

# Estudios Base para la ciudad de Neiva, Colombia

Cambio Climático, Riesgos Naturales y Crecimiento Urbano



## ESTUDIO DE VULNERABILIDAD Y RIESGOS NATURALES

INFORME FINAL



## Índice de contenido

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....  | 12 |
| 1.1   | DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                                      | 12 |
| 1.2   | VALORACIÓN PROBABILÍSTICA DE RIESGOS NATURALES .....                      | 13 |
| 2     | ENCUADRE GENERAL .....  | 17 |
| 2.1   | SELECCIÓN DE AMENAZAS .....   | 17 |
| 2.1.1 | Registro histórico de eventos .....                                       | 17 |
| 2.1.2 | Reuniones mantenidas con los principales actores .....                    | 19 |
| 2.1.3 | Análisis multicriterio .....  | 20 |
| 2.2   | MARCO GEOLÓGICO .....   | 22 |
| 2.2.1 | Unidades Litoestratigráficas .....  | 22 |
| 2.2.2 | Estructura y Tectónica .....  | 28 |
| 2.2.3 | Geomorfología .....   | 29 |
| 2.2.4 | Hidrogeología .....   | 32 |
| 3     | ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA .....    | 34 |
| 3.1   | CONCEPTOS BÁSICOS .....   | 34 |
| 3.2   | LA PROBLEMÁTICA DE LA CIUDAD DE NEIVA .....                               | 34 |
| 3.3   | METODOLOGÍA .....   | 35 |
| 3.3.1 | Datos previos .....   | 36 |
| 3.3.2 | Análisis de eventos .....   | 38 |
| 3.3.3 | Análisis de los procesos, factores condicionantes y desencadenantes ..... | 40 |
| 3.4   | ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD. MODELO BIVARIANTE .....                   | 42 |
| 3.5   | EXPOSICIÓN DE VIVIENDAS E INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS .....                 | 45 |
| 3.6   | ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD/AMENAZA .....                                 | 45 |
| 4     | ESTUDIO DE SEQUÍA URBANA .....  | 48 |
| 4.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 48 |
| 4.2   | SISTEMA DE ACUEDUCTO DE NEIVA .....                                       | 48 |
| 4.2.1 | Sistema El Guayabo .....  | 48 |
| 4.2.2 | Sistema El Guayabo II .....   | 49 |
| 4.2.3 | Sistema El Tomo .....   | 49 |
| 4.3   | OFERTA HÍDRICA .....  | 50 |
| 4.3.1 | Oferta hídrica clima presente .....                                       | 50 |
| 4.3.2 | Oferta hídrica con cambio climático en 2050 .....                         | 51 |
| 4.4   | DEMANDA HÍDRICA .....   | 53 |
| 4.4.1 | Demanda hídrica actual .....  | 53 |
| 4.4.2 | Demanda hídrica en 2050 .....   | 55 |
| 4.5   | BALANCE HÍDRICO. ÍNDICE DE ESCASEZ .....                                  | 55 |
| 4.5.1 | Balance hídrico e índice de escasez actual .....                          | 55 |
| 4.5.2 | Balance hídrico en 2050 .....   | 57 |
| 4.6   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                      | 58 |
| 5     | ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN .....                    | 59 |
| 5.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 59 |
| 5.2   | ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO .....   | 59 |
| 5.2.1 | Escenarios de cambio climático .....                                      | 61 |
| 5.2.2 | Datos utilizados .....  | 63 |
| 5.2.3 | Control de calidad .....  | 63 |
| 5.2.4 | Metodología .....   | 64 |

