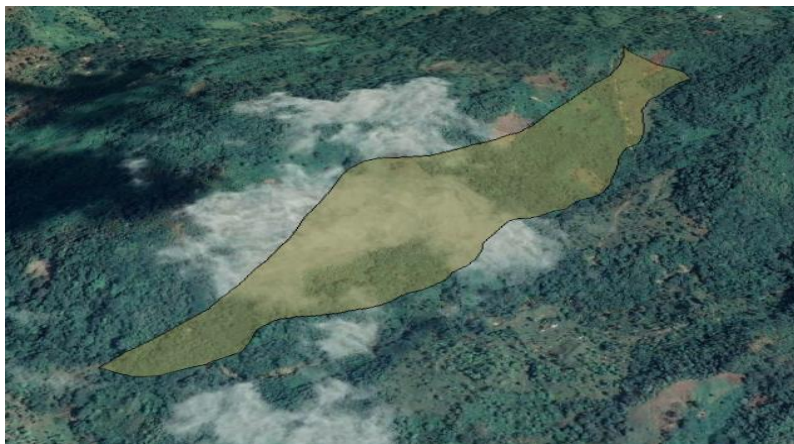


Figura 180. Ladera erosiva

9.3.2.13 Lomeríos muy disectados (Dlmd)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas agudas a redondeadas estrechas, de laderas cortas a moderadamente largas, de forma cóncava a rectas y pendientes abruptas a escarpadas, con índice de relieve bajo. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por la alta disección, generando valles en V. Estos lomeríos generalmente se encuentran en los bordes de altiplanos y frentes de erosión. En esta unidad los procesos que se presentan son movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional. La geoforma se observa mayormente hacia el norte de Apartadó, entre las veredas Salsipuedes, La Balsa, El Tigre, El Guineo, El Osito y Los Mandarinó, junto con una reducida área de la vereda Sabaleta (Figura 181).

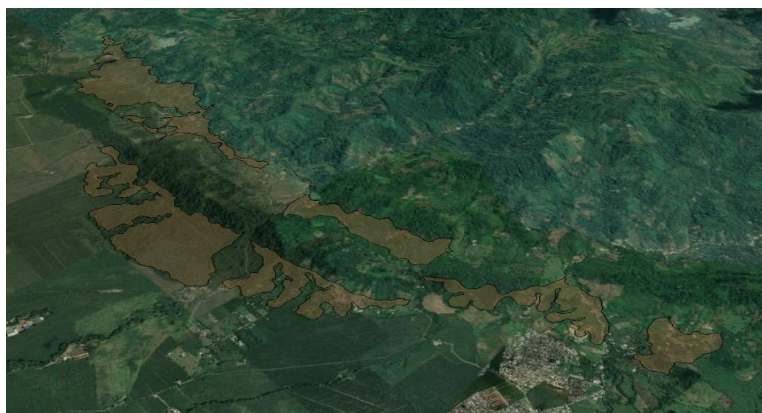


Figura 181. Lomeríos muy disectados

9.3.2.14 Lomeríos poco disectados (Dlpd)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, con cimas planas amplias y eventualmente redondeadas, de laderas muy cortas a cortas, de forma rectas, y eventualmente cóncavas y convexas, con pendientes inclinadas a muy abruptas, e índice de relieve muy bajo a bajo. En estos lomeríos los procesos de incisión son muy leves y generalmente estas unidades se encuentran en áreas centrales de altiplanos o alejados de los frentes erosivos. Son frecuentes procesos erosivos y reptación y eventualmente movimientos en masa tipo deslizamiento rotacional. Esta geoforma se observa principalmente hacia el sur,

en las veredas Churidó Medio, Churidó Sinaí, San Martín, La Pancha, La Miranda y La Danta; pero también se identifica en la vereda Arenas Bajas al norte del municipio. **Lomerío poco disectado inclinado (Dlpdi)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y pendientes entre los 6-10°, **Lomerío poco disectado muy inclinado (Dlpdmi)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y pendientes entre los 11-15°, **Lomerío poco disectado abrupto (Dlpda)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y pendientes entre los 16-20°, **Lomerío poco disectado muy abrupto (Dlpdma)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y pendientes entre los 21-30°; y **Lomerío disectado escarpado (Dlpde)**, el cual cuenta con un índice relativo entre 250 m y 1000 m y pendientes entre los 31-45°.



Figura 182. Lomeríos poco disectados

9.3.2.15 Loma residual (Dlor)

Prominencia topográfica con una altura menor de 200 metros sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada de laderas cortas a muy cortas, convexas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas, constituida por suelo residuales, cubiertos por niveles de material coluvial. Su origen es relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial. La categoría de Loma Residual se observa principalmente al noreste de Apartadó, en las veredas El Porvenir, La Esperanza, Playa Larga, Rodoxali y Las Flores (Figura 183).



Figura 183. Loma residual

9.3.2.16 Ladera ondulada (Dlo)

Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales. Esta categoría se observa en las veredas Playa Larga y La Esperanza (Figura 184).



Figura 184. Ladera ondulada

9.3.2.17 Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo)

Elevación del terreno con una altura menor de 50 metros sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Su origen es relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas blandas o friables y en sedimentos no consolidados, dispuestos de manera horizontal a ligeramente inclinados. Este tipo de geoforma se observa solamente al norte de la vereda Playa Larga (Figura 185).



Figura 185. Montículo y ondulaciones denudacionales

9.3.2.18 Sierra denudada (Dsd)

Prominencia topográfica de morfología montañosa y elongada de laderas largas a extremadamente largas, cóncavas a convexas, con pendientes muy inclinadas a abruptas, donde prevalecen procesos de erosión o de movimientos en masa acentuados. Su origen es relacionado a procesos de erosión acentuada en sustratos rocosos ígneos y metamórficos. La geoforma se presenta hacia el sureste del municipio, entre las veredas La Esperanza, Las Nieves y Mulatos Cabecera (Figura 186).



Figura 186. Sierra desnuda

9.3.3 Ambiente fluvial

Incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre. Las geoformas de este ambiente se presentan ampliamente extendidas hacia el occidente del municipio, así como asociadas a los principales cauces que se observan al norte del área de estudio.

9.3.3.1 Abanico fluviotorrencial (Faa)

Superficie en forma de cono, de laderas cóncavas a convexas de morfología plana, aterrazada. Su origen es relacionado a la acumulación torrencial y fluvial en forma radial, donde una corriente desemboca en una zona plana. Los depósitos aluviales se depositan radialmente desde el ápice del abanico localizado en la salida de la corriente de las montañas. Los canales fluyen cortando el abanico, siendo más profundos en el ápice del abanico y más someros al alejarse de él. Su tamaño puede alcanzar varios kilómetros de largo y de ancho. Este tipo de geoforma se observa hacia el centro suroeste del área de estudio, en las veredas Vijagual, Zungo Carretera, Churidó Puente, Churidó Medio y Salsipuedes.

9.3.3.2 Escarpe de abanico fluvial (Fea)

Plano subvertical de longitud muy corta a corta, cóncavo o convexo, presente en los bordes de la superficie del abanico. Su origen es relacionado a procesos de incisión de la red de drenaje tributaria. Pueden alcanzar varios metros en la medida que se acerque al ápice del abanico. Este tipo de escarpes se distingue en las veredas Salsipuedes, La Unión, Arenas Altas y Arenas Bajas.

9.3.3.3 Abanico aluvial antiguo (Faaa)

Superficie en forma de cono, de laderas cóncava y/o convexas de morfología plana, aterrazada, por acumulación torrencial y fluvial en forma radial donde una corriente desemboca en una zona plana. La geoforma se observa al norte de Apartadó, en las veredas La Unión, Arenas Altas y Arenas Bajas.

9.3.3.4 Barras compuestas (Fbc)

Superficie o conjunto de barras unitarias que pueden alcanzar decenas a cientos de metros lateralmente y varios kilómetros longitudinales. El espesor máximo es determinado por la profundidad del cauce. Su origen es relacionado al amalgamamiento de varias barras, como resultado de múltiples eventos de erosión

y sedimentación y/o por la reocupación de canales y cauces abandonados. Esta categoría se encuentra de manera muy puntual en las veredas Salsipuedes, Churidó Sinaí, La Victoria, en el límite entre las veredas La Unión, Bellavista y Las Playas, así como en el límite norte del municipio, en las veredas Los Mandarinos y Arenas Altas.



Figura 187. Barra compuesta río Apartadó

9.3.3.5 Barra puntual (Fbp)

Cuerpo en forma de medialuna de morfología suave ondulada, compuesta de crestas y artesas curvas de poca altura. Estos cuerpos se localizan en la parte cóncava de los meandros de los ríos, como producto de la acumulación de sedimentos erodados de la parte convexa del cauce. Su depósito está constituido por sedimentos generalmente arenosos finos y materiales arcillosos en las artesas. Cuando se dan procesos de migración lateral del cauce, la acumulación de este tipo de barras, pueden conformar conjuntos sencillos o complejos de oríllales. Este tipo de barras se observa en las veredas La Victoria, Las Playas, La Unión, Los Mandarinos y El Salto.



Figura 188. Barra puntual

9.3.3.6 Cauce aluvial (Fca)

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Estos cauces cuando recorren grandes distancias pueden formar lagunas y rápidos. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo. Dependiendo la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras unidades asociadas. Esta geoforma marca el trazado de los ríos en el municipio, destacándose los cauces al norte, oeste y noreste del área. Dentro de los ríos principales del municipio de Apartadó se encuentra su homónimo, río Apartadó el cual atraviesa en sentido este – oeste su cabecera municipal, es esta misma dirección atraviesan al municipio el río Grande, caño Vijagual, río Churidó, caño Vijagualito, entre otros, hacia la zona de alta montaña los ríos transitan sobre el municipio en sentido sur-norte como el es caso del río Mulatos y río Currulao.



Figura 189. Mosaico de imágenes del río Apartadó



Figura 190. Panorámica del río Apartadó

9.3.3.7 Meandro abandonado (Fma)

Sección en forma de curva del cauce de un río antiguo, Su origen es relacionado a la migración lateral de la corriente hacia la parte contraria de la concavidad o por el corte de la zona más angosta entre dos curvas consecutivas, que generan el estrangulamiento de un meandro. Su depósito está constituido por sedimentos finos arcillosos con intercalaciones de turba, producto del estancamiento de aguas. La geoforma se ubica de manera puntual en el centro de la vereda El Tigre.



Figura 191. Meandro abandonado

9.3.3.8 Plano o llanura de inundación (Fpi)

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de "U" o "V", al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. En regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, en red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial. Esta categoría corresponde a la más extensa en el área, pues ocupa casi toda la zona plana del oeste del municipio, junto con las áreas anegadizas de los ríos y quebradas del sur, centro y oriente de la zona de estudio.



Figura 192. Planicie de inundación

9.3.3.9 Planicie y delta lacustre (Fpla)

Superficie extensa de aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes de varios metros de altura. Su origen es relacionado al desplazamiento lateral del cauce de un río dentro de la llanura aluvial. Su depósito está constituido por arcillas con intercalaciones locales de arenas finas con niveles delgados de gravas y turbas concordantes, producto de la acumulación de materiales transportados por las corrientes. Este tipo de planicie constituye todas las veredas que se ubican al oeste del municipio de Apartadó.



Figura 193. Planicie y delta lacustre

9.3.3.10 Terraza de acumulación (Fta)

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Estas terrazas pueden ser parte de cauces rectos a meándricos. Su depósito está constituido por gravas arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río. La geoforma se localiza en el centro, específicamente en las veredas Salsipuedes y La Victoria; hacia el norte en El Salto; y hacia el oriente, entre las veredas La Esperanza y Playa Larga.

9.3.3.11 Terraza de acumulación sub-reciente (Ftas)

Superficie plana a suavemente inclinada, remanente de terrazas sub-recientes de morfología ondulada, disectadas, localmente basculadas, con inclinaciones entre 3° a 5°, aunque algunos sectores pueden alcanzar los 10° donde se presenta limitada por escarpes de 5 a 20 m. Su origen es relacionado a la ampliación del valle de un río, al ganar importancia la erosión en sus márgenes. La superficie de la anterior llanura aluvial queda adosada a las márgenes del valle en forma de escalón o resalte topográfico que define la terraza. Pueden estar cubiertas por suelos arcillosos fluviales. Su depósito está constituido por arenas, arcillas e intercalaciones locales de grava fina. Esta categoría de terraza se observa en la vereda La Victoria.

9.3.3.12 Terraza de acumulación antigua (Ftan)

Superficie alomada en forma de abanico de extensión kilométrica, laderas moderadamente largas, cóncavas a convexas. Se caracterizan por presentar pendientes de 5° a 10° en las partes altas, limitadas por escarpes de disección en forma de "V" que localmente pueden alcanzar inclinaciones de 20°. De manera general, se presentan colgadas, inclinadas y discordantes sobre unidades antiguas. Su origen es relacionado a la disección y tectonismo de abanicos y planicies aluviales antiguas. Su depósito está constituido por gravas, arenas y arcillas. La geoforma se observa a lo largo del cauce del río en la vereda Playa Larga.

9.3.3.13 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de acumulación. Su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce. La altura de los escarpes puede alcanzar decenas de metros. Este tipo de escarpe se encuentra en las veredas Salsipuedes y La Victoria.

9.3.4 Ambiente estructural

Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno. En los tres primeros apartados subsiguientes se especifican numerales en la categoría de unidad, mientras que los demás continuarán dentro del nivel de subunidad, como se ha descrito en los ambientes anteriores. Las geoformas propias de este ambiente se encuentran en franjas alargadas en sentido NNW-SSE en la parte central del municipio y en el extremo este del mismo.

9.3.4.1 Cuesta (Sc)

Sierra asimétrica elongada y amplia de morfología colinada a alomada definida por el basculamiento suave entre 10° a 25° de las capas o estratos de unidades resistentes y blandas. Su origen se debe a la incisión o fallamiento perpendicular al buzamiento de los estratos sedimentarios suavemente plegados o basculados. Este tipo de geoforma se encuentra en las veredas Zabaletas, El Porvenir y Las Nieves (Figura 194).



Figura 194. Cuesta

9.3.4.2 Ladera estructural de cuesta (Scle)

Superficie con estratos dispuestos a favor de la pendiente del terreno (10° - 25°), de longitud larga a extremadamente larga, de forma recta a irregular, con pendientes inclinadas a muy inclinadas, relacionada a una estructura de cuesta. La geoforma se observa exclusivamente en la zona central de la vereda Churidó Sinaí (Figura 195).



Figura 195. Ladera estructural de cuesta

9.3.4.3 Ladera de contrapendiente de cuesta (Sclc)

Superficie vertical a subvertical muy corta a corta, de forma cóncava o convexa de pendiente escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno. Este tipo de ladera se observa en las veredas Churidó Sinaí, Las Nieves, La Esperanza y Mulatos Cabecera (Figura 196).



Figura 196. Ladera de contrapendiente de cuesta

9.3.4.4 Colina estructural (Sces)

Prominencia topográfica con una altura entre 200 y 399 metros sobre su nivel de base local, que presenta una cima aguda a redondeada, limitada por laderas cortas a moderadamente largas de forma convexa y

pendientes abruptas a escarpadas, un alto grado de disección de los drenajes y desarrollo de valles en V. Su origen está relacionado con la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos y periodos de meteorización y denudación en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Esta categoría de geoformas se presenta solamente al sur de Mulatos Cabecera (Figura 197).



Figura 197. Colina estructural

9.3.4.5 Espinazo (Se)

Sierra simétrica elongada de cresta aguda a redondeada y morfología colinada o alomada, definida por la intercalación de estratos de unidades con diferente resistencia, dispuestos en ladera estructural en un patrón escalonado de lajas triangulares o chevrones labrados por la escorrentía. La geoforma puede ser simétrica (flancos entre 20° y 45°) y asimétrica (flancos entre 21° y 45°). Se presenta como un conjunto de cerros alineados y elongados afectados por erosión diferencial y por disección acentuada. Este tipo de geoforma se observa hacia el centro noreste del municipio, entre las veredas La Balsa, El Cuchillo, Guineo Alto, Arenas Altas, La Esperanza, El Porvenir, Las Nieves y Playa Larga (Figura 198).



Figura 198. Espinazo

9.3.4.6 Lomos (Sl)

Prominencias topográficas que se caracteriza por ser un sistema con índice de relieve bajo, con cimas alargadas, de topos agudos a redondeados que siguen la tendencia estructural regional, compuestos por laderas cortas a moderadamente largas, de forma cóncava a recta y pendientes inclinadas a abruptas. Los Lomos son geoformas que se encuentran en la zona central del municipio en franjas largas y extensas, con sentido N-S, que también se observan las veredas La Hoz, La Resbalosa y Rodoxali (Figura 199). En el área de estudio incluye los componentes de: **Lomo abrupto (Sla)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo moderado y pendientes entre los 16-20°; y **Lomo denudado escarpado (Slma)**, el cual cuenta con un índice de relieve relativo moderado y pendientes entre los 21-30°.



Figura 199. Lomos

9.3.4.7 Plancha (Sp)

Ladera en capas o estratos inclinados a favor de la pendiente de longitud variable que se presentan como laderas festoneadas o dentadas hacia arriba con pendientes muy abruptas a escarpadas. Su origen obedece a procesos de plegamiento o erosión diferencial que ocurre sobre una secuencia de estratos delgados duros y blandos. Esta categoría se encuentra en las veredas La Esperanza y Playa Larga, al norte del municipio (Figura 200).

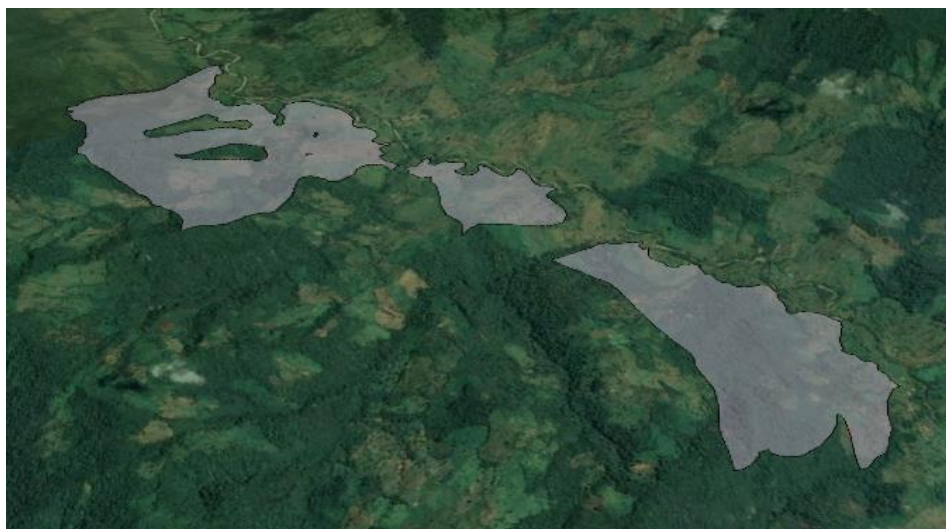


Figura 200. Plancha

9.3.4.8 Sierra (Ss)

Prominencia topográfica de morfología montañosa, de laderas largas a extremadamente largas, cóncavas, convexas o rectas, con pendientes muy inclinadas a escarpadas. Su origen está relacionado con procesos de fallamiento intenso en macizos rocosos ígneos, metamórficos y sedimentarios. En esta geoforma, la ausencia de datos estructurales no permite establecer una asociación con alguna estructura (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros). La geoforma se localiza hacia el sureste de Apartadó, entre las veredas Miramar, La Cristalina, Bellavista y Mulatos Cabecera (Figura 201).



Figura 201. Sierra

9.3.4.9 Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal (Ssalc)

Superficie vertical a subvertical corta a moderadamente larga, de forma convexa a irregular escalonada, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, desarrollada en la ladera estructural de una estructura anticlinal debido a la acción de procesos de erosión, meteorización o tectonismo que cortan y moldean la estructura original. La geoforma se encuentra al oriente de la vereda Sabaleta (Figura 202).



Figura 202. Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal

9.3.4.10 Ladera estructural de sierra anticlinal (Ssale)

Superficie con estratos inclinados a favor de la pendiente, de longitud corta, formas convexas a rectas y pendiente inclinada a muy abrupta, relacionada al flanco de una estructura anticlinal. Localmente los estratos se presentan con inclinaciones menores de la pendiente natural del terreno. La geoforma se identifica al oriente de la vereda Sabaleta (Figura 203).



Figura 203. Ladera estructural de sierra anticlinal

9.3.4.11 Sierra homoclinal (Ssh)

Prominencia topográfica simétrica o ligeramente simétrica elongada y de morfología montañosa a colinada de cimas agudas, definida por una secuencia de estratos o capas apilados e inclinados ($> 35^\circ$) en una misma dirección. Generalmente es producto del desarrollo o erosión de un solo flanco de una estructura geológica. Este tipo de sierra se encuentra entre las veredas del norte del municipio El Guineo, El Osito, El Gas, Guineo Alto, El Salto, Arenas Altas, Buenos Aires, La Unión, Las Nieves, El Porvenir y Arenas Bajas, junto con las veredas La Pedrosa, La Miranda, Las Playas y la Victoria, al sur del área de estudio (Figura 204).



Figura 204. Sierra homoclinal

9.3.4.12 Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle)

Superficie definida por la inclinación de los estratos a favor de la pendiente, de longitud corta a moderada larga, formas rectas a convexas y pendientes escarpadas a muy escarpadas, relacionada a una estructura homoclinal. La geoforma se observa en las veredas La Pedrosa, Salsipuedes, Arenas Bajas, Playa Larga y Rodoxali (Figura 205).



Figura 205. Ladera estructural de sierra homoclinal

9.3.4.13 Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc)

Superficie vertical a subvertical moderada a larga, de forma cóncava, escalonada, festoneada a irregular, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del terreno, relacionada a una estructura homoclinal. Esta geoforma se observa en las veredas La Pedrosa, Salsipuedes, Arenas Bajas, Playa Larga y Rodoxali (Figura 206).



Figura 206. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal

9.3.4.14 Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc)

Superficie vertical a subvertical corta a moderadamente larga, de forma convexa a irregular escalonada, con pendiente abrupta a escarpada, generada por estratos dispuestos en contra de la pendiente del

terreno, relacionada al flanco de una estructura sinclinal. Esta categoría de ladera se encuentra hacia el oriente de Apartadó, en las veredas Las Nieves, La Esperanza, La Hoz, Playa Larga, Sabaleta y Rodoxali (Figura 207).



Figura 207. Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal

9.3.4.15 Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle)

Superficie definida por estratos inclinados a favor de la pendiente del terreno, de longitud corta a moderadamente larga, forma cóncava y pendientes inclinadas a abruptas, relacionada al flanco de una estructura sinclinal. Este tipo de ladera se observa hacia el oriente de Apartadó, en las veredas Las Nieves, La Esperanza, La Hoz, Playa Larga, Sabaleta, La Resbalosa y Rodoxali.



Figura 208. Ladera estructural de sierra sinclinal

9.3.4.16 Ladera estructural (Sle)

Superficie en declive, de morfología regular a irregular, definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamiento entre otros) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga a extremadamente larga y con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas. En esta

geoforma los datos estructurales no permiten establecer una asociación con alguna estructura de tipo regional (anticlinal, sinclinal, homoclinal, monoclinal, entre otros). La geoforma se observa al extremo noreste de la vereda Rodoxali.

10. Morfodinámica

El componente de morfodinámica agrupa los diferentes procesos de geodinámica externa que tienen la capacidad de modelar y transformar la superficie del terreno, los cuales para fines del presente estudio agrupan los movimientos en masa tipo deslizamiento, flujo, caída, procesos de erosión tanto por escorrentía superficial como por erosión fluvial (socavación con un alto potencial de afectación en zonas ocupadas), además de procesos fluviales como inundaciones y avenidas torrenciales.

Para el municipio de Apartadó por medio de las labores de fotointerpretación, como también durante las fases de reconocimiento de campo, se han identificado 1797 procesos morfodinámicos (Tabla 49) los cuales pueden ser agrupados en eventos asociados a movimientos en masa (1344) tipo deslizamiento, flujo, caída; fenómenos de erosión fluvial, particularmente socavación lateral (203); además de la identificación de procesos fluviales como inundaciones (250), dentro de la identificación realizada no se encontraron avenidas torrenciales. En la Figura 209 se presenta la localización espacial de los diferentes procesos morfodinámicos y de acuerdo con esta última, los movimientos en masa y erosión se han concentrado y restringido en las zonas montañosas, mientras que las inundaciones ocurren en las márgenes de los ríos del oeste del municipio, principalmente en la zona distal de la cuenca del río León. Sobre los márgenes de los ríos principales (incluyendo el caño Chinita) que atraviesan en municipio, sentido este- oeste se encuentra una extensa socavación de los márgenes de dichos cuerpos de agua.

Tabla 49. Fenómenos identificados y espacializados

Fenómeno amenazante	Número de eventos espacializados
Movimientos en masa (flujo, caída de rocas, erosión)	1344
Movimientos en masa (erosión fluvial - socavación)	203
Inundaciones	250
Avenidas torrenciales	0
Total	1797

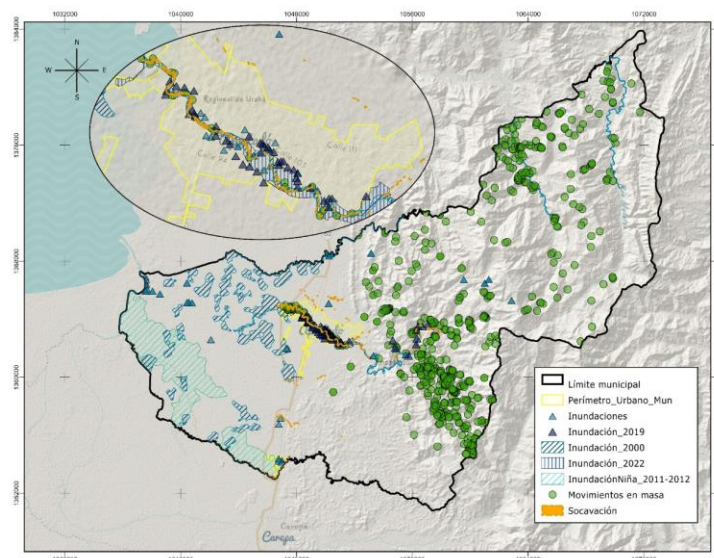


Figura 209. Procesos morfodinámicos identificados en el municipio

La Tabla 50, resume los principales agentes geomorfológicos, agentes de la meteorización y fuerzas de desplazamiento, así como los procesos exógenos a que dan lugar.

Tabla 50. Agentes y procesos geomorfológicos externos.

Fuerza o agente	Proceso geomorfológico	
	Denudativo	Constructivo
Agua, hielo, temperatura, organismos	Meteorización de las rocas	Principio de formación de suelos
Gravedad, movimientos sísmicos	Movimientos en masa	Sedimentación coluvial
Lluvia	Erosión pluvial	Sedimentación coluvial
Gravedad + agua del suelo	Remoción torrencial, flujos de lodos y escombros	Sedimentación diluvial
Escorrentía	Erosión fluvial	Sedimentación aluvial
Oleaje, corrientes costeras, mareas	Erosión marina o lacustre	Sedimentación marina o lacustre
Nieve y hielo en movimiento (glaciar)	Erosión glaciaria	Sedimentación glaciaria
Viento	Erosión eólica	Sedimentación eólica
Hombre	Degradación antrópica	Conservación y recuperación de tierras

Fuente: Villota, 2005 en (Carvajal, 2012).

10.1 Movimientos en masa

Los movimientos en masa (MM) tipo deslizamiento son los más recurrentes en la zona de alto relieve del municipio, con un total de 654 eventos, los cuales tienden a presentarse desde la zona este hasta la parte media del municipio. Su distribución está estrechamente asociada a la influencia de los sistemas de fallas conjugadas entre el Cinturón de San Jacinto y la Falla de Uramita. Dichos procesos de fallamiento ejercen un marcado efecto en la respuesta de los materiales térreos, debido a que se inducen en las unidades un acentuado grado de fracturamiento, el cual aumenta el área superficial una roca poco competente y en consecuencia favorece la acción de los agentes de meteorización que en ultimas darán lugar a la pérdida de resistencia del material rocoso.

En general, los procesos de inestabilidad se encuentran asociados a la pérdida de resistencia de los materiales por efectos de la meteorización. Alcanzándose a desarrollar perfiles de meteorización con espesores bajos pero con muy continuos. En la Figura 210 se observan deslizamientos y flujos ubicados en el centro poblado de San José de Apartadó.



Figura 210. Deslizamientos identificados en cercanías al centro poblado de San José de Apartadó

Debido al régimen climático de esta zona del país, las condiciones de alta humedad son recurrentes y en conjunto un estilo tectónico complejo, propio del Cinturón Plegado del Sinú - San Jacinto, el grado de fracturamiento y plegamiento de las unidades rocosas aumenta considerablemente, aumentando las discontinuidades y en ultimas la superficie de reacción de disponible para la meteorización de las rocas.

De acuerdo a lo anterior, los procesos de inestabilidad se asocian principalmente a la movilización del suelo residual desarrollado por las unidades litológicas sedimentarias, favorecidos por la pérdida de cobertura vegetal nativa, siendo esta última deforestada o reemplazada por especies gramíneas destinadas a actividades ganaderas y que no aportan mayor soporte radicular, que cuando son concurrentes con pendientes pronunciadas y formas de ladera cóncavas o irregulares, se generan condiciones de flujo subsuperficial del agua, que en últimas conlleva a la disminución de los esfuerzos efectivos entre las partículas y la consecuente pérdida de resistencia al corte del suelo. En la Figura 211 se aprecia un deslizamiento traslacional en la vereda Arenas Altas (quebrada el Muerto) el cual afecta un suelo residual derivado de rocas del Miembro Corpa Medio, cuya cobertura vegetal superficial está constituida por pastos y las laderas presentan formas cóncavas a rectas.



Figura 211.Deslizamiento quebrada el Muerto

10.2 Erosión

Los procesos de erosión, asociados a la degradación del suelo por saturación o desecamiento de los materiales, los cuales tienen la capacidad suficiente para remover los materiales depositados por gravedad o movimiento de pequeñas corrientes de agua en diferentes eventos, son comunes en las zonas medias y altas del municipio, se ilustra la anterior situación, donde la degradación del suelo ha generado grietas que eventualmente se pueden convertir en coronas de deslizamientos o flujos.

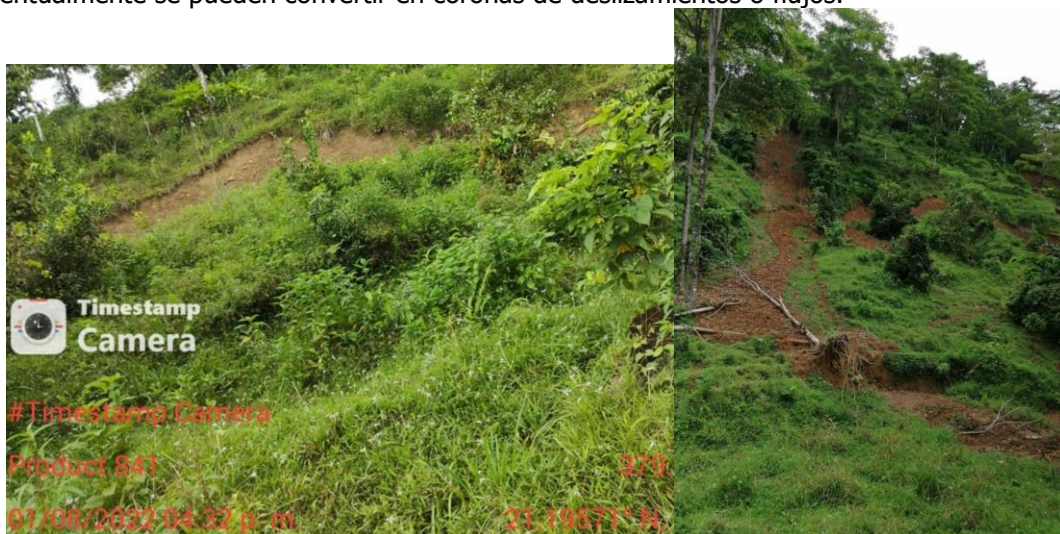


Figura 212. Erosión por degradación del suelo

Los procesos de erosión hídrica, asociados a la socavación lateral de los cauces, los cuales tienen la capacidad suficiente para remover los materiales depositados por la misma corriente en diferentes eventos, son comunes en los márgenes de los ríos Apartadó, Zungo y Churidó, así como en el caño La Chinita y quebrada Vijagual, se ilustra la anterior situación, en el cauce de los ríos Apartadó y Zungo. Estos procesos están asociados exclusivamente a la actividad hídrica, siendo los procesos de socavación lateral de las márgenes de los ríos y la acción de las aguas de escorrentía los principales responsables del desprendimiento, transporte de las partículas de sedimento y suelo.

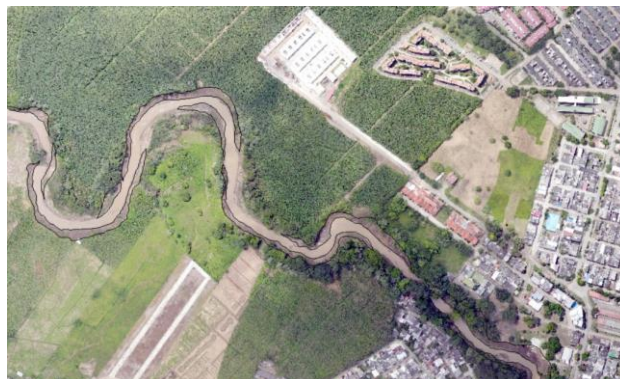




Figura 213. Socavación en el río Apartadó



Figura 214. Socavación en el río Zungo



Figura 215. Socavación en el quebrada el Guineo

La erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia ocurre principalmente en unidades del ambiente denudacional tales como lomeríos poco disectados y muy disectados, en tales áreas la baja pendiente topográfica ha permitido el aprovechamiento de los suelos para labores agrícolas y agropecuarias con el consecuente cambio en el uso y cobertura vegetal del terreno, que pasó a ser dominada por praderas y algunos cultivos. Debido a que la cobertura vegetal no es capaz de realizar una interceptación plena de las gotas de lluvia, estas llegan directamente al suelo desprendiendo y transportando las partículas de material, el cual progresa desde la erosión laminar a erosión en cárcavas (Figura 216). Las zonas sometidas a este tipo de erosión pueden posteriormente progresar hacia un movimiento en masa de tipo deslizamiento o flujo, toda vez que los procesos de infiltración de agua se ven favorecidos y al estar desprovistos de cobertura vegetal, las condiciones de estabilidad se ven reducidas.



Figura 216. Superficies de erosión y cárcavamiento

10.3 Inundaciones

El modelado fluvial reviste de una importante influencia la zona de estudio, dado que gran parte de la zona baja del municipio responde a procesos fluviales, dentro de los cuales se incluyen las inundaciones. Las inundaciones son procesos que se encuentran relacionados a los periodos de mayor precipitación (meses de abril a mayo y de octubre a noviembre) y que están asociados con la dinámica fluvial en zonas relativamente planas. Durante la época de lluvias, los ríos se desbordan afectando cultivos y algunas viviendas, particularmente hacia las zonas rurales.

En torno a los tramos de algunos cauces ocurren zonas anegadizas presentando encharcamientos permanentes. Así mismo, la gran mayoría de cauces tienen la capacidad desbordar sus aguas durante las épocas de grandes precipitaciones y recobrar partes de sus llanuras de inundación o zonas de divagación de la corriente. Si bien es cierto que en muchos sectores ocurren terrazas, abanicos y planos lacustrinos, cuyas características texturales sugieren que son depósitos maduros, ello no implica necesariamente que en épocas de gran precipitación los cauces no transiten sobre estos y aneguen las áreas contiguas, por lo que es necesario controlar las cotas de máxima inundación y administrar responsablemente las rondas de las corrientes hídricas (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019)).

Debido a la densa red de drenajes que baña el área geográfica de la cuenca, las zonas ribereñas de algunos ríos y quebradas, particularmente en las zonas de bajo relieve son propensas a presentar inundaciones, por ejemplo, en junio del año presente (2022), la zona de Casaverde del sector urbano del Reposo resultó gravemente afectada, como se muestra en la Figura 217.



Figura 217. Inundación El Reposo, junio de 2022

De igual manera, durante el mes de mayo, la administración municipal tuvo que atender diferentes eventos de inundación en la cabecera municipal, sobre los barrios el Concejo y la Esperanza, entre otros. Eventos en los que normalmente las personas, que habitan zonas ribereñas o que se encuentran asentados sobre zonas de divagación natural de río, pierden enseres, comienzan a presentar problemas complicados asociados a vectores sanitarios. En la (Figura 218) se muestran las labores de atención y las afectaciones presentadas en las inundaciones que sufrieron en los barrios el Concejo y la Esperanza.



Figura 218. Afectaciones inundación mayo 2022. Fuente: Secretaría de planeación Apartadó.

Hacia el centro poblado de Punto Rojo, se ha construido un jarillón artificial sobre el río Grande, como parte de las actividades adelantadas para proteger del cauce del río y controlar el proceso natural de inundación (Figura 216).



Figura 219. Jarillón artificial sobre el río Grande de Nicuro. Localización Estación GM80 X:708960 Y:1368093. Fuente: (CORPOURABA; ECOFOREST, 2019)

10.4 Avenidas torrenciales

La sismicidad y las lluvias son los dos principales detonantes de los movimientos en masa tanto en los materiales rocosos como en los depósitos y suelos residuales. La aceleración sísmica, en general el sistema de fallas conjugadas entre la Falla de Uramita y el Cinturón Plegado de San Jacinto genera aceleraciones que se clasifican dentro de amenaza sísmica media, la cual es además amplificada por las formas del relieve abrupto. Estos eventos típicamente generan fracturamiento en los estratos de roca que se detonan luego con las temporadas de altas precipitaciones, generándose grandes desplazamientos de material para convertirse luego en avenidas torrenciales a lo largo de todos los cauces confinados y torrenciales. Estos últimos fenómenos no son reportados ni identificados, sin embargo, existen condiciones de aporte de material, pluviosidad y relieve que podrían desencadenar este tipo de evento.

Es de notar que en las zonas (quebrada el Muerto, la Sucia, la Clara) no presentan elementos expuestos directos, pero presentan confluencia hacia el centro poblado de San José de Apartadó, el cuál también presenta laderas que aportan una cantidad significativa de material a través de deslizamientos y flujos.

11. Dinámica fluvial

El análisis de los elementos del sistema fluvial permite en conjunto determinar los procesos predominantes en los territorios asociados a sus cuerpos de agua, cuencas hidrográficas y demás elementos, así como caracterizar la energía que se genera y libera en los procesos fluviales. En este apartado se realiza una interpretación de los sistemas fluviales principales del municipio de Apartadó, así como un análisis multitemporal de la divagación de los cauces con mayor sinuosidad dentro del municipio como lo son los ríos Apartadó, Grande, Currulao, quebrada Vijagual y algunos sectores del río Mulatos, a estos drenajes se suma el análisis en zanjones y caños existentes en la zona baja del municipio.

En la Figura 220 se muestran los principales cauces permanentes del municipio sobre los cuales, dependiendo de la disponibilidad de información de sensores remotos o fotografías aéreas históricas se realizaron los análisis multitemporales.

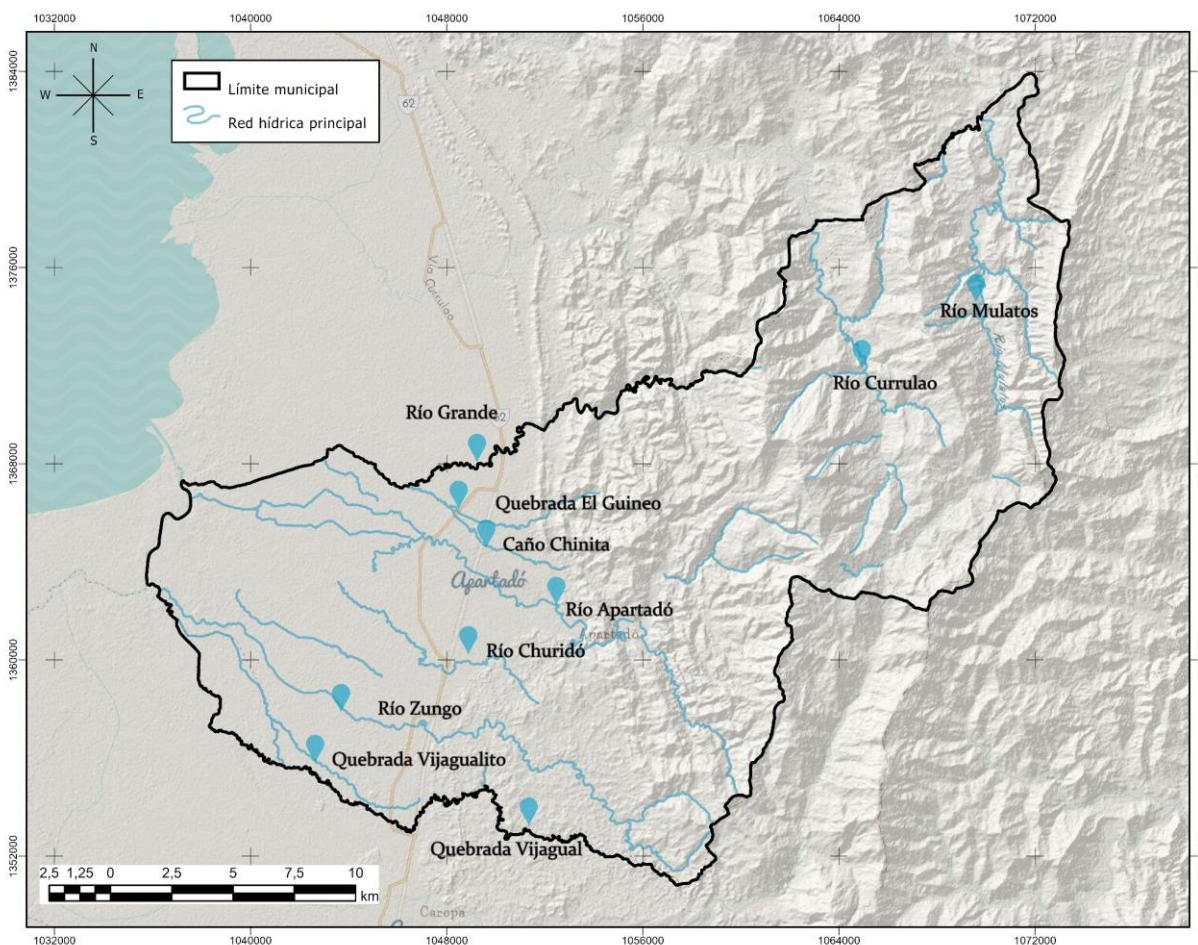


Figura 220. Red hídrica principal del municipio

11.1 Elementos de dinámica fluvial

A continuación, se definen los elementos que se van a considerar dentro del análisis de la dinámica fluvial para la zona de estudio.

11.1.1 Perfil Longitudinal

El perfil longitudinal de un río describe la forma en el que éste varía su cota a lo largo de su recorrido; refleja por tramos la diferencia altitudinal que tiene a lo largo de su línea de flujo, el cual avanza dependiendo de las condiciones morfométricas de las zonas por donde fluye (Figura 221).

El índice de Hack es utilizado para determinar o caracterizar la evolución de los sistemas fluviales y representa un método geomorfológico que puede aportar en el análisis de erosión y deformaciones de la superficie. Hack (1975) trató de demostrar una relación entre características físicas del lecho rocoso (pendiente, longitud) y propiedades químicas de su litología (Senciales, et al., 2018). En la ecuación (1) se muestra dicha relación.

$$SL = \frac{H1 - H2}{\ln L2 - \ln L1} \quad (1)$$

Donde, H1-H2 es la diferencia entre alturas de secciones de cauces, y $\ln L2 - \ln L1$ es la diferencia de los logaritmos de las longitudes de secciones de cauce aguas abajo (L2) y aguas arriba (L1) del cauce.

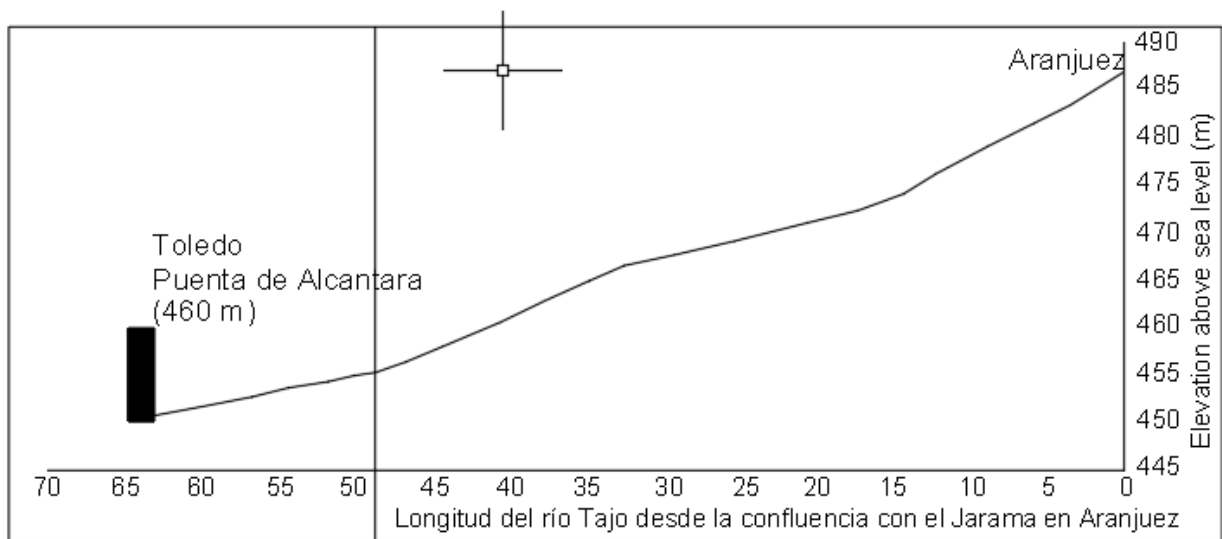


Figura 221. Ejemplo de perfil longitudinal del río Tajo, Jarama-Aranjuez. España

Fuente: Tomado y modificado de Uribe Larrea del Val, D. (2009)

11.1.2 Divagación de cauce

La divagación se encuentra relacionado con la movilidad del cauce y la estabilidad de este, se establece analizando la sinuosidad y la dinámica de las orillas; permitiendo identificar zonas de máxima y mínima movilidad del cauce.

Los factores que condicionan la forma del canal principal de un río corresponden al tipo y tamaño de los sedimentos, el tipo de roca o suelo del lecho, la magnitud y frecuencia de las crecientes, así como el predominio de un tipo u otro de transporte (modificado de Farguell, 2021). En vista de planta se reconocen cuatro tipos de canales principales: recto, meandriforme, trenzado y anastomosado (Figura 222).

La sinuosidad está definida por el cociente entre la longitud del río y la longitud del valle en un tramo del río, como se indica en la (2):

$$S = \frac{L_c}{L_v} \quad (2)$$

donde S es la sinuosidad, Lc es la longitud del cauce y Lv corresponde a la longitud del tramo o sección analizado.

En la Tabla 51, se presentan los valores de sinuosidad y el tipo de cauce que describen.

Tabla 51. Tipo de cauce de acuerdo con la sinuosidad

Valor de sinuosidad	Tipo de cauce
$\leq 1,2$	Recto
$1,2 - 1,5$	Sinuoso
$\geq 1,5$	Meándrico

Fuente: García y Maza (1997)

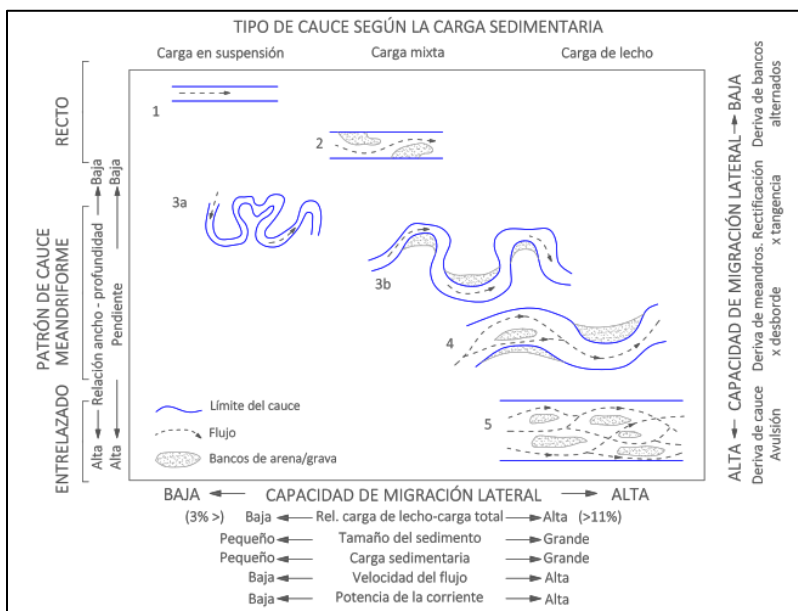


Figura 222. Relación entre el tipo de cauce, la carga sedimentaria, capacidad de carga y migración lateral (estabilidad relativa)

Fuente: Tomado de Ramonell (2000)

La Figura 223, muestra que los cauces presentan diferentes características, las cuales deben considerarse al momento de realizar los diferentes análisis.

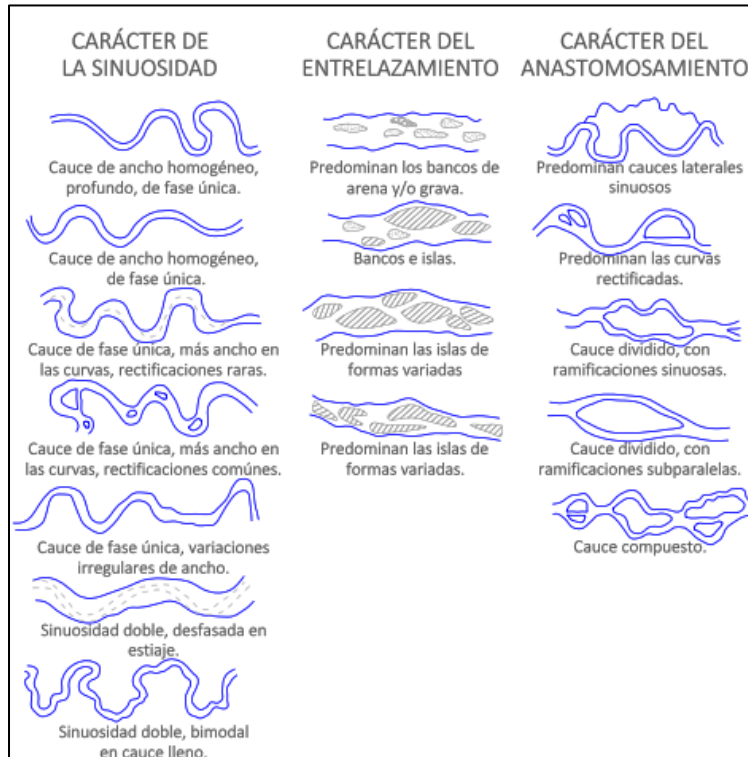


Figura 223. Tipos y características de los cauces aluviales





Fuente: Ramonell (2000)

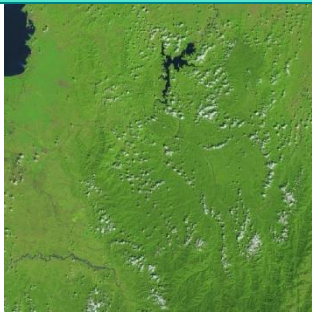

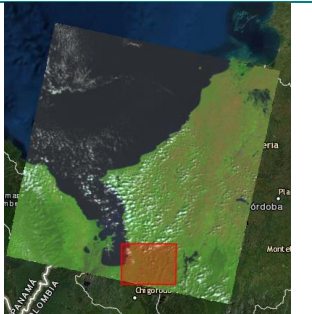
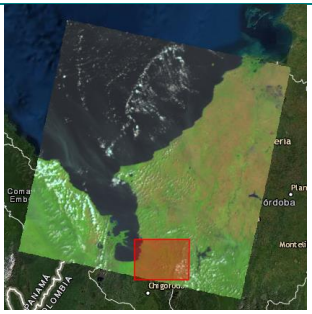
11.2 Imágenes recopiladas

El análisis de dinámica fluvial parte de la recopilación de información cartográfica en donde se logren identificar elementos hidrodinámicos que permitan analizar la evolución de los cuerpos hídricos existentes en el municipio, esta recopilación incluyó, gracias a la información suministrada por la secretaría de planeación y ordenamiento territorial de Apartadó, por CORPOURABA e información libre disponible para descarga.

Esta información incluye la digitalización y georreferenciación de fotografías aéreas del año 1993 (Figura 226), ortofotografías de los años 2006 (Figura 224) y 2013 (Figura 225), imágenes satelitales de 2017 a 2021 (Tabla 52) así como la interpretación multitemporal del stock de imágenes de los años 1969, 2001, 2013, 2017 y 2022 disponibles en Google Earth.

Tabla 52. Imágenes satelitales recopiladas para análisis multitemporal

Id	Fecha de adquisición	Cobertura %	nubes	Vista previa
Sentinel 2B				
L1C_T18N UP_A0204 00_202101 31T153618	31/01/21	14,17%		
L1C_T18N UP_A0056 71_201804 07T153815	7/04/18	9,54%		
L1C_T18N UP_A0139 36_201802 21T153745	21/02/18	9,01%		
L1C_T18PT Q_A01393 6_2018022 1T153745	21/02/18	9,03%		

Id	Fecha de adquisición	Cobertura nubes %	Vista previa
L1C_T18N UP_A0040 98_201712 18T153606	18/12/17	1,02%	
Landsat 8			
Id	Fecha de adquisición	Cobertura nubes %	Vista previa
LC08_L1TP _010054_2 0180110_2 0200902_0 2_T1	10/01/18	16,49%	
LC08_L2SP _010054_2 0181228_2 0200829_0 2_T1	28/12/18	8,71%	
LC08_L2SP _010054_2 0170224_2 0200905_0 2_T1	24/02/17	12,27%	

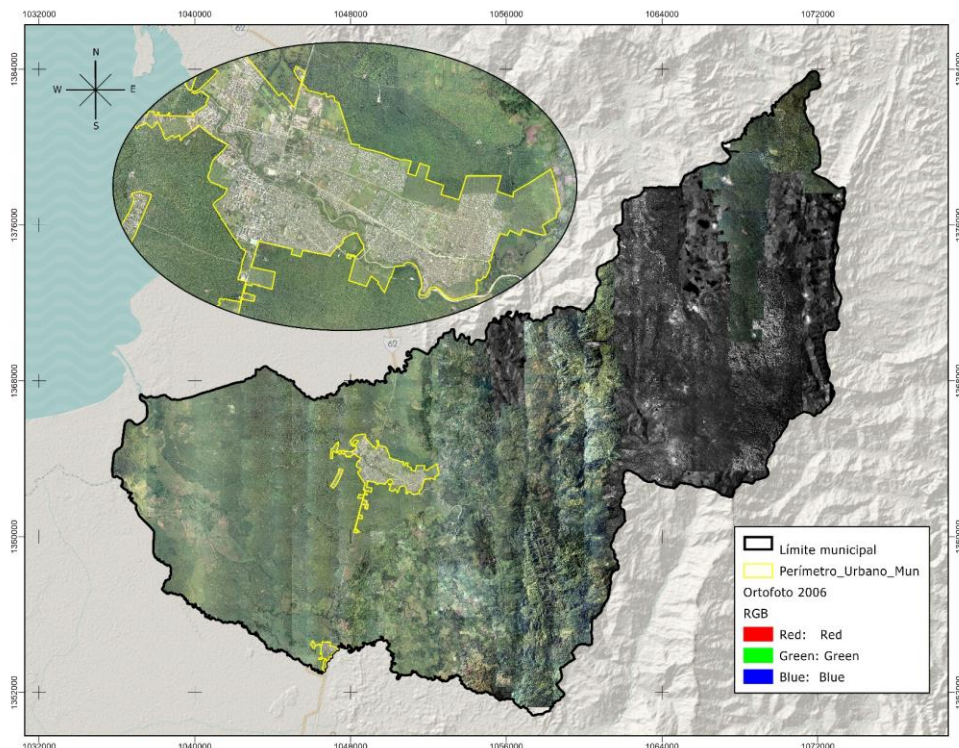


Figura 224. Ortofotografía 2006 municipio de Apartadó. Fuente: (Consortio zonificación 2008, 2011)

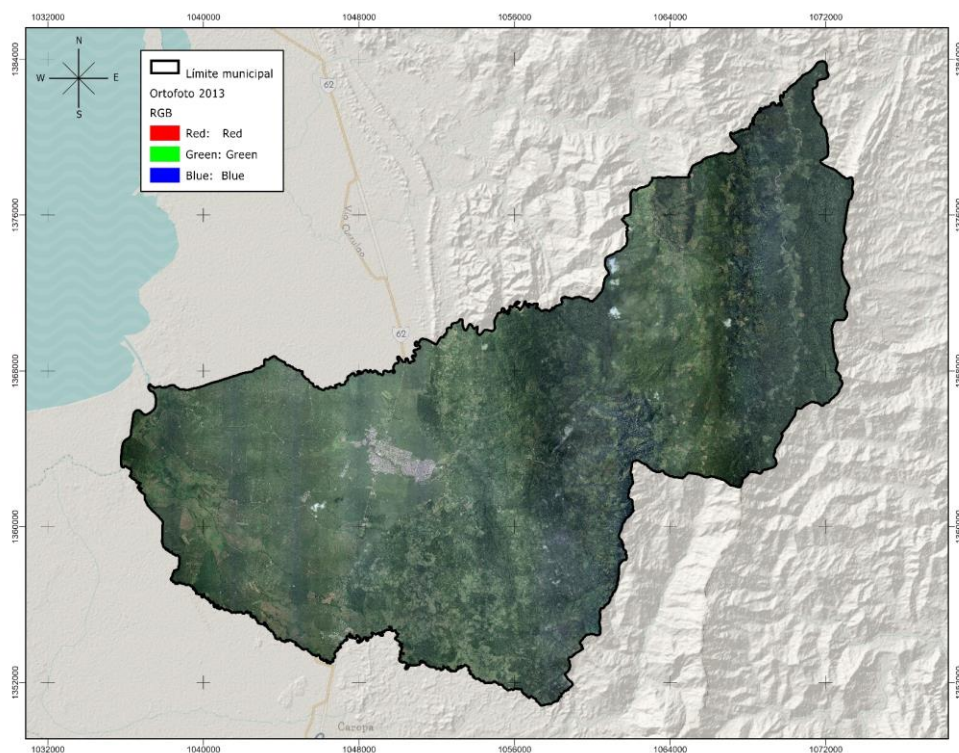


Figura 225. Ortofotografía (imagen satelital 2013) municipio de Apartadó. Fuente: equipo POT 2022.