|       |   |     |       |  |     |
|-------|---|-----|-------|--|-----|
| 5.2.5 | Clima presente .....                                      | 66  | 5.8   | ESTIMACIÓN DE RIESGOS PARA LAS PERSONAS.....                 | 119 |
| 5.3   | ESTUDIO HIDROLÓGICO .....                                 | 68  | 5.9   | CONCLUSIONES VALORACIÓN DE RIESGOS .....                     | 119 |
| 5.3.1 | Metodología de abstracciones.....                         | 68  | 6     | CÁLCULO PROBABILÍSTICO DEL RIESGO SÍSMICO.....               | 121 |
| 5.3.2 | Hidrograma unitario del SCS .....                         | 69  | 6.1   | INTRODUCCIÓN .....   | 121 |
| 5.3.3 | Distribución temporal de la lluvia .....                  | 74  | 6.2   | PELIGROSIDAD SÍSMICA.....                                    | 123 |
| 5.3.4 | Modelo HMS, propagación de hidrogramas .....              | 74  | 6.2.1 | Antecedentes de estudios de peligrosidad .....               | 123 |
| 5.3.5 | Salidas .....   | 77  | 6.2.2 | Metodología de cálculo del nuevo estudio desarrollado .....  | 124 |
| 5.4   | ESTUDIO HIDRÁULICO .....                                  | 79  | 6.2.3 | Fases del estudio de peligrosidad sísmica .....              | 125 |
| 5.4.1 | Modelo hidráulico .....                                   | 79  | 6.2.4 | Resultados .....   | 148 |
| 5.4.2 | Resultados.....   | 81  | 6.3   | EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD .....                            | 157 |
| 5.4.3 | Peligrosidad.....   | 93  | 6.3.1 | Introducción .....   | 157 |
| 5.4.4 | Amenaza de inundación. Conclusiones.....                  | 100 | 6.3.2 | Elaboración de la base de datos de exposición .....          | 158 |
| 5.5   | EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN.....                          | 100 | 6.3.3 | Estimación de vulnerabilidad .....                           | 161 |
| 5.5.1 | Introducción .....  | 100 | 6.3.4 | Asignación de funciones de capacidad y fragilidad .....      | 165 |
| 5.5.2 | Exposición física .....                                   | 100 | 6.4   | EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO .....                          | 167 |
| 5.6   | VULNERABILIDAD .....                                      | 111 | 6.4.1 | Introducción .....   | 167 |
| 5.6.1 | Introducción .....  | 111 | 6.4.2 | Cálculo del daño esperado .....                              | 167 |
| 5.6.2 | Vulnerabilidad material ante inundaciones .....           | 111 | 6.4.3 | Otros parámetros de riesgo .....                             | 170 |
| 5.6.3 | Vulnerabilidad humana ante inundaciones .....             | 113 | 6.4.4 | Resultados del estudio de riesgo sísmico .....               | 173 |
| 5.7   | CÁLCULO DEL RIESGO .....                                  | 114 | 6.5   | MAPA DE LIMITANTES CONSTRUCTIVAS .....                       | 181 |
| 5.7.1 | Metodología seguida para la amenaza de inundación .....   | 114 | 6.6   | RESUMEN, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES..... | 182 |
| 5.7.2 | Pérdida Máxima Probable (PML) .....                       | 114 | 7     | MEDIDAS DE MITIGACIÓN .....                                  | 186 |
| 5.7.3 | Representación gráfica del riesgo por inundación.....     | 115 | 7.1   | MEDIDAS ESTRUCTURALES .....                                  | 186 |
| 5.7.4 | Cálculo de la pérdida anual esperada por inundación ..... | 116 | 7.1.1 | Quebrada La Toma .....                                       | 186 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1.2 | Reubicación de la población (del Río del Oro y los asentamientos precarios del Río Las Ceibas)..... | 191 |
| 7.1.3 | Áreas verdes (para sismo, inundación y remoción en masa).....                                       | 192 |
| 7.1.4 | Dique de protección Río Las Ceibas (inundación).....  | 194 |
| 7.1.5 | Mejora barrial Comuna 8 (sismo).....  | 195 |
| 7.1.6 | Planificación, Normativa y Obras para reducción y mitigación de fenómenos de remoción en masa.....  | 195 |
| 7.2   | MEDIDAS NO ESTRUCTURALES.....   | 196 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.2.1 | Implementación de estrategias de compromiso y difusión. .... | 196 |
| 8     | BIBLIOGRAFÍA .....   | 199 |
| 9     | EQUIPO DE TRABAJO .....                                      | 202 |
| 9.1   | EQUIPO IDOM.....   | 202 |
| 9.2   | EQUIPO FINDETER .....  | 202 |

**ANEXO A: PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA POR CAMBIO CLIMÁTICO**  
**ANEXO B. MAPA SUSCEPTIBILIDAD A FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**  
**ANEXO C. UNIDADES GEOLÓGICAS PARA LA INGENIERÍA**

## Índice de figuras

|  |    |   |    |
|--|----|---|----|
| Figura 1. Municipios vecinos de Neiva.....   | 12 | Figura 19: Construcción en 2006 del cuerpo de la nueva bocatoma (El Guayabo II). .....  | 49 |
| Figura 2. Vista de la ciudad desde el río Magdalena.....   | 13 | Figura 20: Bocatoma el Tomo .....   | 50 |
| Figura 3. Posición relativa según tipo de amenaza según los datos de Desinventar .....   | 18 | Figura 21: Caudales medios mensuales (l/s) en la estación El Guayabo.....   | 50 |
| Figura 4. Posición relativa según tipo de amenaza según los datos de Desinventar .....   | 19 | Figura 22: Oferta hídrica en m <sup>3</sup> /mes teniendo en cuenta la reducción por calidad y caudal ecológico.....  | 51 |
| Figura 5 Izquierda, depósitos de la Formación Gigante. Derecha, depósitos de gravas pertenecientes a depósitos aluviotorrenciales de abanico aluvial. .... | 28 | Figura 23: Temperatura media mensual actual y en 2050 bajo tres escenarios de CC. ....  | 52 |
| Figura 6 Izquierda, planicie generada por el abanico de Neiva sobre la que se instala la ciudad. Derecha, vertientes y escarpes de la Fm Gigante. ....     | 31 | Figura 24: Precipitaciones medias mensuales en la actualidad y en 2050. ....  | 52 |
| Figura 7 Deslizamientos en la zona de estudio. Izquierda Deslizamiento rotacional en el Divino Niño. Derecha Alto mirador .....                            | 35 | Figura 25: Caudales medios mensuales con clima actual y con aumento de la temperatura por efecto del cambio climático (RCP8.5) .....  | 53 |
| Figura 8 Esquema metodológico para el análisis de susceptibilidad de movimientos en masa .....   | 35 | Figura 26: Demanda hídrica en l/s .....   | 55 |
| Figura 9 Procesos de remoción en masa inventariados a partir de las imágenes de Google Earth .....   | 39 | Figura 27: Índice de escasez actual, sin pérdidas en la red y con pérdidas objetivo .....   | 56 |
| Figura 10 Actuaciones realizadas entre 2012 a 2015 .....   | 39 | Figura 28: Balance hídrico para clima presente y población de 2016. ....  | 57 |
| Figura 11 Ubicación de eventos en la zona de estudio.....  | 40 | Figura 29: Balance hídrico en 2050 con aumento demográfico teniendo en cuenta el cambio climático .....   | 57 |
| Figura 12 Mapas temáticos introducidos en el análisis .....  | 41 | Figura 30: Balance hídrico en 2050 con aumento demográfico sin tener en cuenta el cambio climático .....  | 58 |
| Figura 13 Mapa Bivariante para la ciudad de Neiva .....  | 44 | Figura 31: Diagrama esquemático de las técnicas principales de reducción de escala como parte del proceso de desarrollo de escenarios climáticos. Nota: Basado en la Figura 9 de UNDP, 2011. ....                                       | 61 |
| Figura 14 Edificaciones en riesgo en la ciudad de Neiva .....  | 45 | Figura 32: a) Forzamiento radiativo proyectado (RF, W m <sup>2</sup> ) y (b) cambio de la temperatura media global en superficie (°C) durante el siglo 21 para escenarios SREA y RCP. Nota: Basado en la Figura 1-4 de IPCC, 2014. .... | 62 |
| Figura 15 Laderas con vestigios de procesos de remoción en masa en la Loma de San Pedro. ....  | 46 | Figura 33: Localización de las estaciones meteorológicas. ....  | 63 |
| Figura 16 Viviendas en zonas de riesgo en la zona de la Loma de San Pedro (Izqda) y Escandal (Dcha) .....  | 46 | Figura 34. Hidrograma unitario del SCS .....  | 69 |
| Figura 17: Localización de las bocatomas del sistema de acueducto de Neiva. ....   | 48 | Figura 35. Clasificación del suelo frente al drenaje Río del Oro .....  | 70 |
| Figura 18: Canal (izquierda) y presa de derivación en la captación el Guayabo I..  | 49 | Figura 36. Usos del suelo cuenca Río del Oro .....  | 72 |
|  |    | Figura 37. Usos del suelo cuenca Quebrada La Toma.....  | 73 |