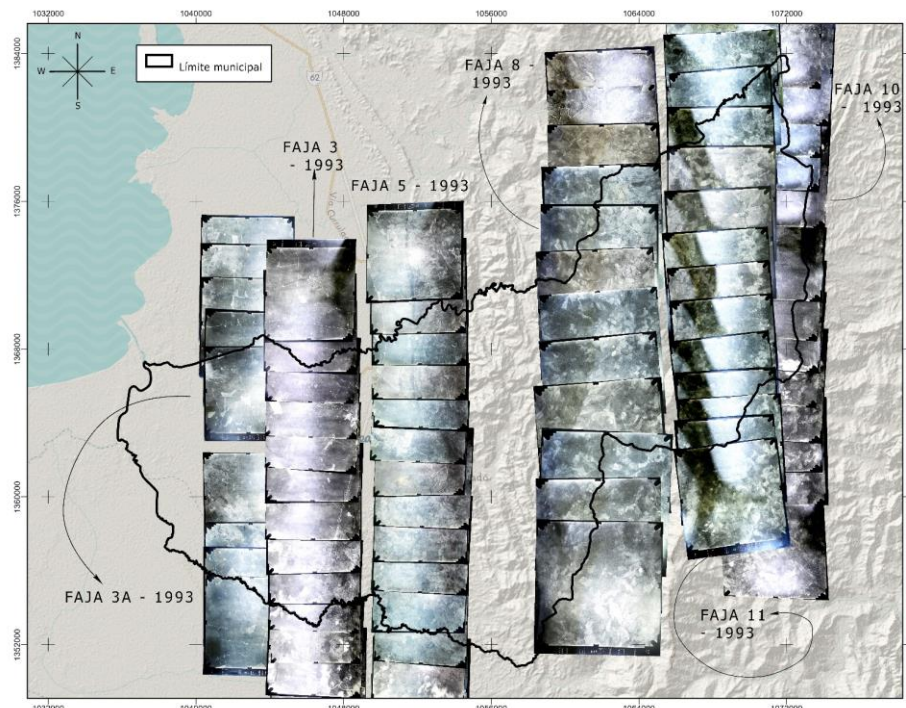


Figura 226. Fotografías aéreas disponibles para el año 1993. Construido con información CORPOURABA

11.3 Análisis elementos dinámica fluvial

Los perfiles longitudinales de los ríos presentan en general forma cóncava, con una pendiente que va disminuyendo desde zonas con mayor erosión hasta zonas de menor pendiente (zonas de sedimentación) (Ramonell, s.f., modificado). En líneas generales la pendiente tiende a ser mayor en tramos que discurren sobre sustratos duros por su resistencia a la erosión. También se pueden dar cambios bruscos de pendiente "Knickpoint" en zonas de confluencia de ríos, cambios litológicos y procesos erosivos generados por actividades humanas.

A continuación se analizan ríos con alta dinámica fluvial, con disponibilidad de información cartográfica de amplia resolución temporal.

11.3.1 Perfil longitudinal del río Apartadó

Analizando la línea por la cual divaga longitudinalmente el río Apartadó, el cual nace en la confluencia de ríos provenientes de la serranía de Abibe en la zona de montaña la cual, aunque corta en extensión, promueve caudales significativos que se expresan aguas debajo de la corriente del río. Sobre la zona de piedemonte, el río traza su camino cerca de los centros poblados de San José de Apartadó, Salsipuedes y la Victoria, desembocando con gran energía hacia la zona de llanura de inundación (la de mayor extensión longitudinal). Este río presenta cambios de pendientes durante su recorrido entre 60°, pasando a zonas con relación de pendiente por debajo de los 30° y finalizando con un relieve relativo muy bajo y pendientes tendientes a 0°.



Figura 227. Perfil longitudinal río Apartadó

11.3.2 Perfil longitudinal del río Zungo

Semejante a la sección del río Apartadó, el río Zungo también cuenta con tres zonas morfométricamente diferentes, naciendo en la zona distal del piedemonte de la serranía de Abibe, discurriendo por los abanicos aluviales y depositándose en la llanura de inundación del río León. Este río presenta cambios de pendientes en una transición leve entre la zona de abanico hacia la de llanura aluvial y con una transición fuerte hacia su zona de montaña, presenta sobre su nacimiento pendientes mayores a los 70° , pasando a zonas con relación de pendiente por debajo de los 10° y finalizando con un relieve relativo muy bajo y pendientes tendientes a 0° .

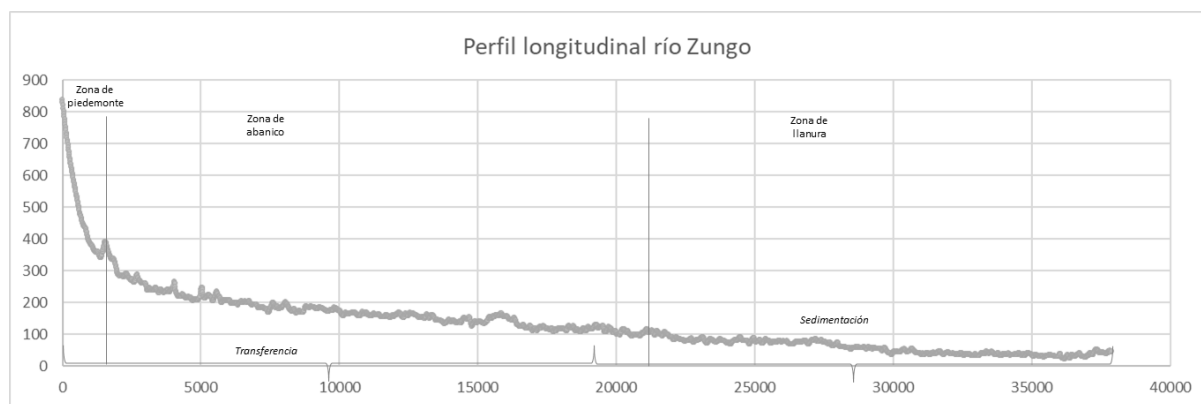


Figura 228. Perfil longitudinal río Zungo

11.3.3 Perfil longitudinal del río Mulatos

El río Mulatos se caracteriza por un perfil longitudinal homogéneo que en el municipio de Apartadó inicia su tránsito sobre la zona de montaña el cual cambia con transitoriamente hacia las zonas de piedemonte y abanicos propios de la zona media del municipio.

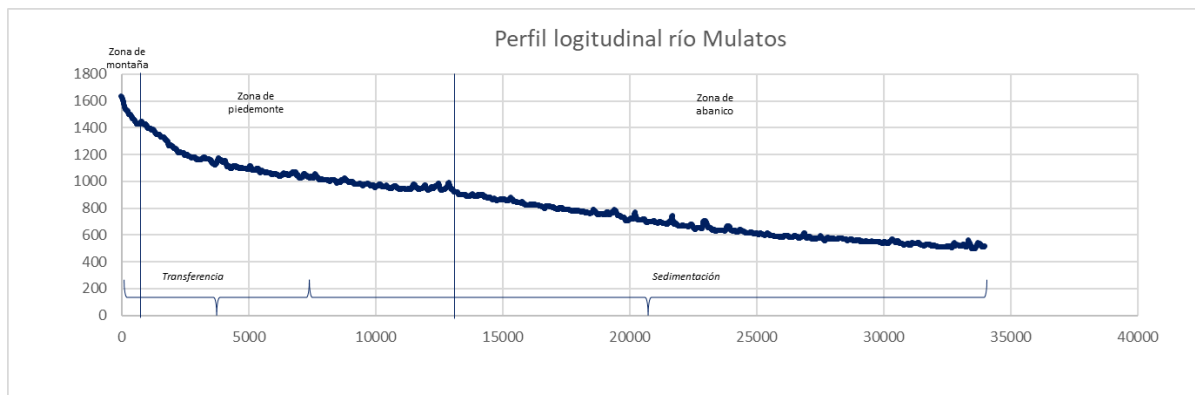


Figura 229. Perfil longitudinal río Mulatos

11.3.4 Perfil longitudinal del río Currulao

El río Currulao se caracteriza por un perfil longitudinal poco homogéneo que en el municipio de Apartadó nace en la zona de montaña, transita por los piedemontes y abanicos de la zona media del municipio para comenzar su camino en los límites con el municipio de Turbo hacia la desembocadura del río homónimo.

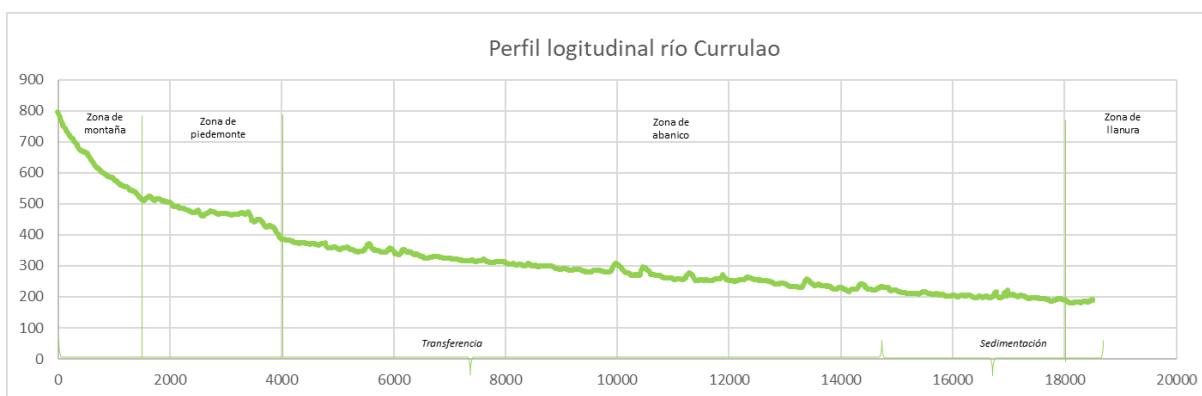


Figura 230. Perfil longitudinal río Currulao

11.3.5 Perfil longitudinal del caño La Chinita

Este caño, urbano principalmente, presenta una pequeña transición desde la zona de piedemonte hacia la llanura de inundación de los río de baja pendiente del municipio, este caño se encuentra disectado por canales menores y presenta un relieve relativo uniforme y de baja pendiente.

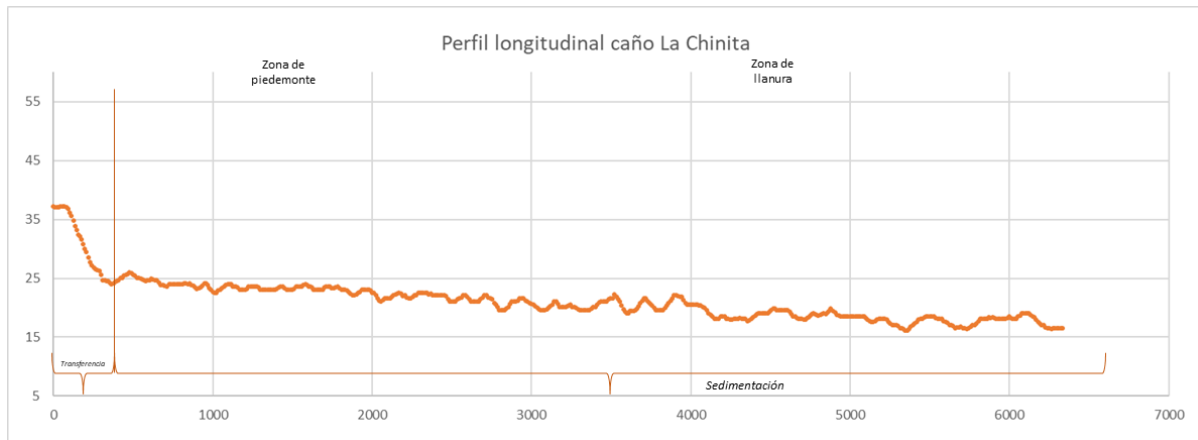


Figura 231. Perfil longitudinal caño La Chinita

11.3.6 Divagación del cauce

Tabla 53 Índice de sinuosidad

Nombre del cuerpo de agua	Valor de sinuosidad S1	Tipo segmento	Valor de sinuosidad S2	Tipo segmento	Valor de sinuosidad S3	Tipo segmento	Tipo de cauce
Río Apartadó	1,29	Sinuoso	1,4	Sinuoso	1,57	Meándrico	Sinuoso a meándrico
Río Zungo	1,32	Sinuoso	1,62	Meándrico	1,7	Meándrico	Sinuoso a meándrico
Río Currulao	1,01	Recto	1,23	Sinuoso	1,25	Sinuoso	Recto a sinuoso
Río Mulatos	1,2	Sinuoso	1,37	Sinuoso	1,4	Sinuoso	Sinuoso
Caño Chinita	1,3	Sinuoso	1,73	Meándrico			Sinuoso a meándrico

11.3.7 Análisis geomorfológico e histórico fluvial en el periodo 1969 – 2022.

En las siguientes figuras se observa el enorme potencial de movilidad que tienen los cuerpos hídricos lóticos de municipio de Apartadó, con tasas de divagación de entre 1.82 m/ año hasta 7.93m/ año, principalmente en los ríos Apartadó, Churidó y Zungo, los cuales a su vez han tenido modificaciones antrópicas evidentes.

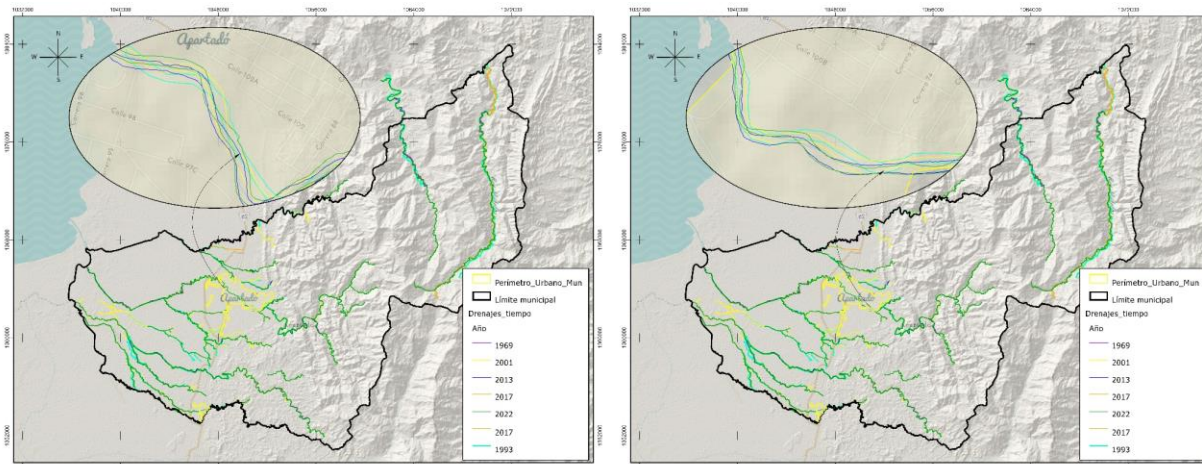


Figura 232. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector urbano

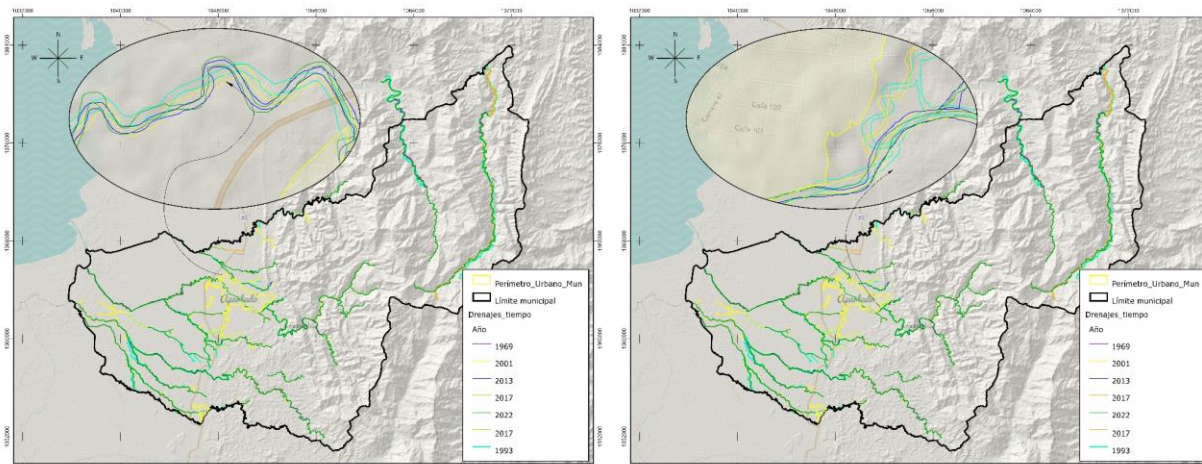


Figura 233. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector área de expansión

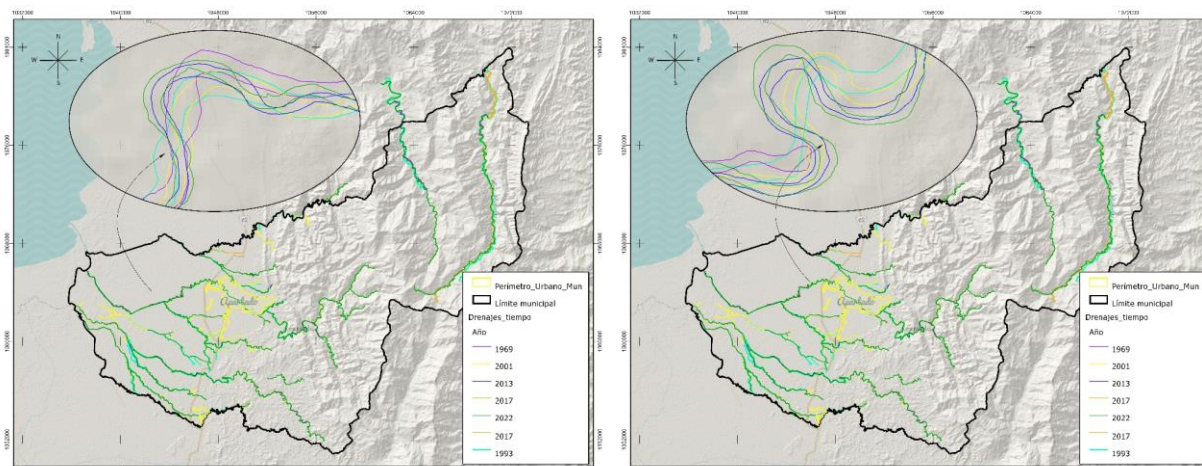


Figura 234. Análisis multitemporal cauce del río Apartadó sector rural

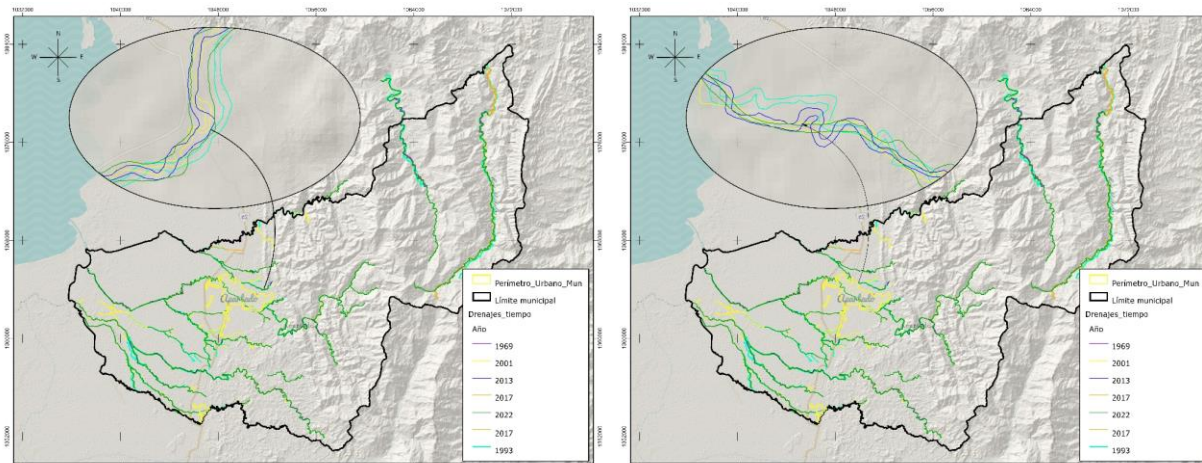


Figura 235. Análisis multitemporal del caño Chinita

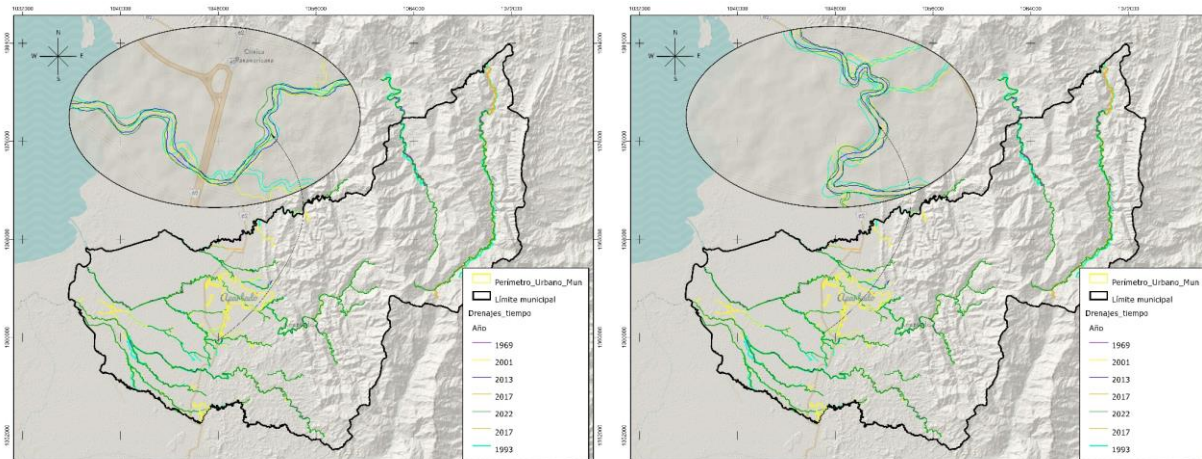


Figura 236. Análisis multitemporal cauce del río Churidó

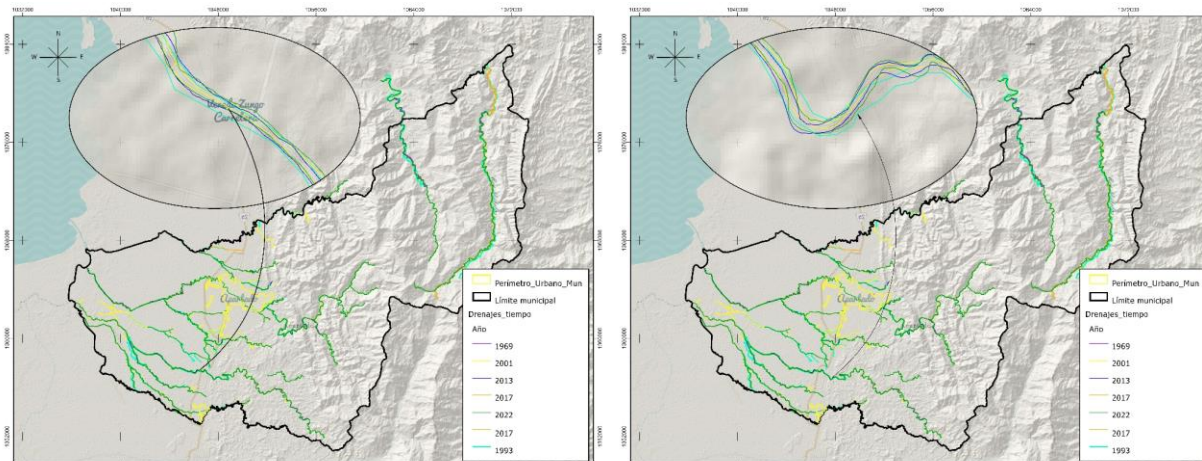


Figura 237. Análisis multitemporal cauce del río Zungo

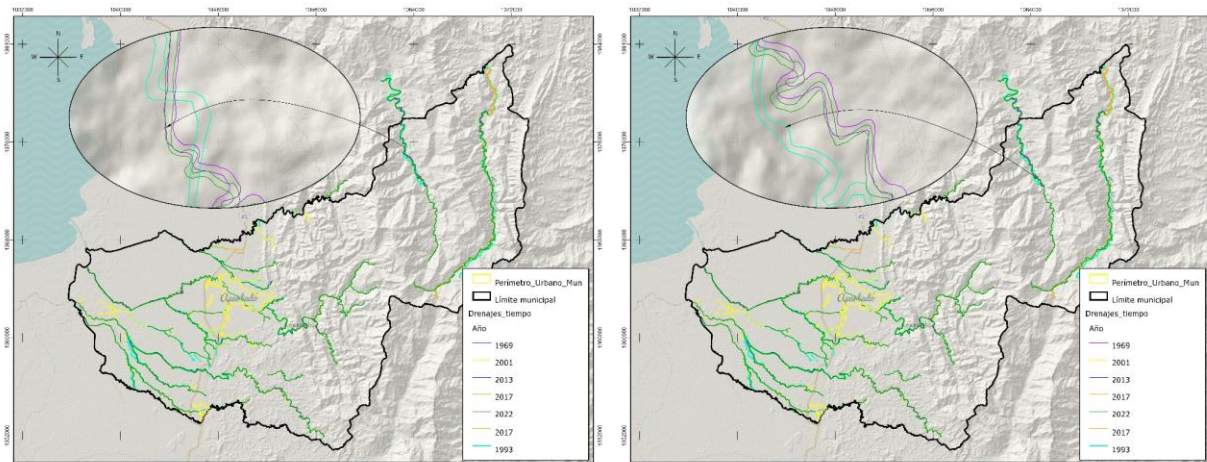


Figura 238. Análisis multitemporal cauce del río Currulao

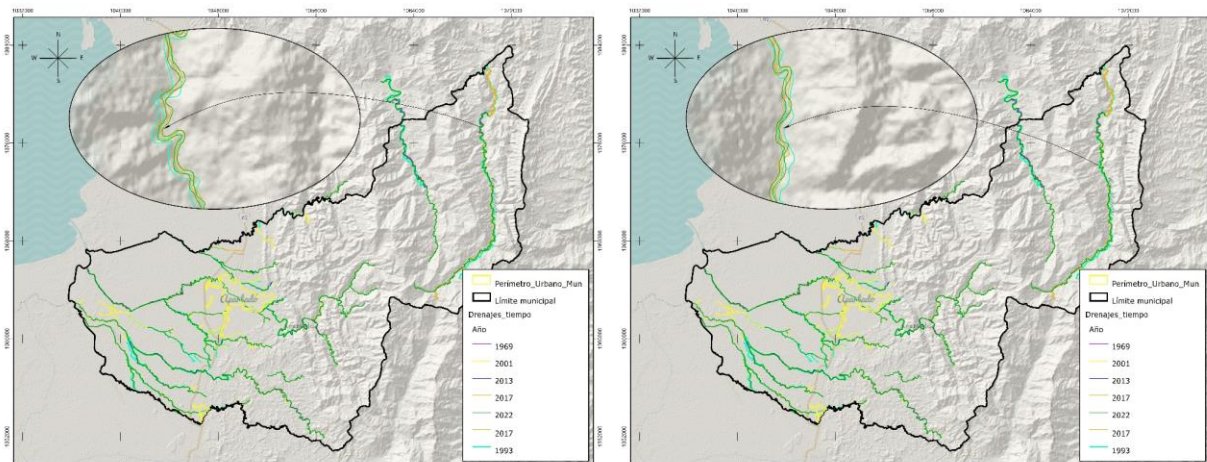
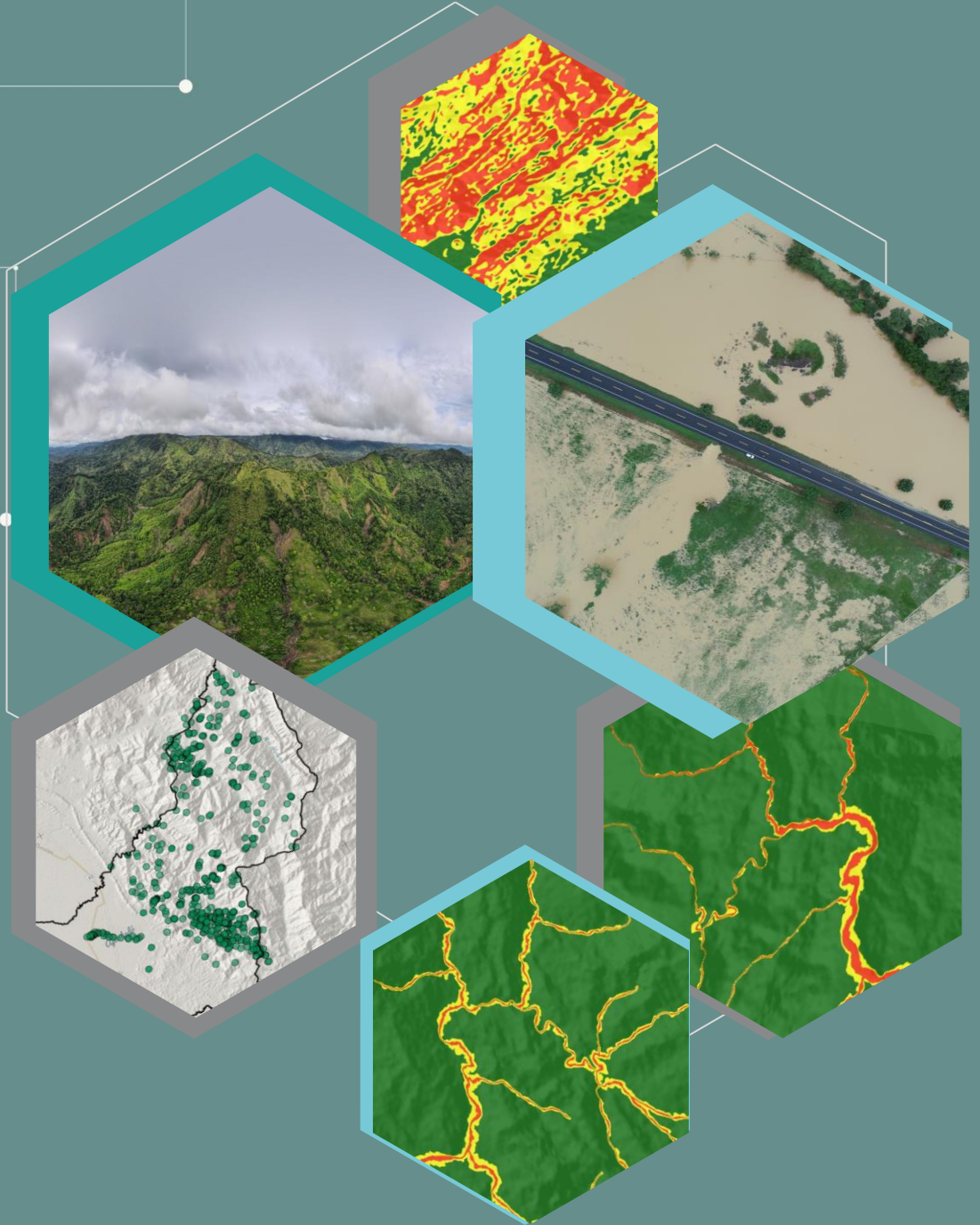


Figura 239. Análisis multitemporal cauce del río Mulatos



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

B. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

1. Amenaza por movimientos en masa

Un movimiento en masa es el proceso por medio del cual un volumen de material constituido por roca, suelo, escombros o una combinación de cualquiera de estos, se desplaza por una ladera o talud por acción de la gravedad. Suele ser conocido también como: fenómeno de remoción en masa, proceso de remoción en masa, derrumbe, deslizamiento, falla de talud, entre otros (Perico, 2016).

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve, su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre. Si por una parte el levantamiento tectónico forma montañas, la meteorización sumada a otros factores detonantes (sismo, lluvia, acción del hombre) actúa sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición de planicie (Portilla, 2012).

Para las áreas rurales, centro poblado, de expansión y urbanas de cabecera municipal se optó por un método determinístico probabilístico, cada uno con la información correspondiente a la escala de análisis. No se emplearon métodos heurísticos porque la información se logró en un nivel de detalle adecuado para la aplicación de criterios técnicos adicionales geológicos, geotécnicos y geomáticos.

1.1 Análisis rural de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000

Dentro de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se tuvo en cuenta el Protocolo para la incorporación de la gestión de riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (MADS, 2015), el cual sugiere un procedimiento determinístico y la valoración de diversos escenarios con presencia de agua y sismo en diferentes periodos de retorno. En la Figura 240 se describe metodológicamente la obtención de la amenaza por movimientos en masa.

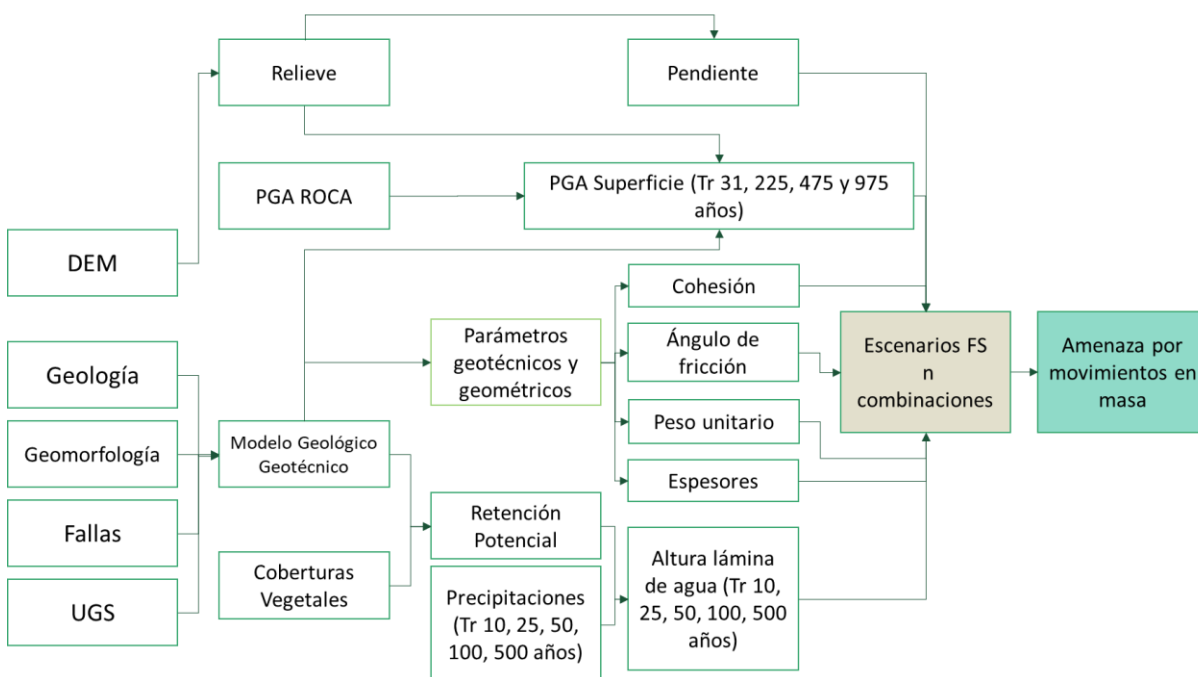


Figura 240. Estructura metodológica para la evaluación de amenaza por movimientos en masa

A partir de la cartografía base de geología y geomorfología, así como de los resultados del programa de exploración del suelo y ensayos de laboratorio realizados como parte de la ejecución del proyecto. Para esto, se llevó a cabo el cruce espacial de los puntos de control de campo geológico y de suelos para estimar los parámetros de comportamiento mecánico en el caso de las unidades geotécnicas que coinciden con al menos uno de los mismos. Los parámetros de resistencia se asignaron en este caso considerando los resultados de laboratorio y los ensayos y parámetros que dan cuenta del comportamiento geomecánico en otros estudios precedentes ya indicados en los apartes de información antecedente. Posteriormente, se tuvo en cuenta la determinación de los detonantes de niveles freáticos y la aceleración sísmica a aplicar para diferentes escenarios.

Una vez definidos los parámetros geotécnicos, se debe tener en cuenta la determinación de los detonantes a aplicar para diferentes escenarios (niveles freáticos y aceleración sísmica). Para considerar la condición de sismicidad se incluyó el efecto de la carga sísmica como una fuerza inercial horizontal a partir del coeficiente de aceleración horizontal en análisis de equilibrio límite pseudoestático. Se partió de los valores regionales de amenaza según el estudio de Amenaza Sísmica Nacional publicado por el Servicio Geológico Colombiano en 2017 y se corroboraron en las zonas de piedemonte para posteriormente aplicar efecto topográfico de amplificación y deamplificación de la aceleración sísmica empleando los principios de Jibson (1987), Faccioli (1991) y la AFPS (1995).

Para la evaluación del nivel freático se plantea la hipótesis en la que este se encuentra en la superficie de falla y varía según el régimen de lluvias de cada píxel. El análisis de lluvia considera el concepto de una proporción de esta que cae al suelo y se infiltra, otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y otro fluye como escorrentía directa. Frente a la dificultad para obtener información primaria de precipitaciones para poder relacionarlos con el registro de eventos históricos y tomando como base la discriminación de periodos de retorno sugerida en los alcances técnicos 2, 20, 50 y 100 años y adicionales 5, 10, 15, 25, 30, 500 años, se estimaron los valores acumulados de lluvia con la precipitación diaria multianual y se evaluó la saturación provocada por ésta. A partir de esto se calcula una condición saturada, parcialmente saturada y seca en lugar de variaciones de nivel freático por periodos de retorno logrando seis escenarios de evaluación en distintas variaciones de profundidad de falla.

Para estimar dicha fracción de agua infiltrada la Guía Técnica sugiere usar el método Alzate (2012) y Torres et al., (2014) que plantea una ecuación empírica en función de los factores que influyen en el proceso de infiltración. Sin embargo, dicha ecuación empírica sugiere el término de precipitación ponderada en el denominador como sumando, lo que puede llegar a indicar menores niveles freáticos con mayores precipitaciones. Por lo anterior, se amplió el análisis con el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del U. S. Department of Agriculture, el cual muy frecuentemente se utiliza para estimar cantidad de agua proveniente de una tormenta (P) que se convierte en escorrentía directa (P_e), pero que para este caso se estimó el complemento, esto es, el resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa sino que se infiltra, es decir ($P_i = P - P_e$).

El método del SCS propone la estimación del Número de Curva (CN) en función de la cobertura y uso del suelo y un potencial de retención que se compara con las precipitaciones para obtener los valores de infiltración posibles según la cobertura y uso del suelo. Finalmente, luego de definir los factores condicionantes en función de las características y propiedades geomecánicas de los materiales y los factores detonantes a partir de la información de amenaza sísmica y precipitaciones, se procede a la definición de la amenaza por movimientos en masa. Para la zonificación básica de amenaza se determinó el factor de seguridad de cada unidad de trabajo (píxel 10 m) definida por la malla y las columnas de suelo obtenidas.

El cálculo de la condición de estabilidad se basa en el método de equilibrio límite aplicando la ecuación de factor de seguridad para el método de bloque deslizante en un talud infinito (Newmark, 1965), para superficies de falla superficiales planas asociadas a deslizamientos traslacionales en cada una de las celdas de trabajo. La ecuación de factor de seguridad se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w b \cos^2 \alpha) \tan \phi'}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

Donde,

c es la cohesión del material.

α Es la pendiente del terreno en grados usada sin reclasificar.

k es el coeficiente de amplificación sísmica.

h_w es el valor de la tabla de agua.

ϕ' Es el ángulo de fricción del material.

γ Gamma es el peso unitario del material.

En la Figura 241 se ilustran los parámetros geométricos indicados.

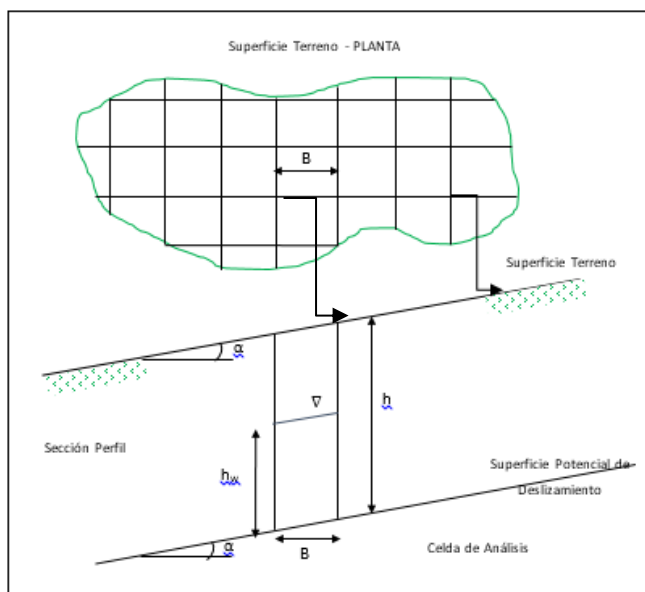


Figura 241. Esquema del modelo de talud infinito. Fuente: SGC, 2015.

El factor de seguridad se debe calcular en al menos diez (10) escenarios que corresponden con los parámetros considerando la profundidad de suelo según las interfaces suelo-roca con ausencia y presencia de detonantes como sismo y nivel de agua modificado por las precipitaciones con distintos periodos de retorno. Para este análisis se consideraron periodos de retorno de precipitaciones de 5, 10, 20, 50 y 100 años y presencia o ausencia de sismo con periodos de retorno de 2, 100, 225, 475 y 975 años y la amplificación de la velocidad de la onda de corte Vs30.

Según las observaciones de campo, los espesores de materiales en donde hay superficies de falla pueden variar entre los 3 y los 20 metros y el área de estudio (título minero) presenta cambios morfométricos importantes en toda su área que indican variaciones espaciales importantes de espesores. Los suelos tienen un espesor promedio de 7.5 metros (calculado con su distribución espacial en el área de influencia) y su variabilidad puede ser importante aun dentro de cada UGS definida, por lo cual se define la

profundidad de 8 m como profundidad promedio de contacto suelo-roca para el cálculo de los diez escenarios mínimos requeridos y se evalúan más profundidades de falla posibles en función de los espesores posibles, no obstante se realizan escenarios adicionales posibles que se integran a la amenaza final.

El resultado final es el cálculo del factor de seguridad en cada celda o píxel para 1492 casos en distintas posibilidades de ocurrencia de falla que relacionan variaciones de nivel freático, presencia de aceleración sísmica, varias profundidades de falla y condición media a desfavorable de parámetros geomecánicos por la presencia de materiales por encima de la superficie de falla.

La condición de amenaza puede ser representada en el Factor de Seguridad siempre que se clasifique en los rangos o clases mostradas en la Tabla 54. Sin embargo, las evaluaciones de riesgo por movimientos en masa conviene desarrollarlas sobre una condición general de amenaza y no sobre escenarios particulares, de manera que no se debe expresar en términos de factor de seguridad para un escenario seleccionado sino en función de la combinación de todos los escenarios posibles. La evaluación de un número mayor de opciones posibles contempla la inclusión de un número mayor de posibilidades de falla (siendo esta siempre acotada por el método de evaluación), para representar los resultados en términos de probabilidad de falla, la cual se calculó en cada celda o píxel considerando la media aritmética, varianza y desviación estándar y se clasificó con los rangos que se presentan en la Tabla 55, siendo estos últimos los definitivos para la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

Tabla 54. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases. Fuente: SGC, 2012

Nivel de amenaza	Factor de seguridad	Color en el mapa
Alta	<1,2	Rojo
Media	1,2 – 1,5	Amarillo
Baja	>1,5	Verde

Tabla 55. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases. Fuente: SGC, 2012

Nivel de amenaza	Probabilidad de falla	Color en el mapa
Alta	0,35 – 1,0	Rojo
Media	0,15 - 0,35	Amarillo
Baja	0 – 0,15	Verde

Se calcula el promedio y la varianza del factor de seguridad estimado para los 1592 escenarios y se plantea de manera probabilística calculando el factor Z y la probabilidad de falla P según Alzate (2012) de la siguiente manera:

$$Z = \frac{1 - FS}{desv(FS)} \quad , \quad P = (0,5 \pm Z) * 100$$

No obstante, el protocolo (MADS, 2015) recomienda calcular la varianza del factor de seguridad final para cada celda de cada uno de los escenarios y no a partir de la combinación misma de todos los escenarios calculados en una misma celda. Si bien la probabilidad de falla se obtiene calculando los factores Z tradicionales para evaluar probabilidad de ocurrencia de FS, para estabilidad de taludes se considera apropiado evaluar directamente la probabilidad de falla (caso en que las fuerzas actuantes son iguales a las fuerzas resistentes en la ecuación del factor de seguridad, es decir, que FS=1), considerando los planteamientos de González¹ (2009); es decir, que si se tiene un resultado de FS igual a uno (1), la posibilidad de falla es la misma a la de la estabilidad, lo que corresponde con una probabilidad de falla del

¹González G., Álvaro. Factores de seguridad... ¿por qué tantos? V encuentro de ingenieros de suelos y estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, 2009.

50%, de manera que considerando una seguridad adicional se plantea la amenaza alta a partir de una probabilidad de falla superior al 40% y la amenaza baja como probabilidad de falla menor a 0,09%. Esto genera los rangos de probabilidad de falla que son compatibles y comparables con las condiciones de factor de seguridad y clasificaciones mostradas de manera acorde con el Protocolo para la incorporación de gestión de riesgo en POMCAS en 2014 y SGC en 2015.

En resumen, la condición de amenaza se presenta para los 10 escenarios solicitados por el Protocolo en distintas combinaciones de superficies de falla posibles y se clasificaron en tres categorías: alta, media y baja. A partir de todas las evaluaciones de posibilidad de falla se calculó también la amenaza en términos probabilísticos considerando no solo un único escenario sino la combinación de todos ellos, lo cual permite adelantarse a la representación de la amenaza general para toda el área del título también en tres categorías (alta, media y baja) y con la cual resulta más recomendable estimar las condiciones de riesgo, evitando la subjetividad impresa en la selección de un solo escenario en el catálogo de posibilidades calculadas.

A continuación se muestran brevemente las variables usadas para el cálculo de la amenaza por movimientos en masa.

1.1.1 Pendiente

Hace referencia al ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, su importancia radica en la influencia del factor sobre la estabilidad del suelo como factor geométrico (Figura 242). Esta variable se mantiene con valores graduales continuos y no se agrupa por rangos a pesar de que típicamente se haga y se solicite en los alcances técnicos del presente estudio; esto porque esta agrupación es solamente aplicable en métodos heurísticos geomorfológicos y no para métodos heurísticos semicuantitativos, estadísticos o determinísticos en los que mantenerse cualitativamente significa reducir resolución y calidad de las variables empleadas.

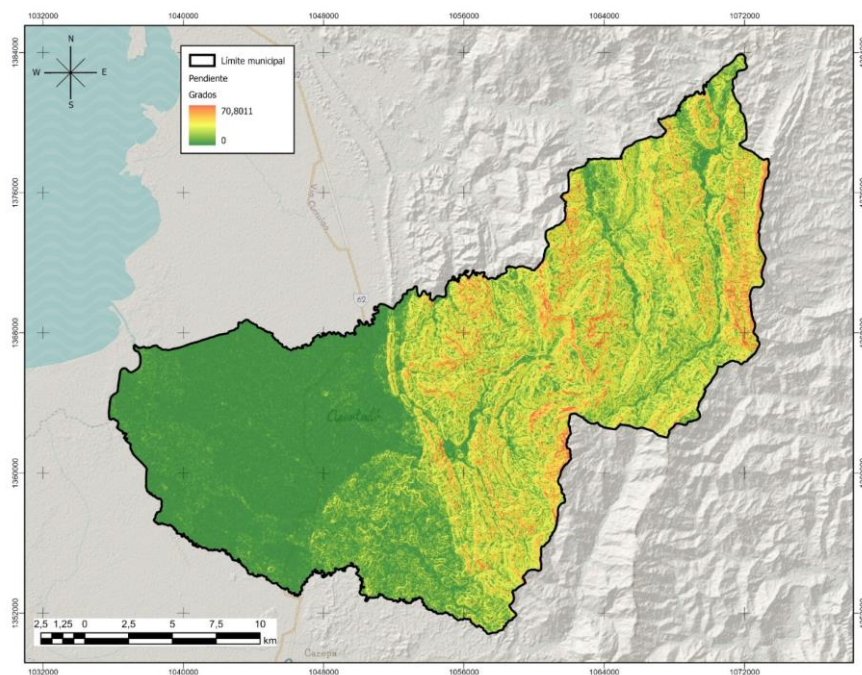


Figura 242. Pendiente.

1.1.2 Precipitación

Mide la cantidad de lluvia en milímetros reportadas por las diferentes estaciones ubicadas por el IDEAM a lo largo del área de estudio. Como se indicó metodológicamente, para estimar la fracción de agua infiltrada la Guía Técnica sugiere usar el método Alzate (2012) y Torres *et al.*, (2014) que plantea una ecuación empírica que puede llegar a indicar menores niveles freáticos con mayores precipitaciones. Por tal motivo se utilizó el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del U. S. Department of Agriculture. Dentro de la evaluación se emplea el valor de precipitaciones con periodos de retorno de 10, 50, 100 Y 300 años cruzados con el tipo de material y cobertura para obtener la retención potencial (S) y las respectivas láminas de agua para la precipitación presente en el área de estudio a lo largo de diferentes periodos de retorno, las cuales hacen variar la lámina de agua en función de cada periodo de retorno.