Figura 38. Número de Curva (CN) en la cuenca del Río del Oro ..... 73

Figura 39. Esquema del modelo hidrológico HEC-HMS realizado para la cuenca del Río del Oro ..... 75

Figura 40. Esquema de representación de la cuenca del Río Las Ceibas en el modelo HEC-HMS. .... 75

Figura 41. Hidrograma a la salida del Río del Oro para el modelo de 100 años de periodo de retorno..... 77

Figura 42. Esquema modelo hidrológico Río del Oro ..... 78

Figura 43. Malla de cálculo no estructurada desarrollada para el cálculo hidráulico del Río del Oro ..... 80

Figura 44. Malla de cálculo no estructurada desarrollada para el cálculo hidráulico de la Quebrada La Toma ..... 80

Figura 45. Calados máximos para el periodo de retorno de 3 años en el Río del Oro ..... 82

Figura 46. Calados máximos para el periodo de retorno de 25 años en el Río del Oro ..... 83

Figura 47. Calados máximos para el periodo de retorno de 50 años en el Río del Oro ..... 84

Figura 48. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en el Río del Oro ..... 85

Figura 49. Zoom calados máximos del tramo no encauzado del Río del Oro para el periodo de retorno de 3 años ..... 86

Figura 50. Zoom calados máximos del tramo no encauzado del Río del Oro para el periodo de retorno de 100 años ..... 87

Figura 51. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en el Río Las Ceibas (encauzamiento)..... 88

Figura 52. Calados máximos para el periodo de retorno de 3 años en la Quebrada La Toma ..... 89

Figura 53. Calados máximos para el periodo de retorno de 25 años en la Quebrada La Toma ..... 90

Figura 54. Calados máximos para el periodo de retorno de 50 años en la Quebrada La Toma ..... 91

Figura 55. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en la Quebrada La Toma ..... 92

Figura 56. Mapa de peligrosidad del Río del Oro para el periodo de retorno de 3 años ..... 95

Figura 57. Mapa de peligrosidad del Río del Oro para el periodo de retorno de 100 años ..... 96

Figura 58. Mapa de peligrosidad del Río Las Ceibas para el periodo de retorno de 100 años ..... 97

Figura 59. Mapa de peligrosidad de la Quebrada La Toma para el periodo de retorno de 3 años ..... 98

Figura 60. Mapa de peligrosidad de la Quebrada La Toma para el periodo de retorno de 100 años ..... 99

Figura 61. Mapa Clases de Análisis zona de estudio ..... 102

Figura 62. Vivienda Unifamiliar-Estrato 1 ..... 103

Figura 63. Vivienda Unifamiliar Ordenados- Estrato 2..... 103

Figura 64. Vivienda Unifamiliar de interés social ..... 104

Figura 65. Vivienda expansión del centro histórico ..... 104

Figura 66. Viviendas zona de Precarios..... 105

Figura 67. Invasiones en Áreas naturales..... 105

Figura 68. Mapa de edificios de uso social e infraestructuras en la ciudad de Neiva ..... 106

Figura 69. Plantas de tratamiento de agua potable de la ciudad de Neiva ..... 107

Figura 70. Bocatomas El Guayabo y El Tomo ..... 107

Figura 71. Mapa de la exposición de la red de agua potable a posibles inundaciones de periodo de retorno 100 años ..... 108

Figura 72. Mapa de la red de alcantarillado ..... 109

Figura 73. Líneas eléctricas ..... 109

Figura 74. Curva de vulnerabilidad ante inundación M1 (Mampostería 1 piso) . 112  
 Fuente: CAPRA  
 Figura 75. Curva de vulnerabilidad ante inundación W1 (Mampostería 1 piso)..... 112  
 Figura 76. Función de vulnerabilidad humana ante inundaciones para estructuras de mampostería;..... 113  
 Figura 77. Representación gráfica de la PML para la inundación del Río del Oro 115  
 Figura 78. Representación gráfica de la curva de excedencia de pérdidas para la inundación del Río del Oro..... 116  
 Figura 79. PAE Pérdida Anual Esperada en la Zona de Estudio por inundación del Río del Oro en el escenario actual ..... 117  
 Figura 80. PAE Pérdida Anual Esperada en la Zona de Estudio por inundación del Río del Oro en el escenario tendencial ..... 118  
 Figura 81. Esquema general del estudio de riesgo sísmico que se plantea en Neiva ..... 122  
 Figura 82. Mapa Tectónico de la Región de Colombia, Centroamérica y Caribe. 127  
 Figura 83. Mapa de sismos históricos sentidos en la ciudad de Neiva, cuyos datos de localización y tamaño se indican en la Tabla 1. .... 129  
 Figura 84. Mapa Localización del sismo del 06 de febrero de 2017. .... 130  
 Figura 85. Ajuste lineal y ecuación obtenida para la homogeneización de datos de Magnitud local  $M_l$  a Magnitud Momento  $M_w$  ..... 131  
 Figura 86. Tasa normalizada de sismos ocurridos por año para cada rango de magnitudes del catálogo, establecidos a partir del análisis de completitud realizado..... 132  
 Figura 87. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidad inferior a 10 km). .... 133  
 Figura 88. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidades entre 10 y 70 km). .... 134  
 Figura 89. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidades superiores a 70 km)..... 134

Figura 90. Izquierda) Mapas de las zonas sismogénicas empleadas en la evaluación de la amenaza sísmica de Neiva, en régimen cortical y de subducción. Derecha) Zoom de las zonas corticales (arriba) y de subducción (abajo), indicando el área de influencia sobre Neiva con el círculo rojo. .... 136  
 Figura 91. Sismicidad asociada a las zonas corticales (izquierda), de subducción interfase (centro) y de subducción intraplaca (derecha)..... 136  
 Figura 92. Modelo de Gutenberg-Richter que representa el patrón de recurrencia de sismos dentro de cada zona sismogénica. .... 137  
 Figura 93. Mapa de fallas activas localizadas en el área de influencia de la ciudad de Neiva. .... 138  
 Figura 94. Distribución de magnitudes máximas de las fallas contenidas en la zona 7..... 138  
 Figura 95. Árbol lógico generado para el cálculo de peligrosidad probabilista (PSHA)..... 142  
 Figura 96. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 475 años..... 143  
 Figura 97. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 975 años..... 143  
 Figura 98. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la  $S_a(1s)$  en un periodo de retorno de 475 años..... 144  
 Figura 99. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la  $S_a(1s)$  en un periodo de retorno de 975 años..... 144  
 Figura 100. Mapa de tipos de suelos en Neiva derivado del mapa geotécnico de la ciudad. Se adopta la clasificación de suelos del NEHRP. .... 146  
 Figura 101. Mapa de PGA en roca para PR 475 años..... 149  
 Figura 102. Mapa de aceleraciones  $S_a(0.1s)$  en roca para PR 475 años ..... 149  
 Figura 103. Mapa de aceleraciones  $S_a(1s)$  en roca para PR 475 años ..... 150  
 Figura 104. Mapa de aceleraciones PGA en roca para PR 975 años..... 150  
 Figura 105. Mapa de aceleraciones  $S_a(0.1s)$  en roca para PR 975 años ..... 151  
 Figura 106. Mapa de aceleraciones  $S_a(1s)$  en roca para PR 975 años ..... 151