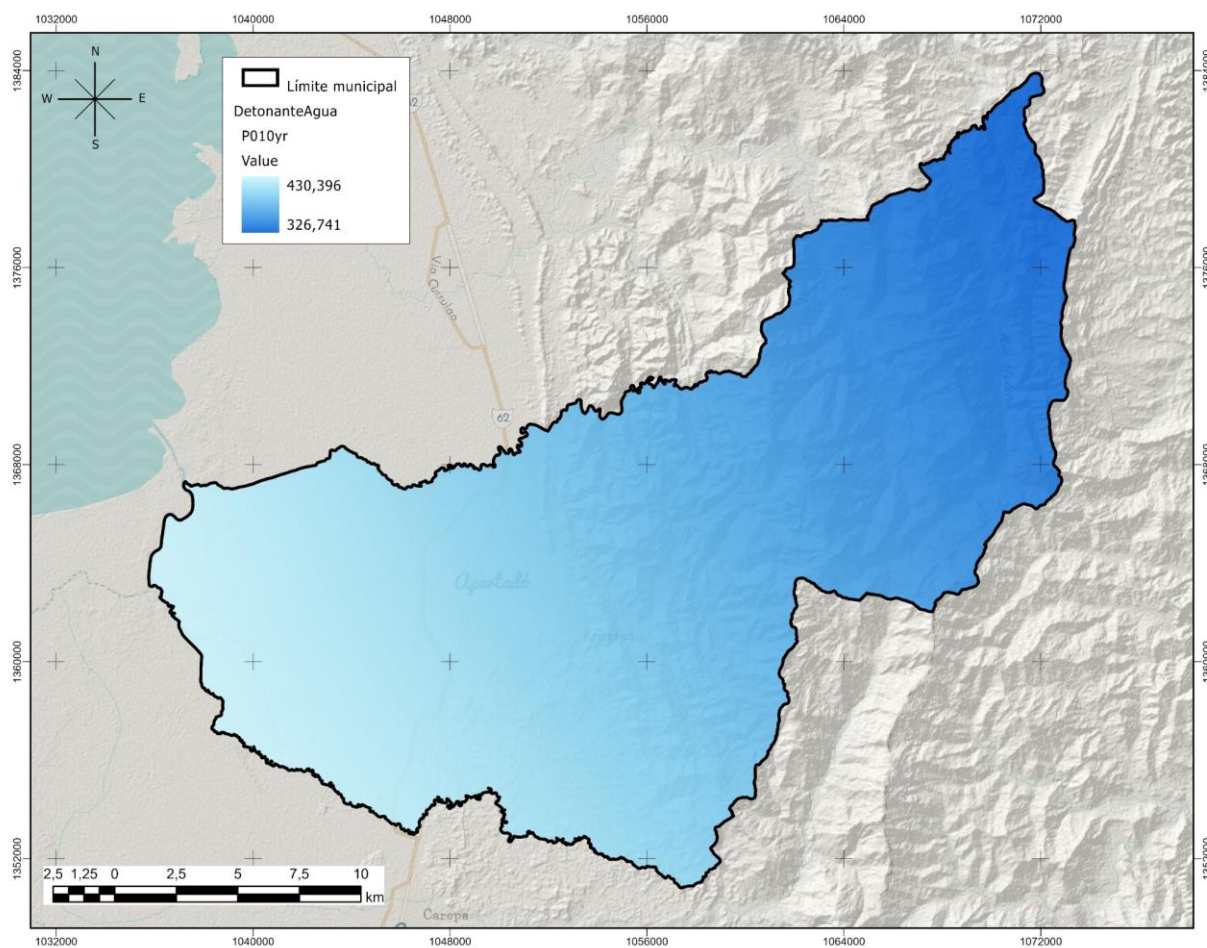


Figura 243. Precipitación Tr 10 años

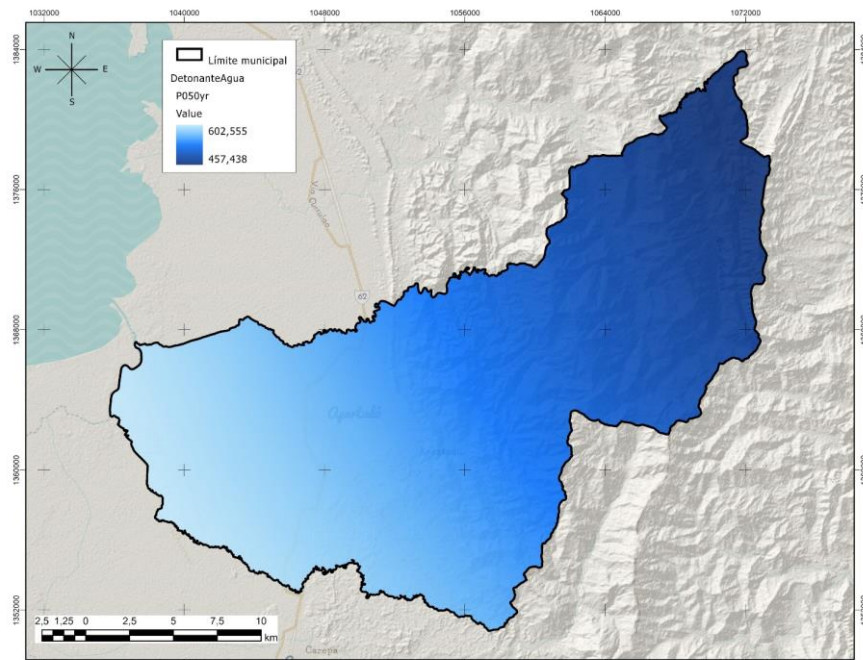


Figura 244. Precipitación Tr 50 años

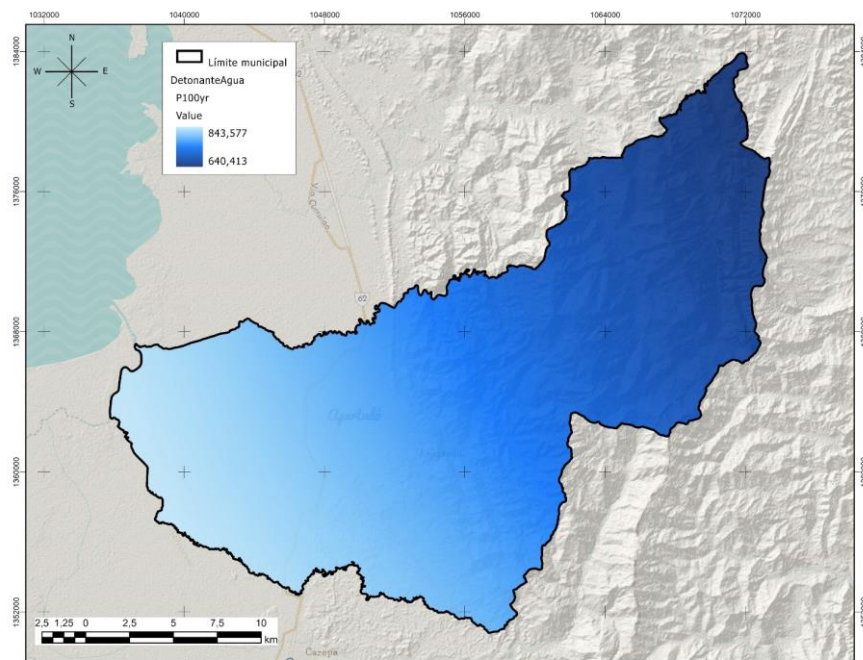


Figura 245. Precipitación Tr 100 años

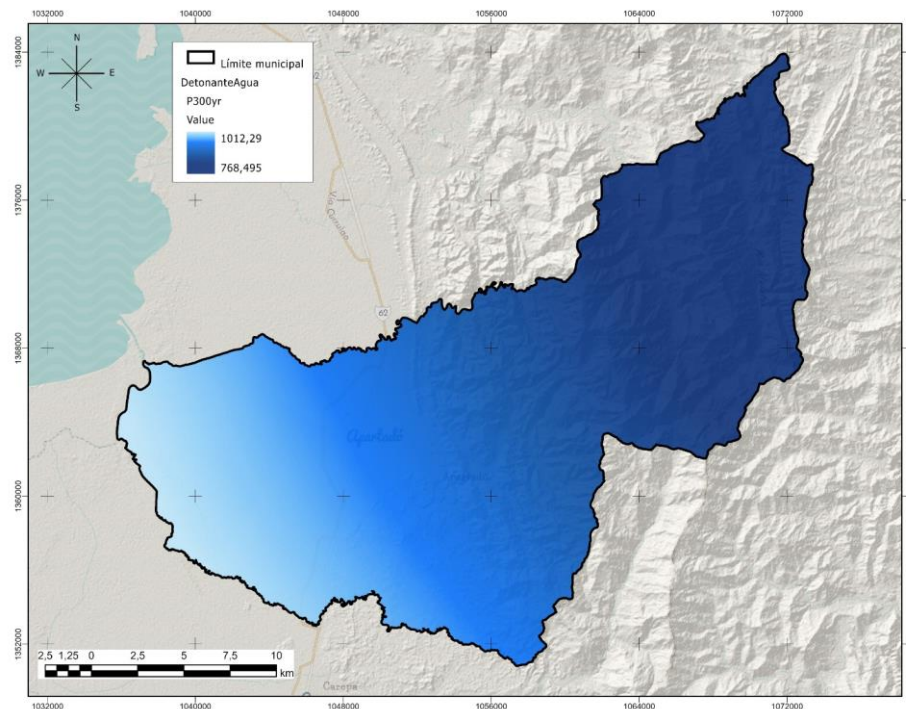


Figura 246. Precipitación Tr 300 años

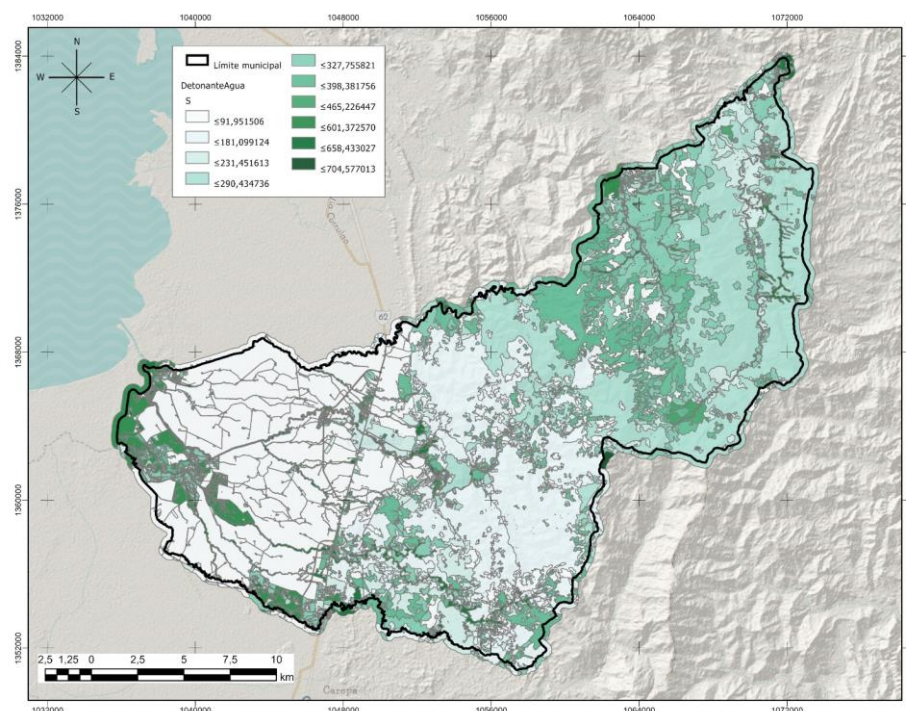


Figura 247. Retención Potencial

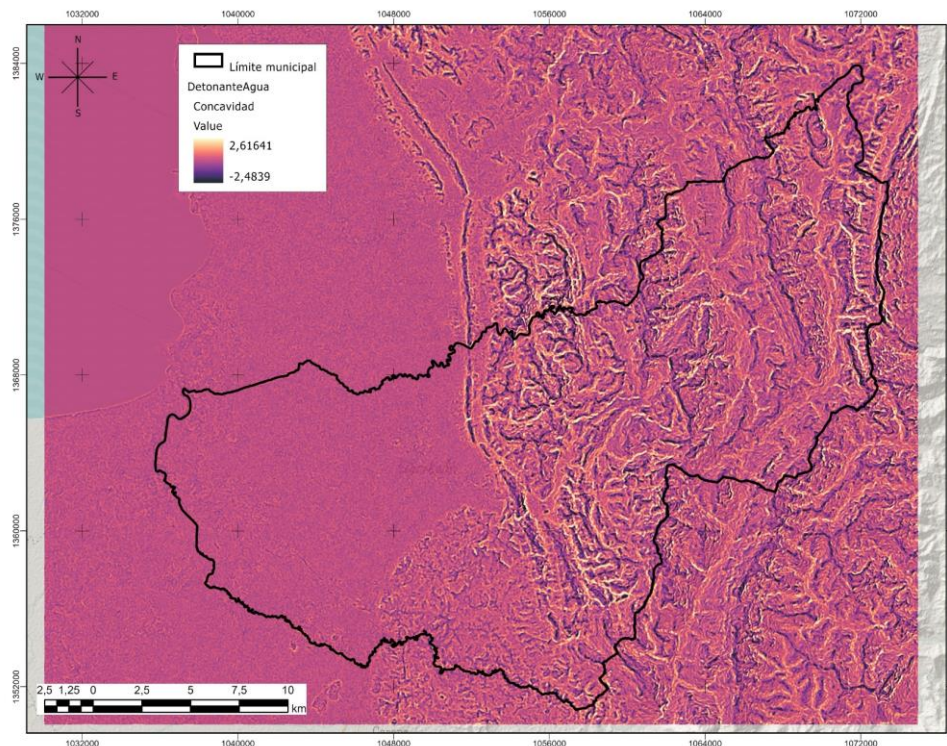


Figura 248. Concavidad

1.1.3 Aceleración sísmica

La aceleración sísmica se estimó partiendo de los valores regionales de amenaza según los valores de Amenaza Sísmica Nacional (SGC; GRP, 2019) y se corroboraron en las zonas de piedemonte con el que se estimó la aceleración horizontal pico efectiva en superficie considerando la respuesta local o el efecto de sitio (Figura 250). Finalmente se aplicó a partir de la geometría y morfometría del área de estudio el efecto topográfico de amplificación y deamplificación de la aceleración sísmica empleando los principios de Jibson (1987), Faccioli (1991) y la AFPS (1995) logrando diferenciar el coeficiente en las partes cóncavas y convexas de la superficie del terreno (Figura 249). Esto teniendo en cuenta los efectos derivados de la inclinación de laderas y su forma, de esta manera se genera correctamente el factor de amplificación (Figura 251) que permite tomar la aceleración sísmica en roca y estimar la aceleración pico efectiva en superficie para períodos de retorno.

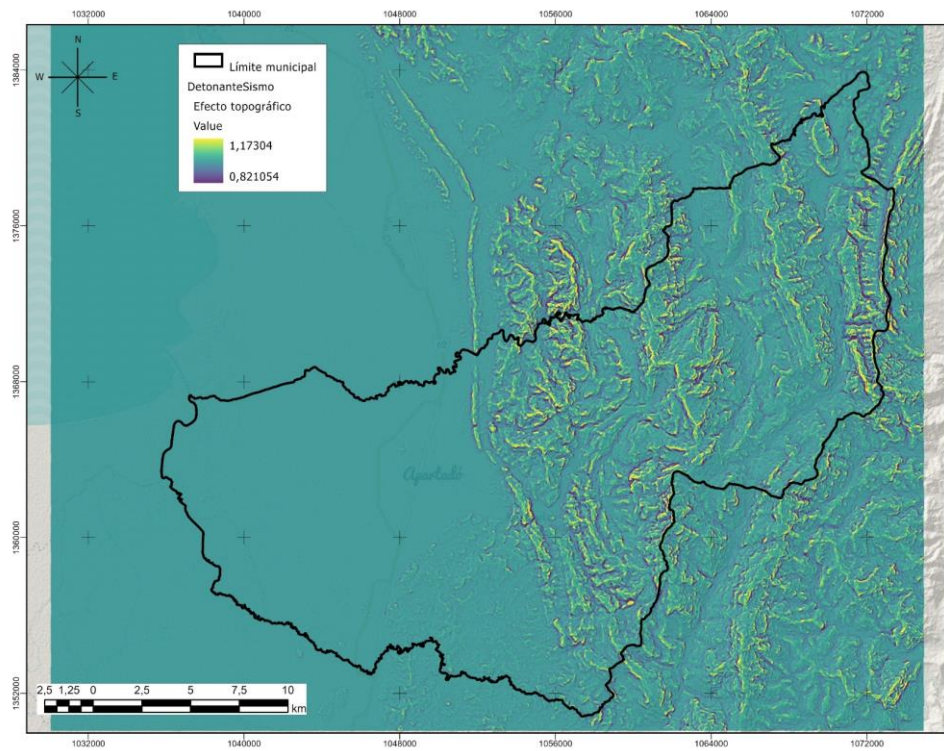


Figura 249. Efecto topográfico.

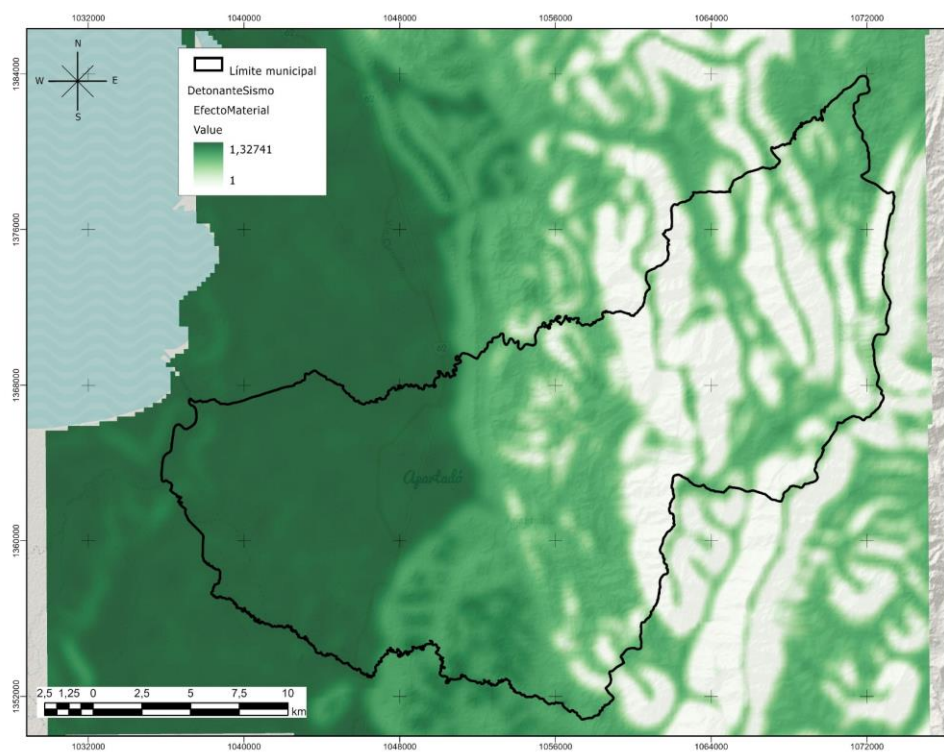


Figura 250. Efecto de material

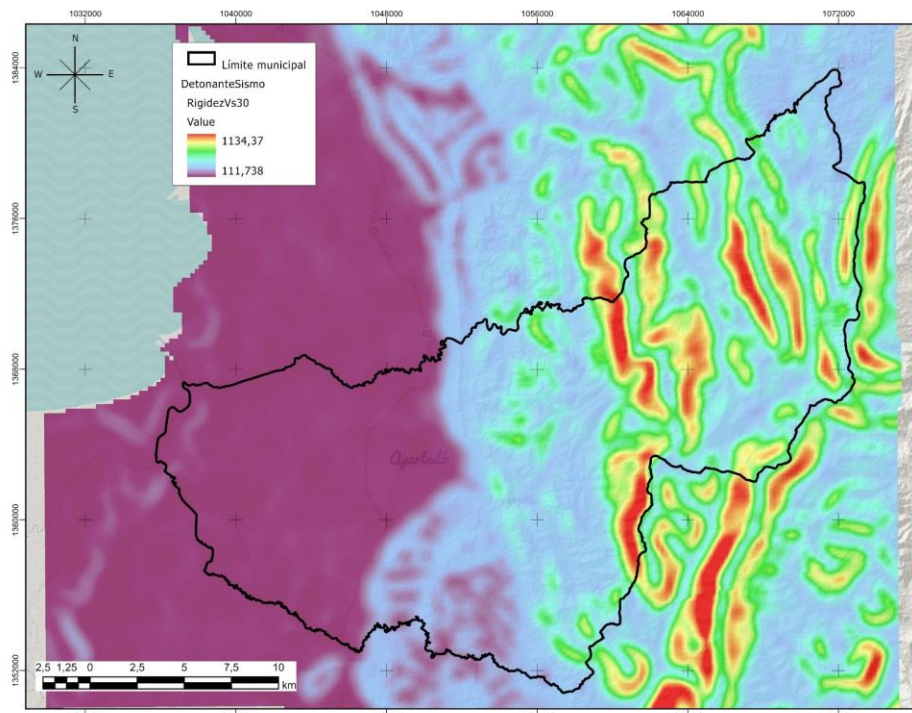


Figura 251. Velocidad onda cortante promediada a 30 m de profundidad

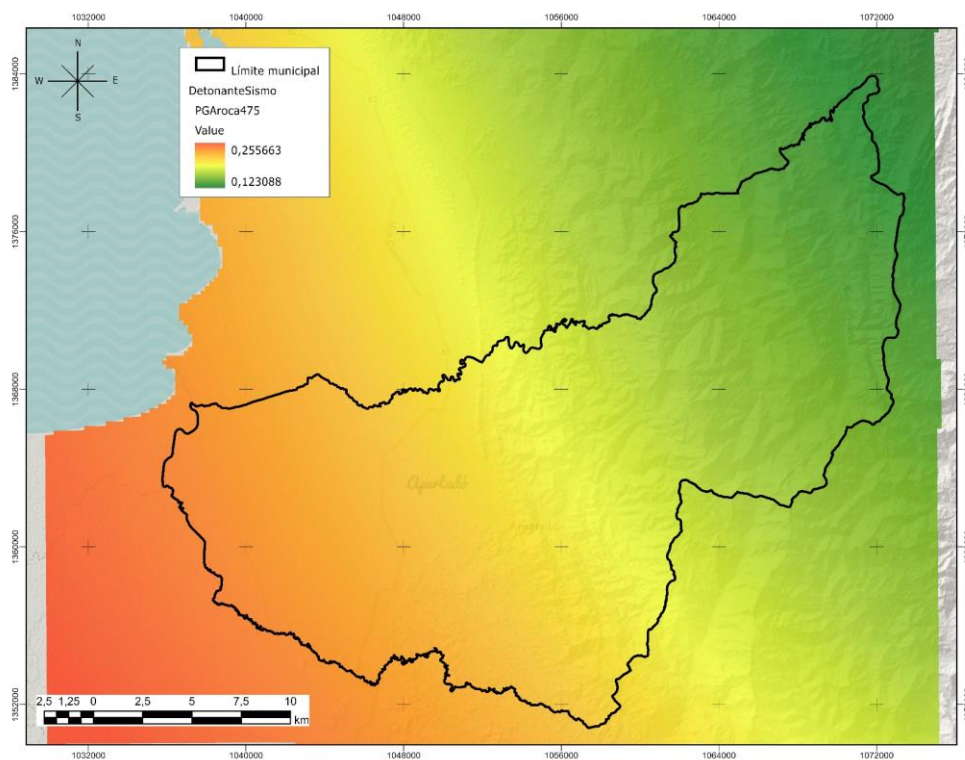


Figura 252. Aceleración sísmica en roca para periodo de retorno 475 años

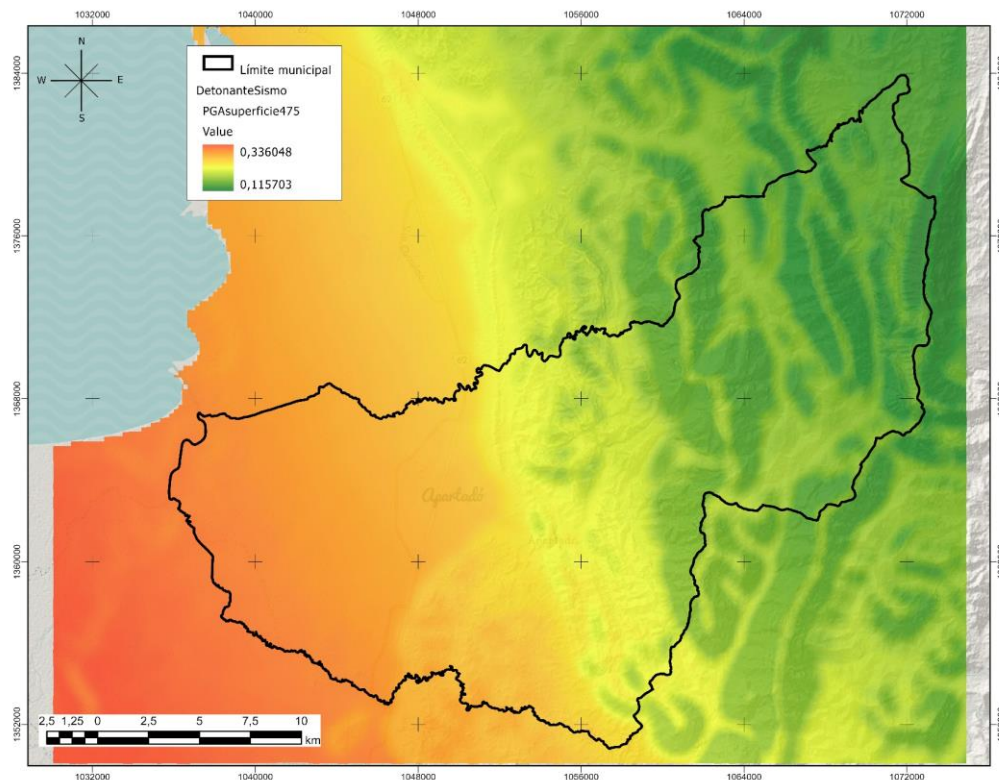


Figura 253. Aceleración sísmica en superficie para periodo de retorno 475 años

1.1.4 Factor antrópico

Representa la posibilidad de contribuir a la ocurrencia de movimientos en masa a partir de modificaciones en el relieve como cortes en las vías, extracción de materiales, entre otras. Sin embargo la acción del hombre en el municipio no promueve la existencia de movimientos en masa.

1.1.5 Modelo geológico geotécnico

Representa las zonas geotécnicas de comportamiento homogéneo (Figura 254), contiene polígonos que simbolizan rocas y suelos en superficie clasificados según lo propuesto por la IAEG (1981), Montero, González, Ángel (1982) y la "Propuesta metodológica para la cartografía geológica aplicada a geomecánica", desarrollada dentro del "Proyecto Compilación de la Información Geomecánica", elaborado por INGEOMINAS (2005), hoy SGC. Cada zona geotécnica homogénea generaliza materiales que dan origen a las formaciones superficiales y el suelo que resulta de la degradación o transporte de los mismos.

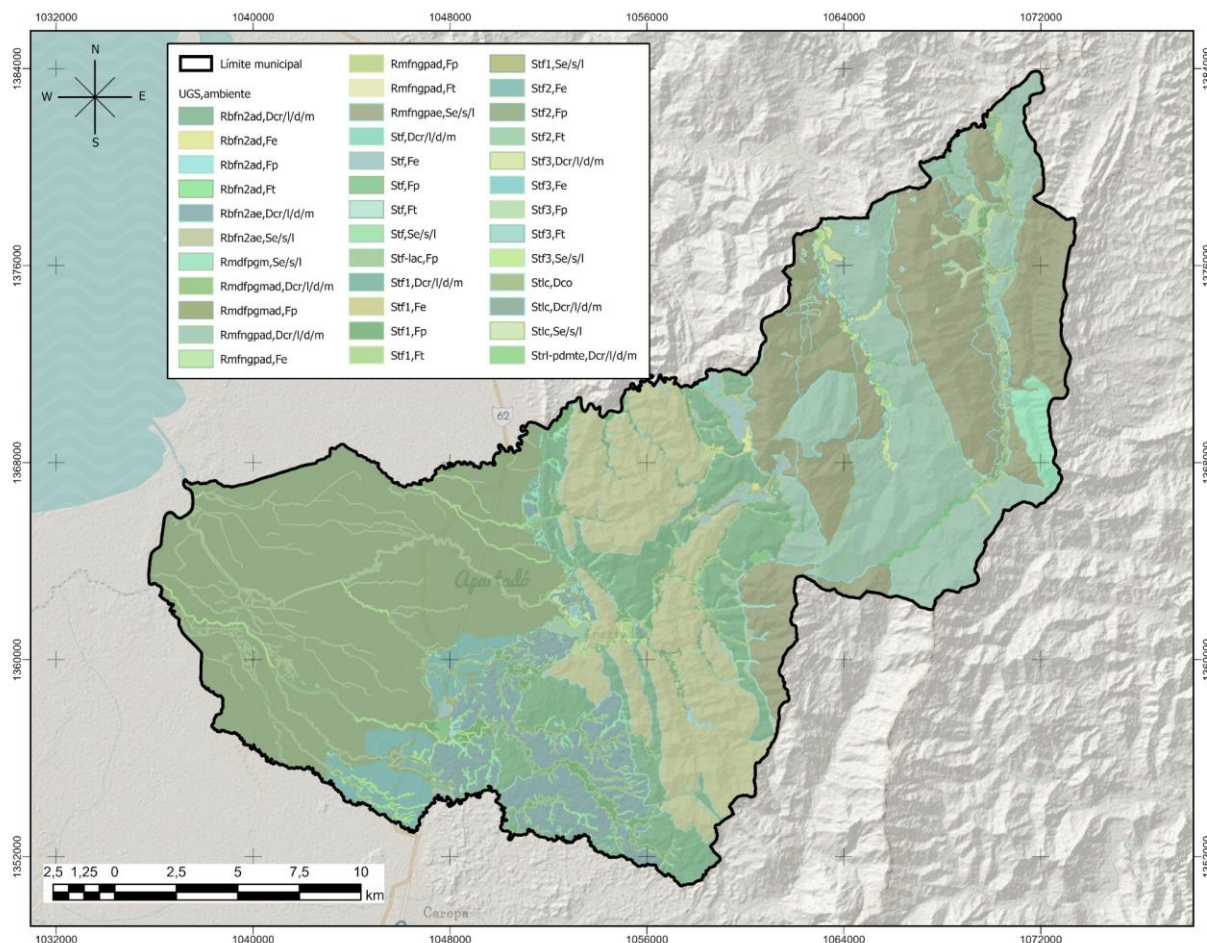


Figura 254. Modelo geológico - geotécnico.

Como se indicó anteriormente, los parámetros de resistencia se asignaron considerando los resultados de laboratorio del componente de geología y los parámetros que dan cuenta del comportamiento geomecánico en otros estudios precedentes ya indicados en los apartes de información antecedente. Los parámetros de densidad y resistencia al corte para un modelo de falla drenada basada en el criterio de Mohr-Coulomb bajo un mecanismo de falla traslacional se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56. Parámetros geomecánicos evaluados para cada unidad geológica superficial

UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Rbfn2ad, Dcr/l/d/m	16,00	26,36	19,12	8,81
Rbfn2ad, Fe	17,05	28,31	18,35	11,92
Rbfn2ad, Fp	16,68	29,27	19,01	14,67
Rbfn2ae, Se/s/l	15,02	33,48	18,44	10,67
Rbfn2ad, Dcr/l/d/m	17,53	32,00	19,06	12,49
Rbfn2ad, Fe	17,01	30,83	18,56	9,89
Rbfn2ad, Fp	16,15	32,71	17,26	8,10
Rbfn2ad, Ft	16,56	32,22	18,34	9,17

UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Rbfn2ae, Se/s/l	15,89	32,43	19,82	10,06
Rbfn2ae, Dcr/l/d/m	17,94	27,99	19,86	9,34
Rbfn2ad, Fe	15,72	30,47	17,75	14,87
Rbfn2ad, Fp	15,89	27,35	18,22	12,53
Rbfn2ad, Ft	15,44	33,49	17,45	11,74
Rbfn2ae, Se/s/l	15,92	30,45	19,23	8,77
Rmfngpad, Fp	23,93	31,11	18,73	12,14
Rmfngpae, Se/s/l	21,90	26,52	18,41	7,44
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	24,43	27,22	18,24	10,94
Rmfngpad, Fp	24,61	32,19	19,42	11,33
Rmfngpae, Se/s/l	22,02	27,43	17,60	12,08
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	22,69	32,24	17,24	8,30
Rmfngpad, Fe	23,08	28,26	18,22	7,54
Rmfngpad, Fp	23,14	27,55	18,79	12,18
Rmfngpae, Se/s/l	23,53	26,41	19,36	8,98
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	23,43	28,35	18,97	9,09
Rmfngpad, Ft	22,10	25,89	17,21	13,27
Rmfngpae, Se/s/l	22,34	31,50	17,62	7,18
Rmfngpad, Dcr/l/d/m	21,64	29,94	19,47	14,06
Rmfngpad, Fp	20,27	33,97	19,73	7,70
Rmfngpad, Ft	21,09	33,24	17,86	7,62
Rmfngpae, Se/s/l	23,52	28,08	18,30	14,23
Rmdfpgmad, Dcr/l/d/m	23,11	30,48	17,31	12,46
Rmdfpgmad, Fp	22,49	32,95	18,40	8,13
Rmdfpgm, Se/s/l	23,33	30,31	18,93	8,43
Strl-pdmte, Dcr/l/d/m	16,85	23,50	18,86	14,53
Stf2, Fe	27,62	10,72	19,24	8,54
Stf2, Fp	25,50	13,52	19,88	37,36
Stf2, Ft	26,47	14,47	19,30	13,57
Stf, Dcr/l/d/m	25,87	15,31	19,38	9,41
Stf, Fe	27,98	11,41	18,47	12,95
Stf, Fp	27,56	13,19	17,79	9,67
Stf, Ft	25,01	14,77	17,85	11,87
Stf, Se/s/l	27,69	12,87	19,67	12,89
Stf1, Dcr/l/d/m	32,94	14,33	18,73	12,78
Stf1, Fe	32,72	14,77	19,94	11,01
Stf1, Fp	30,97	17,62	19,75	19,68
Stf1, Ft	31,72	15,74	18,72	14,47
Stf1, Se/s/l	30,82	8,99	19,88	14,03
Stf, Fe	25,38	8,41	19,69	8,18

UGS	Phi	C	Gamma	Espesor
Stf, Fp	26,45	11,51	19,40	7,19
Stf, Ft	25,53	16,52	18,45	14,09
Stf, Fp	25,69	8,36	17,56	12,71
Stf, Ft	27,77	8,01	18,59	13,46
Stf, Fe	27,98	11,35	18,36	13,47
Stf, Fp	27,05	15,89	18,02	10,43
Stf, Ft	26,28	9,26	18,99	13,39
Stlc, Dco	16,42	11,29	18,23	8,53
Stlc, Dcr/l/d/m	14,78	14,32	18,67	10,38
Stlc, Se/s/l	14,27	16,11	19,54	9,19
Stf1, Dcr/l/d/m	28,64	8,33	18,89	9,14
Stf1, Fe	29,80	13,21	17,83	16,81
Stf1, Fp	29,86	16,01	19,84	14,98
Stf1, Ft	29,30	14,13	19,19	11,70
Stf1, Se/s/l	28,87	8,83	18,87	10,24
Stf, Dcr/l/d/m	25,20	16,75	19,60	7,52
Stf, Fp	25,75	14,27	19,91	14,17
Stf, Ft	27,83	10,99	19,69	7,22
Stf, Se/s/l	27,29	8,65	19,02	7,72
Stf, Dcr/l/d/m	25,78	10,07	18,11	7,33
Stf, Fe	26,16	13,95	18,88	13,06
Stf, Fp	25,51	9,09	17,10	10,58
Strl-pdmte, Dcr/l/d/m	16,11	23,24	17,21	12,74
Stf-lac, Fp	27,40	14,87	17,95	13,54
Stf3, Dcr/l/d/m	25,13	14,23	18,89	10,87
Stf3, Fp	25,67	10,07	18,92	7,05
Stf3, Se/s/l	26,62	13,79	19,84	8,00
Stf3, Dcr/l/d/m	27,25	15,07	19,88	10,61
Stf3, Ft	27,95	10,40	19,48	12,58
Stf3, Dcr/l/d/m	25,53	12,38	19,52	14,55
Stf3, Fp	27,90	11,03	18,30	13,25
Stf3, Ft	27,43	10,80	19,61	10,66
Stf3, Se/s/l	25,39	10,72	17,21	11,84
Stf3, Dcr/l/d/m	27,00	9,07	19,70	14,24
Stf3, Fe	27,87	17,47	19,25	10,68
Stf3, Fp	27,15	13,50	19,58	14,23
Stf3, Ft	25,14	11,80	17,16	9,55
Stf3, Se/s/l	25,57	12,47	19,58	7,86

Al analizar la condición de estabilidad los escenarios de combinación de lluvias por periodos de retorno, presencia de sismo y distintas posibilidades de superficie de falla, se observa una condición de amenaza

baja y media, aun en las condiciones más favorables (sin sismo y suelos secos) debido al relieve de baja pendiente y los materiales transportados presentes en toda la extensión del territorio.

Este relieve y las características de comportamiento geomecánico de materiales siguen dominando en la condición de estabilidad tras aplicar saturaciones parciales de suelos con lluvias por periodos de retorno de aumento gradual, siendo por supuesto cada vez más importante el aumento de las lluvias. Si se tiene en cuenta el sismo como detonante, es evidente que el empuje generado en los taludes por efecto de la fuerza sísmica redundará en una multiplicación significativa en la inestabilidad siendo muy representativo el aumento de la condición de amenaza en los escenarios "extremos" con este detonante. Por lo anterior referente a la dispersión de las áreas de amenazas altas, medias y bajas, se plantean las siguientes consideraciones en función de cada una:

- Las zonas de **amenaza alta** corresponden con laderas en las que han ocurrido movimientos en masa o confluyen condiciones que favorecen su ocurrencia como áreas de fallamiento local (en áreas de aporte ubicadas en zonas lejanas al área de influencia), meteorización alta a moderada, discontinuidades desfavorables, alta pendiente, erosión hídrica alta y socavación permanente en los márgenes de los cuerpos de agua.
- Las zonas de **amenaza media** corresponden con laderas donde han ocurrido algunos movimientos en masa y existe la posibilidad de que ocurran pues confluyen algunas de las condiciones que favorecen su ocurrencia como algunas áreas cercanas a fallas locales, presencia de cortes y rellenos en caminos rurales, pendientes moderadas y erosión hídrica moderada o socavación lateral moderada.
- Las zonas de **amenaza baja** corresponden con laderas en las que no existen indicios que permitan predecir deslizamientos y confluyen pocas condiciones que favorecen su ocurrencia, son áreas con materiales con discontinuidades favorables, ausencia de fallamiento local o erosión hídrica y poca pendiente del terreno.

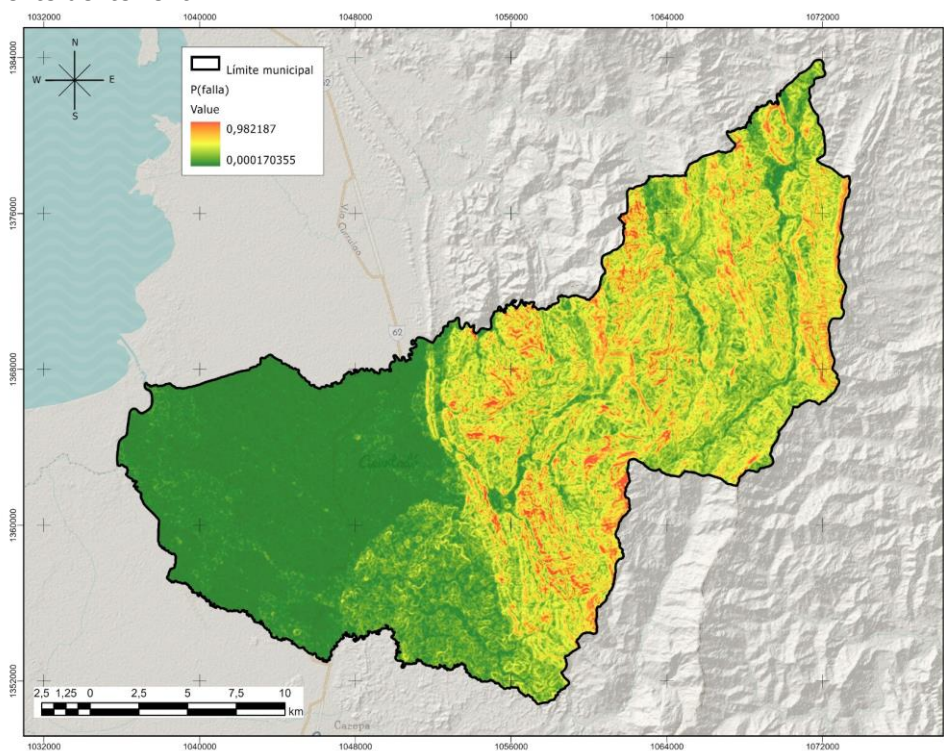


Figura 255. Probabilidad de falla

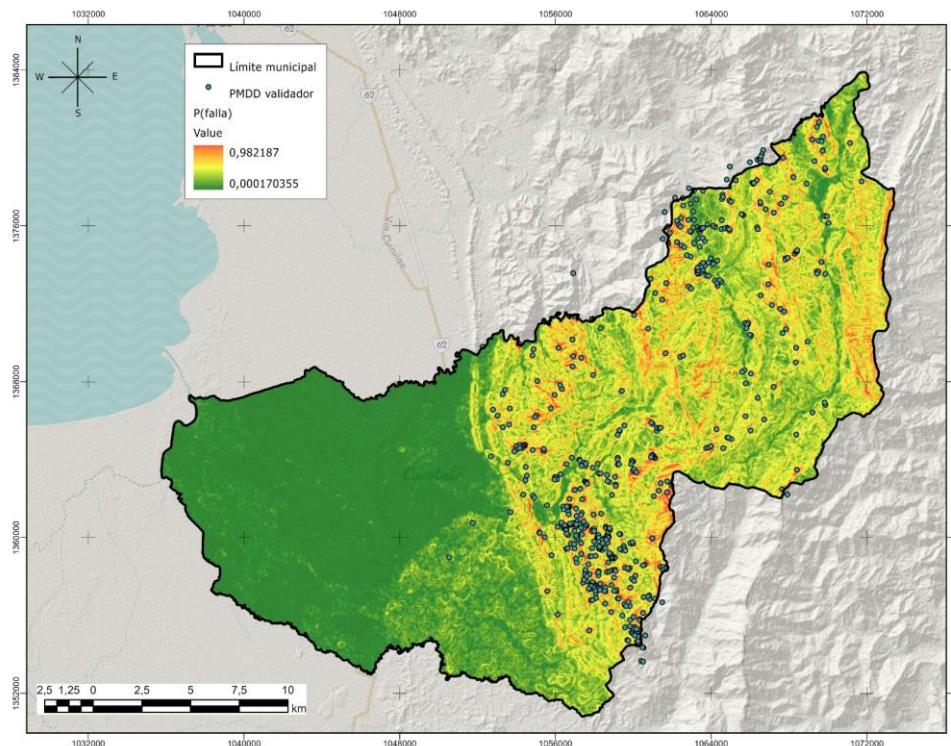


Figura 256. Probabilidad de falla y validación con eventos

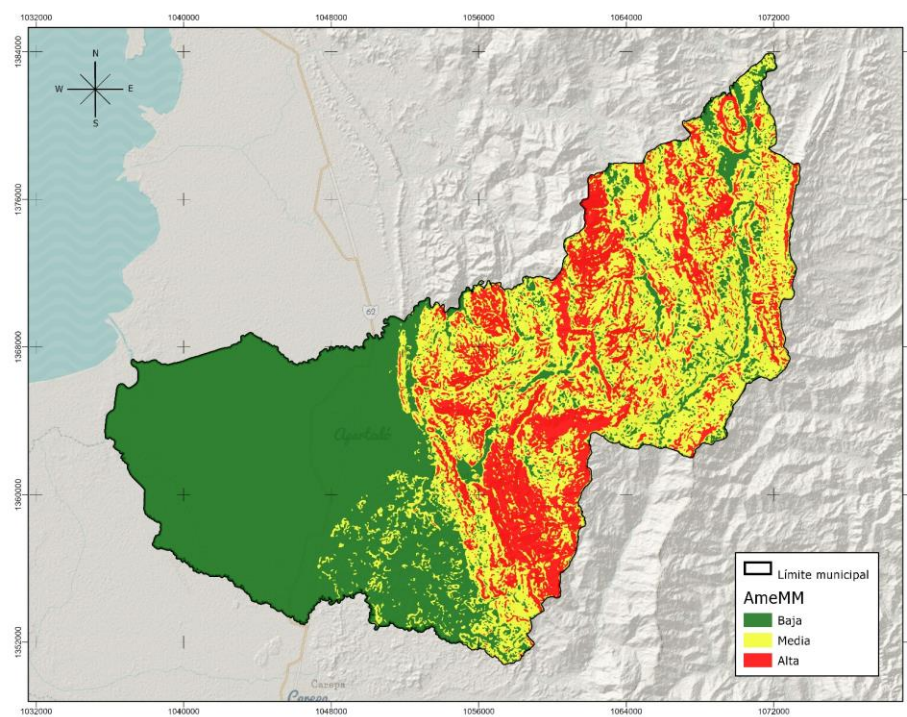


Figura 257. Amenaza por movimientos en masa

1.2 Análisis urbano de amenaza por movimientos en masa escala 1:5.000

El cálculo de la condición de estabilidad se basa en el método de equilibrio límite aplicando la ecuación de factor de seguridad para el método de bloque deslizante en un talud infinito (Newmark, 1965), para superficies de falla superficiales planas asociadas a deslizamientos traslacionales en cada una de las celdas de trabajo. Las variables usadas se muestran desde la Figura 261 hasta la Figura 275 y la ecuación de factor de seguridad se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w b \cos^2 \alpha) \tan \Phi'}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

Donde,

c es la cohesión del material,

α Es la pendiente del terreno,

k es el coeficiente de amplificación sísmica,

h_w es el valor de la tabla de agua,

Φ' Es el ángulo de fricción del material,

γ Gamma es el peso unitario del material.

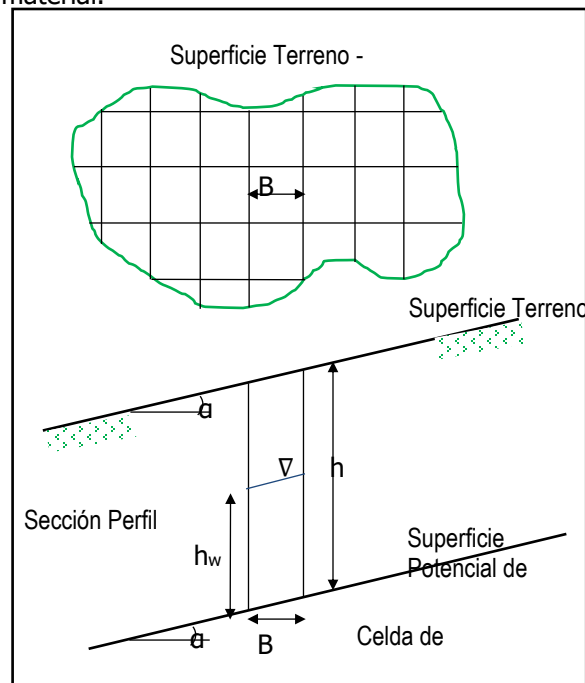


Figura 258. Modelo de estabilidad de talud infinito. Fuente: SGC (2015)

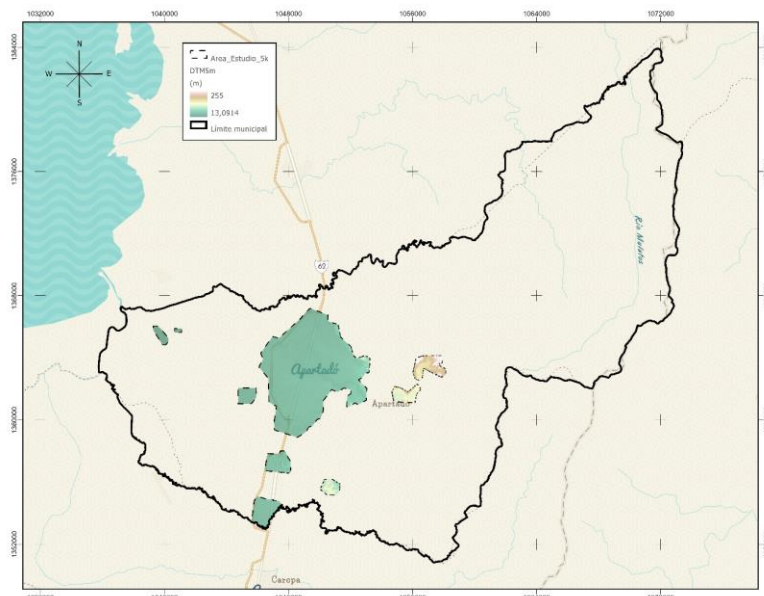


Figura 259. Área de estudio 5k

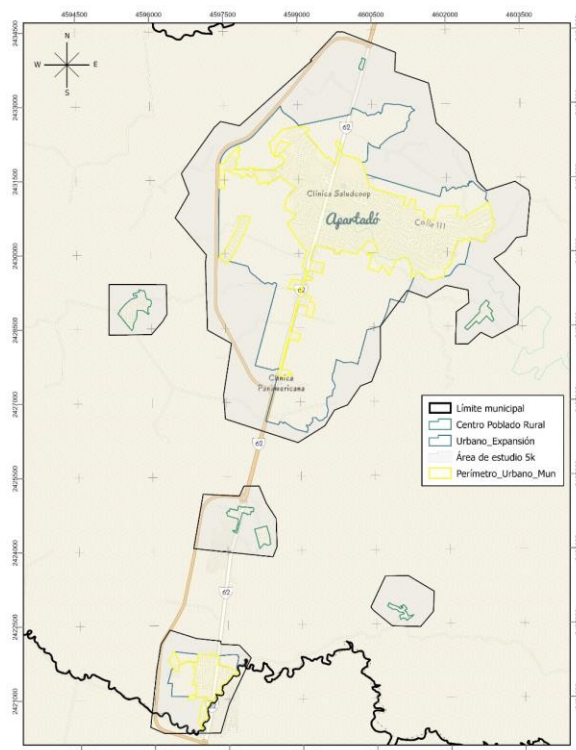


Figura 260. Área de estudio suelo urbano

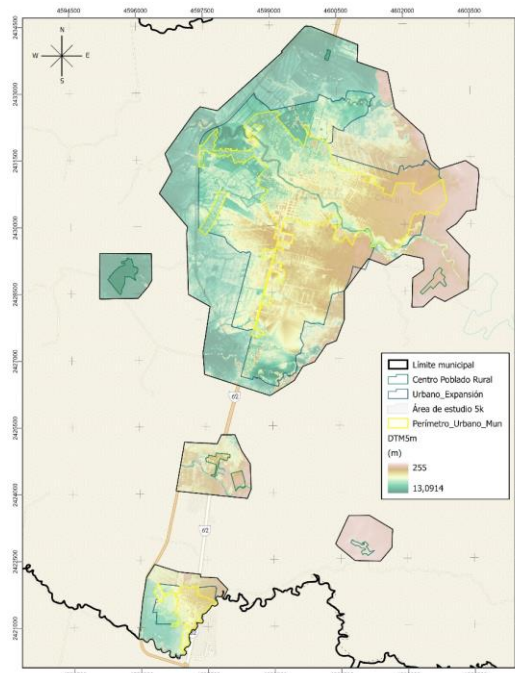


Figura 261. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras urbano



Figura 262. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

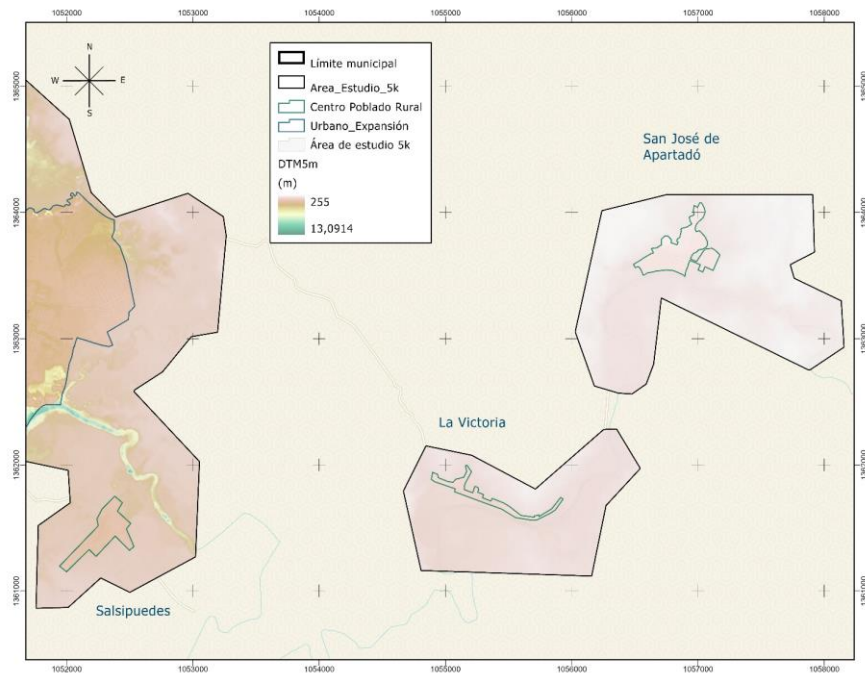


Figura 263. Modelo digital del terreno contrastado con modelo de sombras en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

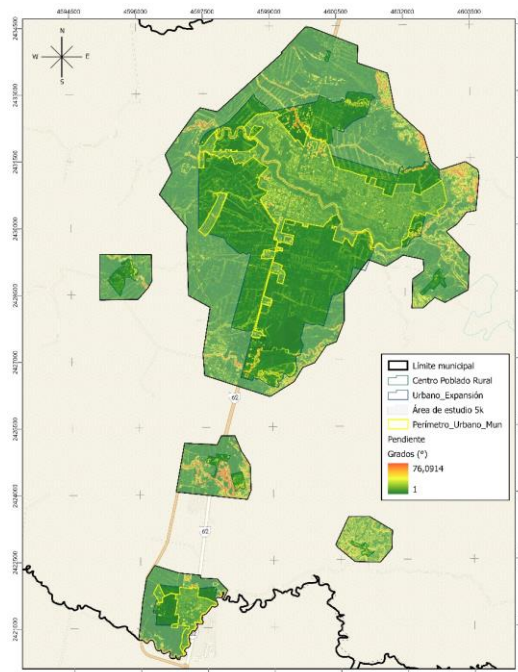


Figura 264. Pendiente del terreno en la zona urbana

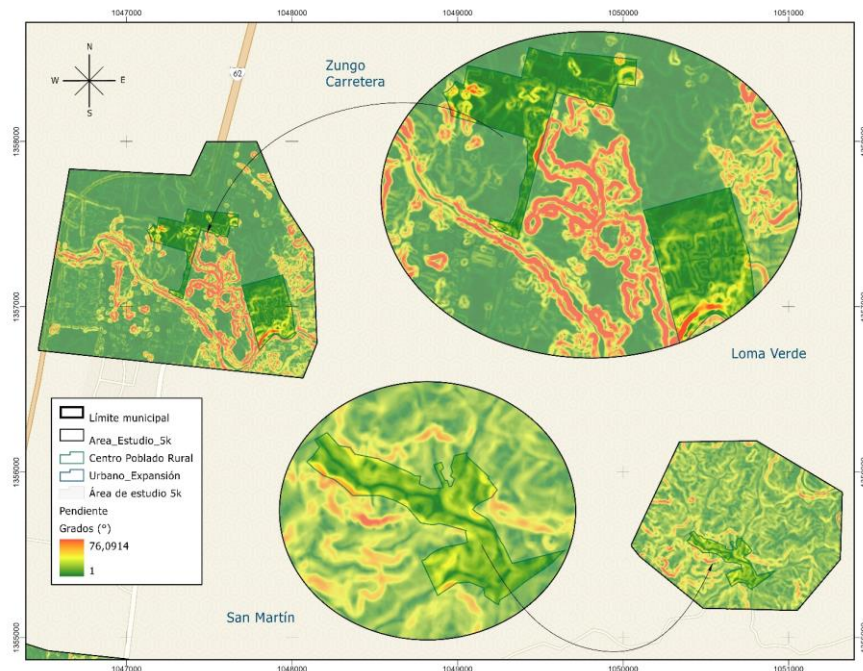


Figura 265. Pendiente del terreno en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

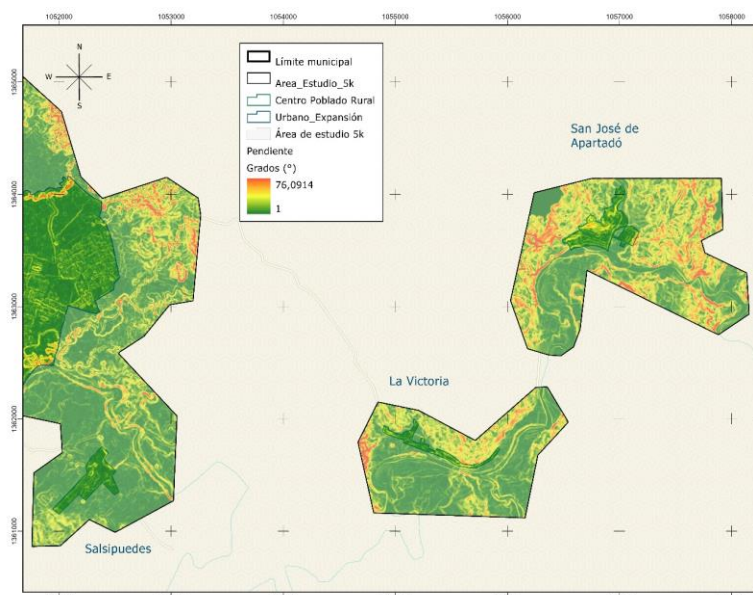


Figura 266. Pendiente del terreno en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

Por un lado, para considerar la condición de sismicidad se incluyó el efecto de la carga sísmica como una fuerza inercial horizontal a partir del coeficiente de aceleración horizontal en análisis de equilibrio límite pseudoestático. Se partió de los valores regionales de amenaza según el estudio de Amenaza Sísmica Nacional publicado por el Servicio Geológico Colombiano en 2017 para posteriormente aplicar efecto de sitio y efecto topográfico de amplificación y deamplificación de la aceleración sísmica empleando los principios de Jibson (1987), Faccioli (1991) y la AFPS (1995) y finalmente un efecto de respuesta local o

efecto de sitio de amplificación por las características del suelo y espesor del mismo (ver Figura 267). La aceleración sísmica en superficie que resulta del procedimiento mencionado se observa en la Figura 270.

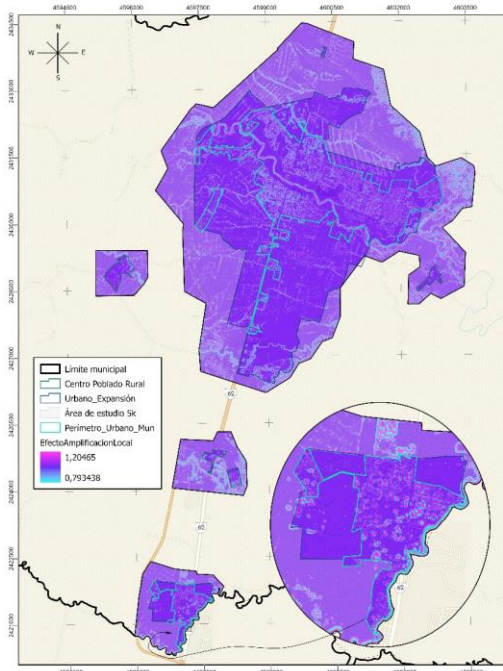


Figura 267. Efecto de sitio o respuesta local urbano

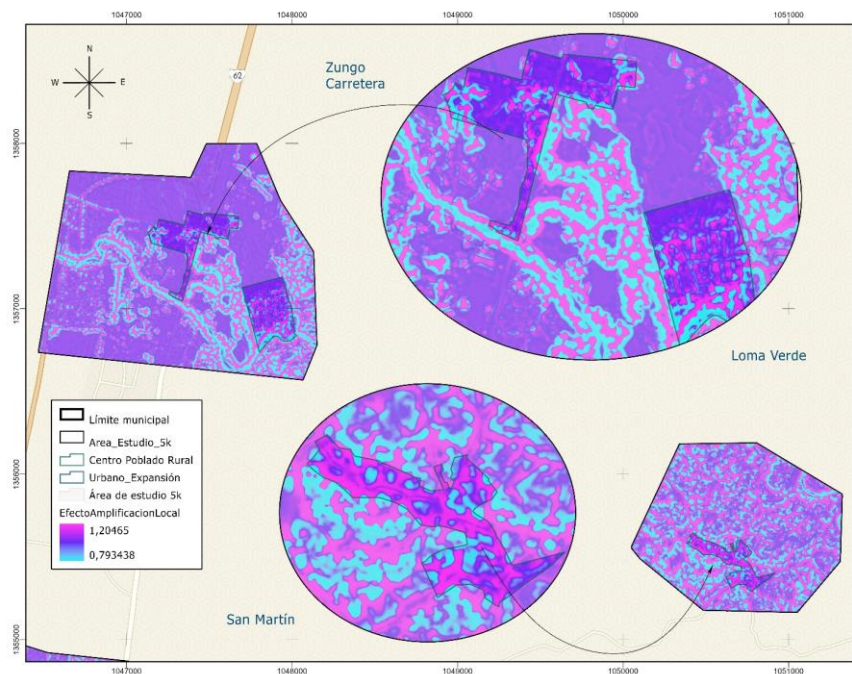


Figura 268. Efecto de sitio o respuesta local en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

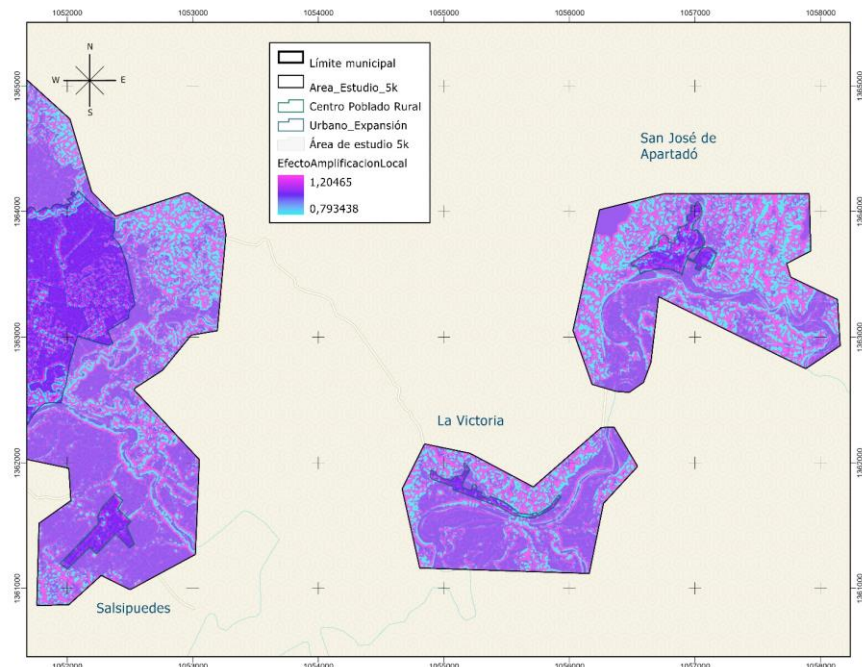


Figura 269. Efecto de sitio o respuesta local en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

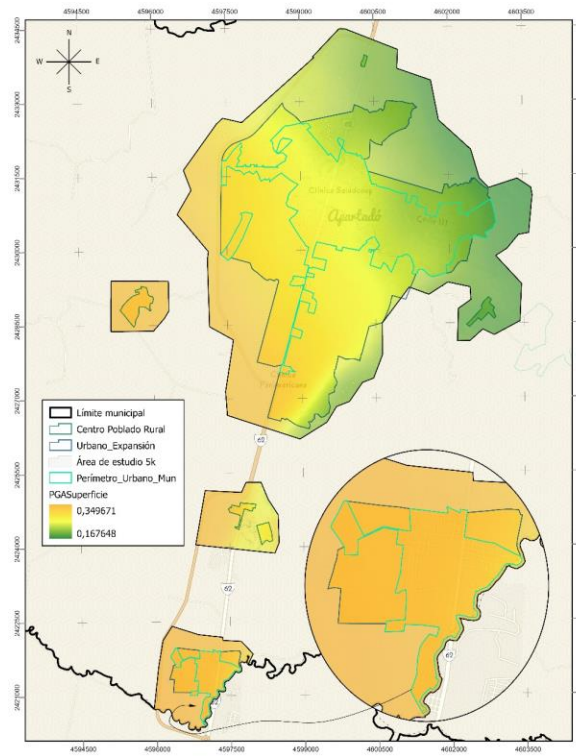


Figura 270. Aceleración sísmica en superficie

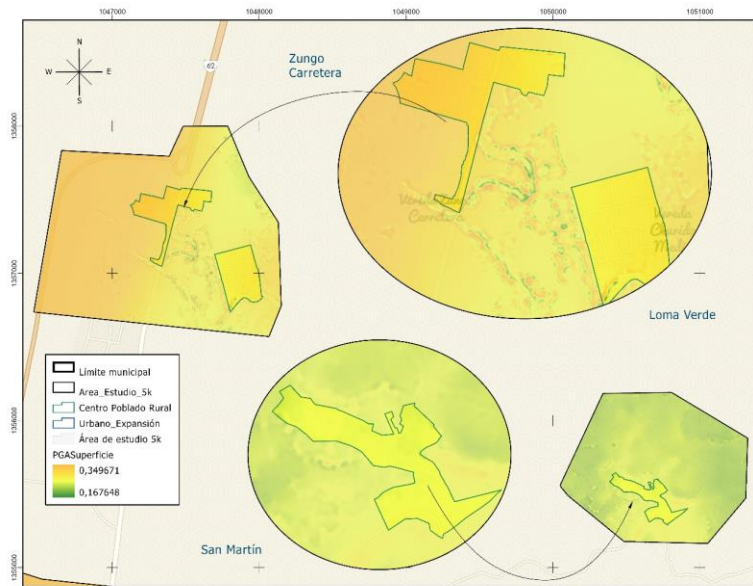


Figura 271. Aceleración sísmica en superficie en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera



Figura 272. Aceleración sísmica en superficie en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

Para la evaluación del nivel freático se plantea la hipótesis en la que este se encuentra en la superficie de falla y varía según el régimen de lluvias de cada píxel. El análisis de lluvia considera el concepto de una proporción de esta que cae al suelo y se infiltra, otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y otro fluye como escorrentía directa. La cantidad de lluvia se obtuvo con los análisis de precipitaciones descritos en curvas IDF y se plantearon valores esperados de precipitación máxima diaria por periodos de retorno.

Para estimar dicha fracción de agua infiltrada se utilizó el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del U. S. Department of Agriculture, el cual, muy frecuentemente, se utiliza para estimar cantidad de agua proveniente de una tormenta (P) que se convierte en escorrentía directa (P_e), pero que para este caso se estimó el complemento, esto es, el resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa, es decir: ($P_i = P - P_e$). El método del SCS propone la estimación del Número de Curva (CN) en función de la cobertura y uso del suelo y un potencial de retención que se compara con las precipitaciones para obtener los valores de infiltración posibles según la cobertura y uso del suelo (ver Figura 273).

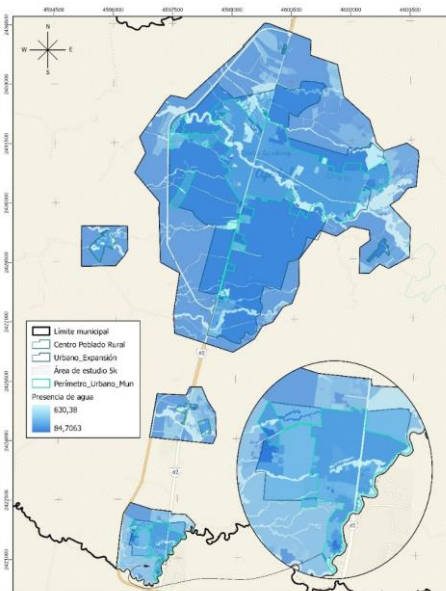


Figura 273. Presencia de agua urbano

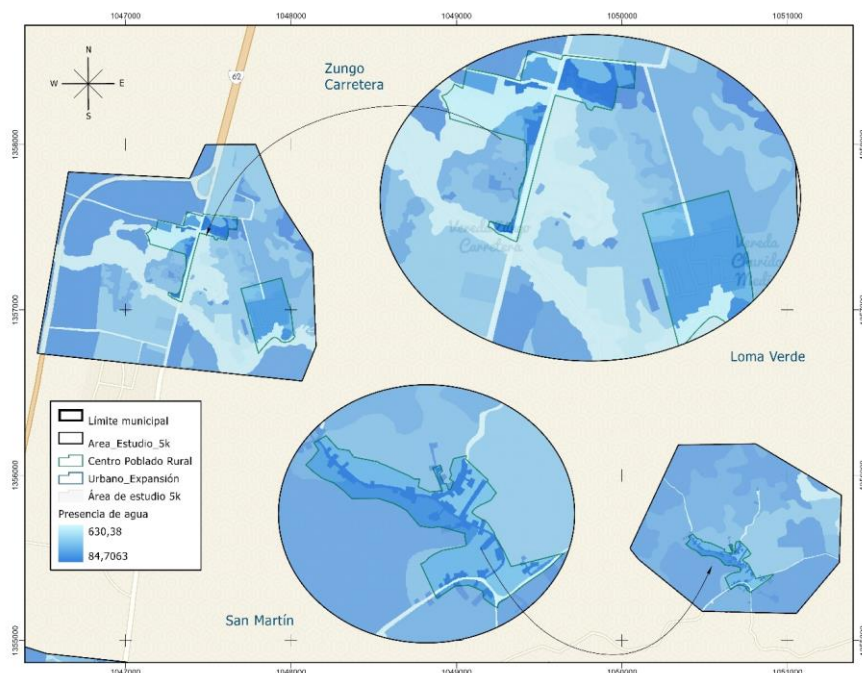


Figura 274. Presencia de agua en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

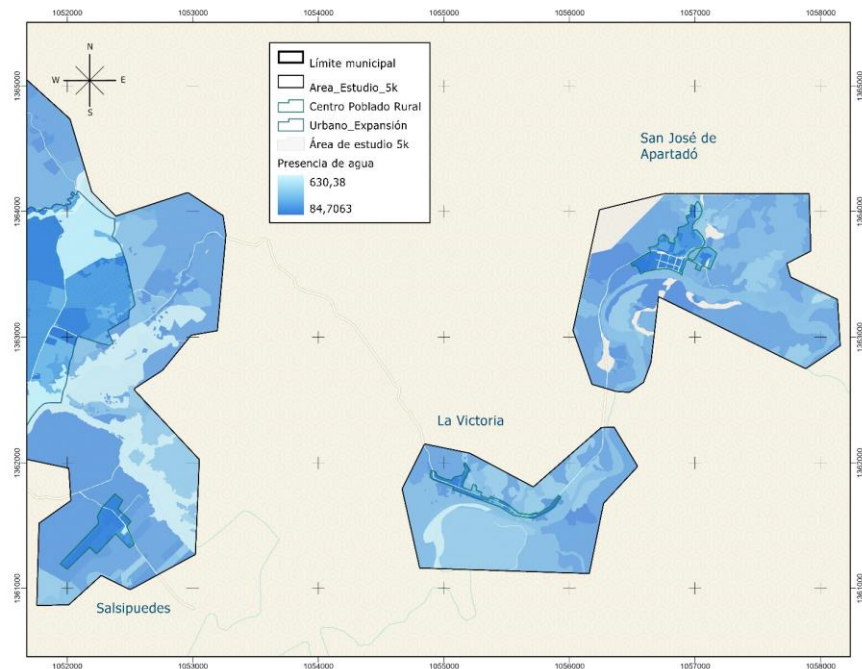


Figura 275. Presencia de agua centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

Finalmente, luego de definir los factores condicionantes en función de las características y propiedades geomecánicas de los materiales y los factores detonantes a partir de la información de amenaza sísmica y precipitaciones, se procede a la definición de la amenaza por movimientos en masa. Para la zonificación básica de amenaza se determinó el factor de seguridad de cada unidad de trabajo (píxel 5 m) definida por la malla y las columnas de suelo obtenidas. Dicho factor de seguridad se agrupa de varios escenarios y se clasifica para calificar la amenaza en alta, media o baja según la Tabla 57. A continuación, se describen las características específicas para cada zona de amenaza:

Tabla 57. Categorías de amenaza por movimientos en masa. Fuente: SGC (2015)

Nivel de amenaza	Probabilidad de falla	Color en el mapa
Alta	>0.35	Rojo
Media	$0.15 - 0.35$	Amarillo
Baja	<0.15	Verde

La caracterización geológica de los macizos rocosos y de los materiales superficiales del área de estudio corresponde con los análisis básicos para el estudio del comportamiento geomecánico de los terrenos, útiles en la evaluación de amenazas por movimientos en masa para el condicionamiento al uso del suelo, entre otros instrumentos de ordenamiento territorial. La información temática se obtiene a partir del procesamiento de la geología y geomorfología básica que permite caracterizar las condiciones físicas de los suelos, rocas y materiales de superficie, lo cual resulta en el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) o de geología para ingeniería. El comportamiento geomecánico de las rocas y suelos está determinado principalmente por propiedades físicas como origen, litología, composición mineralógica, textura, dureza, condición estructural, grado de fracturamiento y de meteorización, granulometría, humedad y consistencia. Los mapas de geología para ingeniería constituyen la base cartográfica temática para la elaboración de mapas de zonificación geomecánica y otros documentos de utilidad para ingeniería. Es así como se detallan mejor los contactos de las unidades geológicas básicas y las subunidades geomorfológicas, se definen zonas geotécnicas más detalladas y se ajustan los modelos de relieve en

función de topografía medida en terreno. Para el caso de la topografía urbana no es necesario aplicar ajustes morfométricos relacionados con cortes viales o márgenes de cuerpos de agua pues estos alcanzan a ser identificados por la escala de análisis, de manera que la inclinación de las laderas se obtiene directamente.

Con la información geológica y geomorfológica se plantearon las zonas geotécnicas en escala urbana a las cuales se les realizó caracterización del comportamiento geomecánico (Figura 276) a partir de ensayos de laboratorio de suelos (ver Anexos "Análisis laboratorio geotécnico", "Caracterización geomecánica", "Caracterización geotécnica" y "Estudios geotécnicos").

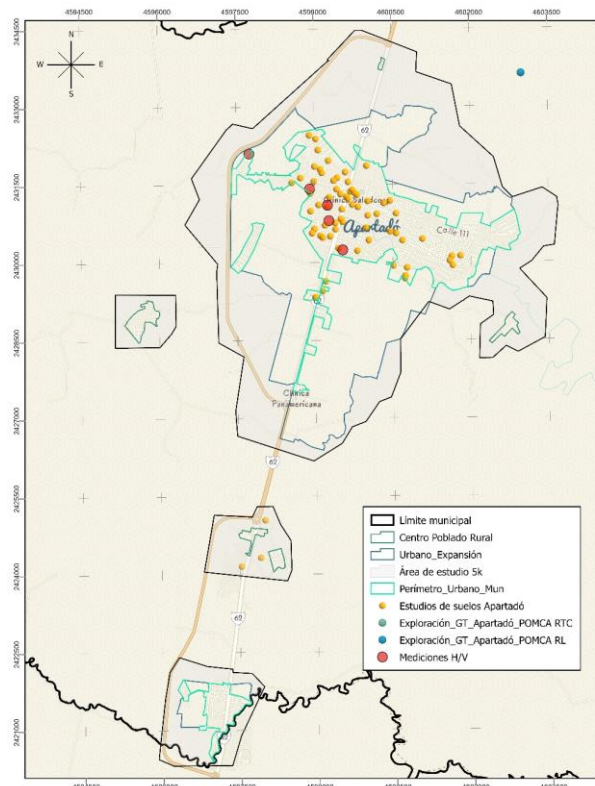


Figura 276. Exploración geotécnica

Los parámetros geotécnicos se obtienen apoyados en estocástica, sin embargo la cantidad de datos no es suficiente por lo cual no es conveniente hacer una simulación Montecarlo sino el cálculo de FS con un valor definido de parámetros. Diferentes estudios (Matsuo, 1984; Zhou et al. 2003, Malkawi et al. 2000) han encontrado que los parámetros del suelo C' , Φ y Γ son variables aleatorias normalmente distribuidas sin una correlación estadística evidente.

Tabla 58. Parámetros de comportamiento de los materiales presentes en superficie en suelo urbano y centros poblados evaluados en escala 1:5.000

UGS	Phi	C	gamma	espesor
Strl-pdmte	16,846	23,504	18,859	14,532
Strcr	22,969	16,616	15,750	5,675
Stf3	27,902	11,034	18,303	13,248
Stf3	27,428	10,799	19,615	10,664
Stf3	25,389	10,716	17,215	11,840

UGS	Phi	C	gamma	espesor
Stf3	26,996	9,071	19,695	14,235
Stf3	27,871	17,473	19,250	10,683
Stf3	27,149	13,503	19,578	14,228
Stf3	25,142	11,799	17,162	9,549
Stf2	27,623	10,717	19,239	8,538
Stf2	25,500	13,522	19,883	37,356
Stf2	26,467	14,470	19,304	13,566
Stf1nc	28,943	18,445	19,733	29,435
Stf1be	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1be	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1ae	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1	32,944	14,334	18,729	12,776
Stf1	32,725	14,767	19,935	11,006
Stf1	30,969	17,616	19,750	19,675
Stf1	31,715	15,743	18,723	14,474
Stf1	30,819	8,990	19,880	14,030
Stf1	28,642	8,334	18,893	9,138
Stf1	29,799	13,214	17,834	16,811
Stf1	29,864	16,007	19,844	14,982
Stf1	29,300	14,133	19,193	11,703
Stf1	28,875	8,830	18,866	10,244
Stf	25,867	15,312	19,376	9,406
Stf	27,978	11,412	18,475	12,945
Stf	27,563	13,188	17,789	9,673
Stf	25,012	14,769	17,846	11,870
Stf	27,691	12,869	19,669	12,886
Stf	25,694	8,356	17,562	12,714
Stf	27,045	15,888	18,017	10,434
Stf	25,204	16,748	19,598	7,521
Stf	25,747	14,267	19,908	14,172
Stf	27,293	8,652	19,015	7,718
Rbfn2ae	15,886	32,434	19,821	10,064
Rbfn2ae	17,936	27,991	19,862	9,344
Rbfn2ad	16,000	26,359	19,123	8,810
Rbfn2ad	16,680	29,272	19,013	14,670
Rbfn2ad	17,531	31,999	19,062	12,493
Rbfn2ad	16,149	32,711	17,256	8,103
Rbfn2ad	16,556	32,219	18,342	9,174
Rbfn2ad	15,887	27,353	18,219	12,534
Rbfn2ad	15,439	33,491	17,451	11,738

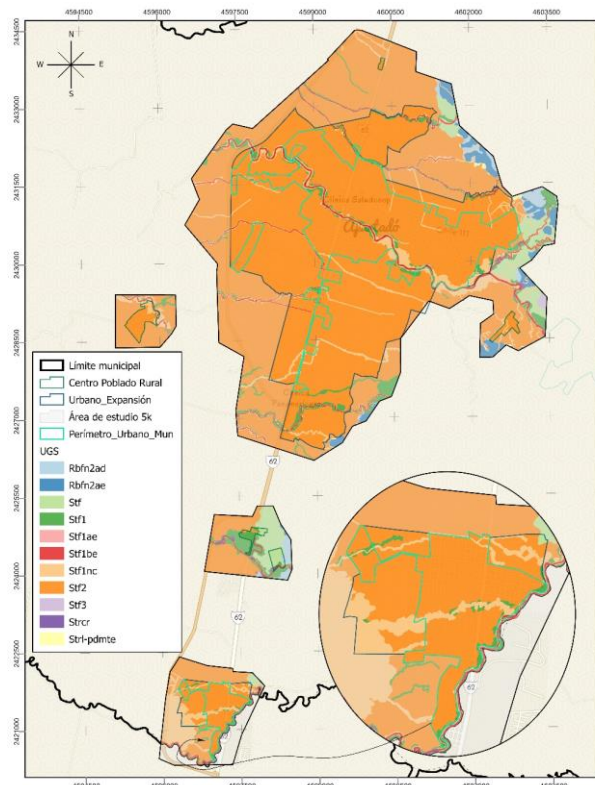


Figura 277. Caracterización geotécnica en la zona urbana

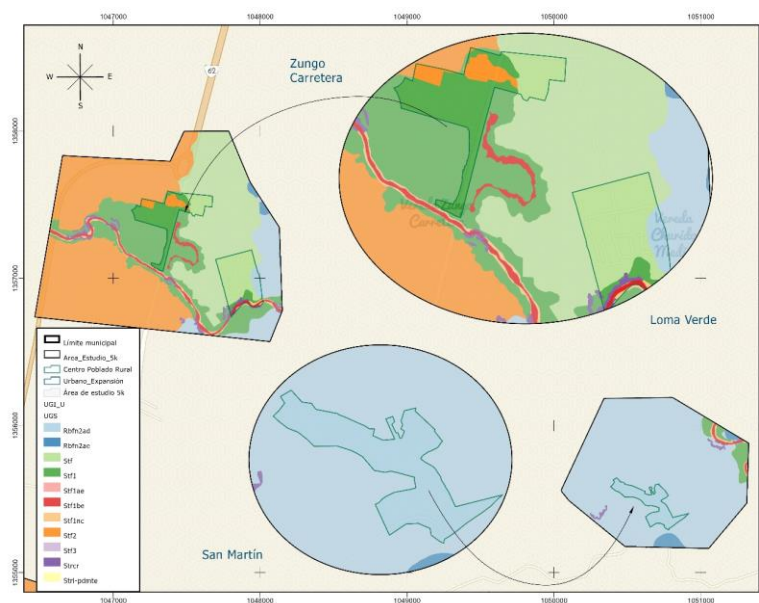


Figura 278. Caracterización geotécnica en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

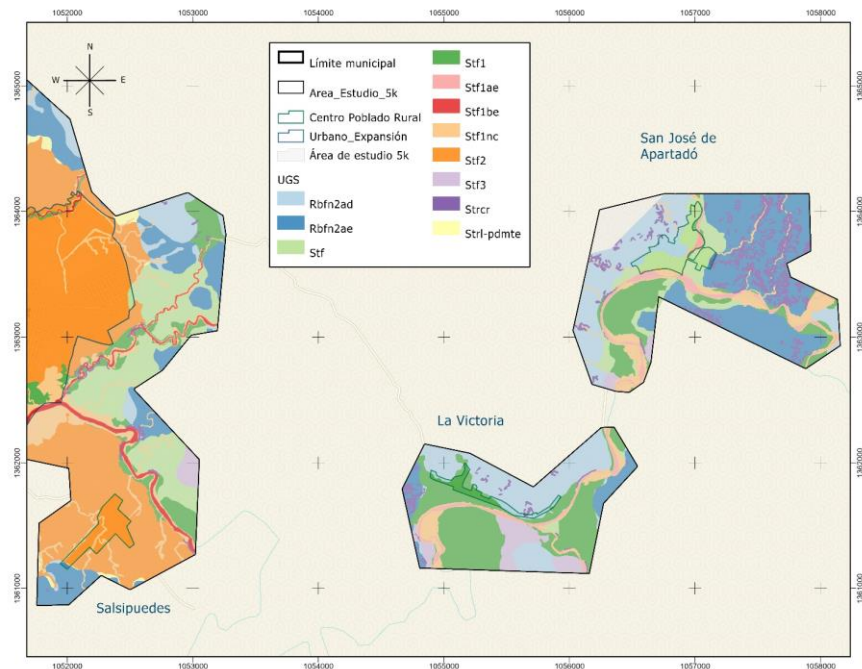


Figura 279. Caracterización geotécnica en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

El empleo de variables con enfoque determinístico permite orientar la zonificación de amenaza en función de su condición de estabilidad relativa considerando las cargas sísmicas y las variaciones de saturación de los suelos como detonante de deslizamientos, imprimiendo variables condicionantes y detonantes de inestabilidad geotécnica según su comportamiento geomecánico. El resultado de la zonificación de amenaza se ilustra en la Figura 284 y se muestra con mayor resolución en los mapas anexos. A continuación, se describen las características específicas para cada zona de amenaza:

Las zonas de **amenaza alta** corresponden con laderas o márgenes de cuerpos de agua en los que han ocurrido movimientos en masa o confluyen condiciones que favorecen su ocurrencia como áreas de meteorización alta a moderada, discontinuidades desfavorables, alta pendiente, suelos de mediano a bajo comportamiento mecánico, erosión hídrica alta permanente en los márgenes de los cuerpos de agua.

Las zonas de **amenaza media** corresponden con laderas o márgenes de cuerpos de agua donde han ocurrido pocos movimientos en masa y existe la posibilidad de que se presenten pues confluyen algunas de las condiciones que favorecen su ocurrencia como erosión hídrica moderada o pendiente moderada a alta.

Las zonas de **amenaza baja** corresponden con laderas en las que no existen indicios que permitan predecir deslizamientos y confluyen pocas condiciones que favorecen su ocurrencia, son áreas con materiales con comportamiento mecánico favorable a la estabilidad, ausencia de fallamiento local o erosión hídrica y poca pendiente del terreno.

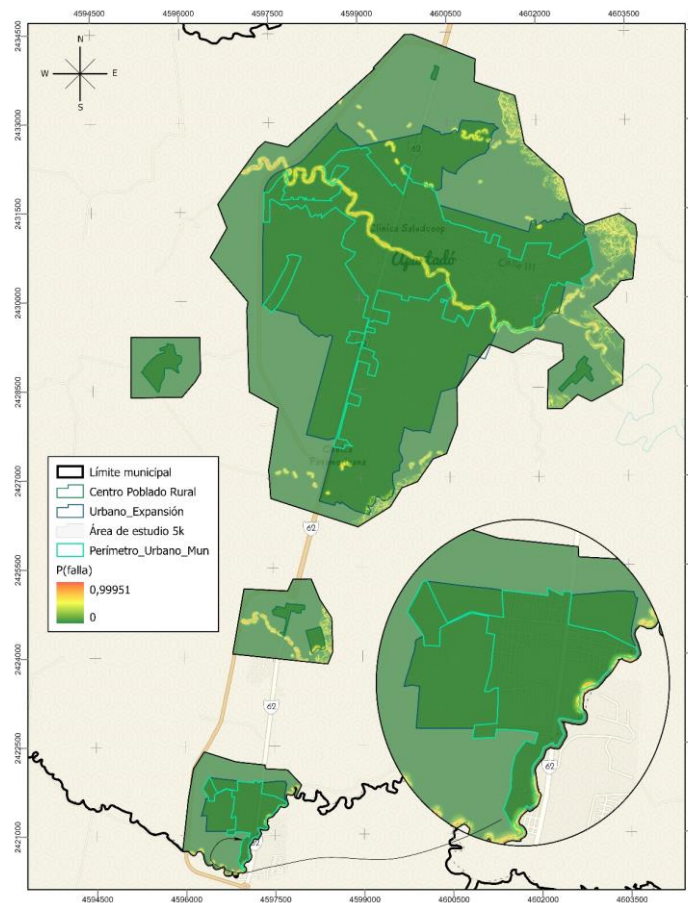


Figura 280. Probabilidad de falla en suelo urbano

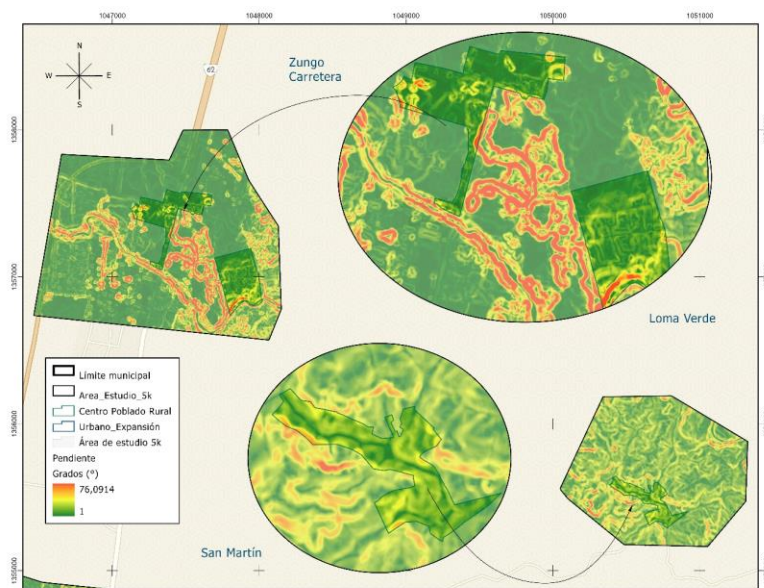


Figura 281. Probabilidad de falla en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera



Figura 282. Probabilidad de falla en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

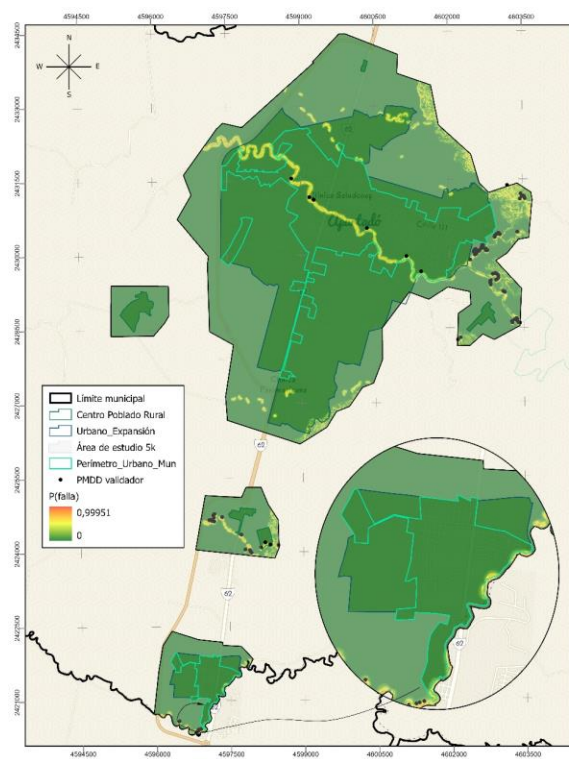


Figura 283. Probabilidad de falla y validación con eventos en suelo urbano

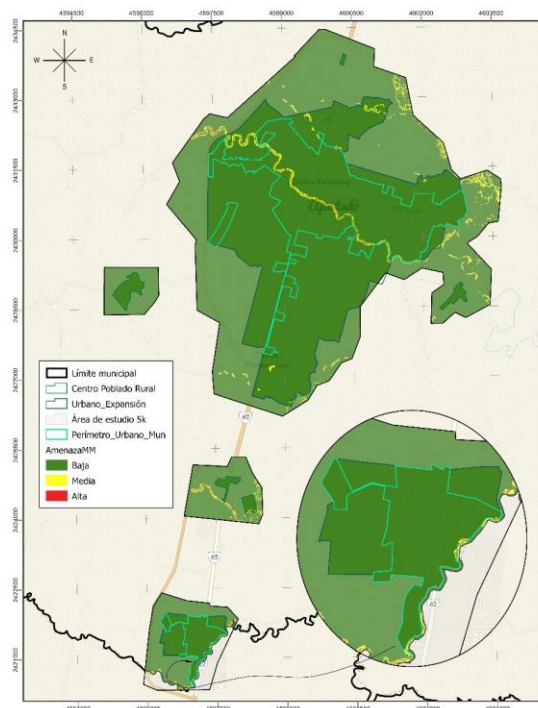


Figura 284. Amenaza por movimientos en masa en suelo urbano

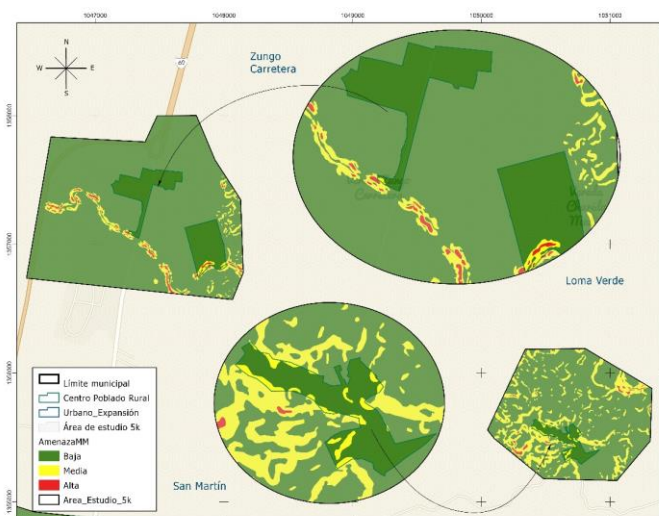


Figura 285. Amenaza por movimientos en masa en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

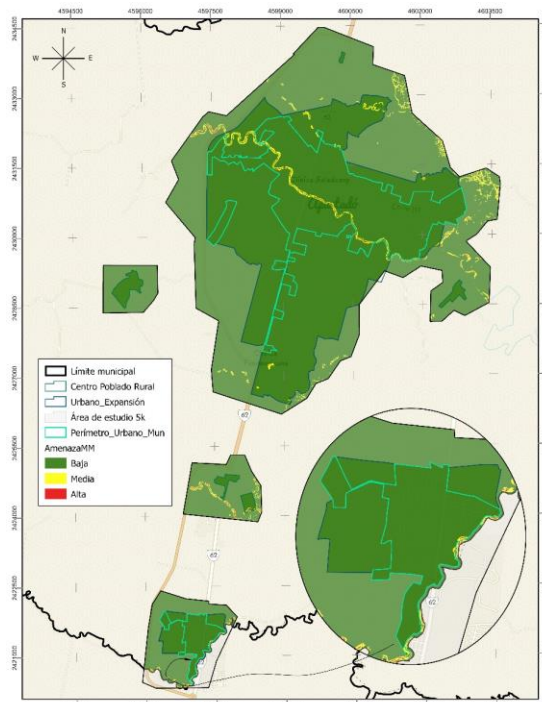


Figura 286. Amenaza por movimientos en masa en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes

1.3 Análisis de socavación

El estudio del descenso del nivel del lecho de un río producto de la socavación general es de gran importancia para determinar la estabilidad de las laderas sobre el margen del río.

Se estima la socavación de fondo general en 6 zonas del río que presentan perfiles batimétricos y propiedades geotécnicas similares.



Figura 287. Ubicación de puntos identificados para análisis de socavación

Para estimar la socavación general el Manual de Drenaje desarrollado por el Invias (2011) recomienda utilizar el método de Lischtván-Lebediev para este tipo de cauces.

1.3.1 Ecuación de socavación

Como se ha mencionado, se utiliza la ecuación de Lischtván-Lebediev para determinar la socavación general en los cauces con la siguiente ecuación:

$$Y_s = \left(\frac{\alpha * Y_o^{5/3}}{0.60 * \beta * \mu * \phi * \gamma_d^{1.18}} \right)^{\frac{1}{1+X}}$$

En donde cada símbolo representa lo siguiente:

Q _d (m³/s)	Caudal medio
Y _m (m)	Profundidad media
B _e (m)	Ancho efectivo
T (años)	Periodo de retorno
α	Coefficiente de sección
Y _o (m)	Profundidad inicial
β	Coefficiente de frecuencia
μ	Coefficiente de contracción
γ _{Tas} (Ton/m³)	Peso unitario total agua +sedimento
φ	Coefficiente de corrección
γ _T (Ton/m³)	Peso unitario total
ω	Contenido de agua
γ _d (Ton/m³)	Peso unitario seco
X	Exponente variable

1.3.2 Consideraciones de análisis

El perfil batimétrico de las secciones del río es obtenido a partir de un modelo de elevación detallado.

El periodo de retorno es de 100 años

El valor de α, Y_m y β son determinados de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{Qd}{Y_m^{5/3} * B_e} \quad Y_m = \frac{A}{B_e} \quad \beta = 0.7929 + 0.0973 * \log(T)$$

COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN. Como no existen pilas en el cauce μ = 1

COEFICIENTE DE CORRECCIÓN POR DEFECTO DE DENSIDAD: φ = - 0.54 + 1.5143 γ_{as}, con γ_{as} como el peso unitario del agua más sedimentos.

PESO UNITARIO SECO: Se obtiene a partir del peso unitario total como:

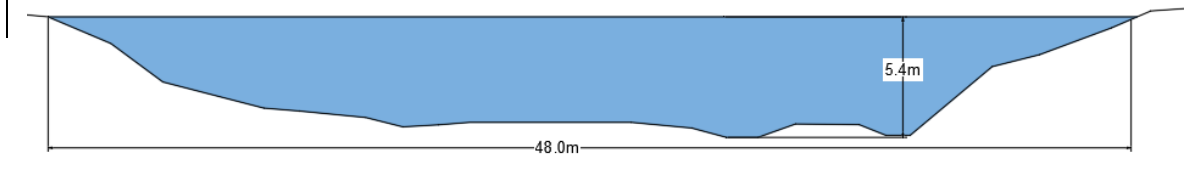
$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{(1 + w)}$$

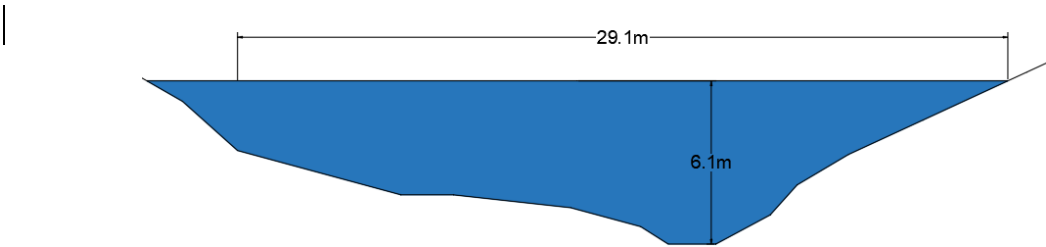
Por lo tanto, el exponente variable X se determina como

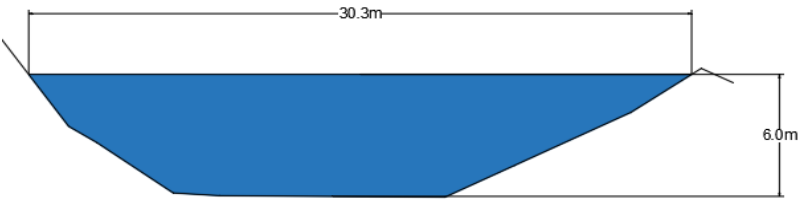
$$X = 0.802619 - 0.58073 * \gamma_d + 0.136275 * \gamma_d^2$$

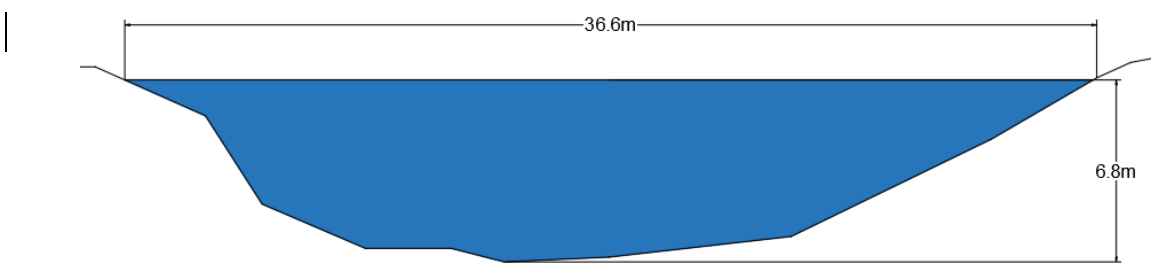
Análisis de socavación del río Apartadó

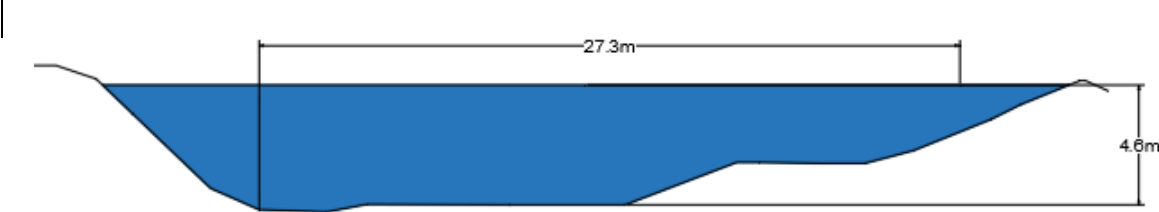
Usando la metodología propuesta, los valores sugieren que la socavación vertical en el río Apartadó no representa un problema.

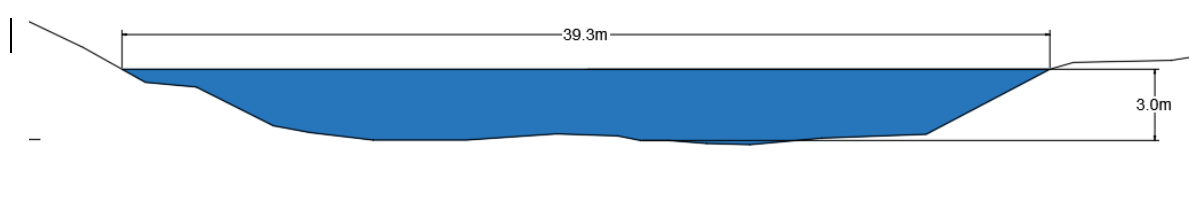
Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: . Método de Lischtván - Lebediev		PERFIL 1
Caudal	Q (m3/s)	50.0
Área hidráulica	A (m²)	128.0
Ancho efectivo	Be (m)	48.0
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	2.7
		
Coeficiente de sección	α	0.2
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ _{as} (ton/m³)	1.1
Coeficiente de corrección	φ	1.1
Peso unitario seco	γ _d (ton/m3)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	4.6
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	2.6
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	2.0
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: Método de Lischtván - Lebediev		PERFIL 2
Caudal	Q (m ³ /s)	50.0
Área hidráulica	A (m ²)	115.0
Ancho efectivo	Be (m)	29.0
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	4.0
		
Coeficiente de sección	α	0.2
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ_{as} (ton/m ³)	1.1
Coeficiente de corrección	ϕ	1.1
Peso unitario seco	γ_d (ton/m ³)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	6.1
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	3.5
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	2.5
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: Método de Lischtvan - Lebediev		PERFIL 3
Caudal	Q (m3/s)	50.0
Área hidráulica	A (m²)	132.0
Ancho efectivo	Be (m)	30.3
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	4.4
		
Coeficiente de sección	α	0.1
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ _{as} (ton/m³)	1.1
Coeficiente de corrección	φ	1.1
Peso unitario seco	γ _d (ton/m3)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	6.0
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	2.8
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	2.1
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: . Método de Lischtván - Lebediev		PERFIL 4
Caudal	Q (m ³ /s)	50.0
Área hidráulica	A (m ²)	167.0
Ancho efectivo	Be (m)	36.6
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	4.6
		
Coeficiente de sección	α	0.1
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ_{as} (ton/m ³)	1.1
Coeficiente de corrección	ϕ	1.1
Peso unitario seco	γ_d (ton/m ³)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	6.8
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	2.7
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	2.1
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: Método de Lischtvan - Lebediev		PERFIL 7
Caudal	Q (m3/s)	50.0
Área hidráulica	A (m²)	128.0
Ancho efectivo	Be (m)	27.3
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	4.7
		
Coeficiente de sección	α	0.1
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ _{as} (ton/m³)	1.1
Coeficiente de corrección	φ	1.1
Peso unitario seco	γ _d (ton/m3)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	6.8
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	3.4
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	2.5
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Análisis socavación río Apartadó		
Ecuación usada: . Método de Lischtván - Lebediev		
PERFIL 9		
Caudal	Q (m ³ /s)	50.0
Área hidráulica	A (m ²)	94.0
Ancho efectivo	Be (m)	39.3
Profundidad hidráulica	Y _m (m)	2.4
		
Coeficiente de sección	α	0.3
Periodo de retorno	T (años)	100.0
Coeficiente de frecuencia	β	1.2
Coeficiente de de contracción	μ	1.0
Peso unitario total agua + sedimento	γ_{as} (ton/m ³)	1.1
Coeficiente de corrección	ϕ	1.1
Peso unitario seco	γ_d (ton/m ³)	1.2
Profundidad inicial	Y _o (m)	3.0
Exponente variable	X	0.4
Numerador	A	1.9
Denominador	B	1.0
Profundidad de flujo después de ocurrida la socavación	Y _s (m)	1.6
Socavación vertical (m)	No presenta socavación	

Para el análisis de socavación lateral se tuvo en cuenta los procesos fotointerpretados, principalmente en la zona urbana en donde se cuenta con un insumo topográfico detallado con adecuada resolución espacial para el análisis y resolución temporal del año de ejecución del presente estudio, el análisis de dinámica fluvial multitemporal descrito en capítulos anteriores y los modelos digitales del terreno y la topografía levantada. Con estos insumos se analiza las tendencias de desplazamiento de los márgenes de los ríos analizados, se realiza un modelo de socavación actual y se genera una proyección temporal máxima de movilización de los cauces, la cual se traduce en términos de amenaza por el efecto de socavación lateral. A continuación se muestran a partes de las variables utilizadas y la respectiva zonificación de amenaza.

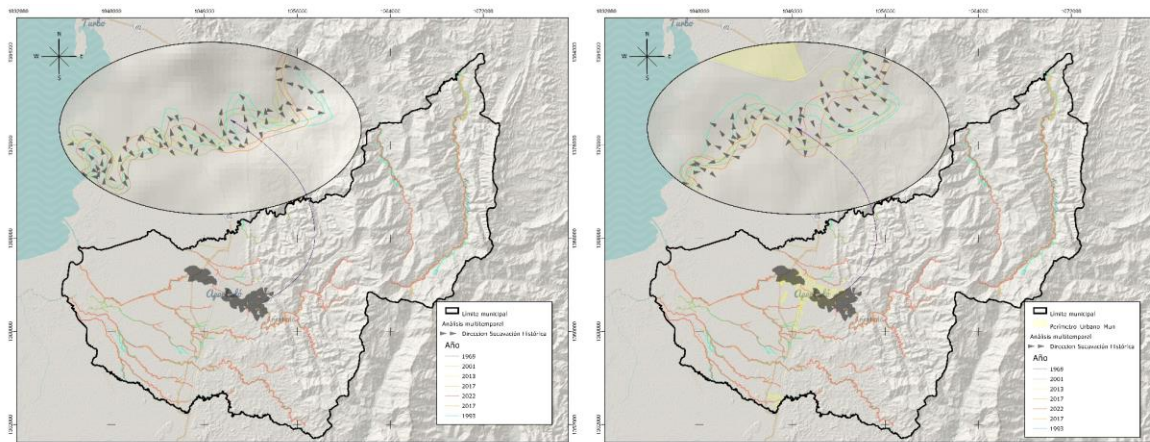


Figura 288. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal

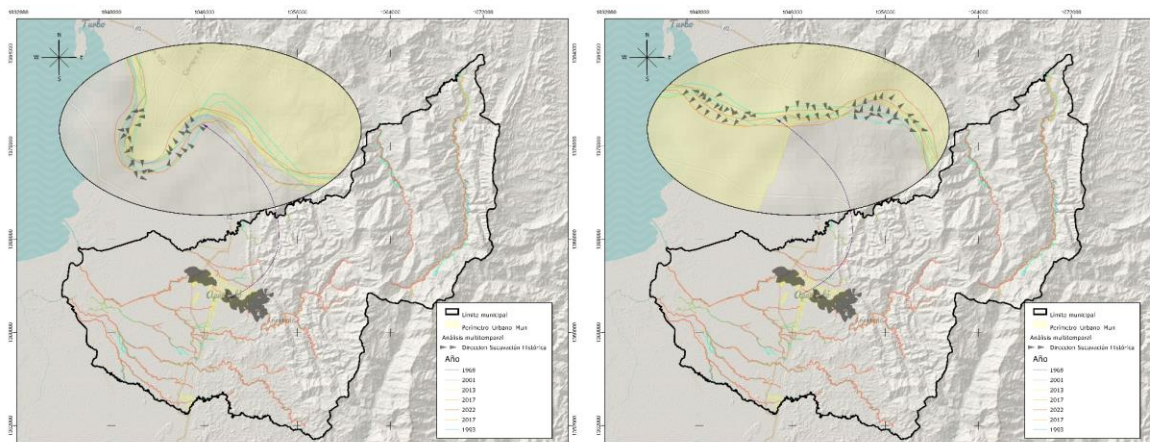


Figura 289. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal

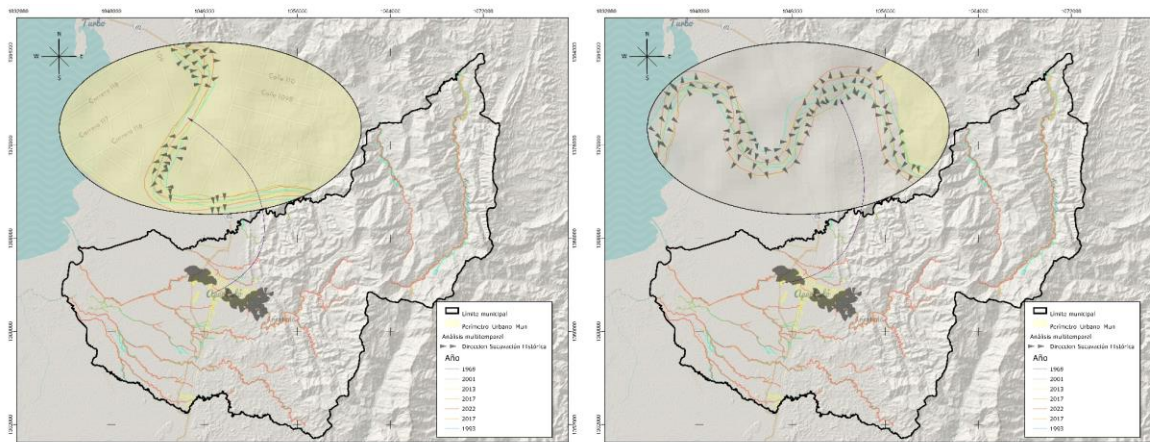


Figura 290. Dirección de socavación histórica inferida a través de análisis multitemporal

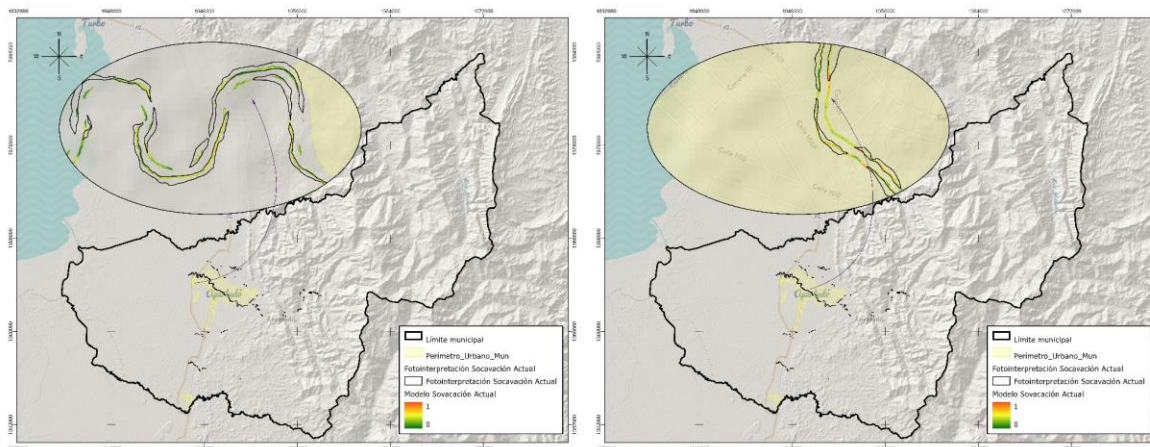


Figura 291. Modelo de socavación actual

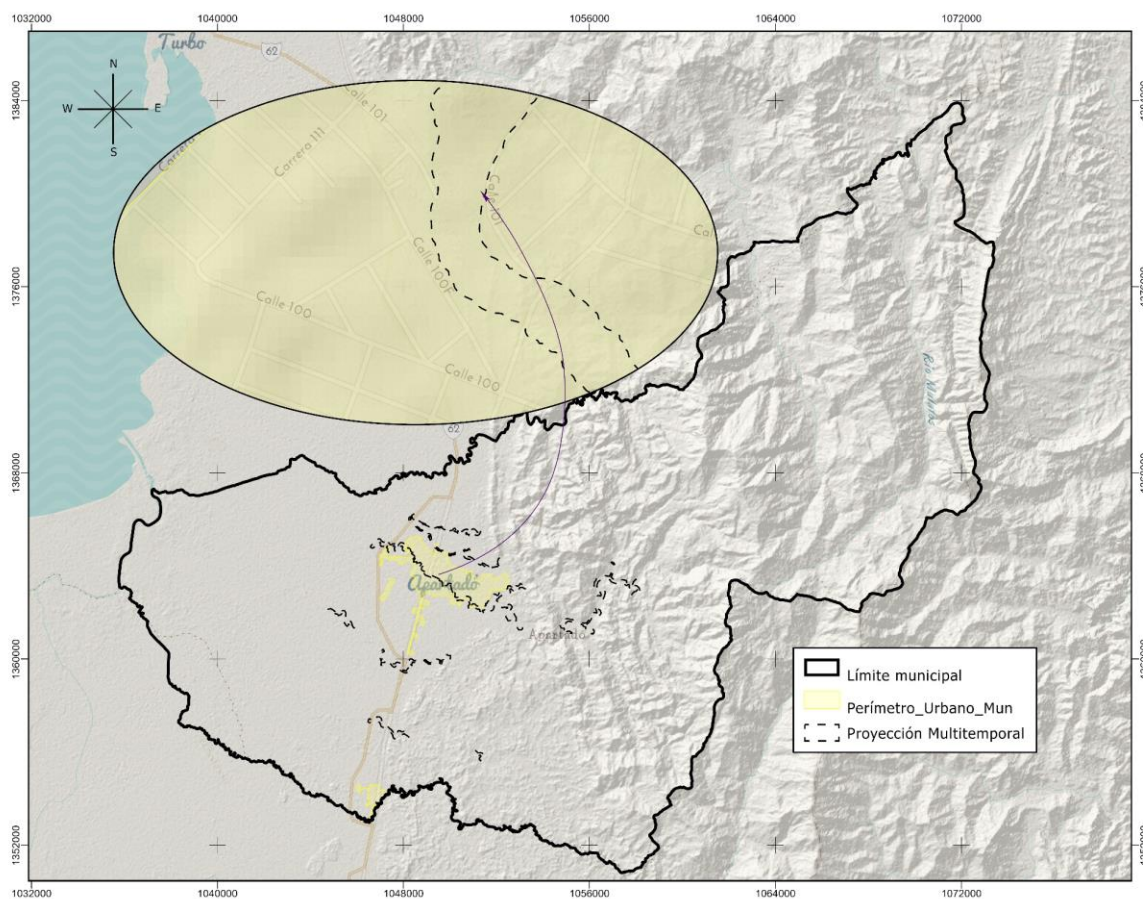


Figura 292. Proyección multitemporal de socavación

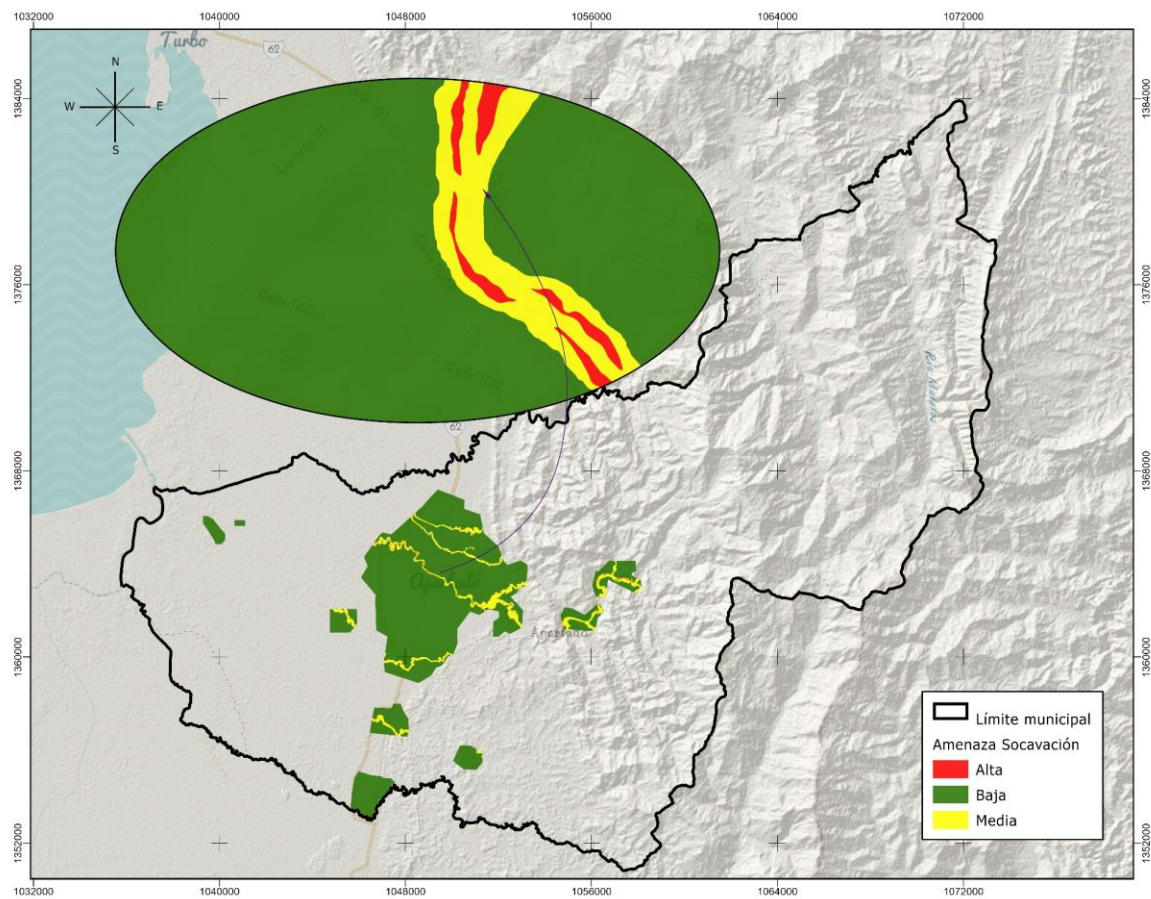
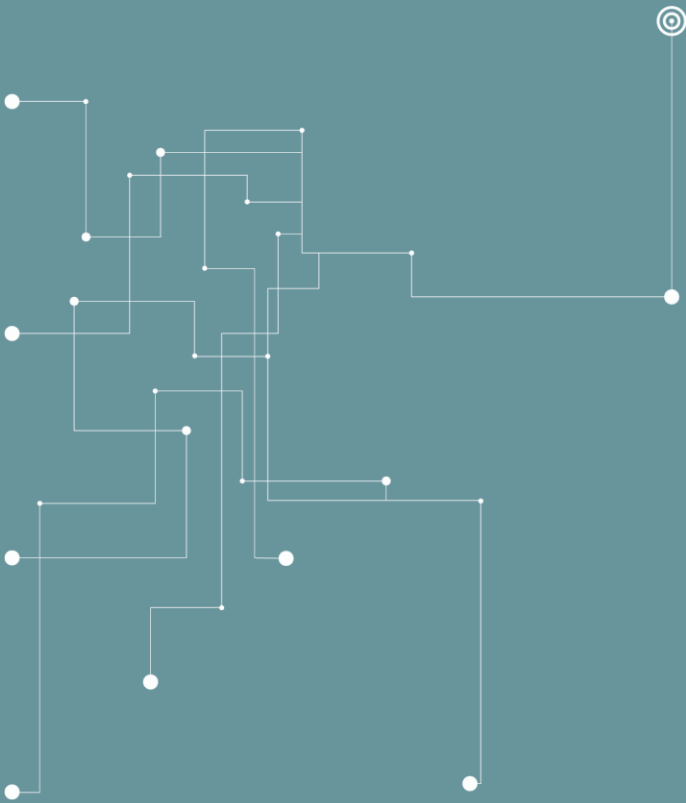


Figura 293. Amenaza por socavación lateral



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



AMENAZA POR INUNDACIONES

2. Amenaza por inundaciones

Las inundaciones son eventos que se producen debido al aumento en los niveles de los ríos, generados principalmente por la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, además de otros factores que pueden propiciar su aparición, duración y magnitud; de acuerdo con el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974), la definición oficial de inundación es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”. En este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas. Se entiende por inundación a aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura. Se busca en este apartado realizar un análisis y una sustentación de las zonas que están sujetas a inundaciones, basándose principalmente un análisis geomorfológico hidráulico definido a partir del relieve y los cuerpos de agua cartografiados y la hidrología del territorio. De esta manera a continuación se procede a explicar la metodología utilizada para determinar las zonas que deben tener un tratamiento particular debido a la amenaza de inundaciones.