|   |     |   |     |
|---|-----|---|-----|
| Figura 107. Mapa de aceleraciones PGA en suelo para PR 475 años .....   | 152 | Figura 125. Geometría y parámetros de la falla. ....  | 174 |
| Figura 108. Mapa de aceleraciones Sa (0.1 s) en suelo para PR 475 años .....  | 152 | Figura 126. Cálculo de la posición relativa del plano de ruptura de la falla con respecto al punto medio de la traza establecido y los parámetros geométricos de la falla .....   | 175 |
| Figura 109. Mapa de aceleraciones Sa (1s) en suelo para PR 475 años .....   | 153 | Figura 127. Plano de ruptura .....  | 175 |
| Figura 110. Mapa de aceleraciones PGA en suelo para PR 975 años .....   | 153 | Figura 128. Espectros específicos para el sismo de Mw 5.5 asociado al escenario 1, y su comparación con la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente: Suelo B (arriba izquierda); Suelo C(arriba derecha) y Suelo D (abajo)..... | 176 |
| Figura 111. Mapa de aceleraciones Sa (0.1 s) en suelo para PR 975 años .....  | 154 | Figura 129. Espectros específicos para el sismo de Mw 7.0 asociado al escenario 2 y su comparación con la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente: Suelo B (arriba izquierda); Suelo C (arriba derecha) y Suelo D (abajo)..... | 177 |
| Figura 112. Mapa de aceleraciones Sa (1s) en suelo para PR 975 años .....   | 154 | Figura 130. Mapa de índice de daño medio para la ciudad de Neiva a causa del sismo de Mw7.0. ....   | 178 |
| Figura 113. Mapa de zonas de amenaza sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa y Av.....  | 155 | Figura 131. Mapa de porcentaje de viviendas con grado de daño nulo para el sismo de Mw7.0. ....   | 178 |
| Figura 114. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.....  | 156 | Figura 132. Mapa de índice de daño medio para la ciudad de Neiva a causa del sismo de Mw5.5. ....   | 180 |
| Figura 115. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.....  | 157 | Figura 133. Mapa de número de viviendas con los diferentes grados de daño: leve, extenso, moderado, completo y nulo para el sismo de Mw5.5.....   | 180 |
| Figura 116. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.....  | 157 | Figura 134. Mapa de limitantes constructivas recomendado para la ciudad de Neiva, en base a los resultados de amenaza sísmica.....  | 182 |
| Figura 117. Mapa de distribución de clases de análisis geoeconómicas de Neiva. ....   | 159 | Figura 135. Tramo no encauzado de la Quebrada La Toma .....   | 186 |
| Figura 118. Número de viviendas en las diferentes clases de análisis geoeconómicas de Neiva. ....   | 160 | Figura 136. Cuenca de la Quebrada La Toma .....   | 187 |
| Figura 119. Mapa de número de viviendas total en las diferentes comunas de ciudad de Neiva y su distribución entre edificaciones con estructura principal de mampostería y de hormigón armado. .... | 160 | Figura 137. Transición en el comienzo del encauzamiento de la Quebrada La Toma .....  | 187 |
| Figura 120. Distribución de la población de Neiva. ....   | 161 | Figura 138. Tramo no canalizado en La Toma en la unión con el encauzamiento .....   | 188 |
| Figura 121. Nivel de diseño sismorresistente de los edificios de la ciudad de Neiva. ....   | 163 | Figura 139. Ejecución de las obras de la actual canalización de la Quebrada La Toma .....   | 188 |
| Figura 122. Espectros de capacidad seleccionados para algunas tipologías constructivas de la ciudad de Neiva.....   | 166 | Figura 140. Resultado actualizado de la inversión con una tasa de descuento del 12%.....  | 189 |
| Figura 123. Representación de curvas de fragilidad generadas para la tipología constructiva de sistemas mixtos de pórticos y mampostería.....   | 167 |   |     |
| Figura 124. Esquema de las curvas de capacidad – demanda y fragilidad para estimar el daño en edificaciones .....   | 168 |   |     |