Entonces según lo anterior se pretende realizar un análisis y una sustentación de las zonas que están sujetas a inundaciones, basándose principalmente en la información recolectada de los fenómenos de inundaciones presentados en los años 2011, 2017, 2019 y 2022, de las zonificaciones de amenaza por inundaciones en los POMCA río León y río Turbo Currulao y un análisis geomorfológico hidráulico definido a partir del relieve y los cuerpos de agua cartografiados y la hidrología del territorio. Por otra parte para el análisis urbano se emplea información de mayor detalle para en análisis hidrológico hidráulico desarrollado. De esta manera a continuación se procede a explicar la metodología utilizada para determinar las zonas que deben tener un tratamiento particular debido a la amenaza de inundaciones tanto en el suelo urbano como en el rural.

2.1 Análisis rural de amenaza por inundaciones escala 1:25.000

La zonificación de amenaza considera inundaciones trazadas de eventos históricos en combinación con los criterios geomorfológicos, paleoinundaciones y estimación de áreas de afectación según el confinamiento de los cauces en la parte alta y media de los cuerpos de agua y desconfinamiento en el tramo restante. La zonificación se realizó a través de un análisis geomorfológico histórico donde se efectuó una interpretación de las geoformas y relieves de ambiente fluvial, aluvial y lacustrino a partir de imágenes satelitales, modelo de elevación del terreno, modelo de sombras, pendiente del terreno y análisis de la información histórica. El objetivo de dicho análisis fue el de encontrar vestigios y evidencias físicas de inundaciones en el área de los cuerpos de agua que tienen influencia sobre el área de estudio. Una vez identificadas las geoformas (subunidades geomorfológicas) relacionadas con los eventos de desplave de las aguas de un río, estas fueron categorizadas según la relación con la actividad fluvial (antigua, efímera o activas).

Inicialmente se identifican los cuerpos de agua existentes y las áreas de escurrimiento en las que se pueden generar desbordes de cauces y las áreas de erosión y sedimentación donde puede ocurrir represamiento del flujo de agua a partir de la cartografía de procesos morfodinámicos elaborada. Luego se calcula la fracción de lluvia que se desarrolla en escorrentía considerando la retención potencial calculada para el modelo de amenaza por movimientos en masa mostrado previamente. Al igual que para movimientos en masa en donde se calculó la fracción de lluvia que se infiltra, para el caso de inundaciones se estima su complemento, es decir, la porción que se deriva en escorrentía directa.

Se desarrolló una zonificación de amenaza de inundación por desbordamiento de cuerpos de agua con modelación hidrológica hidráulica semicuantitativa (función del relieve, elevación y pendiente del terreno empleando el método de líneas de energía del IDEAM mostrado en la Figura 294) y acumulación del flujo de agua superficial que se corresponde con la línea de energía de la red de drenaje.

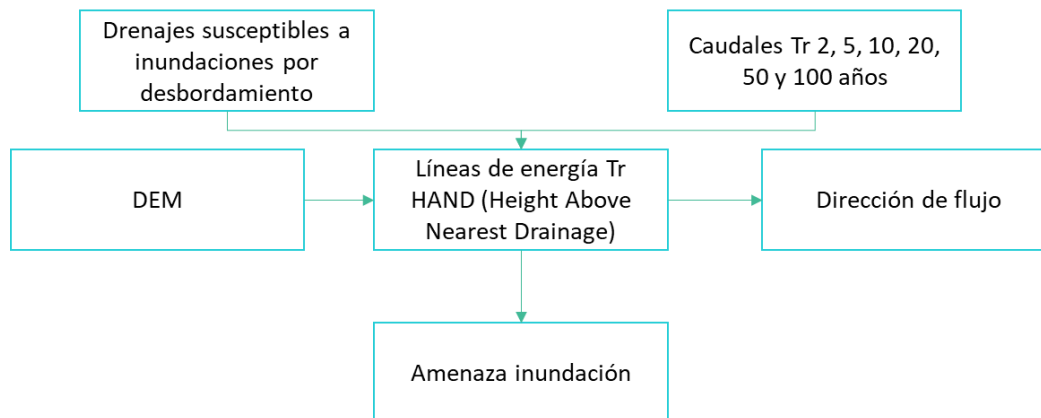


Figura 294. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND (Fuente: este estudio basado en IDEAM)

El estudio del IDEAM calcula el mapa de amenaza por inundación nacional asociado a niveles de lámina de agua, genera dos productos espaciales: el primero es el de línea de energía que es una interpolación de los valores de niveles de las estaciones a través de la red de drenaje (el nivel varía de acuerdo con el período de retorno), y el segundo, que se obtiene por medio de la aplicación del algoritmo HAND (Height Above Nearest Drainage) mostrado, es el mapa de amenaza por inundación que indica dónde el terreno puede inundarse de acuerdo con los valores de los niveles de las estaciones.

La idea fundamental de este algoritmo HAND es la representación de un mapa de alturas con una pequeña variación con respecto al mapa de elevación original (DEM). El HAND tiene todos sus valores de elevación normalizados con respecto a la magnitud de la línea de energía en la red de drenaje existente, conformando así un mapa de elevaciones relativo a las corrientes existentes en las diferentes cuencas de la zona representada. En cuanto a hidrología, previamente se mostró el comportamiento del régimen hidrológico en la región mediante un análisis de los eventos hidrológicos para distintos periodos de retorno.

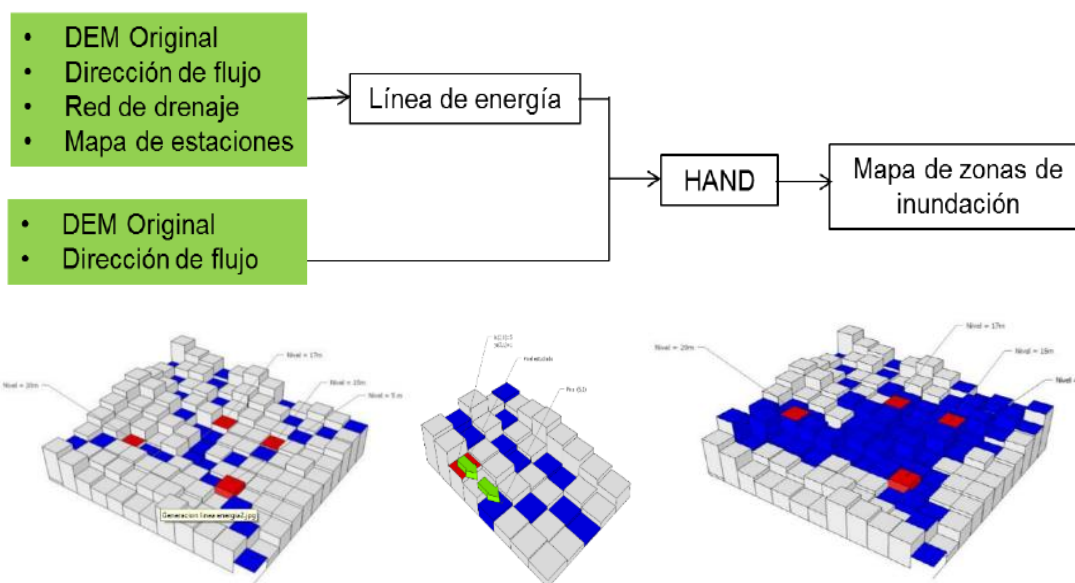


Figura 295. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND. Fuente IDEAM

Las zonas de **amenaza baja** corresponden con áreas con baja probabilidad de inundaciones por el desbordamiento de las quebradas o ríos. Dado que la probabilidad no es nula y que los análisis no contemplan numéricamente los efectos de la variabilidad y cambio climático, estas áreas convienen dentro en los planes de emergencia del municipio.

Las zonas de **amenaza media** corresponden con áreas que pueden ser inundadas por el desbordamiento de ríos y quebradas en los periodos extremos de altas precipitaciones y deben establecer estrategias y medidas de gestión de riesgo para anticiparse al evento de inundación con objeto de una respuesta oportuna y temprana.

Las zonas de **amenaza alta** corresponden con áreas que se pueden afectar por inundaciones en los periodos de altas precipitaciones o incluso hacen parte del lecho del río que siempre sostendrá un nivel de agua en dichos periodos.

2.1.1 Análisis geomorfológico

A partir de las subunidades geomorfológicas se establece una calificación de las áreas que pueden llegar a verse afectadas por inundaciones por su configuración morfométrica y geomorfológica en general.

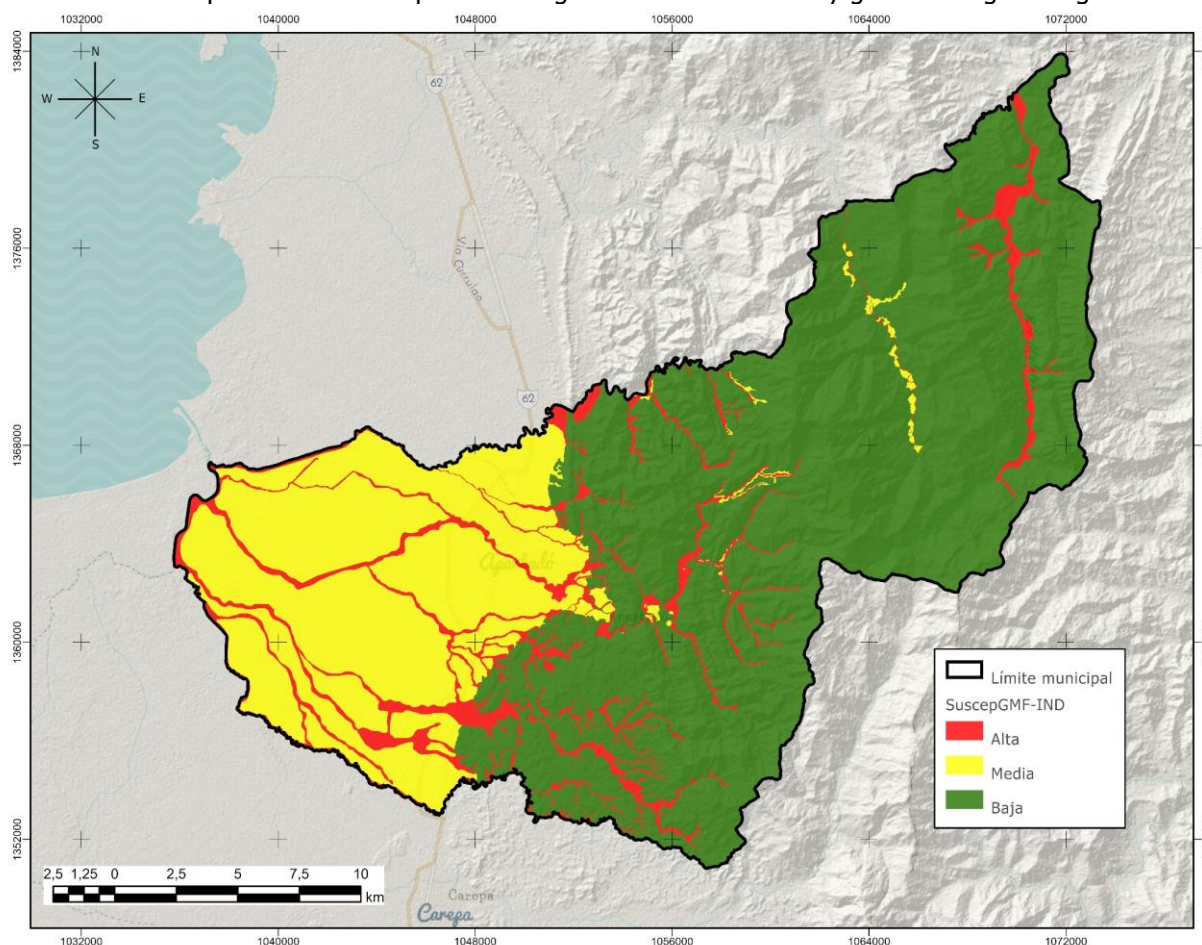


Figura 296. Áreas susceptibles por análisis geomorfológico

2.1.2 Análisis hidráulico

En el capítulo de evaluación de amenaza por movimientos en masa se definió metodológicamente la estimación de las escorrentías a partir de la estimación del número de curva (CN) y retención potencial

(S) en función de las coberturas y los materiales superficiales. Para movimientos en masa se consideró la fracción de lluvia que se infiltra mientras para inundaciones se tiene en cuenta su complemento, es decir, la fracción de lluvia que se deriva en escorrentía directa.

Inicialmente, se valoran los elementos geomorfológicos que aportan a la identificación de áreas inundables y de los cuerpos de agua que pueden presentar desbordamiento de su cauce, aprovechando que la fotointerpretación que se realizó para este proyecto tiene un enfoque específico para la caracterización de amenazas naturales.

Complementariamente se desarrolló una zonificación de amenaza de inundación por desbordamiento de cuerpos de agua con modelación hidrológica hidráulica semicuantitativa (función del relieve, elevación y pendiente del terreno empleando el método de líneas de energía del IDEAM) y acumulación del flujo de agua superficial que se corresponde con la línea de energía de la red de drenaje. El resultado de dicho análisis se observa en las Figura 297 y Figura 298.

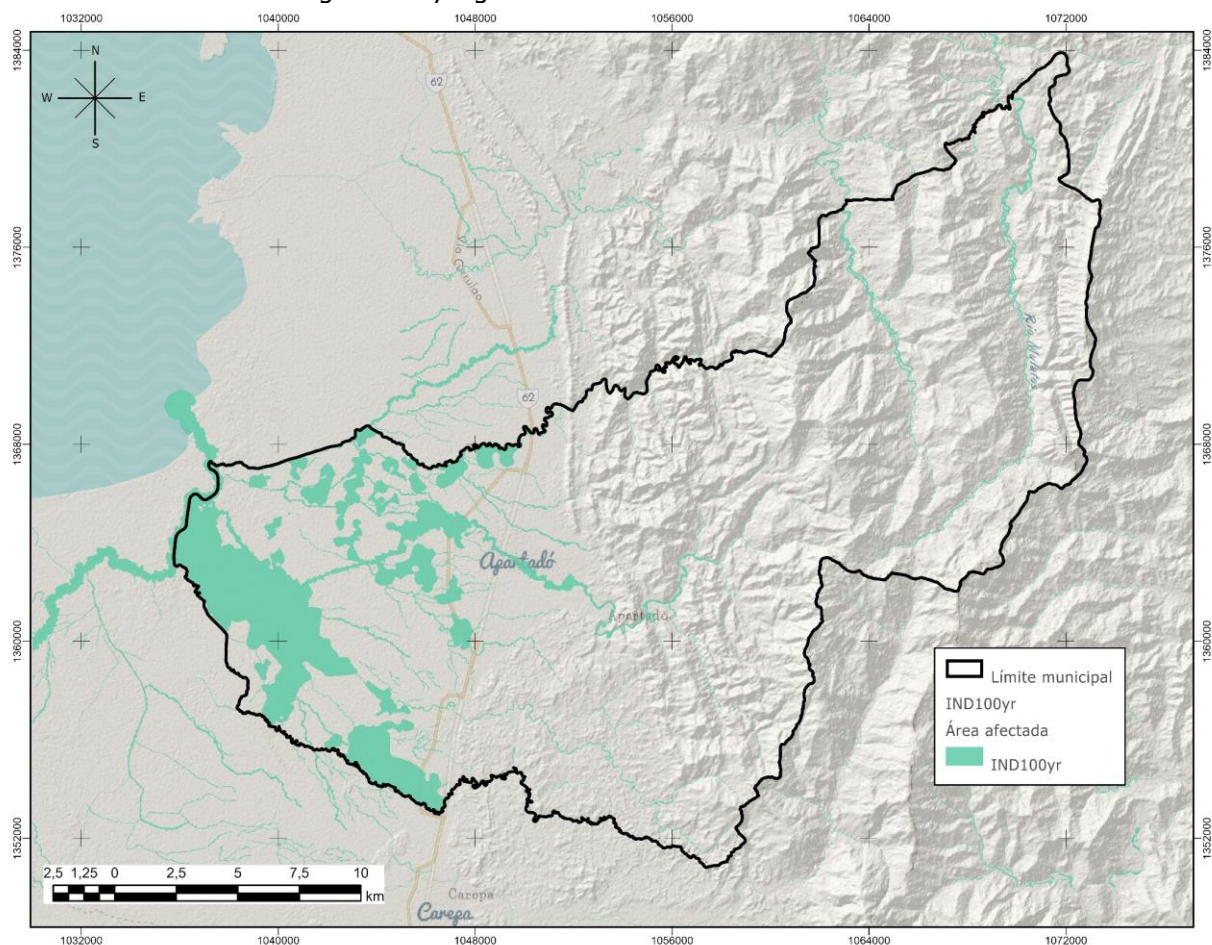


Figura 297. Áreas de afectación por inundación para un Tr 100 yr resultado de la modelación en el área rural

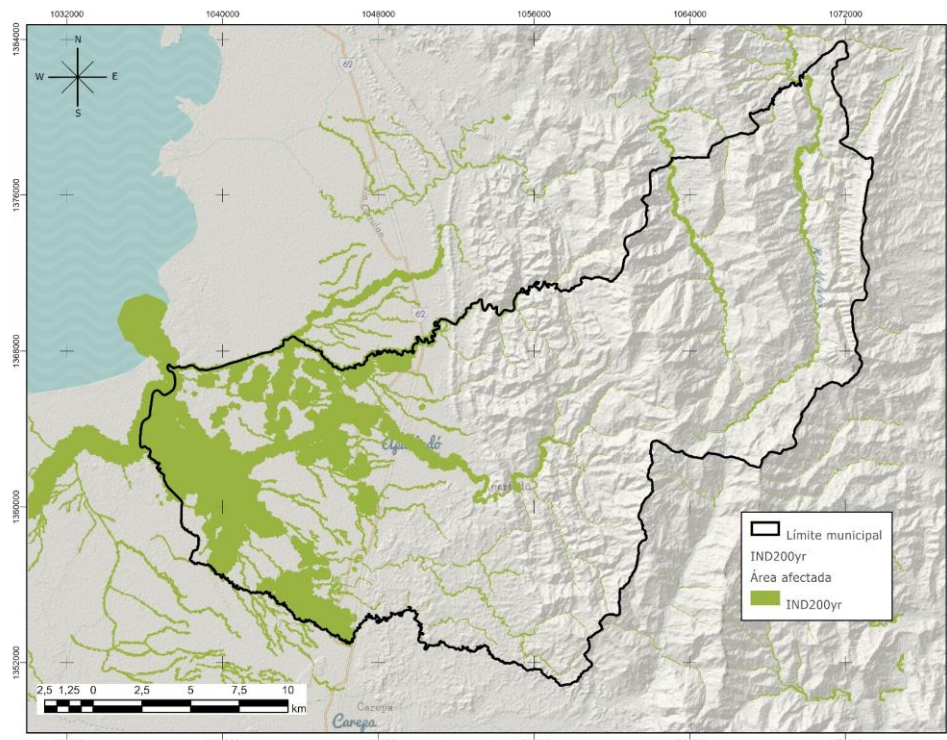


Figura 298. Áreas de afectación por inundación para un Tr 200 yr resultado de la modelación en el área rural

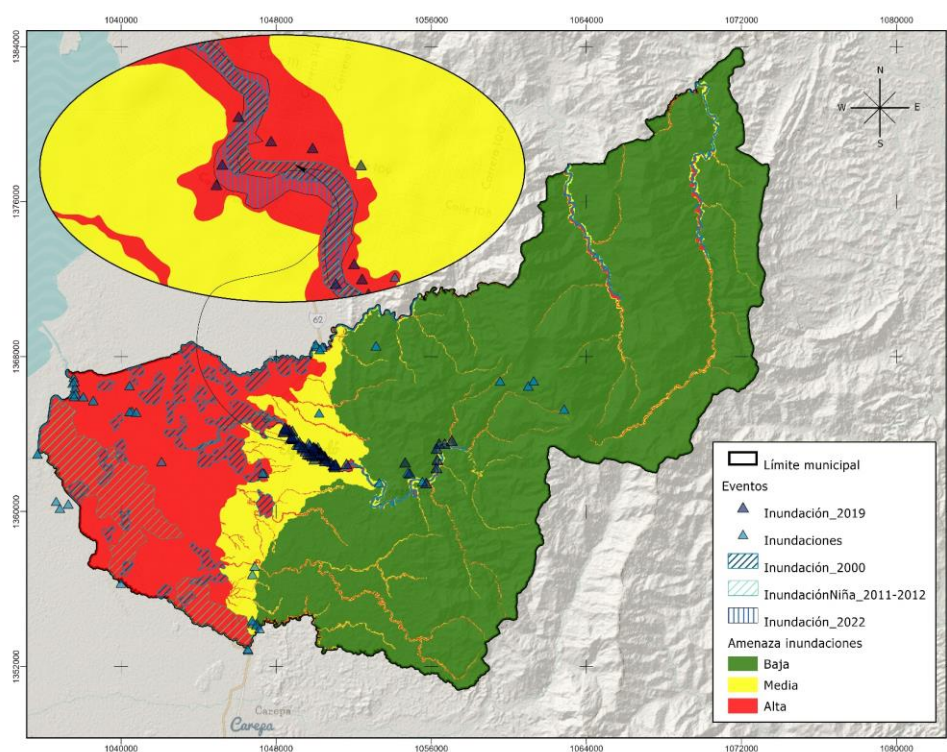


Figura 299. Áreas de validación de eventos por inundación verificados en la modelación en el área rural

Una vez evaluada la zonificación de los desbordamientos posibles en los cuerpos de agua que tienen influencia sobre el área de estudio seleccionada, se comparan con los históricos de inundación, se contrasta con evidencias históricas geomorfológicas para establecer la zonificación de amenaza por inundación en el área rural, específicamente en el área de estudio definida con anterioridad. La amenaza por inundación para el área de estudio del sector rural se muestra con mayor resolución en los mapas anexos que hacen parte integral del presente documento.

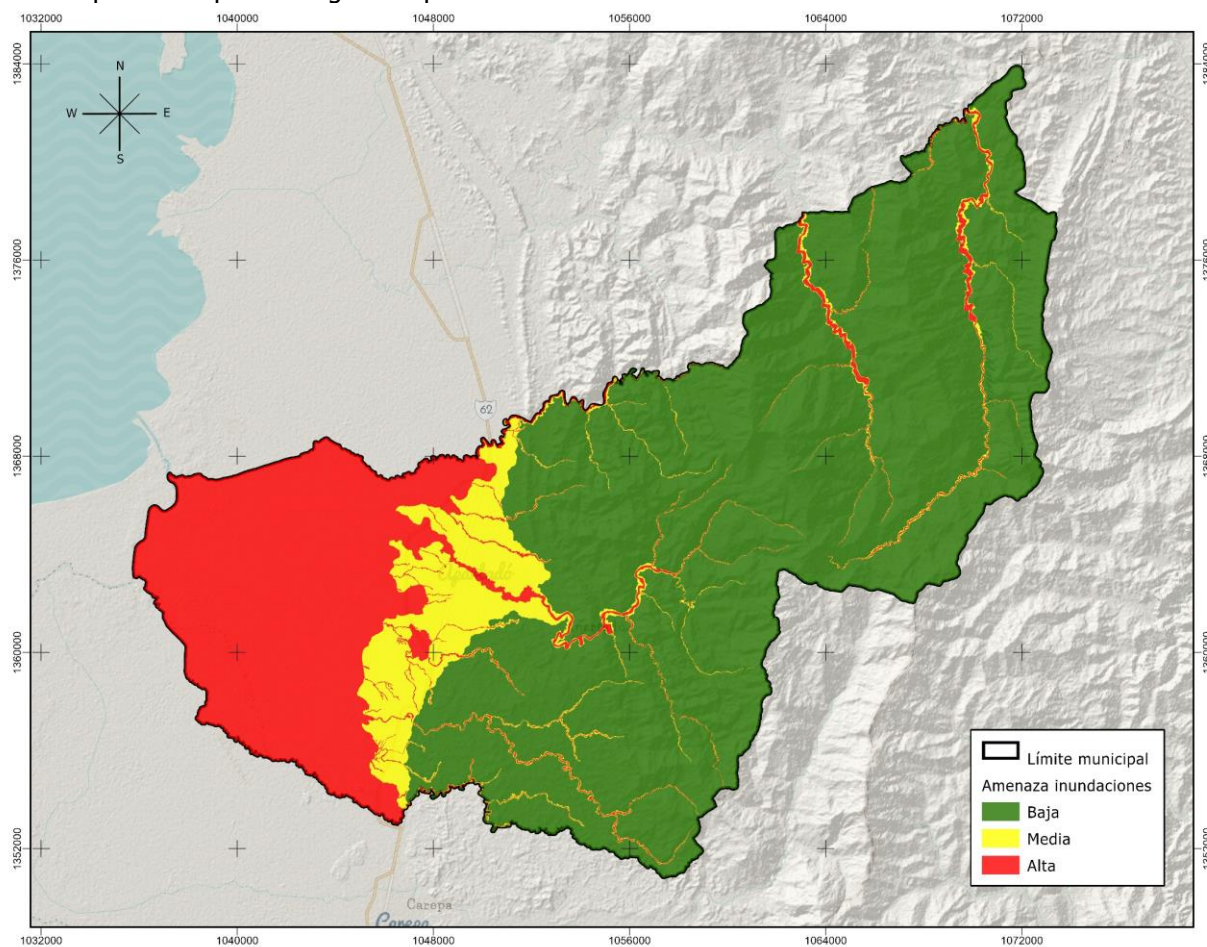


Figura 300. Amenaza por inundación en el área rural

2.2 Análisis urbano de amenaza por inundación escala 1:5.000

El estudio del IDEAM calcula el mapa de amenaza por inundación asociado a niveles de lámina de agua, genera dos productos espaciales: el primero es el de línea de energía que es una interpolación de los valores de niveles de las estaciones a través de la red de drenaje (el nivel varía de acuerdo con el período de retorno), y el segundo, que se obtiene por medio de la aplicación del algoritmo HAND (Height Above Nearest Drainage), es el mapa de amenaza por inundación que indica dónde el terreno puede inundarse de acuerdo con los valores de los niveles de las estaciones.

La idea fundamental de este algoritmo HAND es la representación de un mapa de alturas con una pequeña variación con respecto al mapa de elevación original (DEM). El HAND tiene todos sus valores de elevación normalizados con respecto a la magnitud de la línea de energía en la red de drenaje existente,

conformando así un mapa de elevaciones relativo a las corrientes existentes en las diferentes cuencas de la zona representada. En cuanto a hidrología, previamente se mostró el comportamiento del régimen hidrológico en la región mediante un análisis de los eventos hidrológicos para distintos periodos de retorno. Como se indicó previamente, se elaboró la modelación hidrológica hidráulica semicuantitativa teniendo en cuenta los principios descritos en la Figura 301.

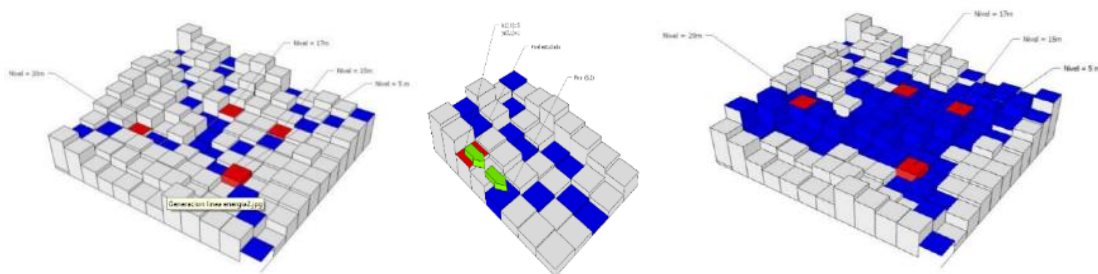
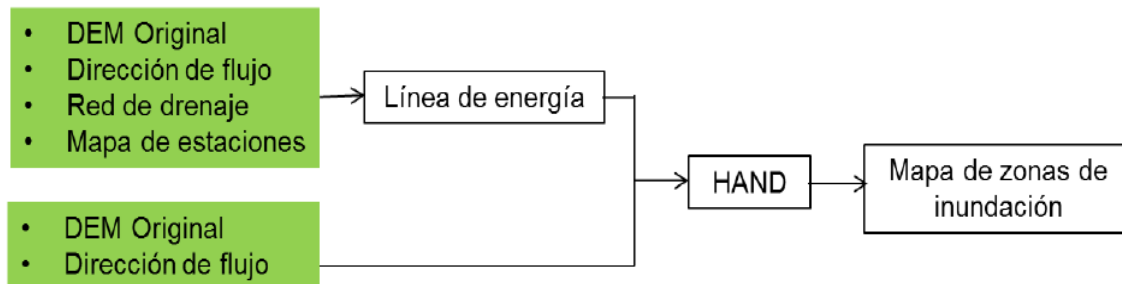


Figura 301. Estimación de la extensión de la inundación, línea de energía y HAND. Fuente: IDEAM

2.2.1 Análisis geomorfológico urbano

A partir de los elementos geomorfológicos se establece una calificación de las áreas que pueden llegar a verse afectadas por inundaciones por su configuración morfométrica y geomorfológica en general.

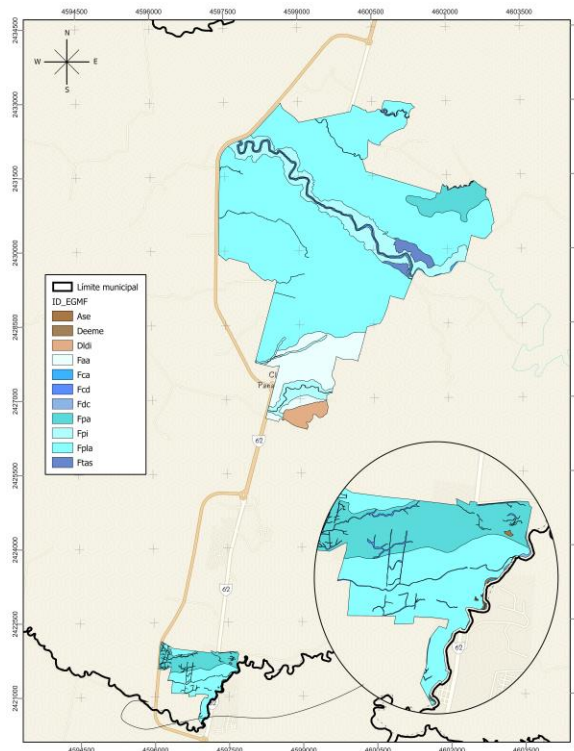


Figura 302. Elementos geomorfológicos fluviales

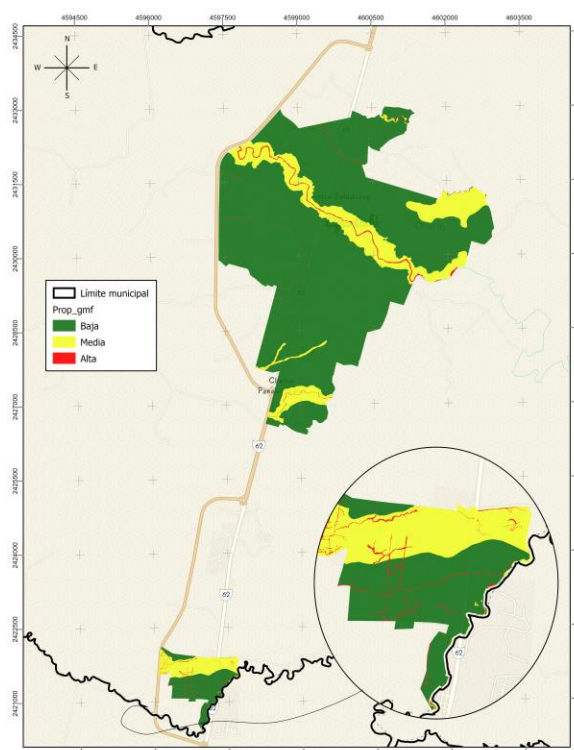


Figura 303. Áreas susceptibles por análisis geomorfológico

Para la cabecera municipal y área de expansión se consideraron las siguientes variables, dando como resultado la zonificación de amenaza por inundación escala 1:5.000 presentada en la Figura 309.

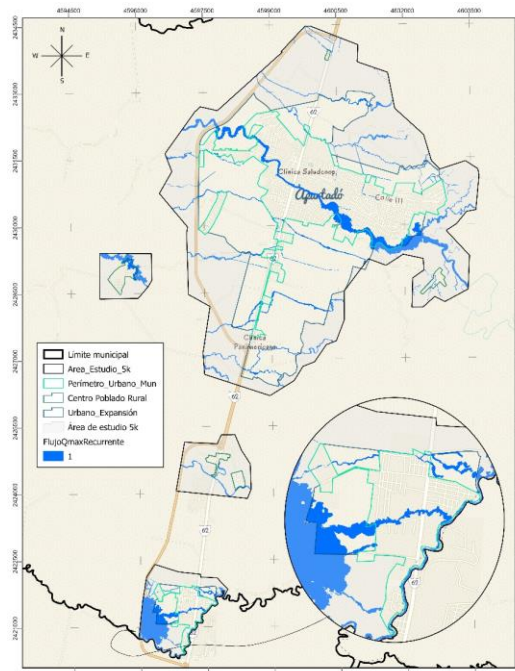


Figura 304. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes urbano

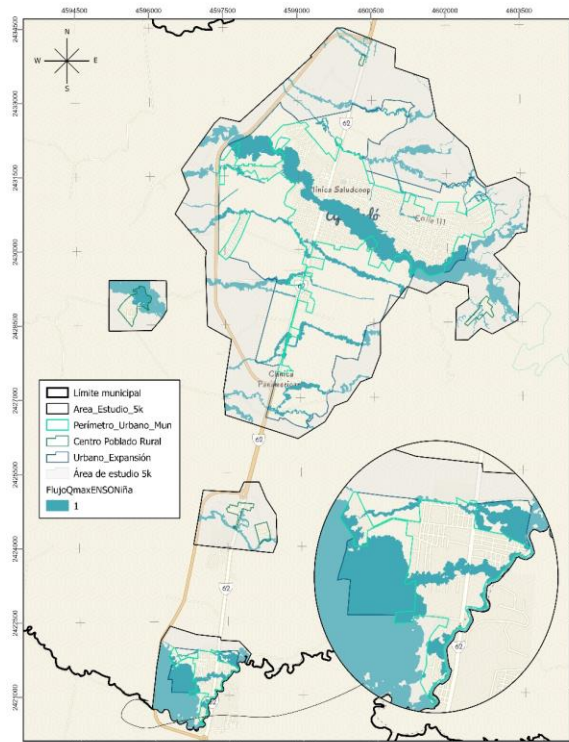


Figura 305. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) urbano

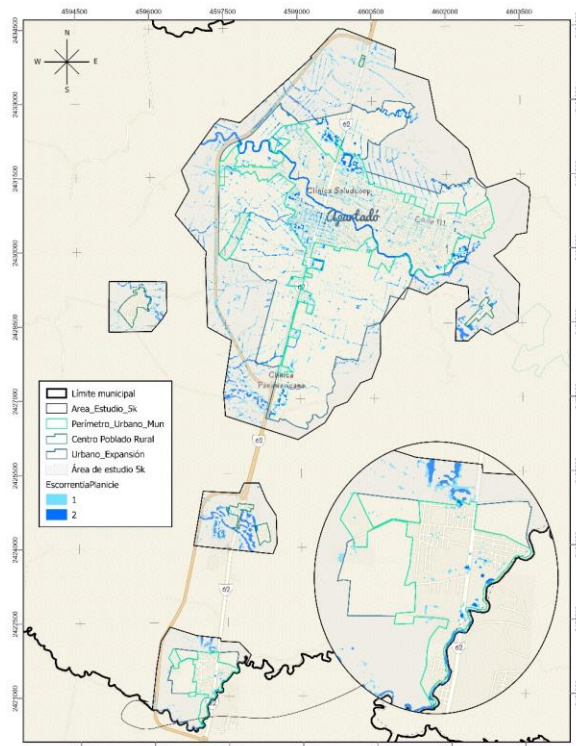


Figura 306. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie urbano

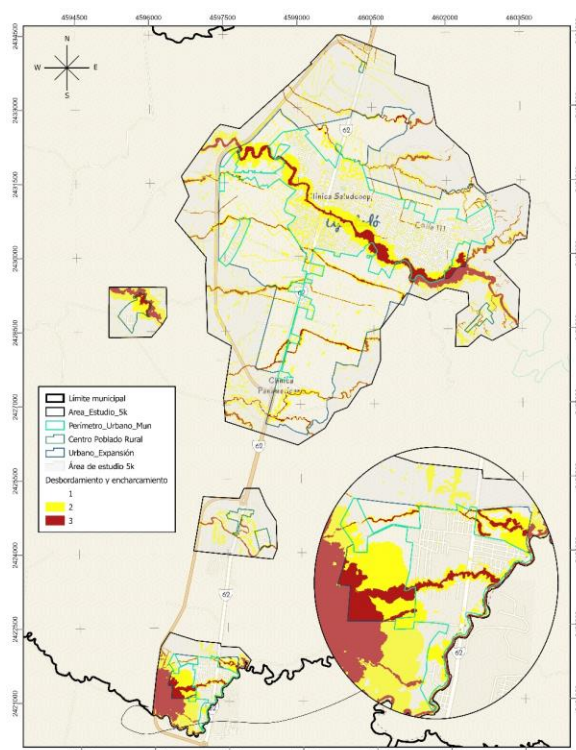


Figura 307. Áreas de desbordamiento y encharcamiento urbano

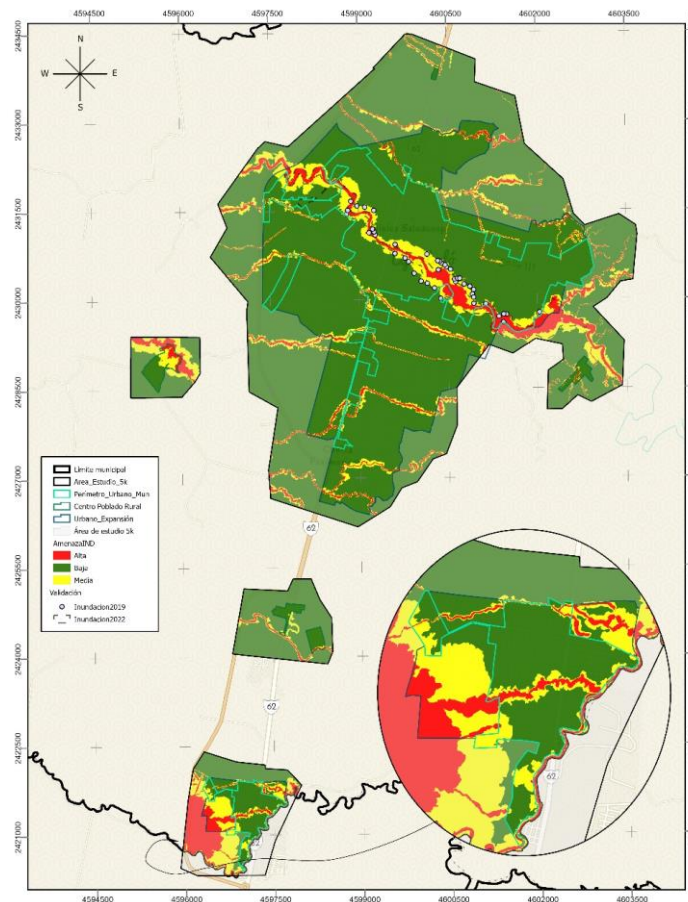


Figura 308. Amenaza por inundaciones validada con eventos 2019 y 2020

Así, se considera entonces la zonificación de amenaza por inundación en función de los resultados obtenidos en la modelación en las categorías alta, media y baja (ver Figura 309), donde la presencia de agua sería frecuente o permanente en la calificación alta, poco frecuente pero con capacidad de afectación en la calificación media y poco frecuente o inexistente en la calificación baja. Esta amenaza es revisada, validada y ajustada junto con el equipo técnico de CORPOURABA, dando como resultado las zonas sujetas a decisión por inundaciones en el ordenamiento territorial.

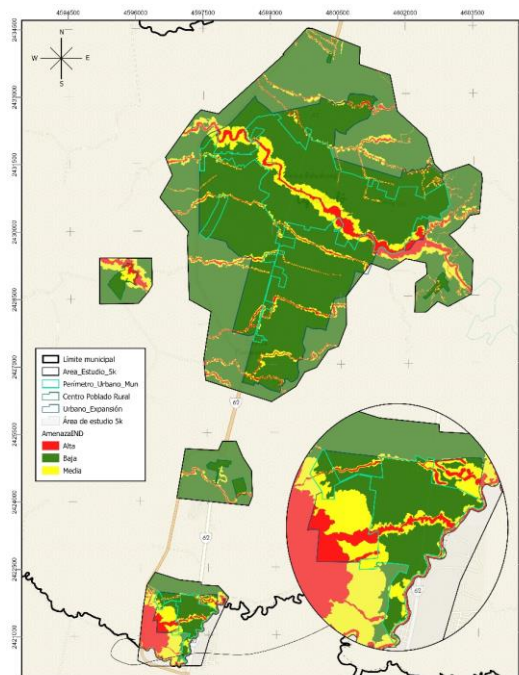


Figura 309. Amenaza por inundación en el área urbana modelada y validada con eventos

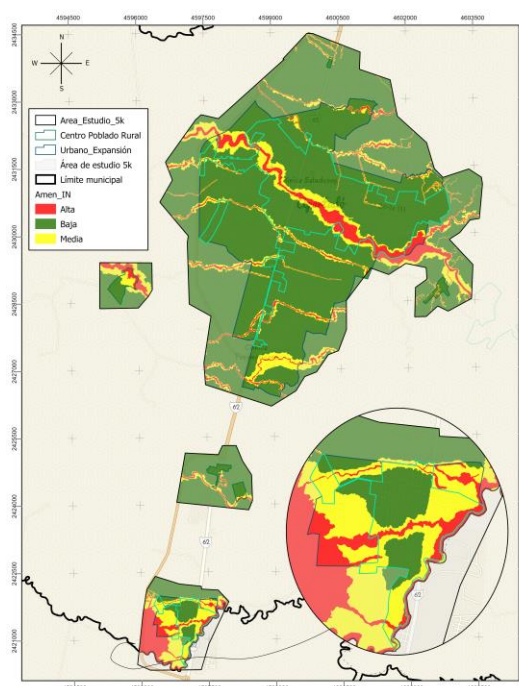


Figura 310. Amenaza por inundación en el área urbana final (verificada y validada con la autoridad ambiental)

Las zonas de **amenaza baja** corresponden con áreas con baja probabilidad de inundaciones por el desbordamiento de las quebradas o ríos. Dado que la probabilidad no es nula y que los análisis no

contemplan numéricamente los efectos de la variabilidad climática y cambio climático, estas áreas convienen dentro en los planes de emergencia del municipio.

Las zonas de **amenaza media** corresponden con áreas que pueden ser inundadas por el desbordamiento de ríos y quebradas en los periodos extremos de altas precipitaciones y deben establecer estrategias y medidas de gestión de riesgo para anticiparse al evento de inundación con objeto de una respuesta oportuna y temprana.

Las zonas de **amenaza alta** corresponden con áreas que se pueden afectar por inundaciones en los periodos de altas precipitaciones o incluso hacen parte del lecho del río que siempre sostendrá un nivel de agua en dichos periodos.

De igual forma se evaluaron en los centros poblados rurales priorizados para ser evaluados en escala 1:5.000, entendiendo que dentro de la ejecución del Plan de Ordenamiento Territorial se deberán evaluar los restantes, ya que todos presentan afectaciones asociadas a inundaciones con diferentes grados de intensidad. A continuación se presentan los resultados para los centros poblados de Churidó, San Pablo, El Diamante, Zungo Carretera, Loma Verde, San Martín, San José de Apartadó, Salsipuedes y La Victoria.

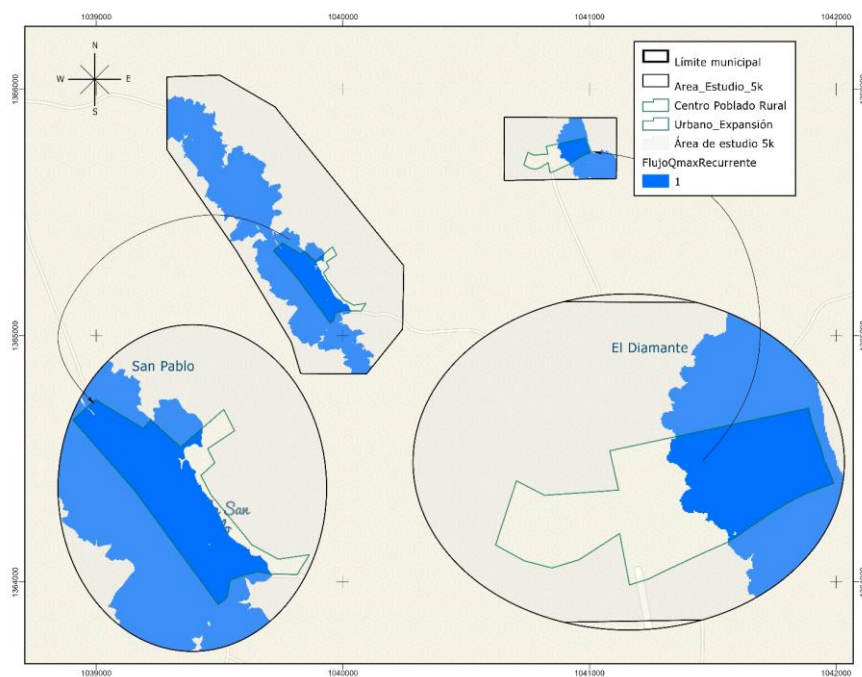


Figura 311. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP El Diamante y San Pablo

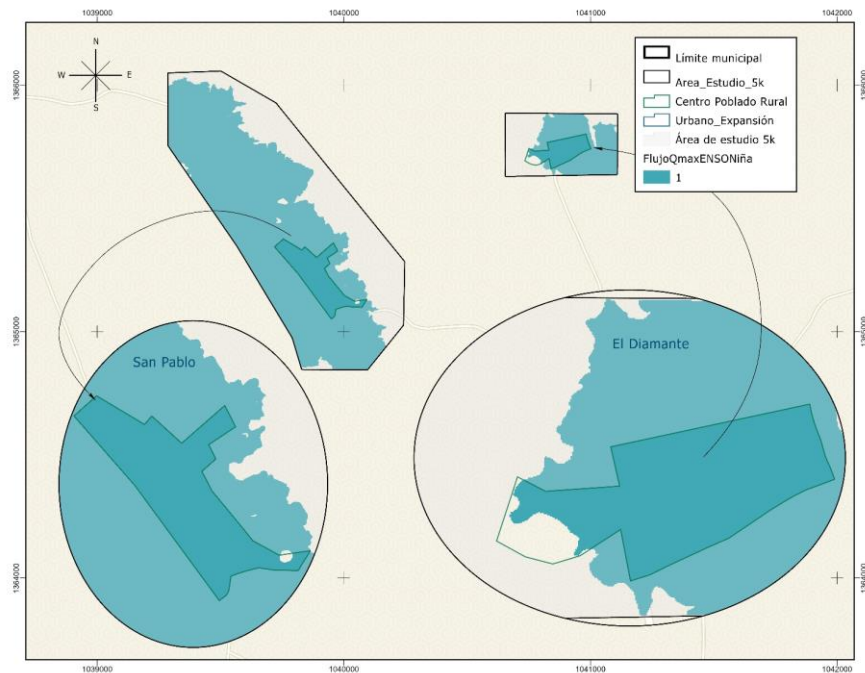


Figura 312. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP El Diamante y San Pablo

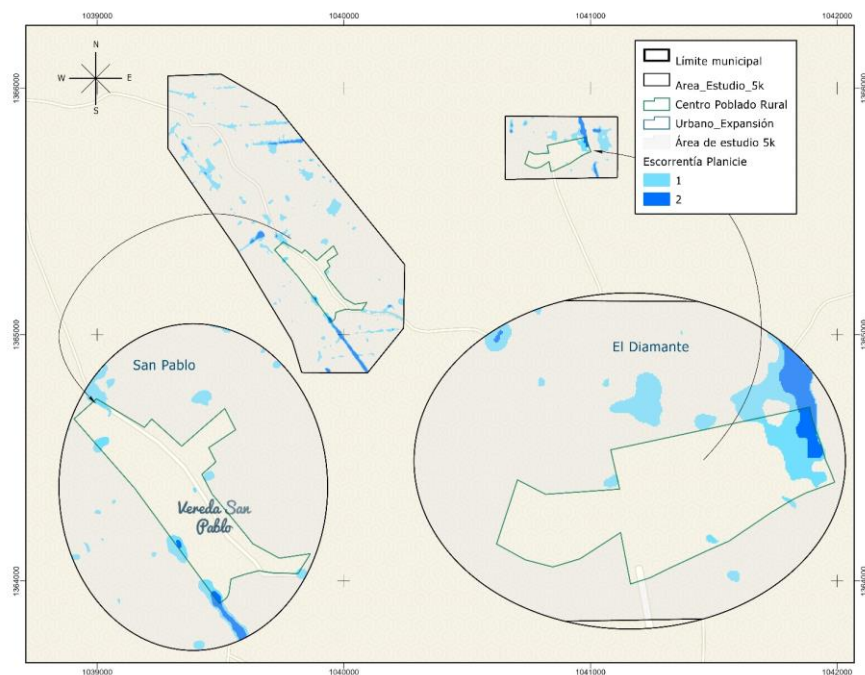


Figura 313. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP El Diamante y San Pablo

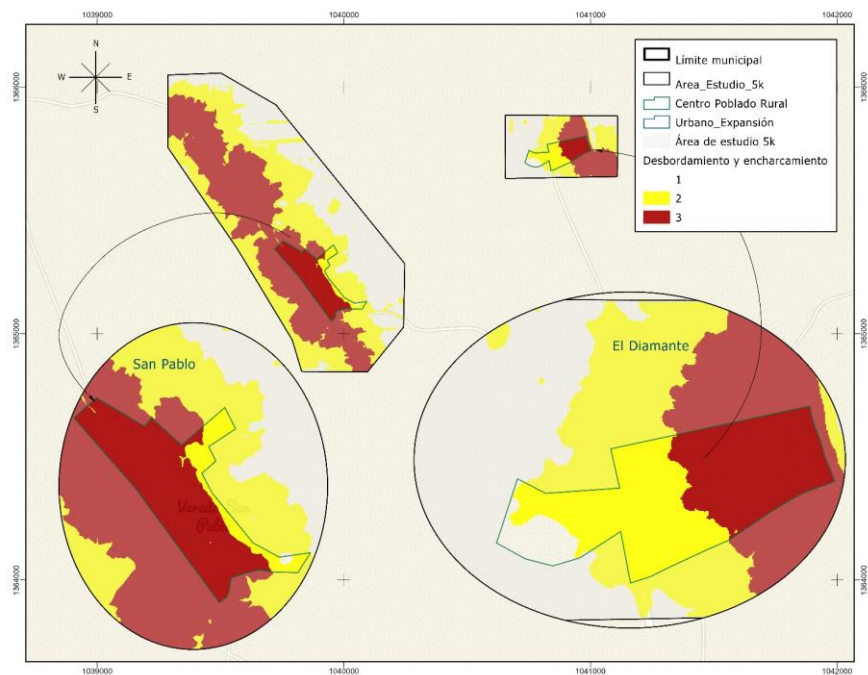


Figura 314. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP El Diamante y San Pablo

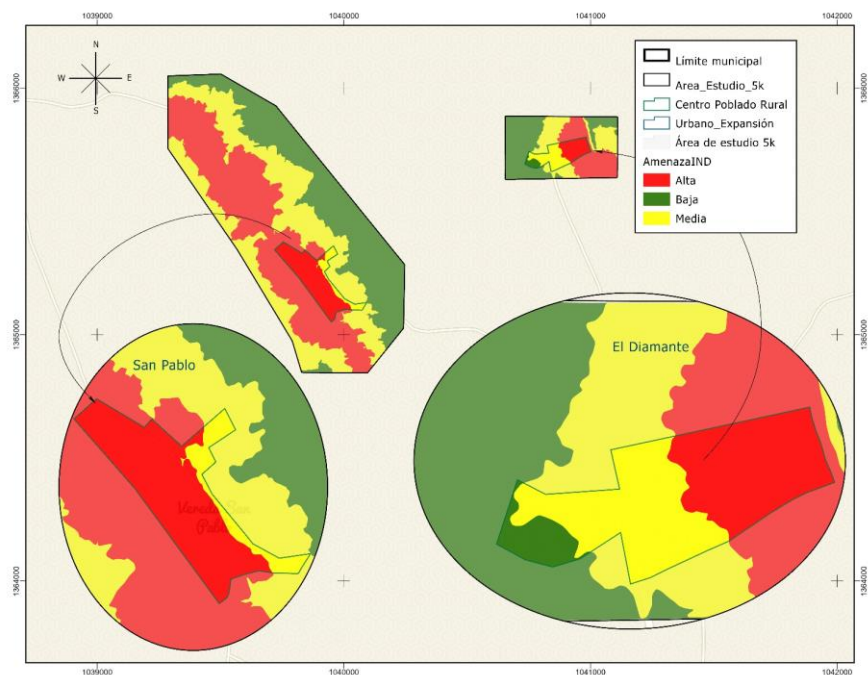


Figura 315. Amenaza por inundación en el área CP El Diamante y San Pablo

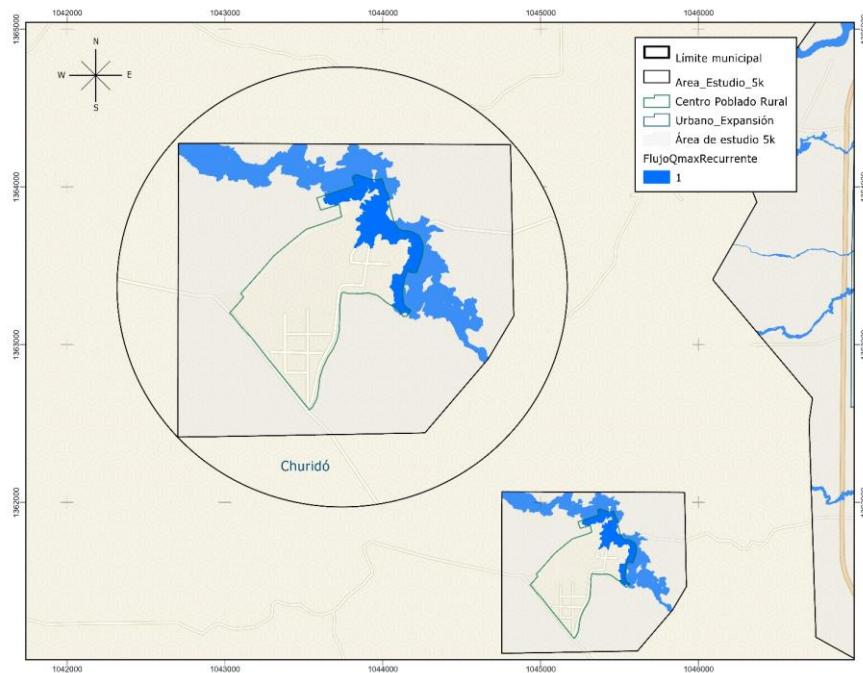


Figura 316. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Churidó

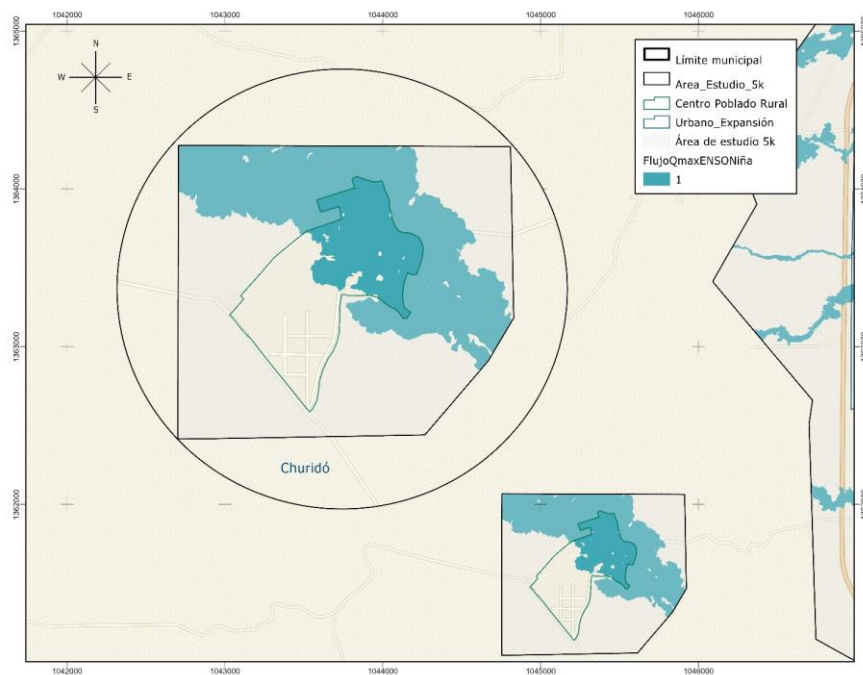


Figura 317. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Churidó

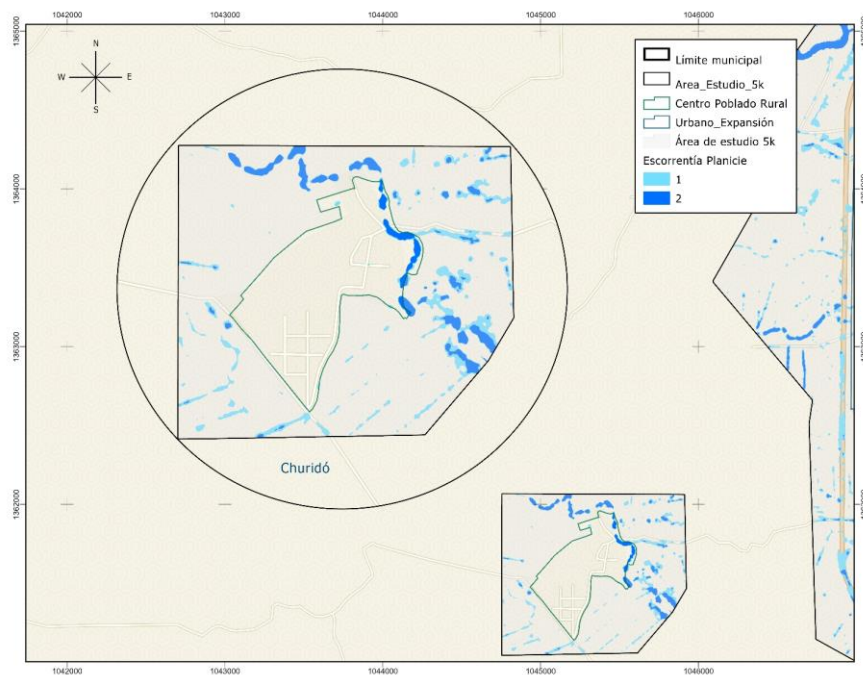


Figura 318. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Churidó

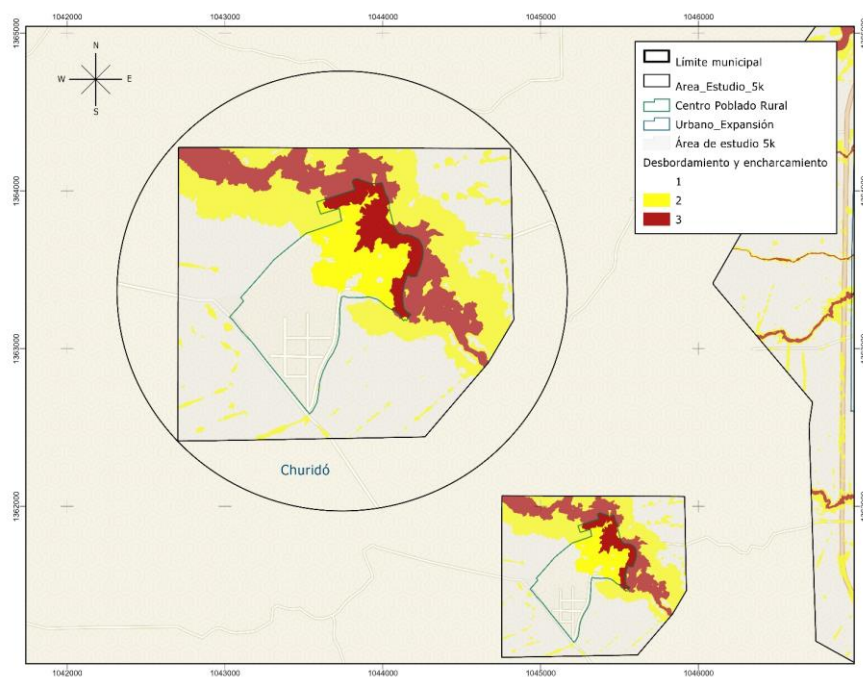


Figura 319. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Churidó

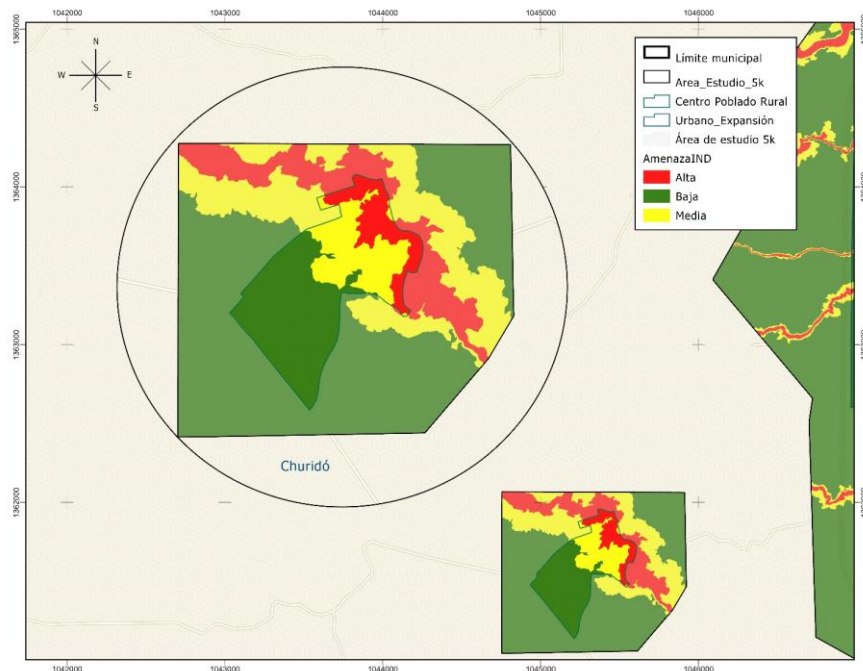


Figura 320. Amenaza por inundación en el área CP Churidó

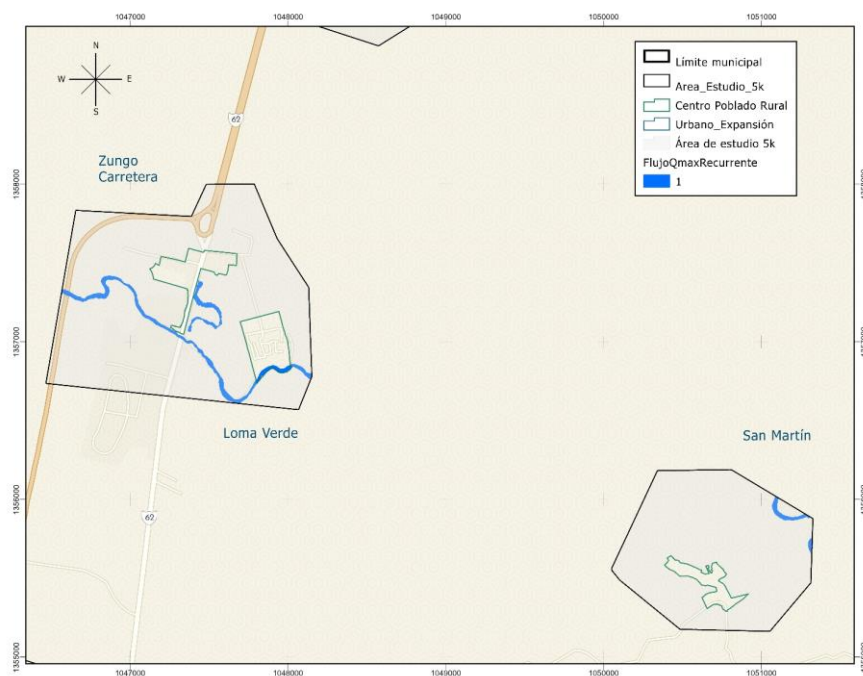


Figura 321. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín

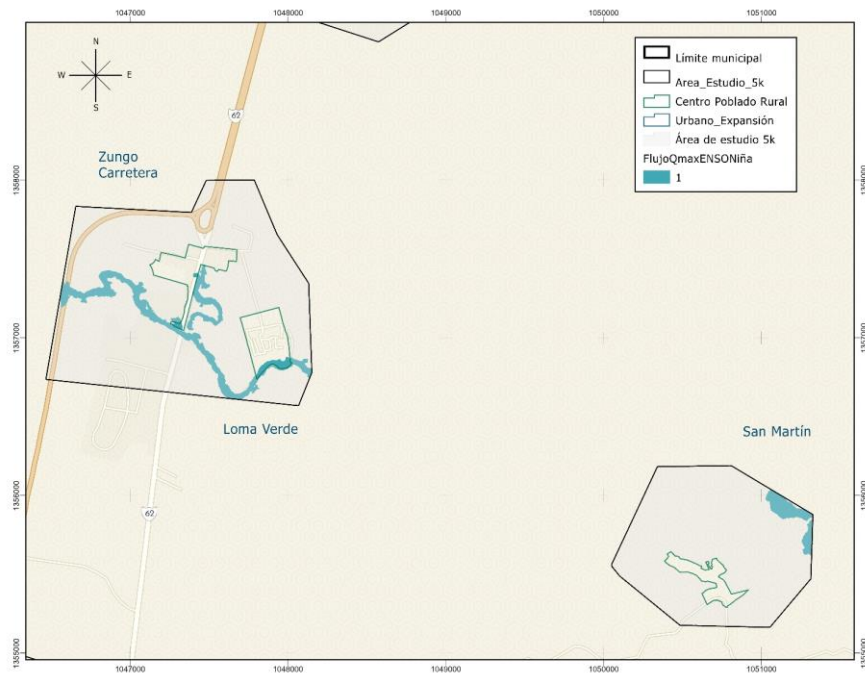


Figura 322. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín

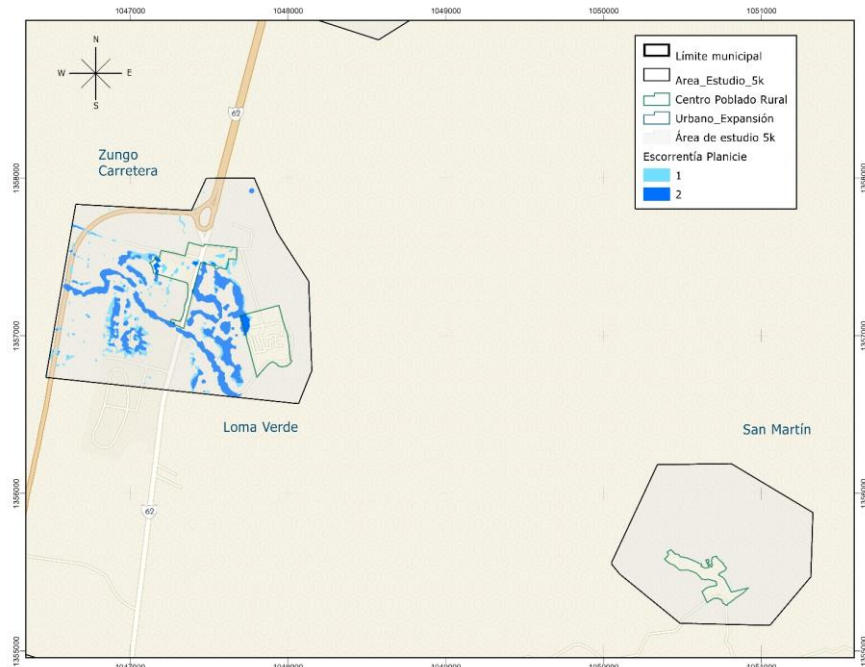


Figura 323. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín

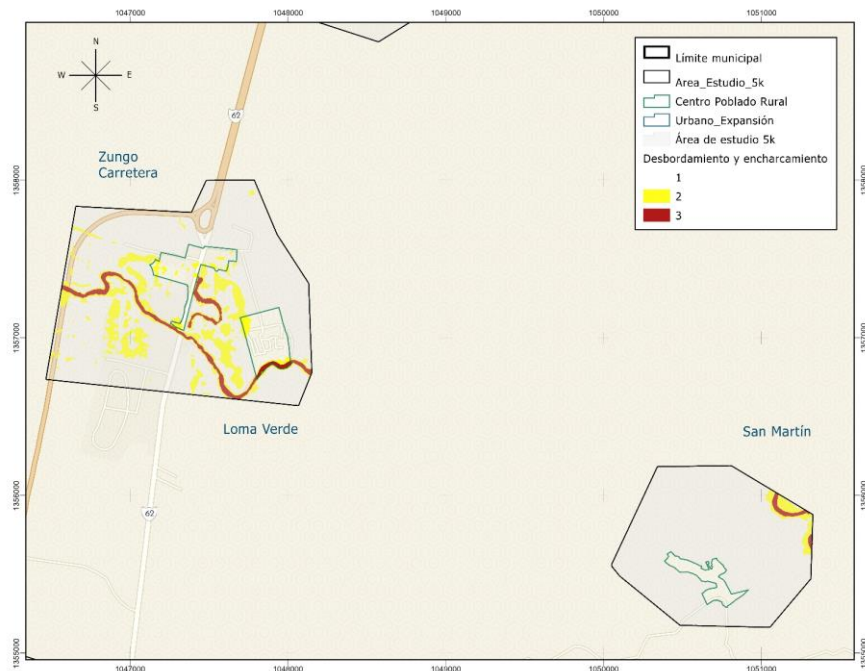


Figura 324. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín



Figura 325. Amenaza por inundación en el área CP Loma Verde, Zungo Carretera y San Martín

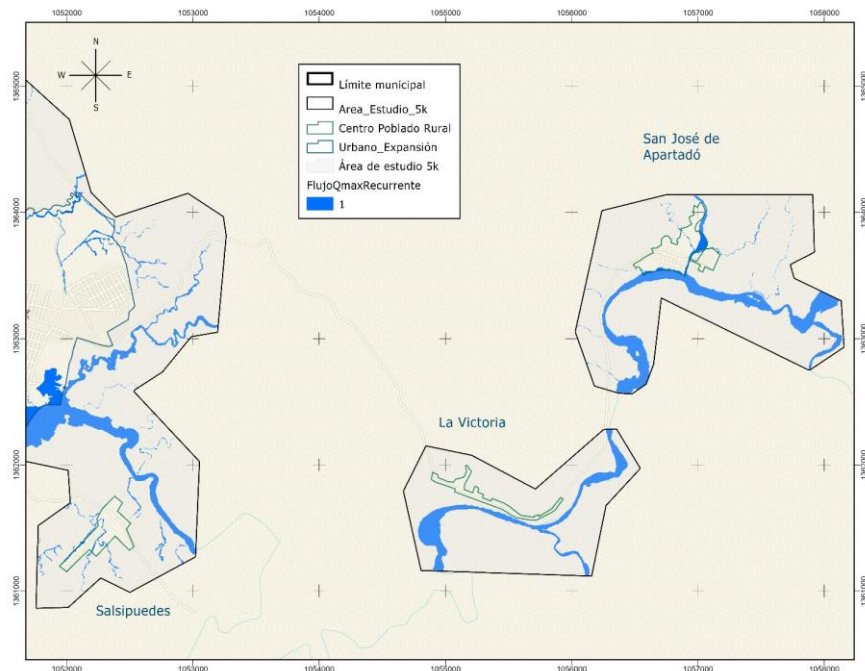


Figura 326. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno recurrentes CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria

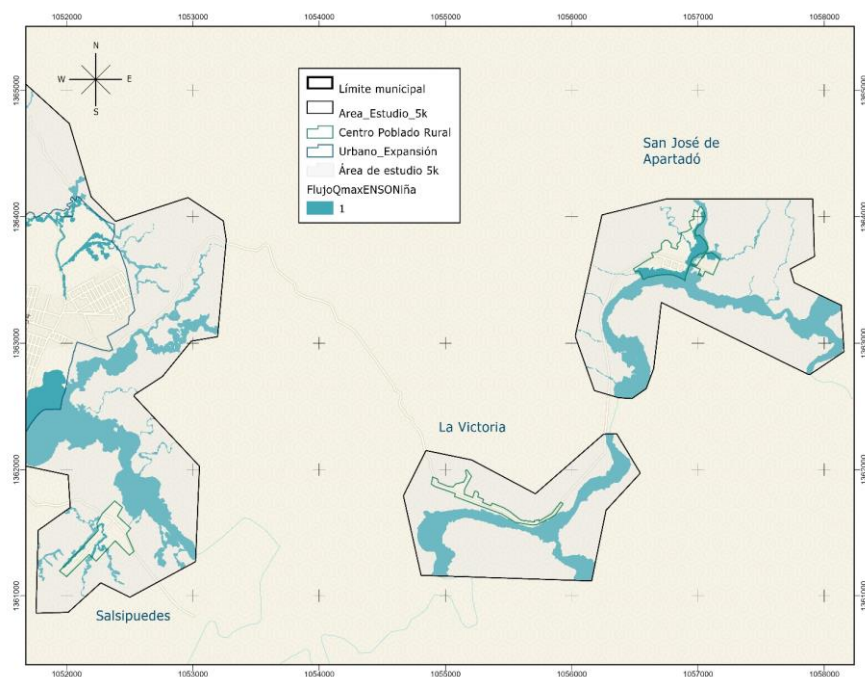


Figura 327. Áreas de afectación por inundaciones en periodos de retorno extremos (Niña) CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria

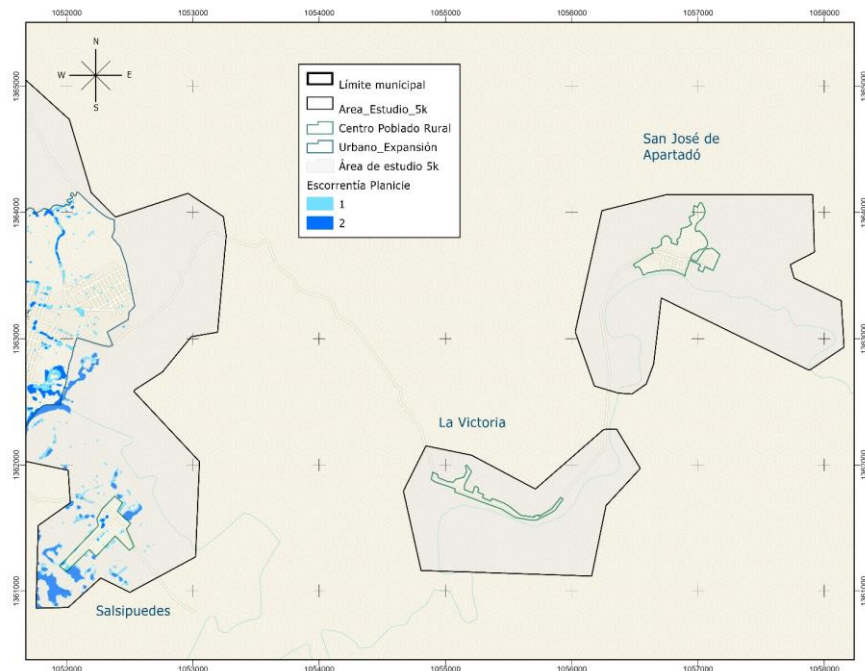


Figura 328. Áreas de afectación por escorrentía en zonas de planicie CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria

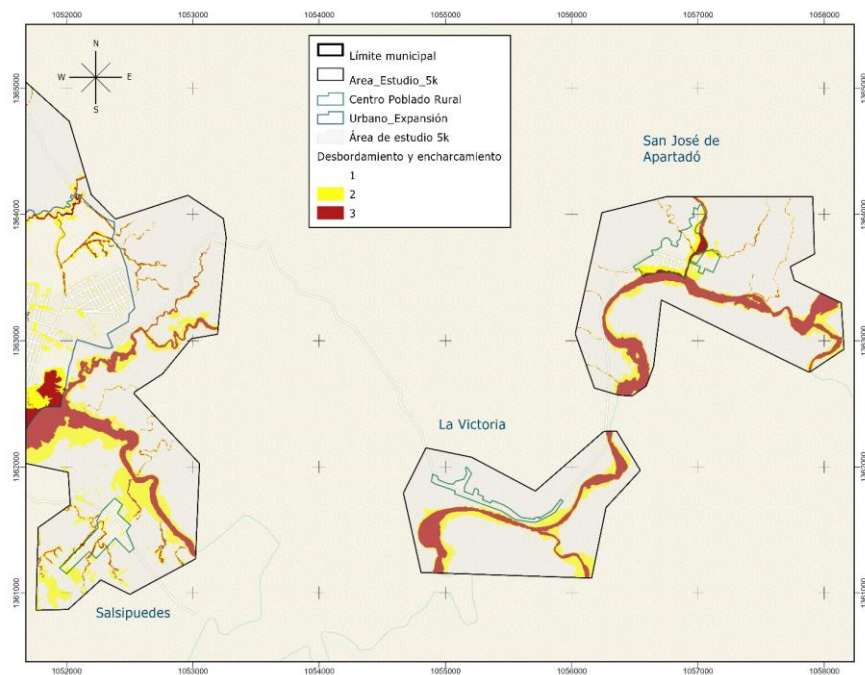


Figura 329. Áreas de desbordamiento y encharcamiento CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria

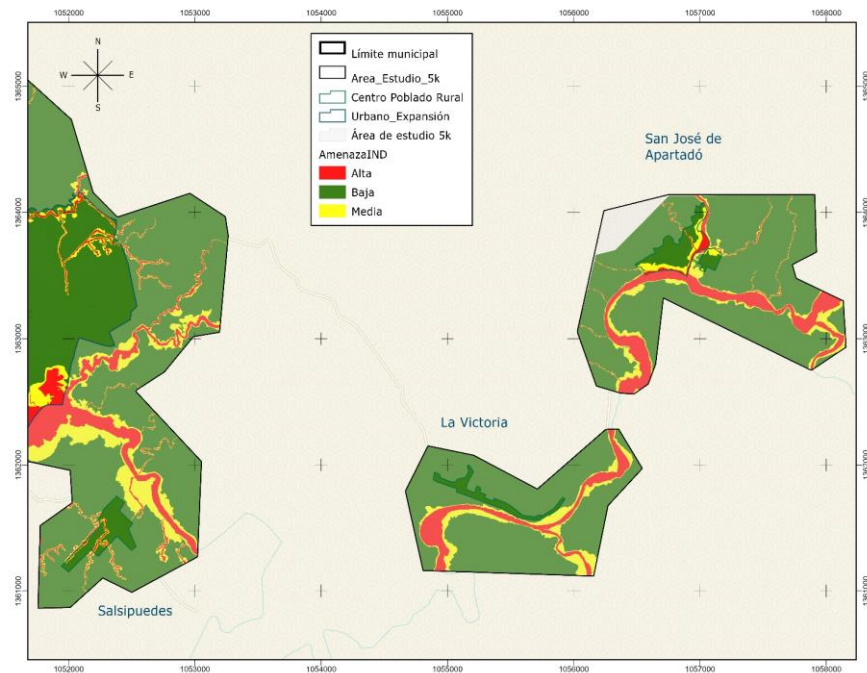
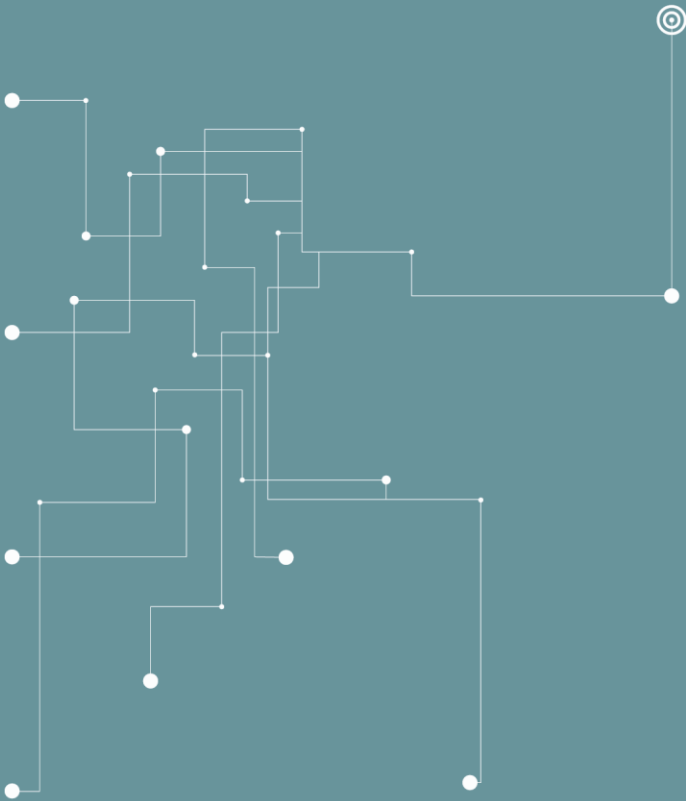


Figura 330. Amenaza por inundación en el área CP Salsipuedes, San José de Apartadó y La Victoria



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

3. Amenaza por avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales son un tipo de movimiento en masa que se desplaza generalmente por los cauces de las quebradas, llegando a transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros con velocidades peligrosas para los habitantes e infraestructura ubicados en la zona de alcance. Dichos fenómenos tienen características particulares que permiten su desarrollo y están relacionados con la pendiente, topografía del terreno, densidad de drenajes, morfometría del área tributaria, sismicidad, precipitaciones y aporte de material sólido al torrente representado con la posibilidad de deslizamientos y flujos conectados a los cuerpos de agua.

3.1 Definición de áreas susceptibles a presentar avenidas torrenciales

Para realizar el análisis de la ocurrencia de fenómenos de Avenidas Torrenciales, el cual es uno de los fenómenos ambientales que conlleva mayor cantidad de afectaciones y daños sociales, económicos y ambientales para la sociedad y el medio, inicialmente se debe acotar áreas que puedan ser propensos a eventos torrenciales, rasgos geomorfológicos, índices de torrencialidad son útiles para identificar estas áreas.

3.1.1 Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales

El IVET o Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales fue creado en 2011 por el IDEAM para determinar el nivel de torrencialidad en cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas, el cual se adapta y es considerado como el insumo básico para el análisis de la amenaza por fenómenos de avenidas torrenciales en el municipio de Apartadó. Este índice identifica características hidrológicas y físicas resumiéndolo en dos índices, variabilidad y morfogenético, los cuales se describen a continuación.

3.1.1.1 Índice de variabilidad

El índice de variabilidad permite conocer la cantidad de caudal líquido que un cauce puede soportar en caso de una tormenta, este índice no está sujeto a variación por actividad antrópica por lo que se enfoca totalmente al análisis hidrológico de la zona de estudio, por esto es que para obtener el índice de variabilidad se debe calcular una curva de caudales y con la pendiente de esta se puede obtener dicho índice.

Tabla 59. Clasificación índice de variabilidad

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
< 10	Muy Baja
10.1 - 37	Baja
37.1 - 47	Media
47.1 - 55	Alta
> 55	Muy Alta

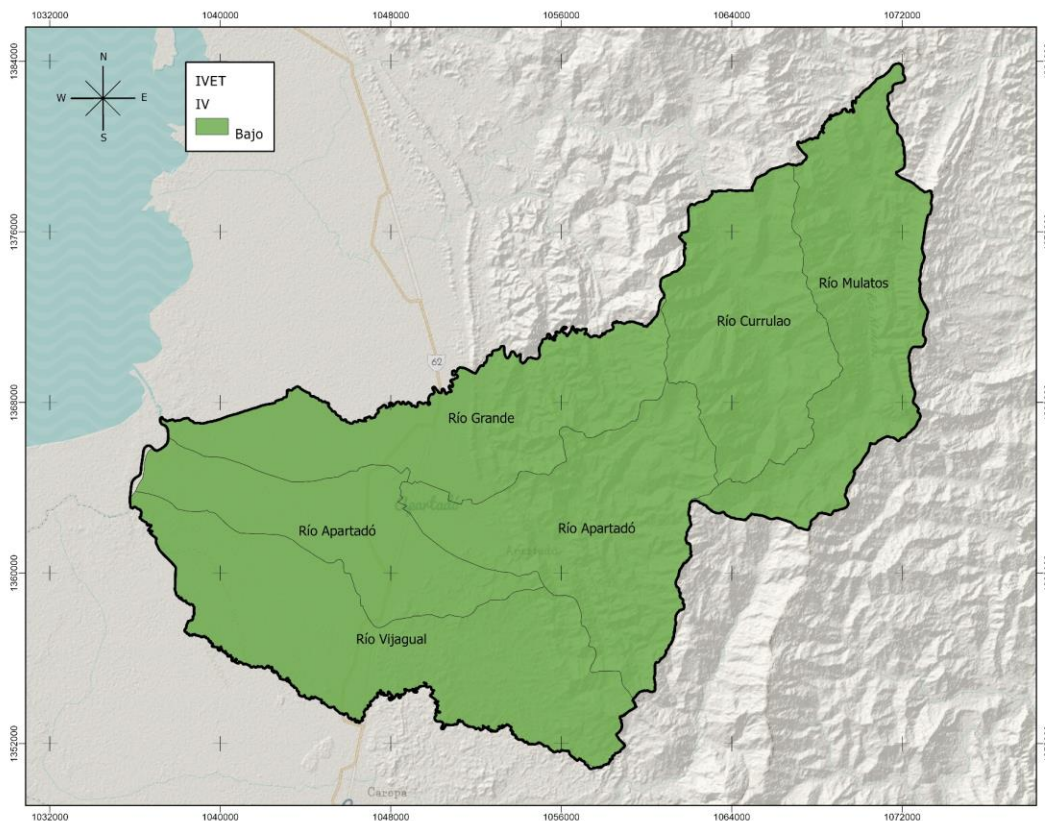


Figura 331. IV cuencas municipio de Apartadó

3.1.1.2 Índice morfométrico de torrencialidad

Debido al carácter de la torrencialidad en una hoya hidrográfica, se hace demasiado complicado determinar cuantitativamente dicho índice y depende en gran medida de la apreciación profesional de la persona encargada de realizar dicho análisis. En la literatura se pueden encontrar una gran cantidad de parámetros lineales que pueden afectar al índice de torrencialidad, sin embargo en los estudios realizados en el país, los parámetros que han sido usados con mayor frecuencia son:

- ▽ Coeficiente de compacidad.
- ▽ Densidad de drenaje.
- ▽ Pendiente media de la cuenca.

Para realizar la clasificación del índice de torrencialidad de área de estudio se hace necesario ponderar de manera cuantitativa, las tres variables que se enunciaron anterior y finalmente identificar en la siguiente tabla el índice de torrencialidad presente en el área. Posteriormente se mostrarán las calificaciones para cada variable por separado.

Tabla 60. Calificación índice de torrencialidad

		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA						
		1	2	3	4	5		
DENSIDAD DE DRENAJE	1	111	121	131	141	151	1	COEFICIENTE DE FORMA
		112	122	132	142	152	2	
		113	123	133	143	153	3	
		114	124	134	144	154	4	
		115	125	135	145	155	5	
	2	211	221	231	241	251	1	
		212	222	232	242	252	2	
		213	223	233	243	253	3	
		214	224	234	244	254	4	
		215	225	235	245	255	5	
	3	311	321	331	341	351	1	
		312	322	332	342	352	2	
		313	323	333	343	353	3	
		314	324	334	344	354	4	
		315	325	335	345	355	5	
	4	411	421	431	441	451	1	
		412	422	432	442	452	2	
		413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
	5	511	521	531	541	551	1	
		512	522	532	542	552	2	
		513	523	533	543	553	3	
		514	524	534	544	554	4	
		515	525	535	545	555	5	

La morfometría de una cuenca determina las características físicas que esta posee y de la misma manera sirve como insumo cuantitativo para el desarrollo del estudio, la morfometría comprende una gran cantidad de parámetros que van desde el área de la cuenca hasta la pendiente media de los cauces que se encuentran en esta; sin embargo para el desarrollo de este documento se van a tener en cuenta solo unos de estos los cuales fueron enunciados anteriormente.

Para realizar el cálculo del IVET en el área de estudio, que en este caso particular será el municipio de Apartadó, se deberá realizar el análisis y cálculo de dos índices o variables que sirven para determinar el IVET, estos son el Índice Morfométrico de Torrencialidad y el otro es el Índice de Variabilidad.

El Índice Morfométrico de Torrencialidad es definido como la relación existente entre los parámetros morfométricos del área de estudio, como las pendientes, las coberturas, los índices de compacidad, de velocidad, de susceptibilidad a generar sedimentos, entre otros índices característicos de una cuenca; y con el análisis de estos determinar el nivel de susceptibilidad a presentar eventos torrenciosos.

Por otra parte, el Índice de Variabilidad es el resultado del análisis de las curvas de duración de caudales, ya que a partir de esta se puede determinar si una cuenca llega a ser torrencial en momentos de fuertes lluvias, ya que dependiendo de esto los caudales podrán aumentar o disminuir con mayor facilidad, provocando así el desbordamiento de los cauces, el transporte de sedimentos y finalmente, la aparición de eventos torrenciales. Se debe tener en cuenta que un factor de gran importancia, tanto para el índice morfométrico como para el de variabilidad, son el área y las pendientes de la cuenca, ya que estos determinarán la estabilidad de la misma y por ende la susceptibilidad a presentar dichos eventos.

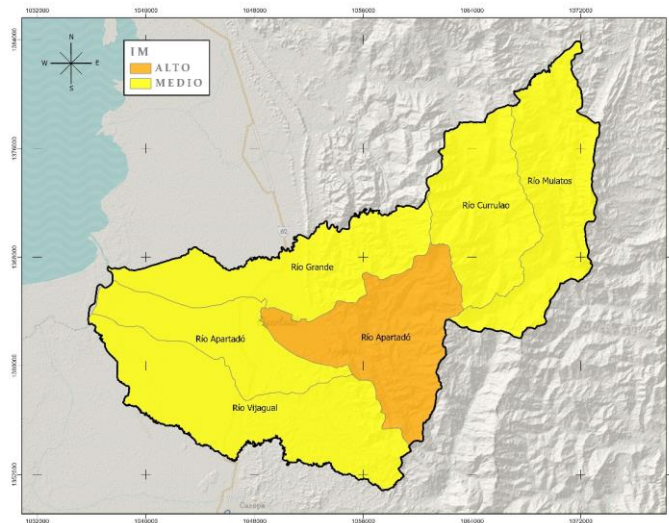


Figura 332. IM cuencas municipio de Apartadó

Luego de obtener y calificar estos índices se procede a realizar el análisis y determinar el nivel de susceptibilidad, por medio del cálculo del IVET, en la tabla se muestra la relación entre el Índice Morfométrico de Torrencialidad y el Índice de Variabilidad.

Tabla 61. Relación Índice Morfométrico de torrencialidad y el índice de variabilidad

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Baja	Muy baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Muy baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Baja	Media	Alta	Muy alta	Muy alta

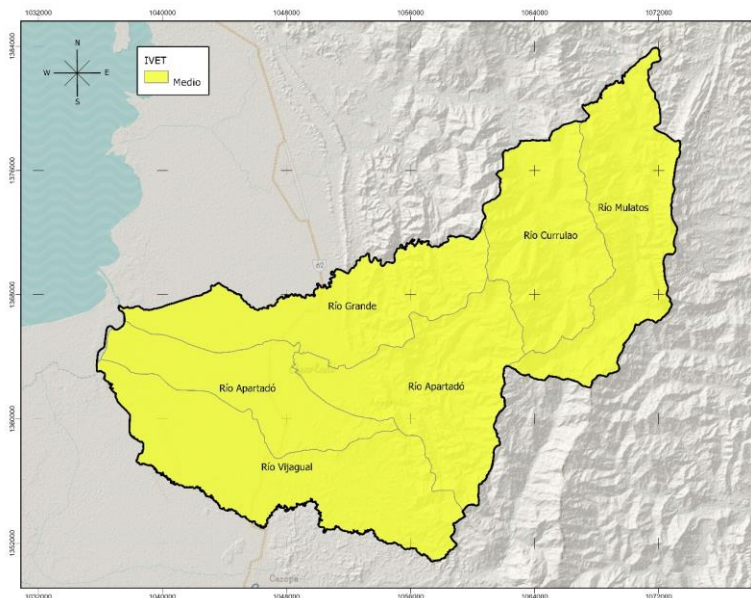


Figura 333. IVET cuencas municipio de Apartadó

3.1.2 Índice de Melton

Se estima primero el número de Melton, cuyo resultado se muestra en la Figura 334 y el cual fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$\text{Índice de Melton} = (H_{max} - H_{min}) \times S^{-0.5}$$

Donde Hmax y Hmin son la cota de altura máxima y mínima de la microcuenca y S es el área de la unidad hidrográfica.

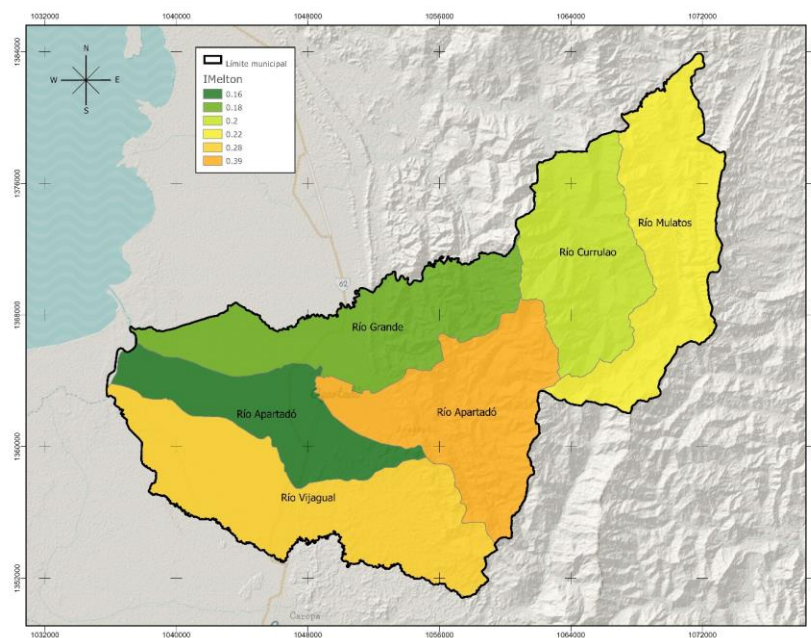


Figura 334. Índice de Melton cuencas municipio de Apartadó

3.2 Análisis rural de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:25.000

El municipio contiene en su mayoría relieve inclinado con configuraciones morfométricas que evitan que las avenidas torrenciales acumulen energía suficiente para dispersarse significativamente en el sector de planicie; no obstante, en el área de estudio existe influencia de quebradas que pueden presentar este tipo de fenómenos.

La zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se realizó considerando el método desarrollado por la consultoría GEOTRIE CIENCIAS E INGENIERIA (2017) en el marco del ordenamiento territorial y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia o POMCAs (ver Figura 335) el cual plantea el siguiente análisis:

- ▼ Clasificación de los drenajes de las microcuencas o subcuencas calificadas con IVET y Melton con calificaciones media, alta y muy alta.
- ▼ Análisis de eventos históricos y evidencia geomorfológica como validadores alternos (un validador alternativo es aquel que sugiere la posibilidad de ocurrencia de eventos futuros por la existencia previa de eventos pasados, no siendo condicionante; es decir, la no existencia de evidencia geomorfológica o eventos históricos no es por sí misma un indicativo de imposibilidad de avenidas torrenciales como se ha evidenciado en estudios de caso en Bogotá en la quebrada la Chiguaza, Zanjones de la muralla y del ahorcado, en Boyacá en el cauce

del río Cusiana en la Vereda Candelas, en Antioquia los ríos circundantes de la cabecera municipal del municipio de Dabeiba entre otros casos que soportan que la evidencia geomorfológica es un indicativo y no un condicionante de posibilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales).

- ▽ Calificación de los drenajes (fase líquida) de las subcuencas con susceptibilidad a eventos torrenciales con la influencia de amenaza por movimientos en masa en las laderas con potencial de aportar materiales (fase sólida) a las crecientes torrenciales.
- ▽ Análisis de confinamiento en la parte alta y media de la cuenca y desconfinamiento en la parte baja para definición de la torrencialidad del cauce y área de influencia o alcance posible.

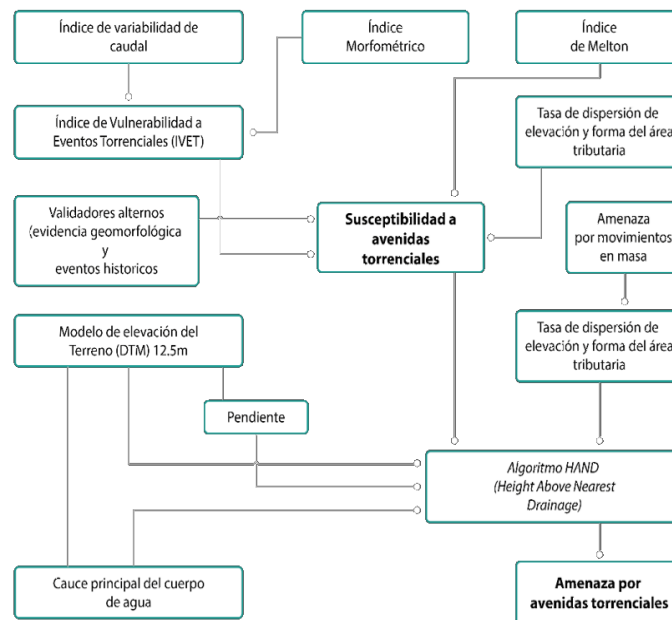


Figura 335. Variables y criterios para el modelo de amenaza por avenidas torrenciales. Fuente GEOTRIE, 2017

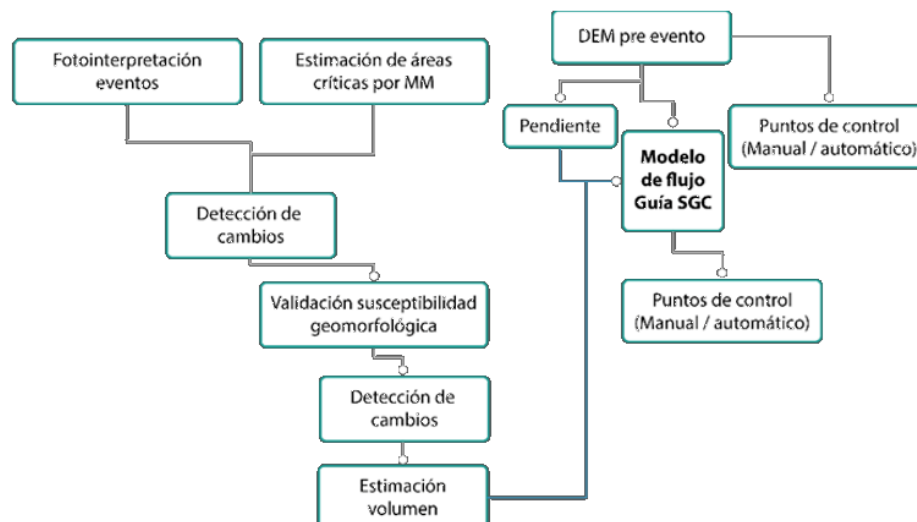


Figura 336. Variables y criterios para el modelo de amenaza por avenidas torrenciales. Fuente GEOTRIE, 2021

A continuación se muestran las variables generadas para la identificación de aporte de material usado para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.

Miura (2019) propone la estimación de volumen de desplazamiento en función del tamaño del área de aporte de sedimento utilizando índices de cambio de vegetación, relieves pre y post evento como se observa en la Figura 337.

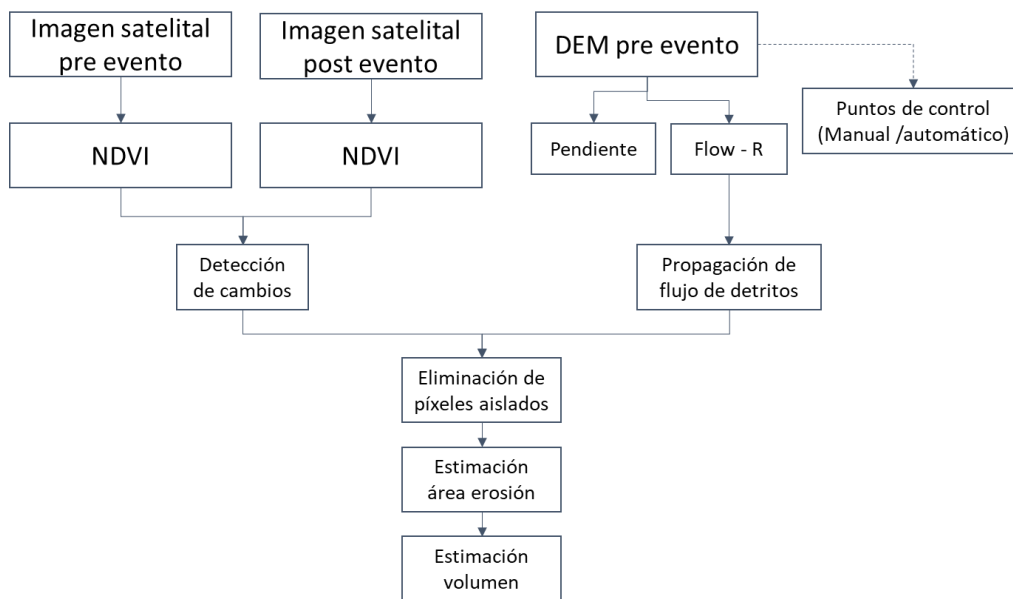


Figura 337. Estimación de volumen desplazado por la avenida torrencial. Fuente: Miura, 2019

Sin embargo al contar con información de áreas críticas de aporte de sedimentos, resultado de la evaluación de amenaza por movimientos en masa, de la fotointerpretación de eventos y empleando el algoritmo HAND (Height Above Nearest Drainage) se plantea el siguiente proceso metodológico para la estimación de volumen de sedimentos.

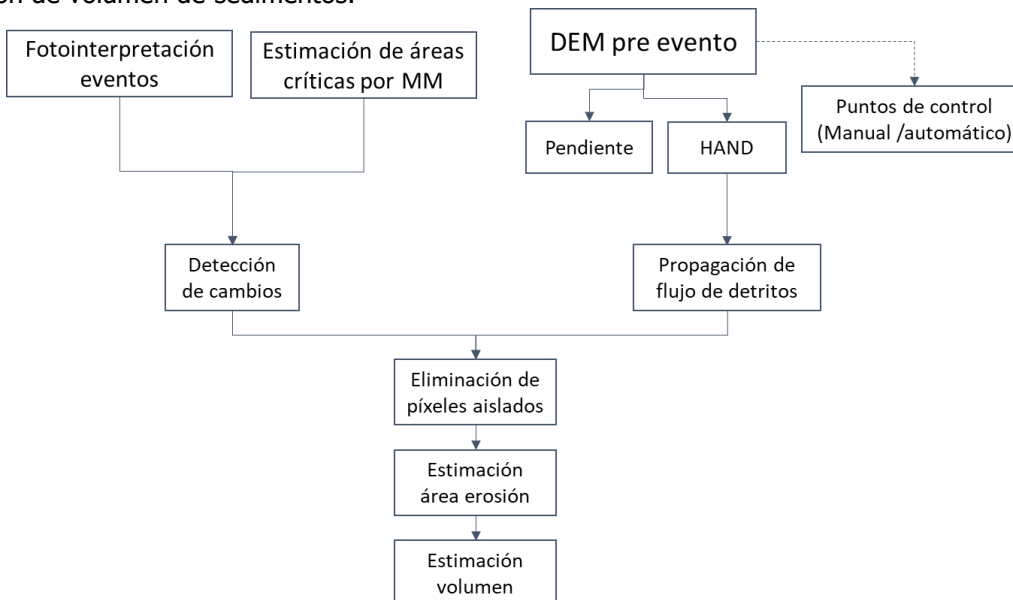


Figura 338. Estimación de volumen desplazado por la avenida torrencial. Fuente GEOTRIE, 2019

Para los mostrados con aporte considerable se aplica el promedio con $([V_Miura_1] + [V_Miura_2] + [V_L_T_S] + [V_I_S] + [V_I]) / 5$. Para los mostrados con aporte Somero se aplica el promedio con $([V_Innes] + [V_G_E]) / 2$. Finalmente se filtra según la posibilidad de arrastre en función de la susceptibilidad a avenidas torrenciales, pues si esta última es baja, los movimientos en masa no serían arrastrados porque el cauce no es torrencial.

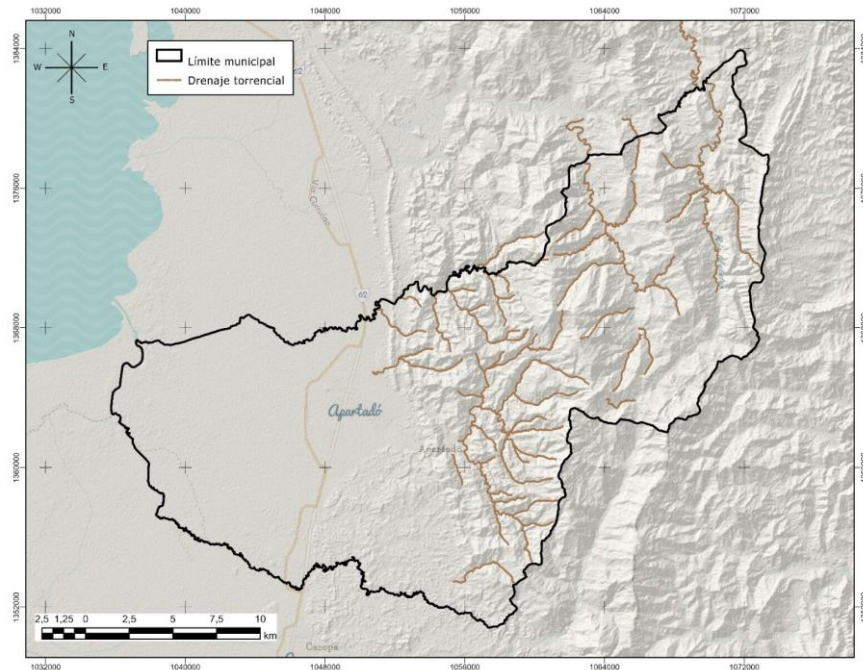


Figura 339. Drenajes sujetos a evaluación con comportamiento torrencial

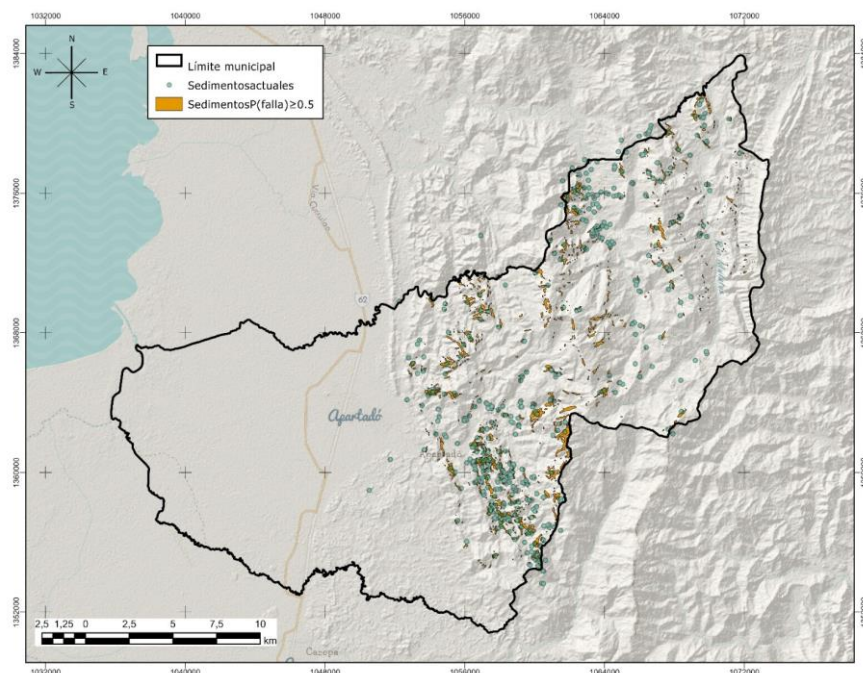


Figura 340. Identificación de áreas con aporte de sedimentos

Cada uno de los drenajes que conforma las microcuencas susceptibles a eventos torrenciales se calificó según la zonificación de la amenaza por movimientos en masa como factor que permite identificar la existencia de carga de sedimentación que podía contribuir a la ocurrencia del fenómeno estudiado y la condición de pendiente evalúa hasta donde podría haber energía para el transporte del material torrencial generado en cuencas con morfometría torrencial soportándose en el algoritmo HAND (Height Above Nearest Drainage) siguiendo los parámetros descritos. Los factores relacionados con la presencia de agua y sismicidad fueron tenidas en cuenta de manera rigurosa en la zonificación de amenaza por movimientos en masa, de manera que implícitamente estos factores se consideran en la detonación de avenidas torrenciales.

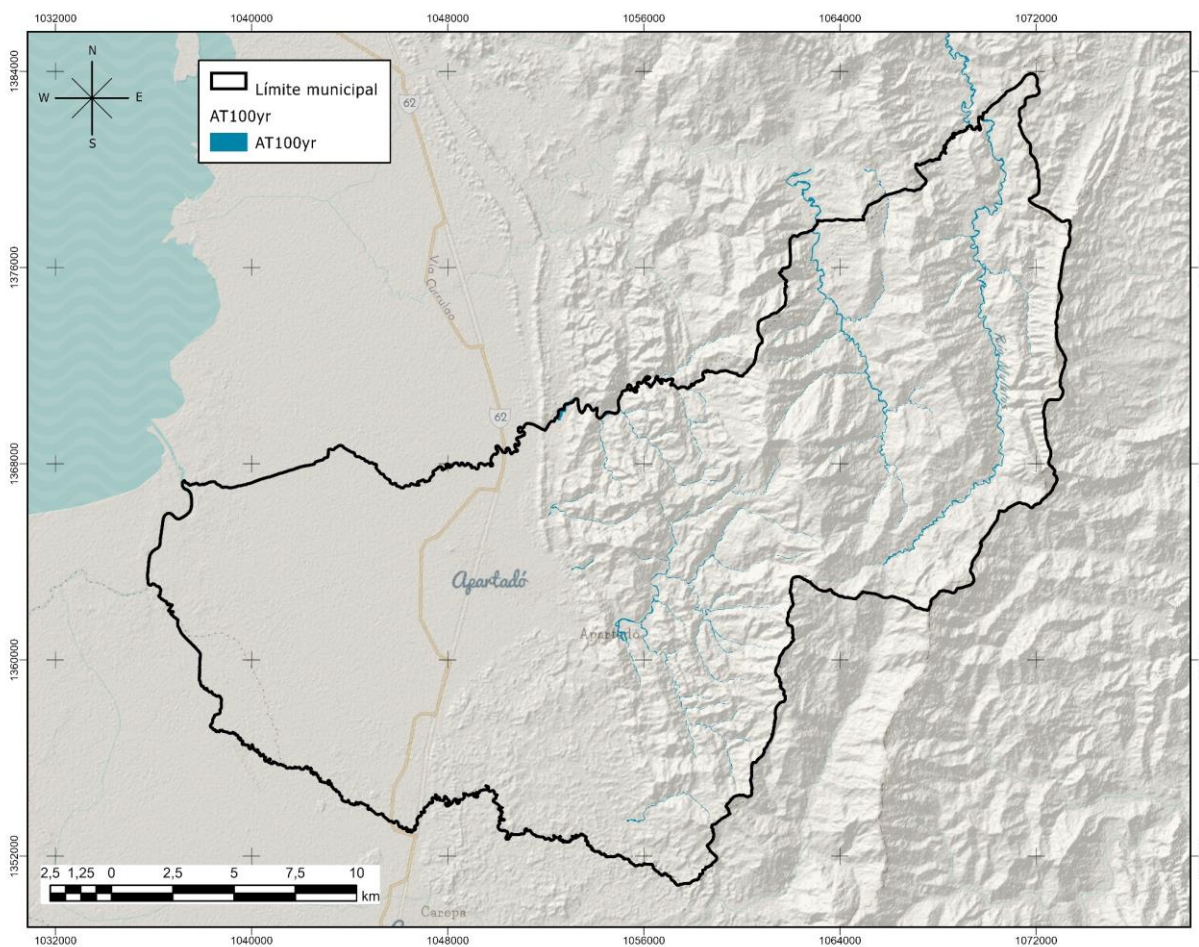


Figura 341. Áreas afectadas en modelación fluidodinámica para un T_r 100 yr

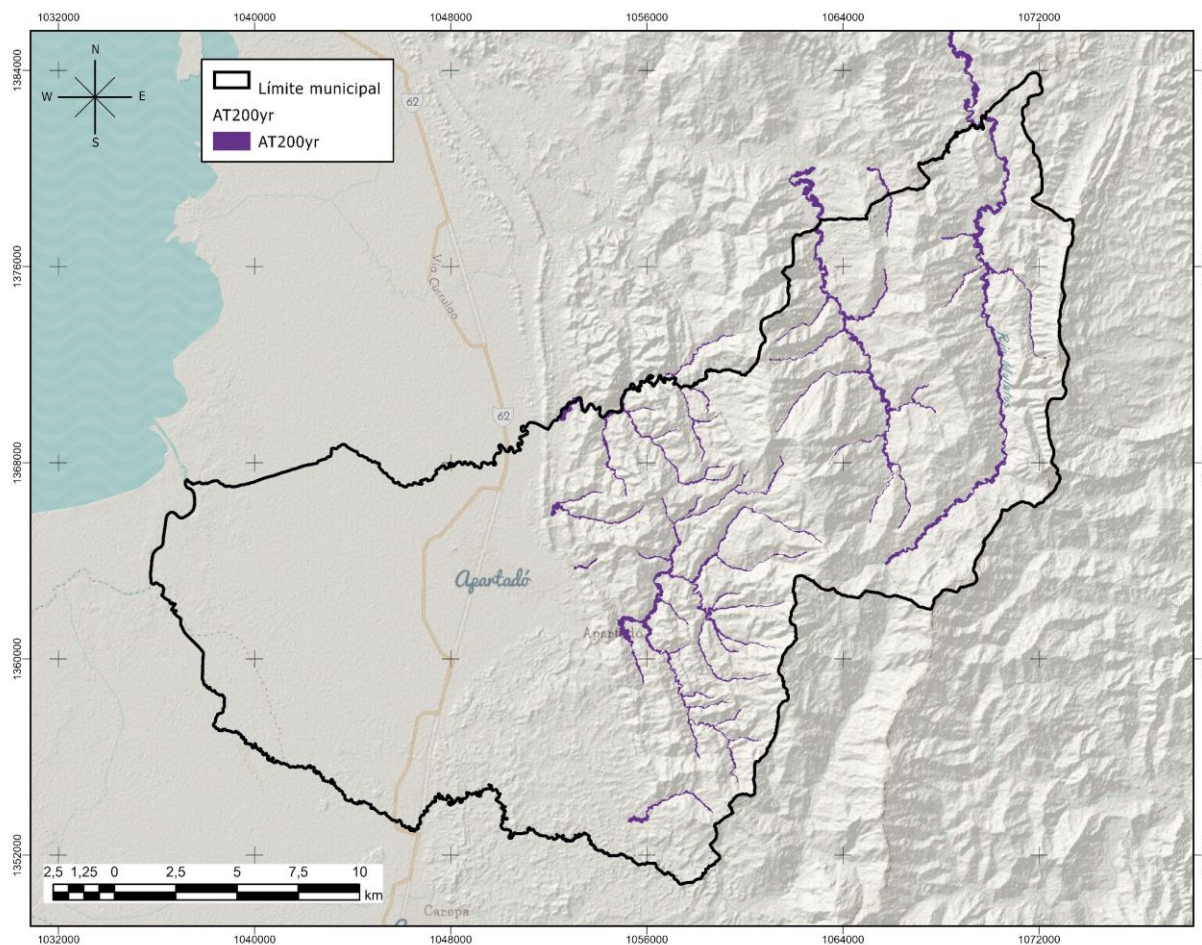


Figura 342. Áreas afectadas en modelación fluidodinámica para un Tr 200 yr

La zonificación se realiza entonces en el área de estudio definida y que se ha mostrado en la definición de amenaza por movimientos en masa y por inundación en el área de influencia buscando zonificar las categorías de amenaza en lugar de solamente calificar los cuerpos de agua y reducir la zonificación a valoraciones meramente heurísticas por subcuencas o subunidades geomorfológicas con el fin de representar una zonificación de avenidas torrenciales de manera separada a los movimientos en masa que aportarían la fase sólida para no generar redundancias en las amenazas y no castigar el uso del suelo en áreas donde físicamente no se evidencia una susceptibilidad a este tipo de eventos.

- Las zonas de **amenaza alta** corresponden con áreas de influencia de cauces en elementos expuestos que pueden tener evidencia geomorfológica histórica, eventos de avenidas torrenciales en combinación con condiciones morfométricas que imprimen torrencialidad a los cauces (pendientes altas, tiempos de concentración bajos, confinamiento) y arrastre de sedimentos generados por movimientos en masa circundantes a los cuerpos de agua que son arrastrados y depositados en las partes llanas durante las temporadas de altas precipitaciones e incluso condiciones de alta energía.
- Las zonas de **amenaza media** corresponden con áreas de influencia de cauces con condiciones morfométricas que pueden generar alguna torrencialidad a los cauces (pendientes medias a altas,

tiempos de concentración medios a bajos, confinamiento moderado a alto) y existencia de sedimentos generados por deslizamientos y flujos circundantes a los cuerpos de agua que son arrastrados y depositados en las partes distales llanas, siendo detonados por altas precipitaciones e incluso en condiciones de sismo de mediana a alta energía.

- Las zonas de **amenaza baja** corresponden con áreas de influencia de cauces que no tienen evidencia geomorfológica histórica, no hay reporte de eventos de avenidas torrenciales ni se combinan condiciones morfométricas que impriman torrencialidad a los cauces, es decir, el área tributaria posee pendientes medias a bajas, tiempos de concentración altos y cauces desconfiados. Al tiempo la ausencia de aporte de sedimentos provenientes de movimientos en masa a los cuerpos de agua evita que se genere una fase sólida necesaria para la formación de avenidas torrenciales.

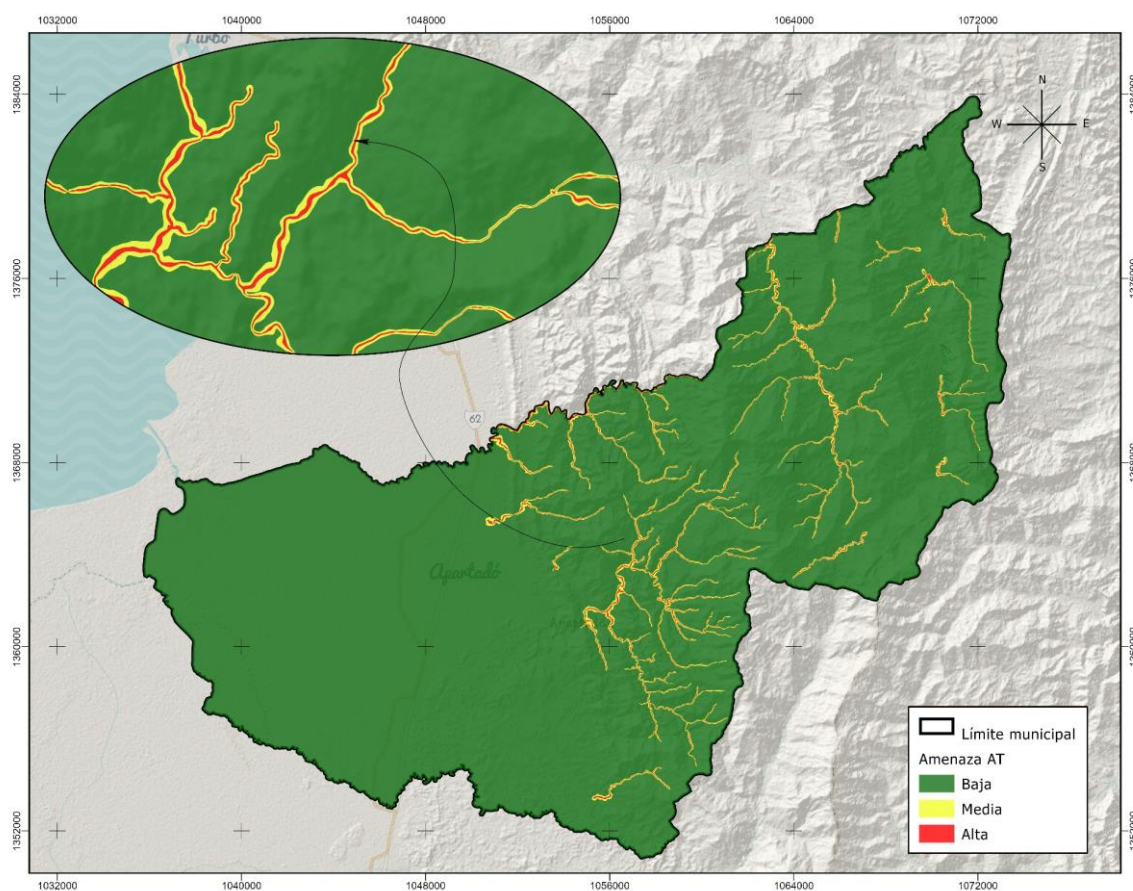


Figura 343. Amenaza por avenidas torrenciales



Figura 344. Acercamientos a la zonificación de amenaza en la parte alta el río Apartadó, veredas la Unión, Arenas Altas y el Cuchillo

3.3 Análisis urbano de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:2.000

La zonificación urbana de la amenaza se realizó con el mismo proceso metodológico de la zonificación regional pero con insumo cartográfico de detalle. Para las subcuencas que conforman la sub zona hidrográfica se calculó el Índice de Melton y el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) con el propósito de clasificar la torrencialidad de cada una de ellas. En los cauces torrenciales se identificó la presencia de amenaza por movimientos en masa como condicionante adicional de la existencia de avenidas torrenciales para finalmente emplear las características físicas del relieve con objeto de zonificar la amenaza por avenidas torrenciales.

Cada uno de los drenajes que conforma las microcuencas susceptibles a eventos torrenciales se calificó según la zonificación de la amenaza por movimientos en masa como factor que permite identificar la existencia de carga de sedimentación que podría contribuir a la ocurrencia del fenómeno estudiado y la condición de pendiente evalúa hasta donde podría haber energía para el transporte del material torrencial generado en cuencas con morfometría torrencial soportándose en el algoritmo HAND (Height Above Nearest Drainage). Los factores relacionados con la presencia de agua y sismicidad fueron tenidas en cuenta de manera rigurosa en la zonificación de amenaza por movimientos en masa, de manera que implícitamente estos factores se consideran en la detonación de avenidas torrenciales.

Finalmente, la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se realizó considerando el método desarrollado por la consultoría GEOTRIE Ciencias e Ingeniería (2017) en el marco del ordenamiento territorial y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia o POMCAs

La zonificación se realiza entonces en la cuenca media y alta del río Apartadó, en los centros poblados de San José de Apartadó y La Victoria que corresponde con los únicos sectores del municipio que podría presentar en condiciones extremas de sismo y lluvia un evento de avenida torrencial en entornos urbanos para lograr espacializar la posible afectación en lugar de solamente calificar el cuerpo de agua y reducir la zonificación a valoraciones meramente heurísticas por subcuencas o subunidades geomorfológicas con el

fin de representar una zonificación de avenidas torrenciales de manera separada a los movimientos en masa que aportarían la fase sólida para no generar redundancias en las amenazas y no castigar el uso del suelo en áreas donde físicamente no se evidencia una susceptibilidad a este tipo de eventos.

Una vez analizada la susceptibilidad y amenaza a avenidas torrenciales a partir de los criterios enunciados, se encontró que las subcuencas que presentan alguna susceptibilidad corresponden con el área de los centros poblados de San José de Apartadó y La Victoria (cuenca alta y media del río Apartadó), de manera que no se presentan las condiciones para la generación de avenidas torrenciales en el área urbana de la cabecera municipal ni en los otros centros poblados del municipio es decir, en el área urbana o cabecera municipal no hay cauces torrenciales ni fenómenos de inestabilidad geotécnica o movimientos en masa que aporten material sólido a las crecientes.

Figura 345. Amenaza por avenidas torrenciales en el área urbana

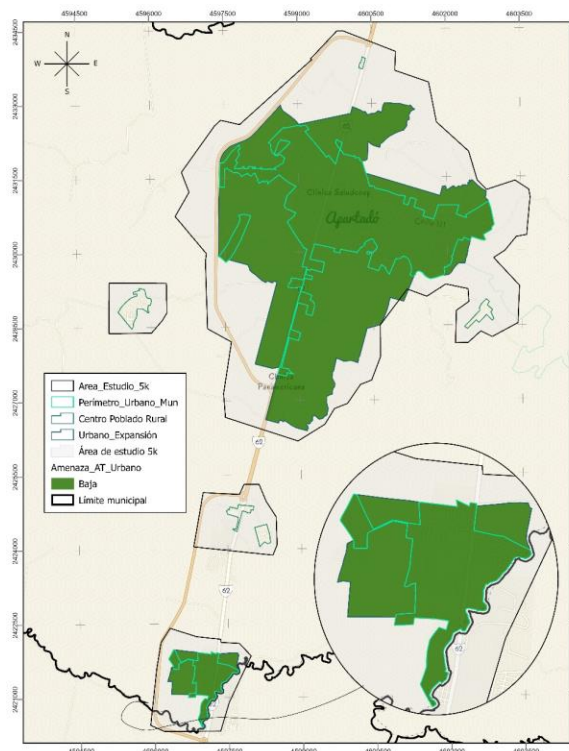


Figura 346. Amenaza por avenidas torrenciales en el área urbana

Nótese de nuevo que la cabecera municipal no presenta evidencia geomorfológica o eventos históricos relacionados con avenidas torrenciales, no evidencia susceptibilidad a avenidas torrenciales, no tiene tampoco deslizamientos, flujos u otro tipo de movimiento en masa que pueda aportar sedimentos a los cuerpos de agua urbanos canalizados o naturales, no presenta cauces torrenciales (ningún cauce urbano está confinado por condiciones de relieve), no hay morfometrías propensas a torrencialidad y el área tributaria acumulada en el área urbana es además demasiado pequeña para lograr los caudales y la energía característica de una avenida torrencial. Estas características se evidencian en los cálculos desarrollados en la escala regional para la totalidad de los cuerpos de agua del municipio, incluyendo el río Apartadó, encontrándose que está sí puede llegar a presentar avenidas torrenciales pero solamente en la parte baja de la misma y bajo condiciones extremas de sismo y lluvia. Sin embargo aguas arriba de la cabecera municipal y zona de expansión la situación es diferente, razón por la cual en temporada de

lluvias, las inundaciones vienen mezcladas con material particulado y otros aportantes, sin que a esto en la zona urbana pueda ser llamado avenida torrencial.

Para el caso de los centros poblados se desarrolló el mismo procedimiento y se calificaron las áreas con amenaza alta, media y baja en donde se logró trazar modelos de relieve más detallados como se muestra a continuación:

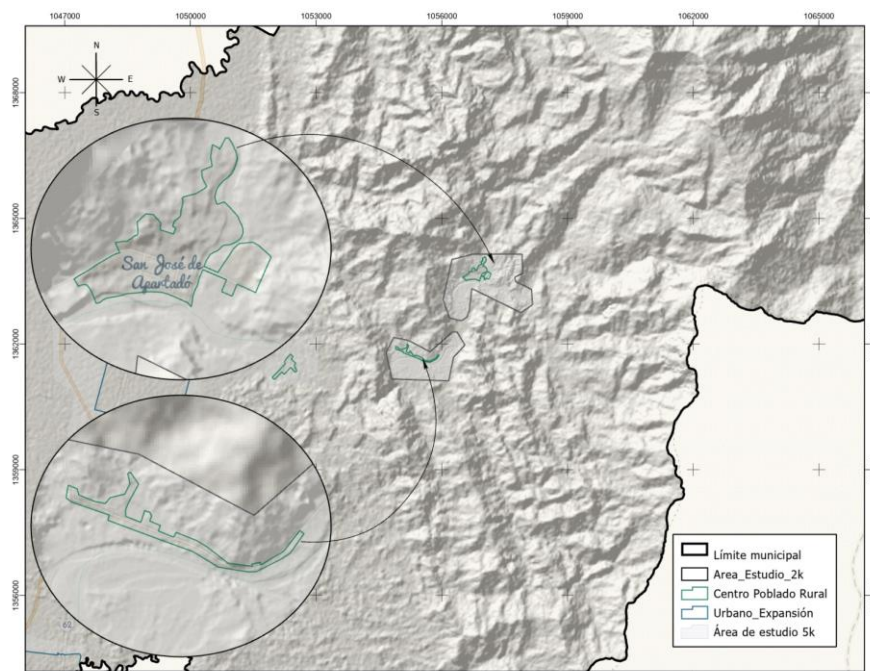


Figura 347. Áreas sujetas de modelación en centros poblados

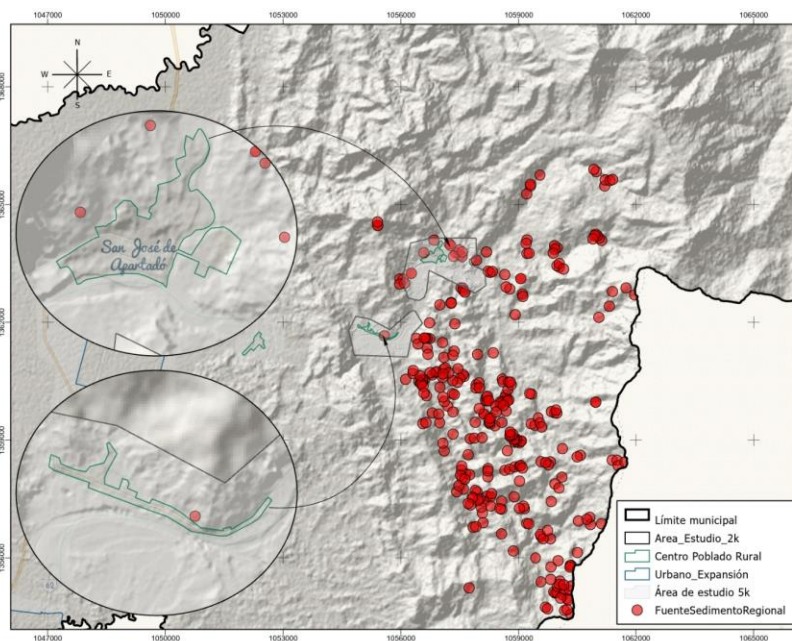


Figura 348. Aporte de sedimentos regional

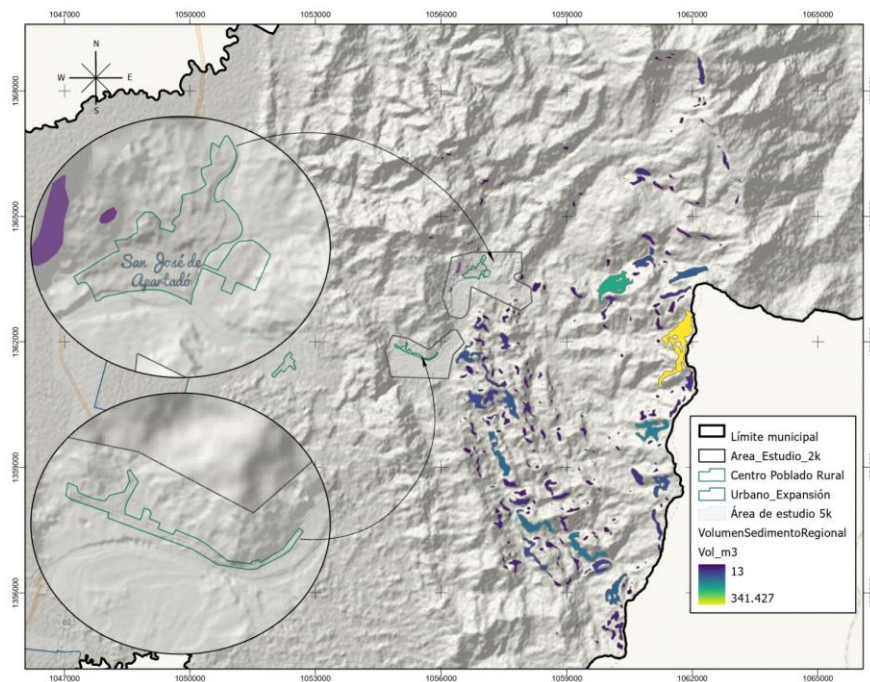


Figura 349. Volumen de material aportado a nivel regional

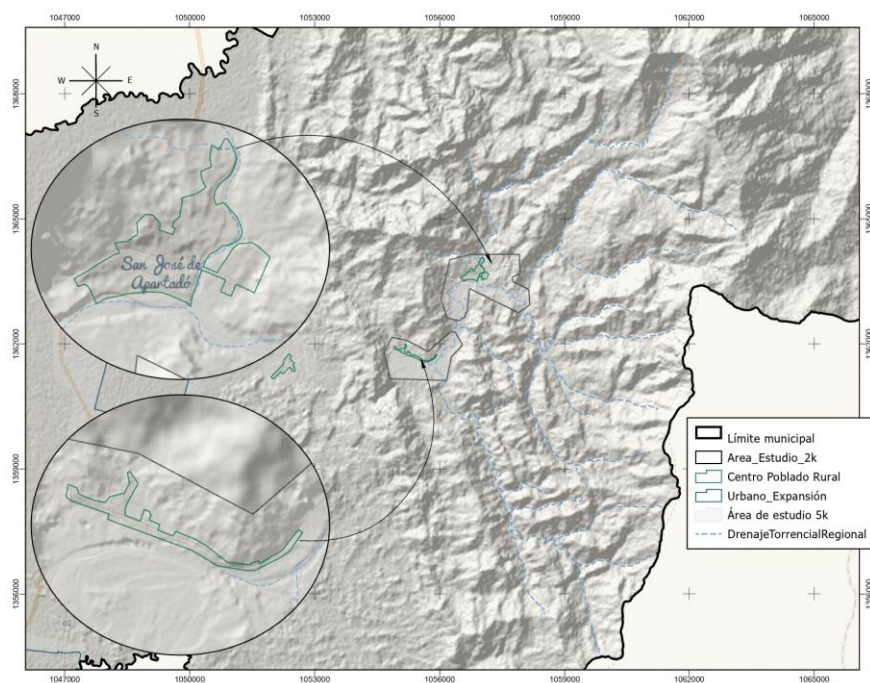


Figura 350. Drenajes con comportamiento torrencial

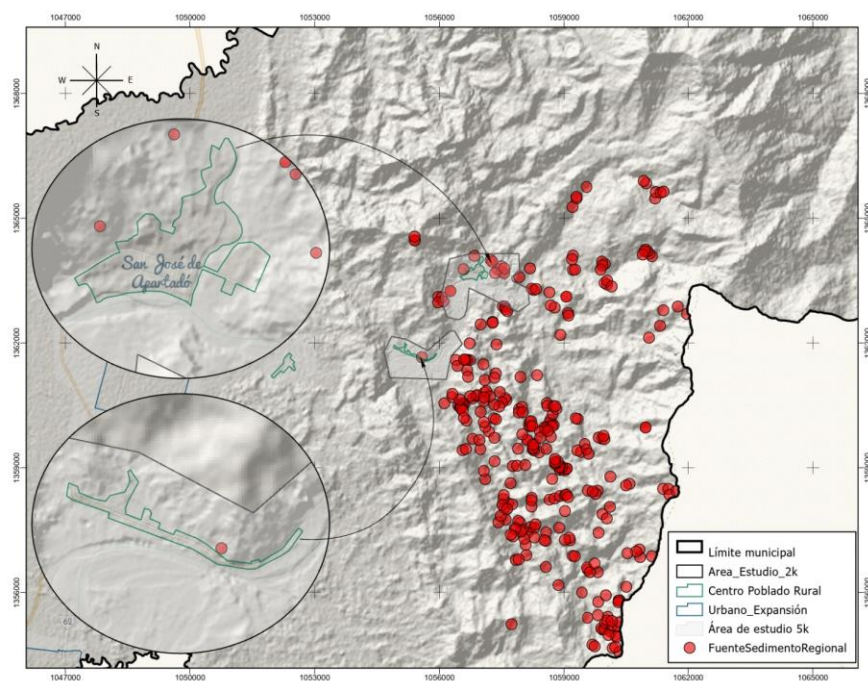


Figura 351. Aporte de sedimentos local

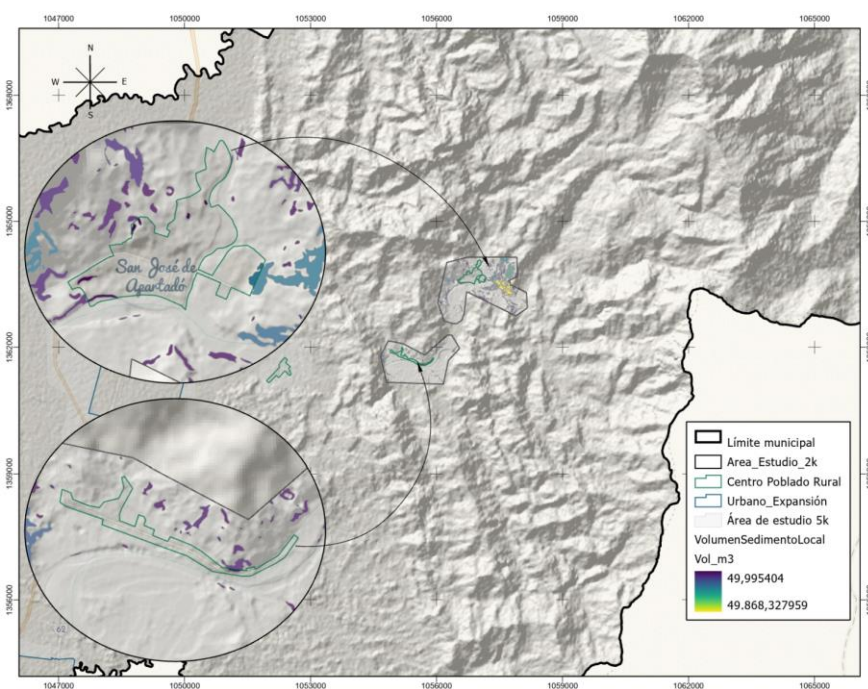


Figura 352. Volumen de material aportado a nivel local

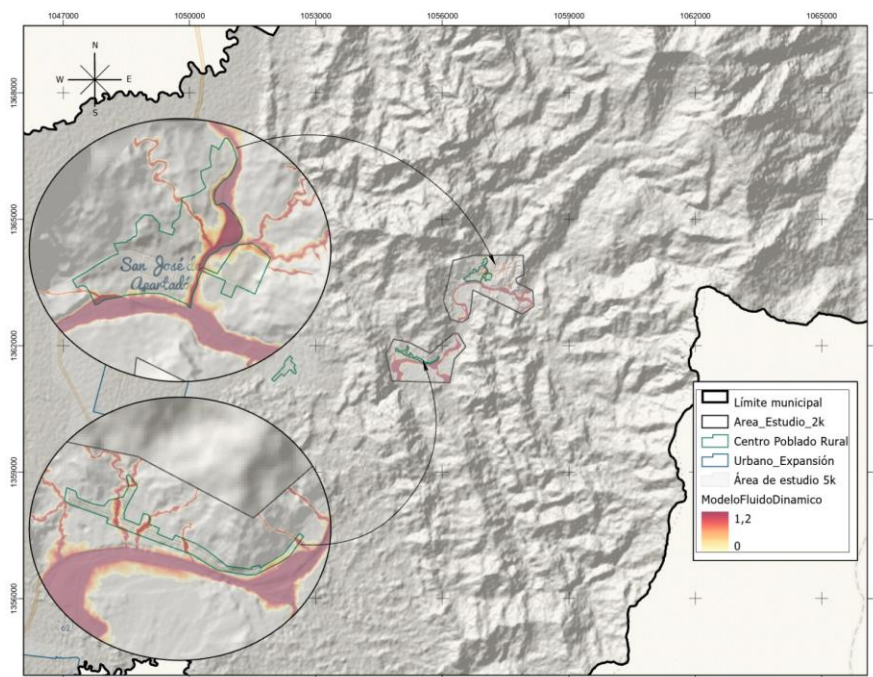


Figura 353. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados

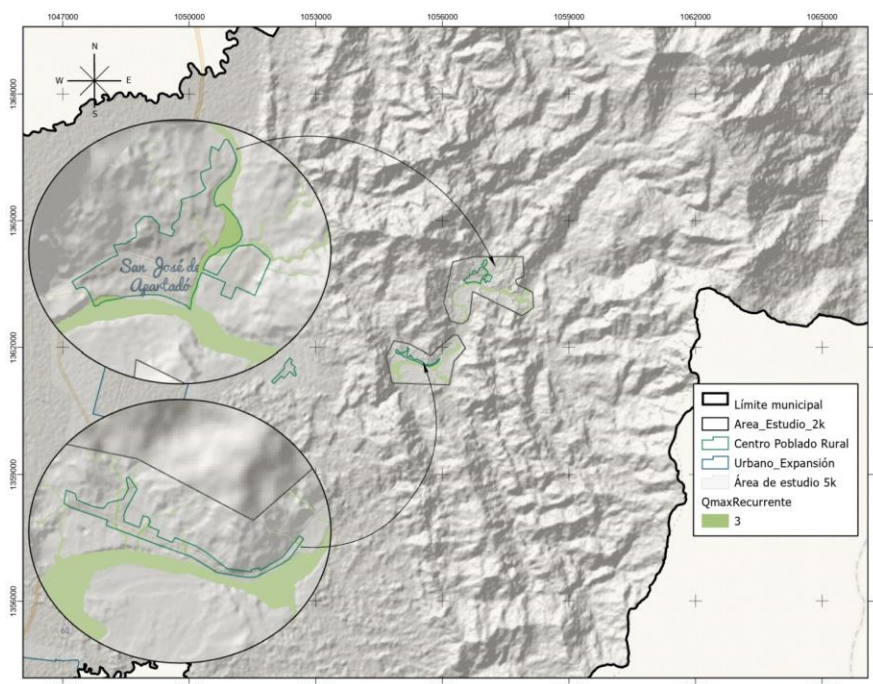


Figura 354. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados en periodos de retorno recurrentes

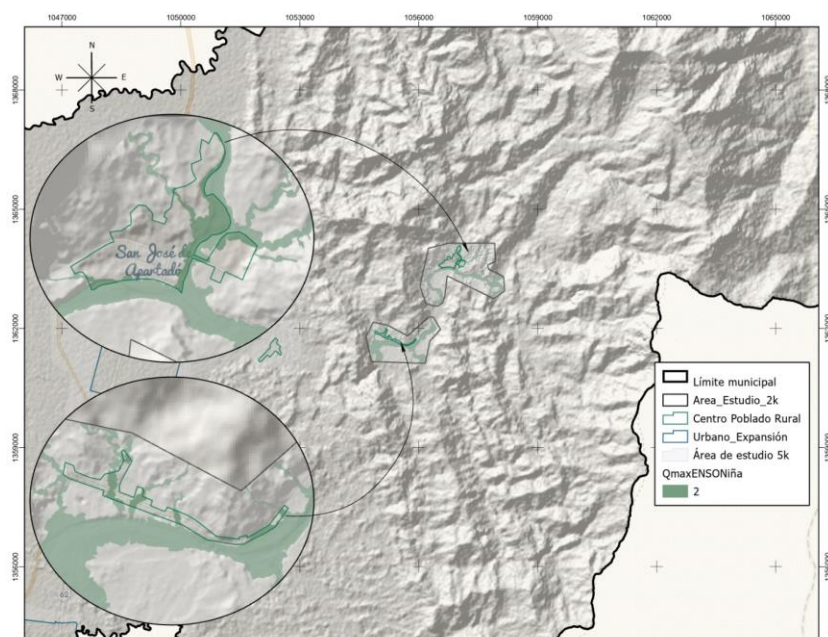


Figura 355. Áreas de afectación por avenidas torrenciales resultado de la modelación en centros poblados en periodos de retorno extremos Niña

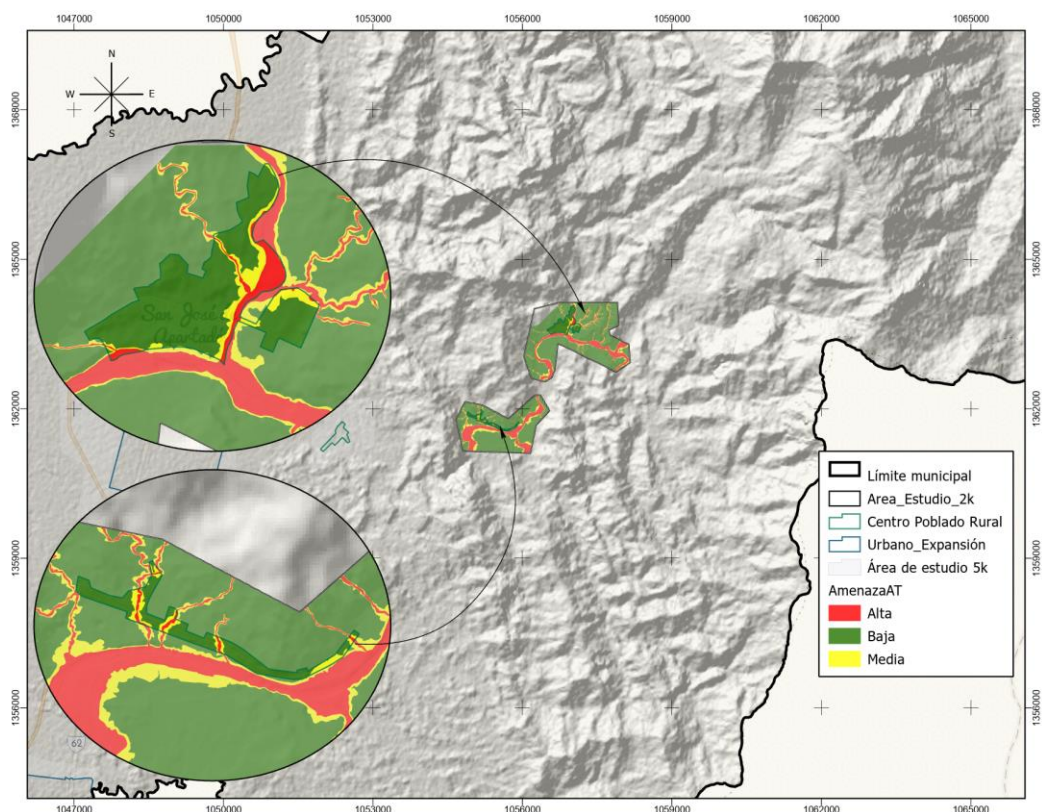


Figura 356. Amenaza por avenidas torrenciales en los centros poblados San José de Apartadó y La Victoria

Es importante considerar que el centro poblado San José de Apartadó se encuentra expuesto a avenidas torrenciales en calificación media alta en considerables proporciones junto al margen del río Apartadó.

En la cartografía anexa y planos anexos se puede observar en detalle la calificación de amenaza en cada sector rural y urbano en las escalas de trabajo correspondiente a cada una. Las zonificaciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales son la base para la identificación de elementos expuestos a amenazas naturales, con lo cual se estima una condición de exposición y riesgo bajo el concepto de riesgo implícito de Cardona (2011) como se explica en el siguiente capítulo.



GEOTRIE
Ciencias e ingeniería



CONSIDERACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGO

1. Áreas con condición de amenaza

Se definen como áreas con condición de amenaza a las áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo. Se incluyen los mapas anexos de "áreas con condición de amenaza". Las áreas urbanas y centros poblados se encuentran desarrollados urbanísticamente y entran en la categoría de áreas con "condición de riesgo".

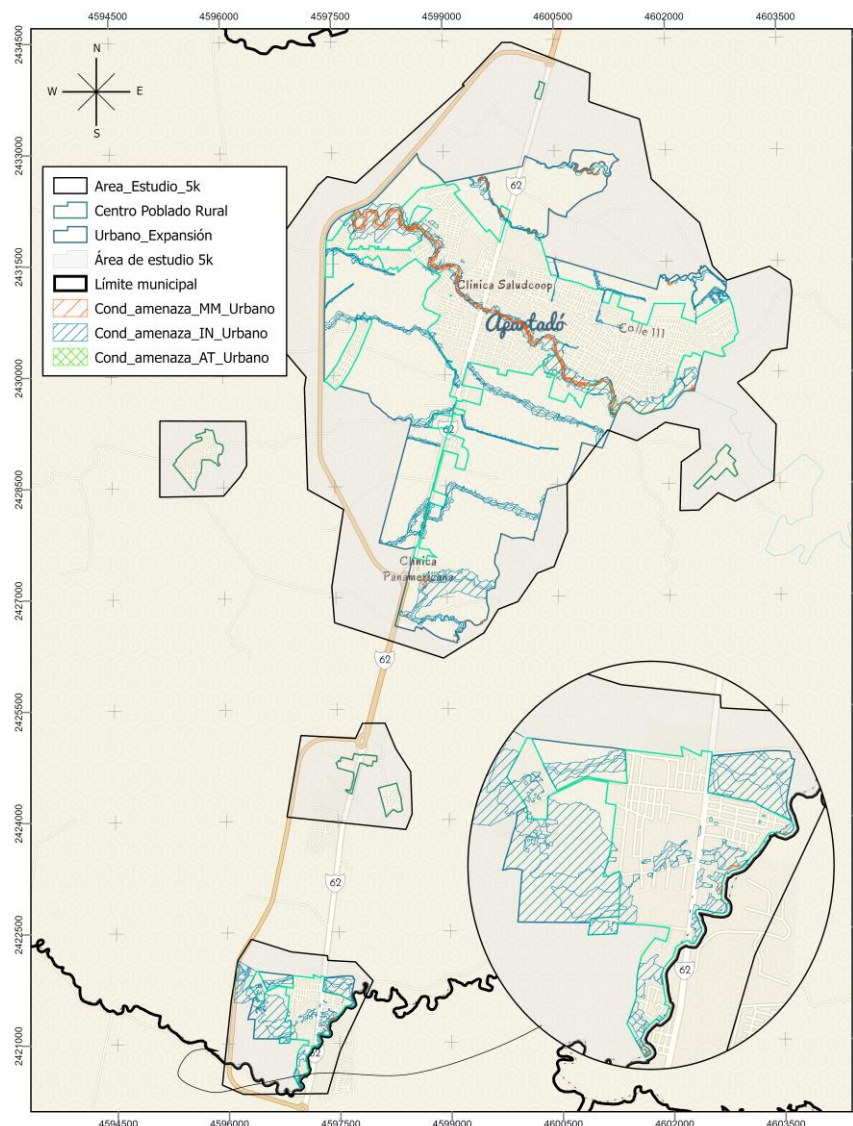


Figura 357. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en suelo urbano

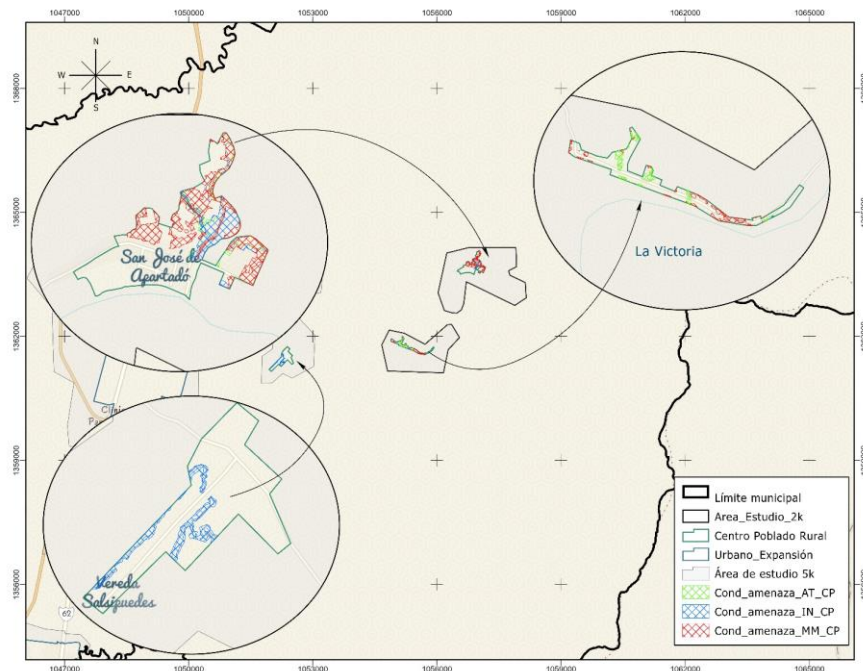


Figura 358. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes



Figura 359. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

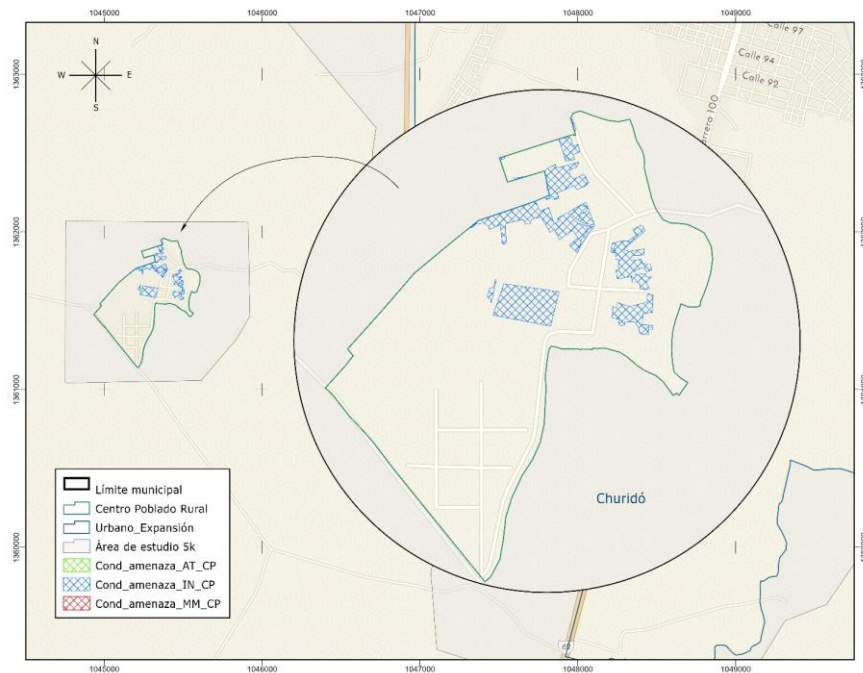


Figura 360. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de Churidó

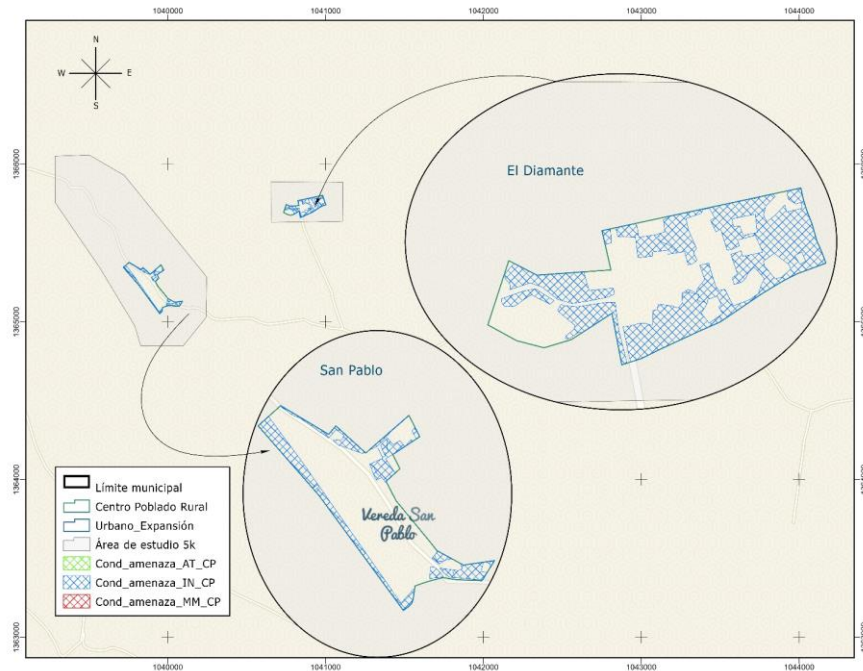


Figura 361. Áreas con condición de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de El Diamante y San Pablo

2. Áreas con condición de riesgo

La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo corresponde con los sectores de elementos expuestos (áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos indispensables (salud, educación, otros), líneas vitales e infraestructura de servicios públicos” categorías de amenaza alta para cualquiera de los fenómenos amenazantes analizados en las dos escalas de análisis. Se incluyen los mapas anexos de “áreas con condición de riesgo”. Para dar mayor detalle a la observación de las áreas con condición de amenaza y con condición de riesgo véase la cartografía anexa y en el anexo Listado de coordenadas condición de amenaza y riesgo.

Para realizar la delimitación de áreas con condición de riesgo en suelo rural se parte de la identificación de elementos de infraestructura los cuales son contrastados con la zonificación de amenaza de los tres fenómenos requeridos por el decreto 1077 de 2015, aquellas áreas que coincidan con niveles de amenaza alta se delimitan como zonas con condición de riesgo y deberán ser sujetas a un proceso de priorización de medidas no estructurales y estructurales dentro del componente programático del POT.

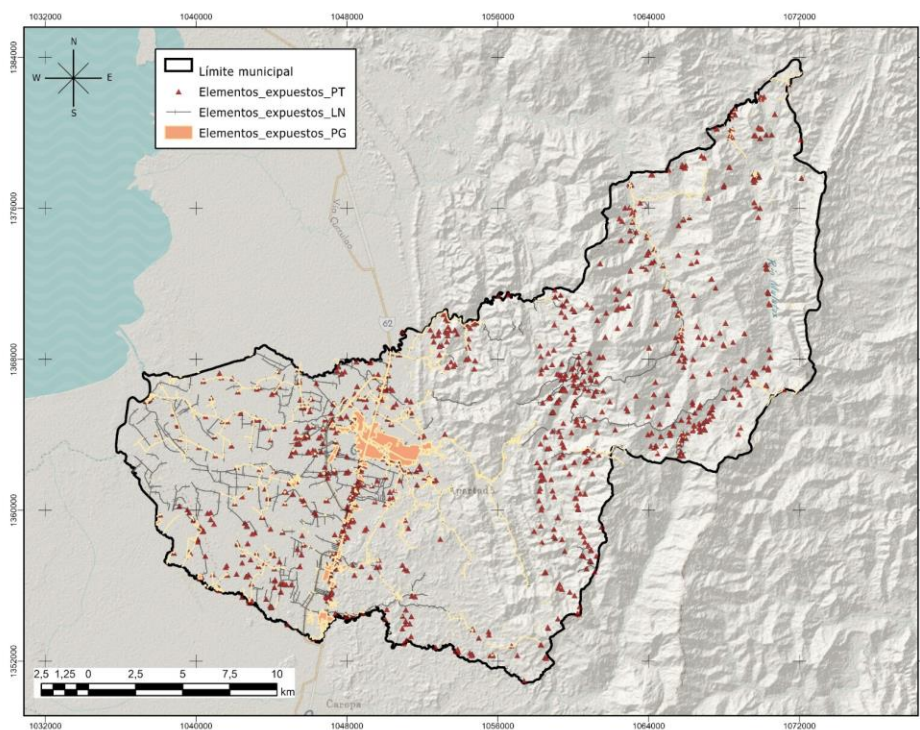


Figura 362. Elementos expuestos en suelo rural

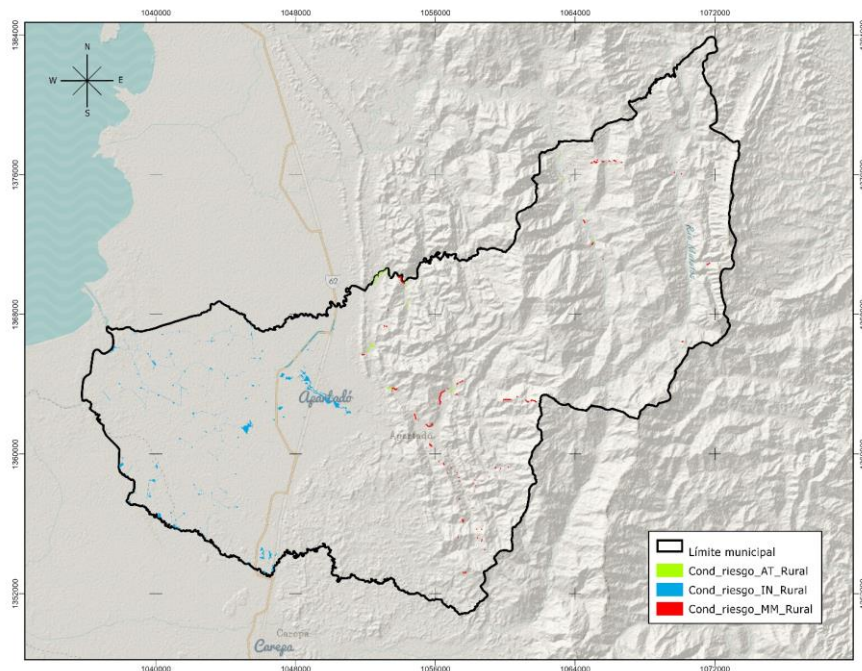


Figura 363. Áreas con condición de riesgo rural por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales

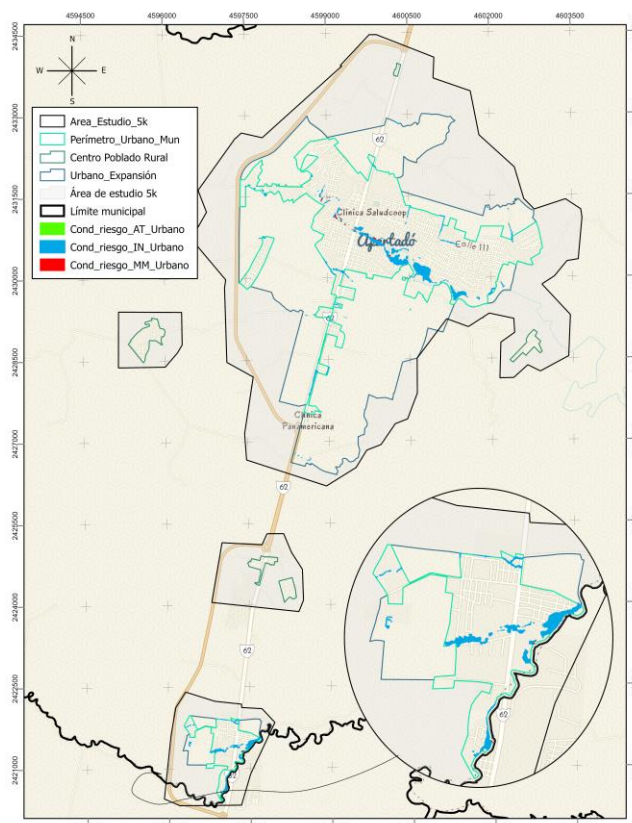


Figura 364. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en suelo urbano

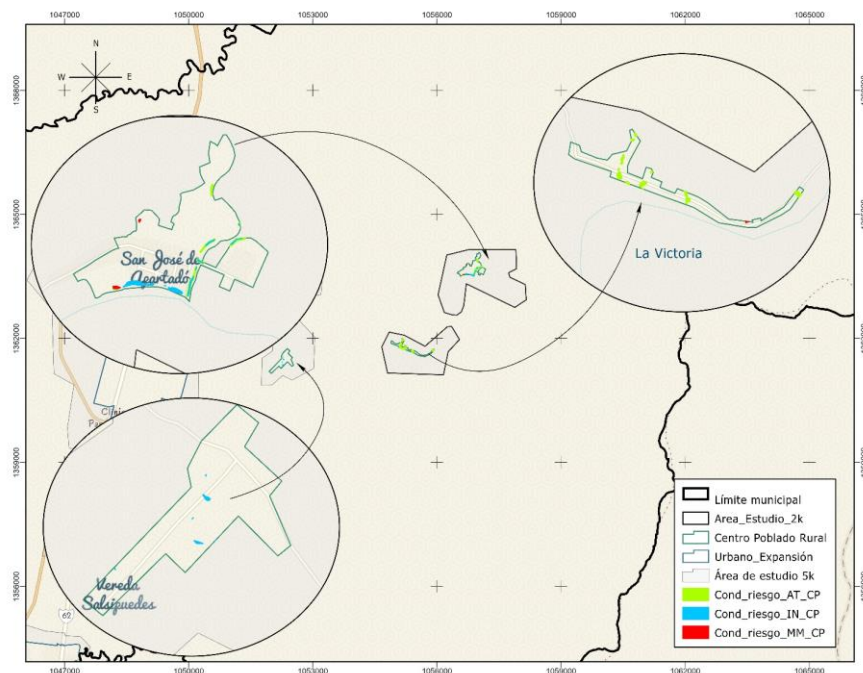


Figura 365. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San José de Apartadó, La Victoria y Salsipuedes



Figura 366. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de San Martín, Loma Verde y Zungo Carretera

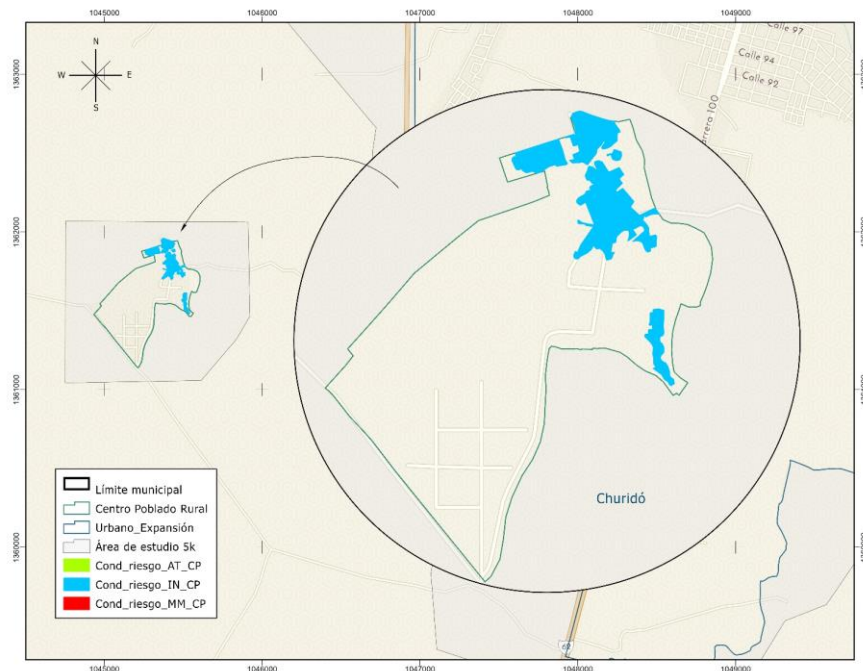


Figura 367. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de Churidó

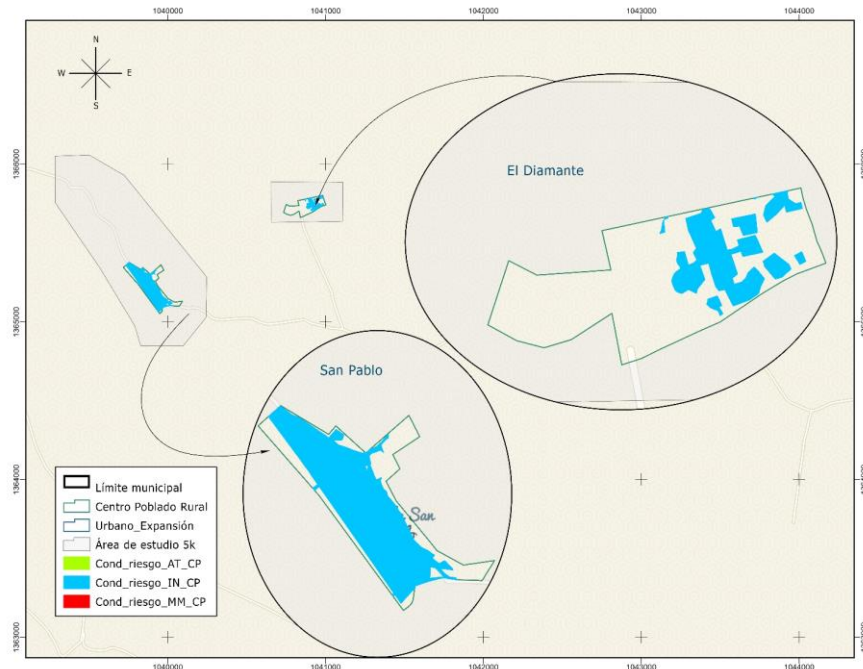


Figura 368. Áreas con condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los centros poblados de El Diamante y San Pablo

3. Consideraciones de amenaza y riesgo por sismo

La región ha sido el escenario de algunos eventos sísmicos importantes dada la presencia de la subducción Pacífica y algunos sismos superficiales de poca magnitud ocurridos en el fallamiento local del área cortical del Pacífico Norte -Darién (Tabla 62 y Figura 369).

Tabla 62. Sismos históricos sentidos en Apartadó. Fuente: SGC (2020)

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Municipio epicentro
5/08/22	8,26	-76,92	3,9	Mar Caribe
24/04/22	8,24	-76,73	4,3	Turbo - Antioquia
23/02/22	7,84	-74,3	5,5	Santa Rosa del Sur - Bolívar
2/12/21	7,25	-77,05	4,6	Riosucio - Chocó
28/11/21	7,45	-76,98	3,5	Riosucio - Chocó
28/11/21	6,08	-76,03	2,3	Urrao - Antioquia
23/11/21	7,82	-76,37	3,2	Tierralta - Córdoba
29/05/21	8,5	-77,05	3,9	Mar Caribe
2/04/21	7,31	-77,13	4,9	Riosucio - Chocó
2/09/20	8,05	-76,94	4,7	Turbo - Antioquia
15/04/20	9,02	-74,49	5,8	Pinillos - Bolívar
12/04/20	7,35	-77,14	5	Riosucio - Chocó
12/04/20	7,36	-77,12	4,3	Riosucio - Chocó
24/06/19	7,47	-76,98	3,6	Riosucio - Chocó
29/10/18	8,35	-77,74	2,4	Panamá-Colombia Border Region
29/10/18	8,75	-77,28	5	Mar Caribe
23/10/18	7,28	-77,13	4,3	Riosucio - Chocó
22/09/18	6,8	-73,16	3,8	Los Santos - Santander
6/09/18	7,99	-77,65	5,7	Panamá-Colombia, región Fronteriza
18/08/18	8,7	-77,27	5,1	Mar Caribe
20/06/18	6,95	-76,28	4,6	Dabeiba - Antioquia
23/11/17	7,35	-76,15	4,4	Ituango - Antioquia
19/12/16	7,5	-73,42	4,6	Rionegro - Santander
14/09/16	7,24	-76,34	4,7	Mutató - Antioquia
14/09/16	7,23	-76,31	4,7	Mutató - Antioquia
13/09/16	7,24	-76,23	6,2	Ituango - Antioquia
11/04/16	6,99	-76,7	5,2	Murindó - Antioquia
28/12/15	6,86	-76,7	5	Murindó - Antioquia
28/07/15	8,15	-77,34	5,8	Panamá-Colombia, región Fronteriza
29/07/15	8,15	-77,4	6,1	Uguía - Chocó
13/08/13	5,76	-78,25	6,5	Océano Pacífico
2/03/11	8,61	-76,9	5,2	Mar Caribe
23/03/95	7,894	-76,858	4,2	Apartadó - Antioquia

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Municipio epicentro
31/07/95	7,873	-76,853	4,2	Apartadó - Antioquia
17/10/92	7,07	-76,8	7,1	Murindó - Antioquia
18/10/92	7,07	-76,8	7,1	Carmen del Darién - Chocó
14/02/52	7,07	-76,8	5,9	Mutatá - Antioquia

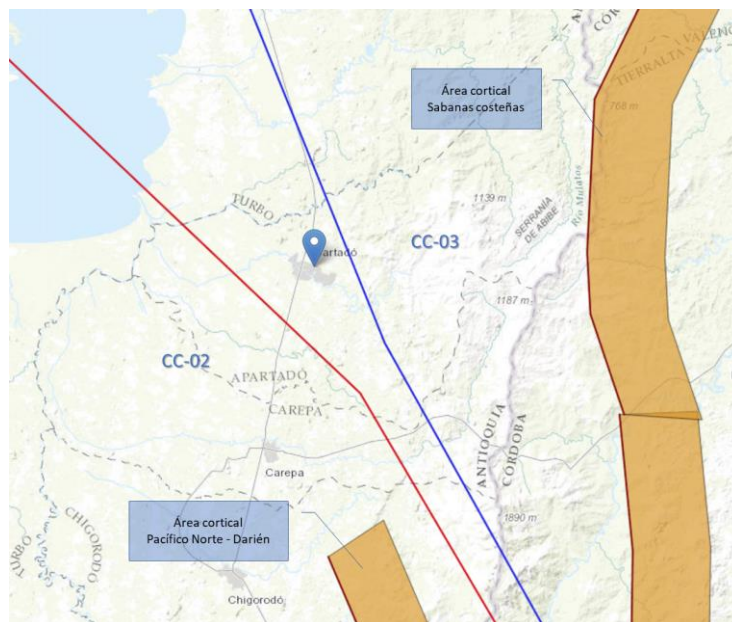


Figura 369. Ubicación de Apartadó en relación con fuentes sísmogénicas. Fuente: (Arcila, 2020)

El Servicio Geológico Colombiano ha actualizado recientemente la información de amenaza sísmica para varias probabilidades de ocurrencia con distintas tasas de excedencia en diferentes periodos de vibración para todo el territorio nacional a nivel de roca. A manera de ejemplo se muestra en la Figura 370 la aceleración en roca esperada para cada centro poblado y cabeceras municipales cuya infraestructura se encuentra expuesta a eventos sísmicos. Estos valores de amenaza contienen los avances más recientes en el análisis de propagación, estudio de fuentes sísmogénicas con funciones de atenuación para cada fuente, catálogos de sismicidad unificado y comparación con acumulaciones de deformaciones medidas por las estaciones GNSS de Colombia durante los últimos años, razón por la cual se referencia directamente como amenaza sísmica para este documento, la cual corresponde con amenaza sísmica intermedia para la cabecera municipal de Apartadó



Un sismo fuerte, aunque sea de baja recurrencia, significa un evento de gran magnitud con capacidad de generar afectaciones a la población, pérdidas de vidas humanas y económicas comparables con la conjugación de las amenazas evaluadas en el estudio. Existe entonces la necesidad de incluir el riesgo sísmico dentro de los aspectos relevantes en la gestión integral del riesgo, partiendo del estudio de la respuesta dinámica de los suelos en el área urbana y avanzando en la caracterización de las condiciones de vulnerabilidad de las construcciones y avanzar hacia estudios de escenarios de daños por sismo. Estos

desarrollos son necesarios para el planteamiento de panoramas de riesgo sísmico que permitan enfocar las medidas adecuadas para reducir el riesgo existente y evitar la configuración de nuevos riesgos.

4. Medidas de intervención

Las medidas de intervención se pueden clasificar y proponer en el tríptico planteado por la Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (UNGRD) a través de la Ley Nacional 1523 de 2012 como conocimiento, reducción y manejo, a lo cual se le puede agregar mitigación y adaptación al cambio climático según los acuerdos internacionales de gestión del riesgo del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 organizado por Naciones Unidas. Esas medidas se pueden clasificar en medidas físicas, no físicas y de reducción de elementos expuestos, de las cuales se deberá estimar cuáles deben ejecutarse en el corto, mediano y largo plazo (ver Tabla 64).

Las medidas de reducción y recuperación por riesgo se ajustan a la agenda de reducción de riesgo del marco de acción de Sendai y al tríptico del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo y la Ley 1523 de 2012 a saber: conocimiento, reducción y manejo. Dichas medidas para conocimiento y reducción se indican en la siguiente tabla.

Tabla 63. Medidas administrativas y proyectos en gestión de riesgo

Medida administrativa
Seguimiento de amenazas naturales
Instrumentación y monitoreo de niveles de agua de ríos, precipitaciones para prever inundaciones, deslizamientos detonados por lluvia y avenidas torrenciales
Establecimiento de sistemas de alertas tempranas articulando instituciones y comunidades con puntos de seguimiento y un centro de monitoreo
Fortalecimiento institucional para prevención y atención de emergencias
Gestión de riesgo comunitario mediante capacitación y preparación en prevención, seguimiento, monitoreo, respuesta a emergencias, ayuda mutua y recuperación social posterior a desastres
Preparación de organismos de respuesta a emergencias y dotación/capacitación a la comunidad como previsor y respondiente de emergencias para reducción de desastres
Mejora del conocimiento de las condiciones de amenaza y riesgo en escalas regionales (panoramas de riesgo) y de mayor detalle (estudios detallados de amenazas y riesgos)
Ejecución de obras de manejo de aguas y control hidráulico en áreas que necesiten control de inundación, estabilización de laderas o márgenes de ríos y control de erosión hídrica de lechos y márgenes de ríos en áreas con infraestructura expuesta (vías, servicios públicos o asentamientos humanos)
Recuperación de áreas afectadas y de aspectos contribuyentes a la generación de amenazas. Por ejemplo gestión del uso del suelo en áreas de divagación del río, recuperación de bosques nativos, manejo de aguas de escorrentía, relocalización de asentamientos, entre otras.

Medida administrativa

Establecimiento administrativo de limitantes y condicionantes por amenaza y riesgo para la restricción o el condicionamiento del uso del suelo. Por ejemplo las áreas en amenaza alta por avenidas torrenciales deben ser restringidas para cualquier uso que implique actividades permanentes pasivas o activas y condicionadas a su uso y aprovechamiento casual en temporadas de bajas precipitaciones cuando se pueda descartar la ocurrencia de este fenómeno. Otro ejemplo corresponde con las áreas de amenaza por inundación (ver diagrama de flujo), en donde se pueden permitir actividades productivas y usos adaptados o adaptables a la presencia de agua frente a la ocurrencia de inundaciones como cultivos resistentes a saturación de suelos y actividades, zonas de protección, parques de recreación pasiva en temporadas de menos lluvias, entre otras.

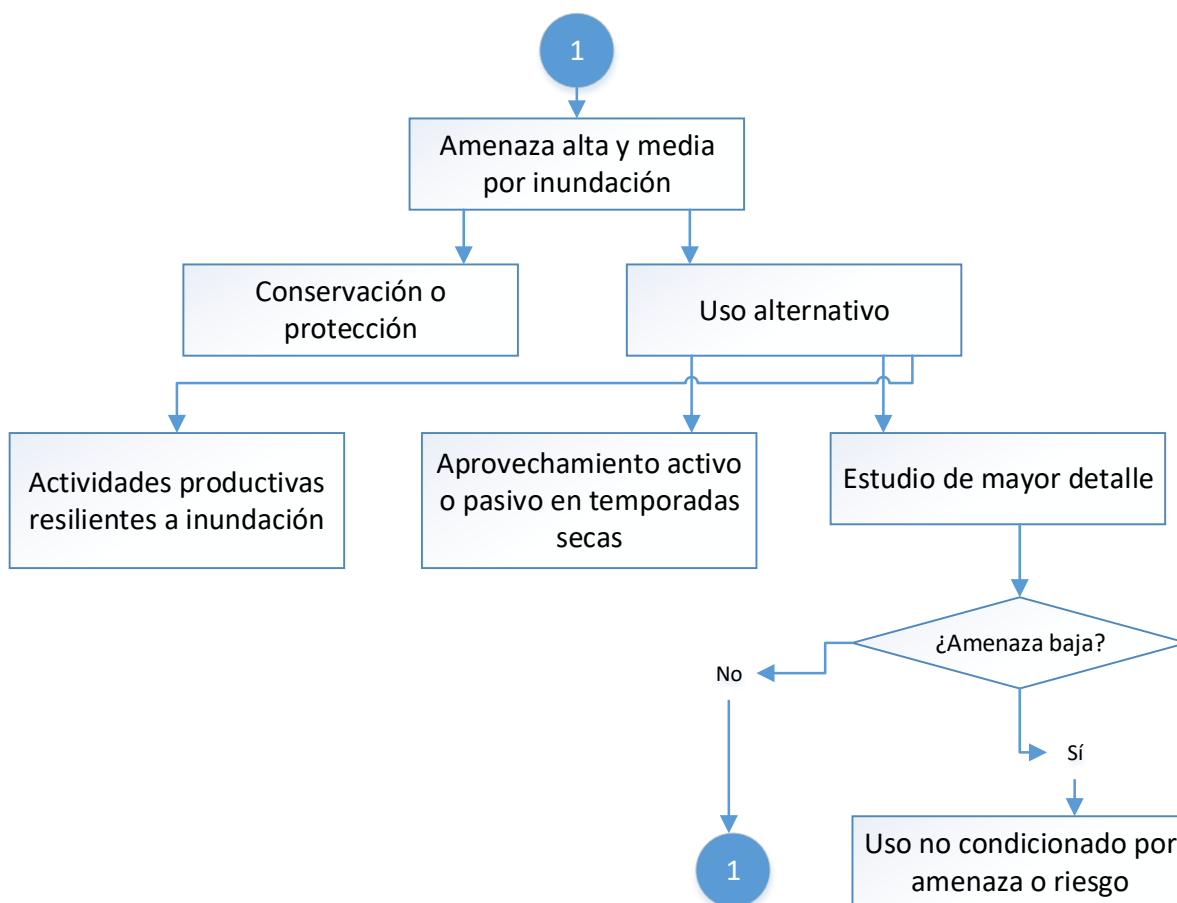
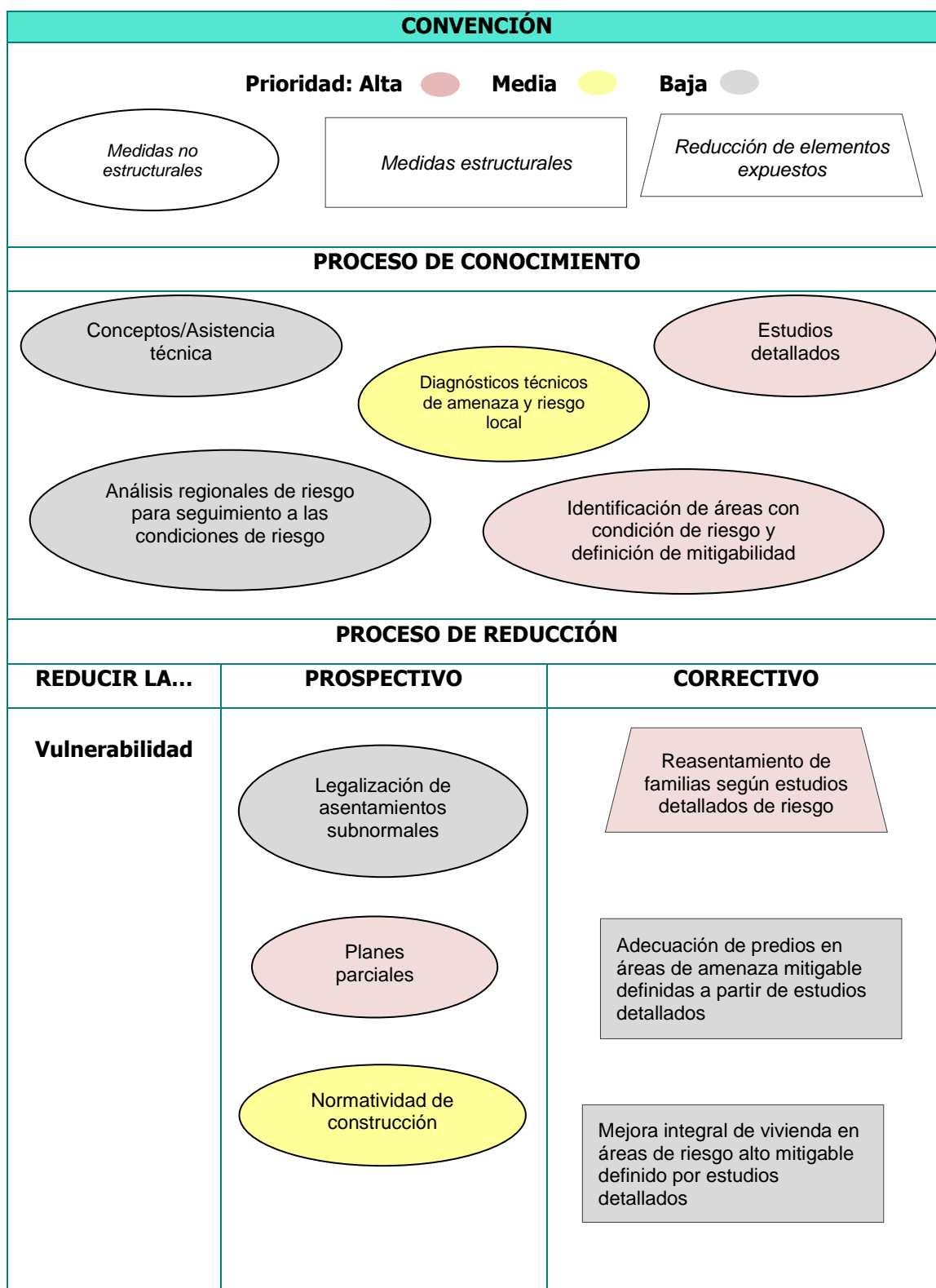
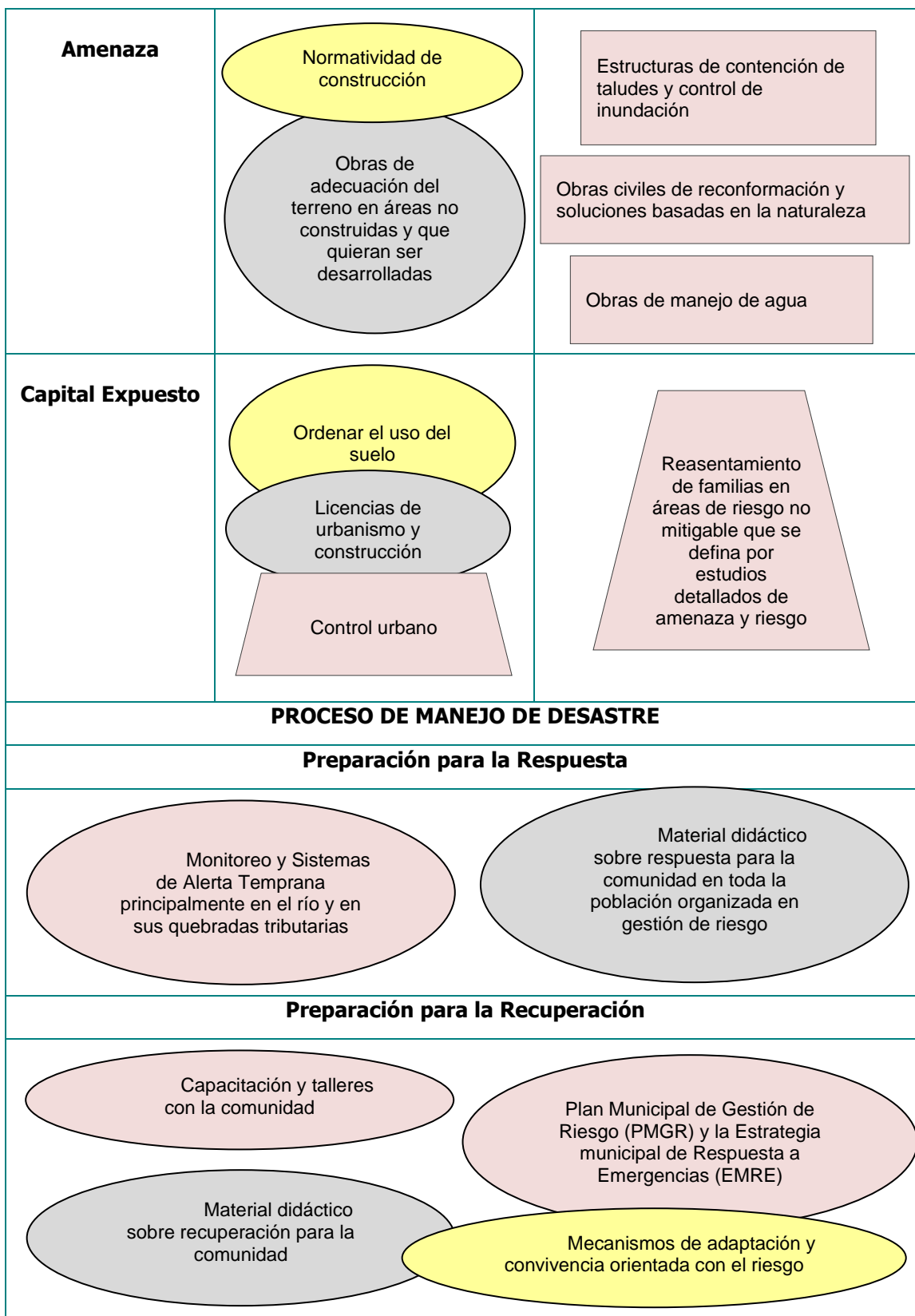


Tabla 64. Medidas que apuntan a la reducción del riesgo





Las medidas generales y específicas que se deben tomar por cada tipo de amenaza son las siguientes:

4.1 Amenaza y riesgo por movimientos en masa

- ▽ Las áreas en amenaza media y alta por movimientos en masa que se proyecten para desarrollo deben ser sujetas a estudios de detalle que valoren en mayor escala las condiciones de amenaza existentes en el marco de lo estipulado en el Decreto 1807 de 2014.
- ▽ Las áreas con condición de riesgo por movimientos en masa harán parte de programas de gestión de riesgo comunitario e institucional en el corto plazo y se proyectarán para estudios detallados en el mediano y largo plazo que caractericen los elementos expuestos a movimientos en masa en cuanto al tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial y demás aspectos técnicos solicitados por el citado decreto.
- ▽ Las áreas de amenaza baja por movimientos en masa no son sinónimo de amenaza nula o de imposibilidad de que ocurra un evento, estas áreas corresponden con sectores que no son propensos a afectarse por movimientos en la magnitud y recurrencia de las calificadas en categoría media y alta, por lo cual no se definen restricciones ni condicionamientos específicos para el uso del suelo, pero sí se indican medidas generales de gestión del riesgo en capacitación comunitaria, preparación para la respuesta y seguimiento y alerta de las condiciones de amenaza y riesgo.

4.2 Amenaza y riesgo por inundación

Las inundaciones son el fenómeno amenazante más representativo del municipio, por lo cual se especifican las siguientes medidas:

- ▽ Las áreas en amenaza media y alta por inundación que se proyecten para desarrollo deben ser sujetas a estudios de detalle que valoren en mayor escala las condiciones de amenaza existentes en el marco de lo estipulado en el Decreto 1807 de 2014.
- ▽ Las áreas con condición de riesgo por inundación harán parte de programas de gestión de riesgo comunitario e institucional en el corto plazo y se proyectarán para estudios detallados en el mediano y largo plazo que caractericen los elementos expuestos a inundaciones en cuanto al tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial y demás aspectos técnicos solicitados por el citado decreto.
- ▽ Las áreas construidas que se encuentran expuestas a amenaza media y alta por inundación deben ser incluidas como prioritarias en procesos de gestión de riesgo comunitario y dentro de las estrategias municipales de respuesta a emergencias, planes de emergencia y contingencia de manera que en el corto plazo la comunidad y las instituciones estén mejor preparados para la respuesta oportuna a inundaciones en estas zonas específicas.
- ▽ Las áreas de amenaza baja por inundaciones no son sinónimo de amenaza nula o de imposibilidad de que ocurra un evento, estas fueron trazadas con criterios de severidad y recurrencia, por lo que las áreas con calificación baja serán menos recurrentes y de menor magnitud que las calificaciones media y alta. En las áreas de planicie, principalmente en las áreas estudiadas de cabecera municipal y centros poblados de poca pendiente, se pueden generar encharcamientos que afecten la movilidad o incluso llegar a afectar enseres que se encuentren expuestos a niveles de agua bajos (1 metro o menos).
- ▽ Toda el área baja del municipio, la correspondiente a planicie o en general de poca pendiente del terreno, tiene baja capacidad de drenaje, por lo que lluvias intensas de poca duración e incluso lluvias moderadas de duración importante generarán encharcamientos. Por su parte, la capacidad de drenaje de las escorrentías es baja en las áreas urbanizadas. Estas áreas se

califican en amenaza baja por inundaciones por ser de poca profundidad y de baja velocidad, además que no pueden ser condicionadas a estudios detallados específicos sino que deberá proyectarse de forma integral un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), que tenga la capacidad de conducir las aguas de escorrentía superficial urbana y drenar en tiempos cortos los encharcamientos que se generen.

- ▽ Para el caso particular de las zonas de amenaza media y alta por inundación, podrán considerarse condicionamientos de ocupación y edificabilidad para evitar que los primeros pisos se vean afectador por el nivel de agua.

4.3 Amenaza y riesgo por avenidas torrenciales

- ▽ Las áreas en amenaza media y alta por avenidas torrenciales que se proyecten para desarrollo deben ser sujetas a estudios de detalle que valoren en mayor escala las condiciones de amenaza existentes en el marco de lo estipulado en el Decreto 1807 de 2014. Si estos estudios no se realizan deberá ser restringido el uso del suelo hasta tanto no se mejore la resolución de las zonificaciones.
- ▽ Las áreas con condición de riesgo por avenidas torrenciales harán parte de programas de gestión de riesgo comunitario e institucional en el corto plazo y se proyectarán para estudios detallados en el mediano y largo plazo que caractericen los elementos expuestos a avenidas torrenciales en cuanto al tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial y demás aspectos técnicos solicitados por el citado decreto.

Los estudios de amenaza y riesgo detallados que se adelanten deben seguir las normas recopiladas en el Decreto 1077 de 2015 y las metas del marco de acción de Sendai expresadas en la Ley 1523 de 2012 considerando metodologías con enfoque cuantitativo, trabajo de campo y caracterización detallada de infraestructura y familias expuestas al fenómeno amenazante. Den estos estudios se deberá concluir las medidas estructurales y no estructurales que permitan adaptarse a las condiciones de amenaza y riesgo estudiadas.

4.4 Marco legal y normativo general para medidas de intervención

Una serie de desarrollos normativos generales y específicos se relacionan con la gestión del riesgo, desde las normas ambientales hasta las de ordenamiento territorial, lo cual refuerza y da soporte a la ejecución de todas las actividades. Las leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 inician buscando la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales para que no se localicen asentamientos humanos en áreas de amenaza alta o alto riesgo con calificación de “no mitigable”.

Paralelamente y tras varios desastres relacionados con amenazas inevitables como la sísmica, la Ley 400 de 1997 reconoce con fuerza la necesidad de adoptar normas de construcción sismorresistente, aplicando el código de construcción CCCSR-84 y provocando estudios de amenaza sísmica y su actualización a la posterior NSR-98. Con esta ley se establecen las responsabilidades y requisitos para las buenas prácticas de construcción en busca de reducir los impactos de los desastres por el fenómeno sísmico, sugiriendo implícitamente lo que antes no se contemplaba pero que hoy hace parte fundamental de la gestión del riesgo: aprender a convivir con las amenazas naturales y a adaptarse a las mismas. Pocos años después y tras las preocupaciones globales en materia de adaptación de los territorios a los problemas ambientales globales, se adoptó el protocolo de Kyoto mediante Ley 629 de 2000 y el Decreto 2015 de 2001 para reglamentar la posibilidad de recuperarse de desastres en términos de reconstrucción de infraestructura.

Con la incorporación del concepto de prevención en la gestión de riesgo se dieron pasos importantes en la reducción de desastres; por ejemplo, con los Decretos 2181 de 2006 y 4300 de 2007 se incorporó la

necesidad de conocer las amenazas naturales de los terrenos para poder dar viabilidad a los Planes Parciales establecidos por la Ley 388 de 1997. Otro ejemplo son los Decretos 926 de 2010, 1469 de 2010 y 092 de 2011 con los que se adopta la actualización de la norma de construcción sismorresistente NSR-10 y se reglamentan las licencias urbanísticas, logrando así fortalecer técnicamente los estudios geotécnicos y estructurales para la protección de la vida y de la infraestructura misma expuesta a amenaza sísmica y por inestabilidad de laderas en zonas de altas pendientes.

Una vez toma importancia la gestión integral de riesgo en ciudades como Bogotá, Medellín y Manizales, el país entero busca replicar experiencias y nace la Unidad Nacional de Gestión de Riesgo mediante Decreto 4147 de 2011, la cual daría las herramientas para la Ley Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres o Ley 1523 de 2012 incorporando el primer Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

Posteriormente, el ordenamiento territorial empieza a fortalecer la incorporación de la gestión de riesgo en cuencas hidrográficas mediante el decreto 1640 de 2012 y en municipios con los decretos 1469 de 2010, 1807 de 2014, 1077 de 2015, 308 de 2016 y 1203 de 2017, con los que se exigen los estudios básicos y detallados urbanos y rurales de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales y el establecimiento de medidas de mitigación de amenaza y reducción de riesgo posibles para los municipios.

Finalmente, tras las discusiones de las problemáticas que trae el cambio climático al mundo realizadas en Sendai se sugirieron medidas de adaptación a los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático para todos los países, algunas de las cuales se establecen en Colombia con el Decreto 308 de 2016. Este marco de acción de Sendai se entiende como una agenda de reducción de riesgo y desastres para el periodo 2015-2030.

5. Proyectos relevantes

Además de condicionar en el ordenamiento territorial a estudios detallados las áreas con condición de amenaza y condición de riesgo, se especifican en este numeral los proyectos de conocimiento y reducción relevantes para la gestión del riesgo en el municipio que son recomendadas para el componente programático del ordenamiento territorial y del Plan Municipal de Gestión del Riesgo.

5.1 Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)

Dada la evaluación de amenaza por inundación, la cual desarrolló análisis de escorrentías en escala 1:5.000, se define una condición de baja capacidad de escorrentía y drenaje superficial. Esta se deriva en encharcamientos frecuentes de poca profundidad y tiempos de drenaje mayores a una hora, lo que lleva a interrupciones de las condiciones normales de funcionamiento de la ciudad consolidada e incluso afectaciones a los enseres de viviendas y locales. Se deberá diseñar y construir un sistema de drenaje pluvial urbano sostenible que disminuya los tiempos de drenaje y permita al municipio recuperar rápidamente las condiciones normales. Este SUDS además puede aportar al aumento de la recarga del acuífero del municipio, ya que según las condiciones de permeabilidad de los suelos presentes, es posible derivar en infiltración parte de las precipitaciones.

5.2 Intervención integral del río Apartadó

El río Apartadó es el drenaje que más caudal transita en el municipio y a pesar de que tiene buena capacidad hidráulica, esta no es suficiente para las crecientes más altas relacionadas con el fenómeno de la Niña y las cada vez más frecuentes precipitaciones extremas producto de la variabilidad climática y efectos del cambio climático, lo que le imprime la amenaza por inundación por desbordamiento más

relevante del municipio. También es el cuerpo de agua que más transporta sedimentos disueltos y suspendidos, principalmente arenas, limos y arcillas, siendo un río que varía constantemente la profundidad del lecho principal. Por otro lado, después de la quebrada la Balsa, es el drenaje que más procesos de socavación lateral y divagación presenta, constituyéndose en uno de los cuerpos de agua más dinámicos tanto en procesos erosivos como constructivos. Las características descritas del río Apartadó justifican que se busque la ejecución de obras en el corto plazo que controlen los actuales puntos críticos por socavación lateral, mientras que en el mediano y largo plazo se debe buscar una intervención integral que mantenga al río en condiciones favorables de drenaje urbano.

Esta intervención integral debe contemplar la ejecución de obras que controlen la divagación del río, los procesos de socavación a lo largo de todo el trayecto urbano y los movimientos en masa que se detonan por la socavación. Las áreas con amenaza alta y media por inundación y socavación deben ser objeto de estudio más detallado que incluya además evaluación de exposición de viviendas e infraestructura, vulnerabilidad y riesgo para que se defina su pertinencia de reasentamiento de familias y la transformación de las áreas a suelos de protección por riesgo, tratamiento especial para uso público recreacional, aprovechamiento público en temporadas de menores lluvias, renaturalización de la ronda hídrica, o una combinación de todas las transformaciones mencionadas.

5.3 Caracterización de respuesta dinámica de suelos en el área urbana

Como se indicó en las consideraciones de riesgo sísmico, la amenaza sísmica no constituye por sí misma un condicionamiento o restricción al uso del suelo. No obstante, la presencia de arenas saturadas que son susceptibles a las cargas cíclicas puede presentar licuación, fenómeno que tiene registros históricos en el área urbana y en general en el área de planicie, por lo cual deberá prestarse la atención suficiente en el licenciamiento de construcción que se revisen la susceptibilidad a licuación en los estudios de suelos de los proyectos de construcción, observando siempre el cumplimiento del reglamento de construcción sismorresistente NSR.

Por otro lado, las aceleraciones esperadas para diseño de edificaciones corresponden con valores altos. Según las mediciones geofísicas realizadas en los presentes estudios básicos de riesgo, existen suelos que fácilmente superan los 30 metros de profundidad y que al tiempo presentan rigidez moderada a blanda. Esto redundo en que las aceleraciones en roca o en el basamento sísmico (materiales con velocidad de onda cortante mayor a 760 m/s) se amplifican por efectos de sitio en los materiales limoarcillosos y limoarenosos presentes, generando aceleraciones mayores a las indicadas en la NSR para el municipio de Apartadó, principalmente en las ordenadas espectrales de largo periodo, lo cual debe cuantificarse en los estudios y diseños de edificaciones mediante estudios de efectos locales.

En el marco de lo expuesto, resulta conveniente adelantar estudios generales de respuesta sísmica que puedan orientar los diseños de edificaciones particulares. En el corto y mediano plazo es posible elaborar caracterizaciones geofísicas en toda el área urbana con los que se identifique la profundidad del basamento sísmico, el periodo fundamental de vibración del terreno y aproximaciones a la respuesta sísmica a partir de caracterizaciones geológicas, geofísicas y geotécnicas. En el largo plazo, y dada la población mayor a 200 mil habitantes, es necesario gestionar un estudio completo de Zonificación de Respuesta Sísmica Urbana en el marco de lo dispuesto en la NSR que se derive en Decreto particular de lineamientos para las consideraciones sísmicas en el diseño de edificaciones.

5.4 Estudios detallados, obras de mitigación y sistemas de alerta

Además de las medidas descritas para las áreas con condición de amenaza/riesgo y los proyectos relevantes mencionados, se considera que espacialmente se deben priorizar las siguientes acciones para avanzar en el conocimiento de amenaza y riesgo en polígonos específicos prioritarios, atendiendo los

requerimientos para estudios detallados consignados en el Decreto 1077 de 2015.

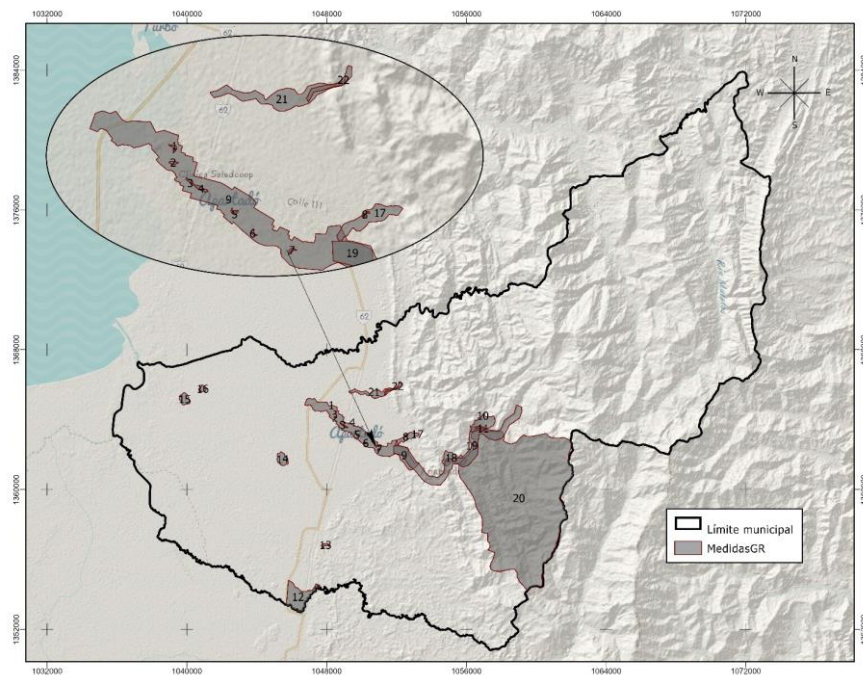


Figura 371. Prioridad de medida de intervención

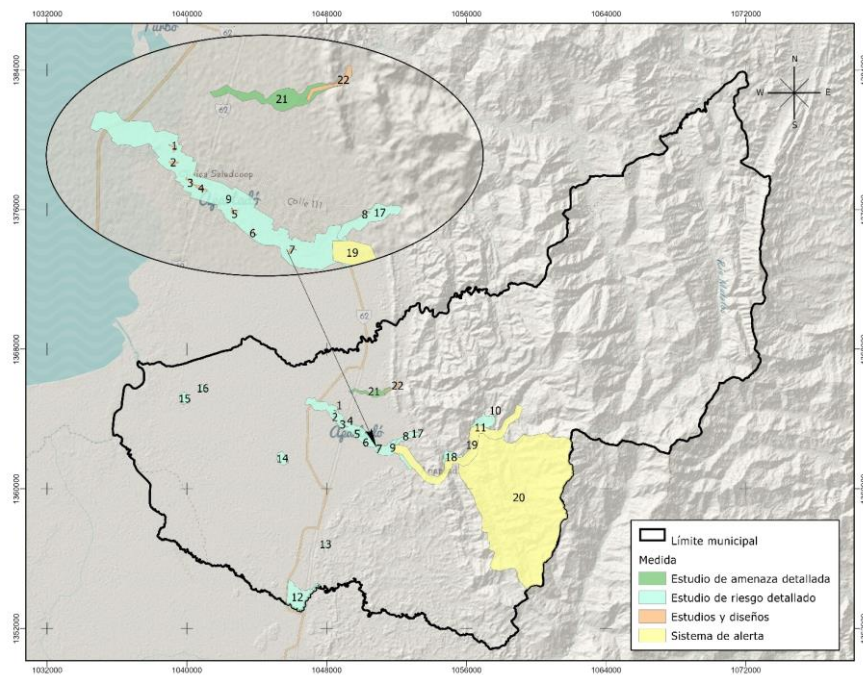


Figura 372. Tipo de medida de intervención

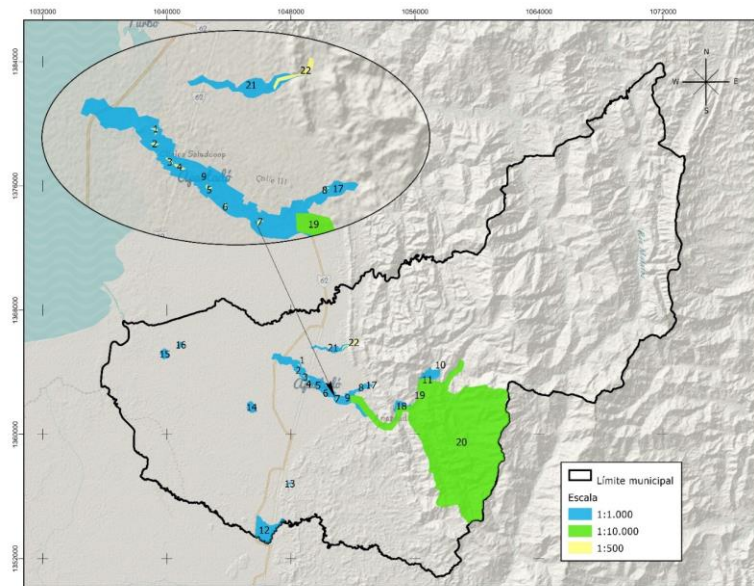
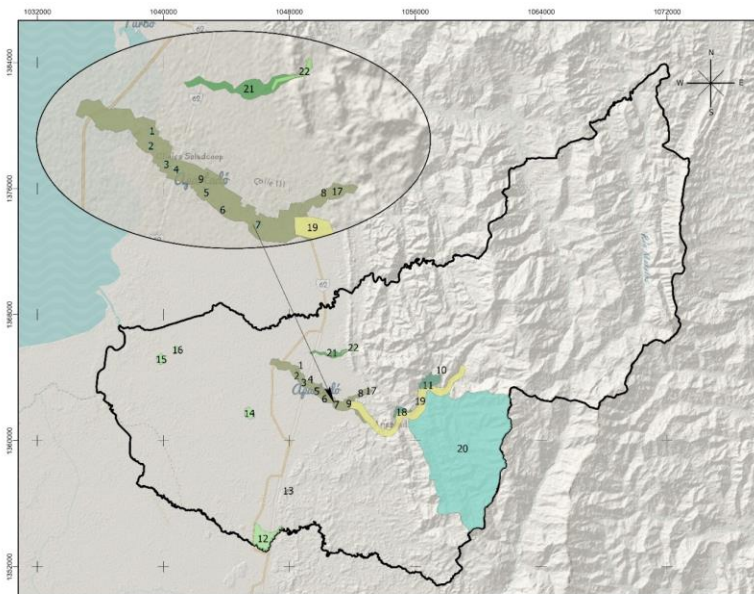


Figura 373. Escala a la cual se debe ejecutar la medida de intervención



□ Límite municipal

Descripción medida

- Análisis semidetallado de amenaza por avenidas torrenciales, instrumentación, seguimiento y sistemas de alerta temprana
- Análisis semidetallado de amenaza por inundación, instrumentación de niveles, seguimiento y sistema de alerta temprana
- Estudio detallado de amenaza por inundación, crecientes súbitas, socavación y avenidas torrenciales
- Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones, socavación lateral y movimientos en masa
- Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación
- Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales
- Estudios y diseños de aliviaderos de energía y retención de sedimentos
- Estudios y diseños de reparación vial, estructura de protección de socavación y contención de deslizamiento
- Estudios y diseños para estructura de protección de socavación
- Estudios y diseños para estructura de protección de socavación e inundación por desbordamiento

Figura 374. Descripción medida de intervención

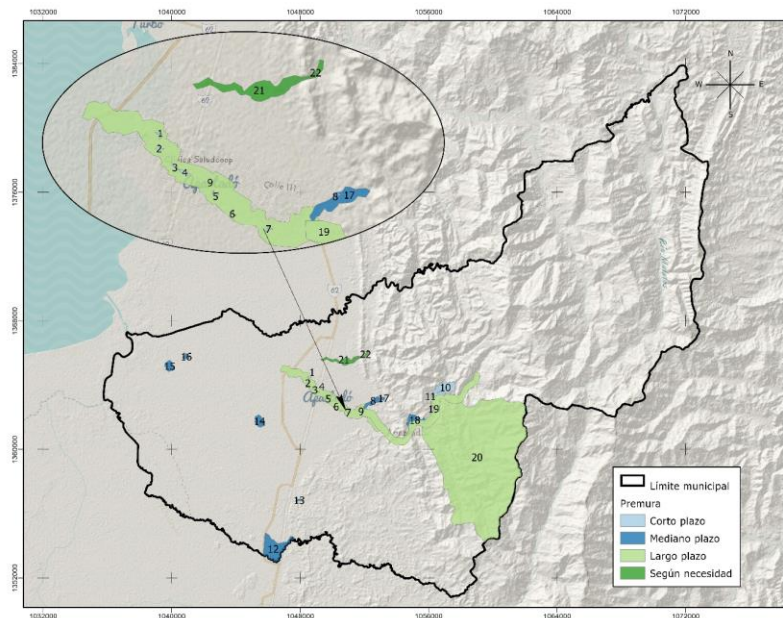


Figura 375. Premura de intervención medida

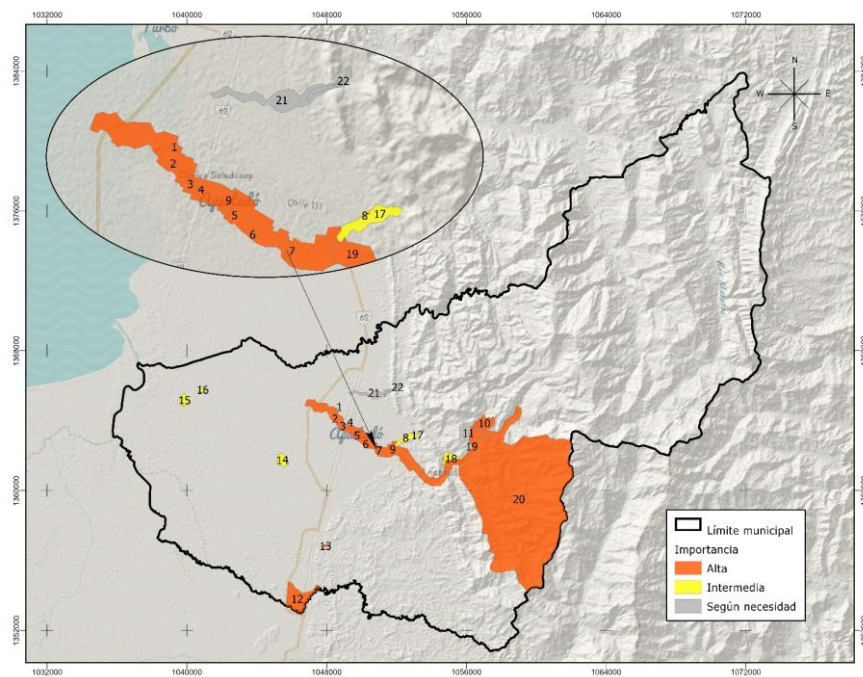


Figura 376. Importancia medidas de intervención

Tabla 65. Medidas de intervención propuestas

Medida	Escala	Descripción	Premura	Importancia	Prioridad
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	1
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	2
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	3
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	4
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	5
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	6
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación	Corto plazo	Alta	7
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños de reparación vial, estructura de protección de socavación y contención de deslizamiento	Corto plazo	Alta	8
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones, socavación lateral y movimientos en masa	Largo plazo	Alta	9
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales	Corto plazo	Alta	10
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños para estructura de protección de socavación e inundación por desbordamiento	Corto plazo	Alta	11
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación	Mediano plazo	Alta	12
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones, socavación lateral y movimientos en masa	Mediano plazo	Alta	13

Medida	Escala	Descripción	Premura	Importancia	Prioridad
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación	Mediano plazo	Intermedia	14
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación	Mediano plazo	Intermedia	15
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación	Mediano plazo	Intermedia	16
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones, socavación lateral y movimientos en masa	Mediano plazo	Intermedia	17
Estudio de riesgo detallado	1:1.000	Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales	Mediano plazo	Intermedia	18
Sistema de alerta	1:10.000	Análisis semidetallado de amenaza por inundación, instrumentación de niveles, seguimiento y sistema de alerta temprana	Largo plazo	Alta	19
Sistema de alerta	1:10.000	Análisis semidetallado de amenaza por avenidas torrenciales, instrumentación, seguimiento y sistemas de alerta temprana	Largo plazo	Alta	20
Estudio de amenaza detallada	1:1.000	Estudio detallado de amenaza por inundación, crecientes súbitas, socavación y avenidas torrenciales	Según necesidad	Según necesidad	21
Estudios y diseños	1:500	Estudios y diseños de aliviaderos de energía y retención de sedimentos	Según necesidad	Según necesidad	22

6. Bibliografía

- Albarelo, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., . . . Puzzilli, L. (2011). The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzonation: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. *52(3)*, 513-538. doi:10.4430/bgta0013
- Amanti, M., Muraro, C., Roma, M., Chiessi, V., Puzzilli, L., Catalano, S., . . . Tallini, M. (2020). Geological and geotechnical models definition for 3rd level seismic microzonation studies in Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:https://doi.org/10.1007/s10518-020-00843-x
- ANH. (2009). *Cartografía Geológica y Modelamiento Estructural del las Cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto partir de interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico*. Bogotá.
- Arcila, M. G. (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Bogotá D.C.
- Arteta, C., Pájaro, C. A., Mercado, V., Arcila, M., & Abrahamson, N. (2021). Ground-motion model for subduction earthquakes in northern South America. *Earthquake Spectra*. doi:10.1177/87552930211027585
- Caielli, G., de Franco, R., Di Fiore, V., Albarelo, D., Catalano, S., Pergalani, F., . . . Vasallo, M. (2020). Extensive surface geophysical prospecting for seismic microzonation. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:https://doi.org/10.1007/s10518-020-00866-4
- Carvajal, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. SGC.
- Consorcio Inypsa - Argea - Aceplan - Ur. (2018). *Programa POTS Modernos. Documento de diagnóstico que contiene la metodología, proceso y resultados de los estudios básicos para la incorporación de la gestión de riesgo en el POT. Municipio de Apartadó*. Apartadó.
- Consorcio zonificación 2008. (2011). *Consultoría para desarrollar la zonificación de amenazas y riesgos en las áreas urbanas de los municipios de Apartadó y Carepa, en el departamento de Antioquia*. Apartadó.
- Corominas, J., & Garcia Yague, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera.
- CORPOURABA; ECOFOREST. (2019). *Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río León SZH (1201). Fase de diagnóstico caracterización física clima-geomorfología*. CORPOURABA.
- CORPOURABA; UT POMCA Río Turbo Currulao. (2018). *Formulación POMCA Río Turbo y Currulao. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica. Fase de diagnóstico Tomo I - Clima, geología*. Bello: CORPOURABA.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes, Special Report.
- Delgado, J., López Casado, C., Giner, J., Estévez, A., Cuenca, A., & Molina, S. (2000). Microtremors as a Geophysical Exploration Tool: Applications and Limitations. *Pure and Applied Geophysics*, *157*, 1445-1462. doi:https://doi.org/10.1007/PL00001128
- European Comission – Research General Directorate. (2004). GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS,

PROCESSING AND INTERPRETATION . *SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12.*

- European comission - Research General Directorate. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. *Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.*
- GRP; SGC. (2019). *Memoria Explicativa de la Plancha 91-Belencito a escala 1:100.000. Departamentos de Córdoba y Antioquia.* Bogotá D.C.: SGC.
- Hoorn, C., Guerreno, J., Sarmiento, G., & Lorente, M. (1995). *Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America.*
- Horton, B., Saylor, J., Junsheng, N., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., & Stockli, D. (2010). *Linking sedimentation in the Northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-PB ages, Eastern Cordillera, Colombia.* Geological Society of America Bulletin.
- Hugyett, A. (1989). *Mapa hidrogeológico de Colombia. Escala 1:2.500.000. Memoria explicativa.* Bogotá: INGEOMINAS.
- IDEAM. (2012). *Metodología para la zonificación de la susceptibilidad.* Bogotá D.C.
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering.* doi:10.1007/s10518-016-0050-1
- INGEOMINAS. (2010). *Integración de la cartografía geológica de los Llanos Orientales: Departamento del Meta y sector suroccidental del departamento de Casanare. Planchas 248, 249, 250, 251, 252, 267, 268, 269, 270 y 271. Escala:1:100.000.* Bogotá D.C.: INGEOMINAS.
- INGEOMINAS; GEOTEC. (2003). *Geología de los Cinturones Sinú-San Jacinto. Planchas 50 Puerto Escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa.* Bogotá D.C.: INGEOMINAS.
- INGEOMINAS; IGAC. (2005). *Investigación Integral del Andén Pacífico Colombiano. Tomo 1. Geología.*
- JAXA/METI. (09 de 03 de 2011). *ASF DAAC.* Obtenido de <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G., & Saéz, E. (2018). Geophysical Characterization of the Chilean Seismological Stations: First Results. *Seismological Research Letters.* doi:10.1785/0220170156
- MADS. (2015). *Protocolo para la incorporación de la gestión de riesgo en POMCAS.* Bogotá D.C.
- Malamud, B. a. (2000). Cellular-automata models applied to natural hazards. *Computing in Science & Engineering.*
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2005). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 687-711.

- Mann, T., Edwards, R., & Ku, T. (1995). Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northeastern Caribbean plate margin. *Tectonophysics*, 1-69.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M., Ammer, A., Dimate, C., & Rodríguez, F. (2006). *Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia*. Tectonics.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, 25-33.
- Palmer, D. (1971). The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. doi:10.1190/1.9781560802426
- Palmer, D. (1981). An introduction to the generalized reciprocal method for seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46(11), 1508-1518. doi:10.1190/1.1441157
- Panzer, F., Romagnoli, G., Tortorici, G., D'Amico, S., Rizza, M., & Catalano, S. (2019). Integrated use of ambient vibrations and geological methods for seismic microzonation. *Journal of Applied Geophysics*, 170. doi:https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103820
- Parolai, S., Bormann, P., & Milkereit, C. (2002). Short Note New Relationships between Vs, Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the H/V Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2521-2527.
- Paudyal, Y., Bhandary, N., & Yatabe, R. (2012). Seismic Microzonation of Densely Populated Area of Kathmandu Valley of Nepal using Microtremor Observations. *Journal of Earthquake Engineering*, 16, 1208-1229. doi: 10.1080/13632469.2012.693242
- Pelekis, P., & Athanasopoulos, G. (2011). An overview of surface wave methods and a reliability study of a simplified inversion technique. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 31, 1654-1668.
- Portilla, M. (2001). *Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa*. Revista Geología de Colombia.
- Portilla, M. (2012). *Notas de clase de amenaza. En S. N. Minería, Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades andinas, 2007: Movimientos en masa de la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenaza*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Quesada-Román, A. (2016). *Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General*. Costa Rica.
- Redpath, B. (1973). Seismic refraction exploration for engineering site investigation. *Technical report E-73-4*. U. S. Army engineer waterways experiment station - Explosive excavation research laboratory.
- Redpath, B. B. (1973). Seismic refraction exploration for engineering site investigation. *Technical report E-73-4 - U.S. Army engineer waterways*. doi:10.2172/4409605
- Reld, & Berry. (1993). *Mecánica de Suelos*. Colombia: Traducción Universidad del Cauca.
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Memoria explicativa de los mapas de geomorfología de las planchas 339, 339 BIS, 361. 361 BIS, 383, 384, 408, 427 y 427 BIS. Bloque Litoral Nariño*. Bogotá D.C.: SGC.

- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques identificados por el Servicio Geológico Colombiano, Grupo 2: Zonas Sur A y Sur B. Geología de la Plancha 285 San Martín*. Bogotá D.C.: SGC.
- SGC; GRP. (2019). *Memoria explicativa de la Plancha 91-Belencito a escala 1:100.000. Departamentos de Córdoba y Antioquia*. Bogotá: SGC.
- SGC; Universidad Nacional de Colombia. (2015). *Memoria técnica explicativa del Mapa Geomorfológico Analítico aplicado a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Plancha 79 - Turbo. Departamentos de Antioquia y Chocó*. Medellín: SGC.
- Stanko, D., & Marsukic, S. (2020). An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and VS30 for Croatia based on HVSr forward modelling. *Natural Hazards*. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04152-z>
- Toussaint, J., & Restrepo, J. (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 237-260.
- Vargas, O. (2005). *Zonas Hidrogeológicas Homogéneas de Colombia*. IDEAM.
- Varnes D.J. (1978). *Slope movements, types*.
- Wathelet, M., Chatelain, J., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, G., Ohrnberger, B., & Savvaidis, A. (2020). Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878-7889. doi: 10.1785/0220190360