Figura 141. Centro de Salud 7 de Agosto..... 190

Figura 142. Susceptibilidad a remoción en masa y afloramientos de agua en la Quebrada La Toma..... 190

Figura 143. Estado de la quebrada a la altura del centro de salud 7 de Agosto .. 191

Figura 144. Desarrollos exteriores de vivienda precaria en la ribera del Río Las Ceibas..... 191

Figura 145. Áreas verdes en el escenario óptimo en la ciudad de Neiva ..... 192

Figura 146. Uso proyectado para la zona inundable del Río Las Ceibas..... 193

Figura 147. Uso proyectado para la zona de riesgo sísmico alto junto al Río Magdalena. .... 194

Figura 148. Localización dique de protección en el Río Las Ceibas ..... 194

Figura 149. Mapa regeneración urbana en el escenario de crecimiento óptimo 195

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Eventos registrados en la base de datos Desinventar.....   | 17 |
| Tabla 2 Impacto social según tipo de evento.....   | 18 |
| Tabla 3 Viviendas afectadas según tipo de evento.....  | 18 |
| Tabla 4 Pérdidas económicas en pesos colombianos.....  | 18 |
| Tabla 5 Infraestructura crítica afectada según tipo de evento.....   | 19 |
| Tabla 6 Comparativa por categoría según la base de datos Desinventar.....  | 19 |
| Tabla 7 Puntuaciones establecidas para cada criterio.....  | 21 |
| Tabla 8 Análisis multi-criterio para la selección de amenazas a estudiar.....  | 22 |
| Tabla 9 Estudios realizados en la zona urbana de Neiva.....  | 36 |
| Tabla 10 Listado de eventos del DesInventar.....   | 38 |
| Tabla 11 Listado de eventos del SIMMA para el municipio de Neiva.....  | 38 |
| Tabla 12 Pesos calculados para el análisis bivariante.....   | 42 |
| Tabla 13 Volúmenes de agua tratada y facturada en Neiva.....   | 54 |
| Tabla 14 Consumo per cápita en Neiva.....  | 54 |
| Tabla 15 Demanda de acueducto.....   | 54 |
| Tabla 16 Demanda de acueducto actual y en 2050.....  | 55 |
| Tabla 17 Categorías del índice de escasez.....   | 56 |
| Tabla 18 Índice de escasez actual, sin pérdidas en la red y con las pérdidas objetivo del Plan Maestro de Acueducto..... | 56 |
| Tabla 19 Modelos de la base CMIP 5 utilizados para la construcción de proyecciones de cambio climático.....              | 63 |
| Tabla 20 Emplazamiento de las estaciones meteorológicas.....   | 63 |
| Tabla 21 Índices extremos de la precipitación para la estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas.....                     | 66 |
| Tabla 22 Índices extremos de la precipitación para la estación 21115100 Palacio-Vegalarga.....                           | 67 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 23 Índices extremos de la precipitación para la estación 21110400 Santa Helena.....   | 67  |
| Tabla 24 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas..... | 68  |
| Tabla 25 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21115100 Palacio-Vegalarga.....       | 68  |
| Tabla 26 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21110400 Santa Helena.....            | 68  |
| Tabla 27 Número de curva para condición antecedente de humedad II según el uso del suelo y su grupo hidrológico. Tomado de Chow, 1994.....              | 71  |
| Tabla 28 Parámetros para el cálculo de abstracciones Río del Oro.....   | 76  |
| Tabla 29 Parámetros hidrológicos para la propagación del hidrograma en cada tramo del Río del Oro.....  | 77  |
| Tabla 30 Salidas para el periodo de retorno de 3 años Río del Oro.....  | 78  |
| Tabla 31 Salidas para el periodo de retorno de 25 años Río del Oro.....   | 78  |
| Tabla 32 Salidas para el periodo de retorno de 50 años Río del Oro.....   | 79  |
| Tabla 33 Salidas para el periodo de retorno de 100 años Río del Oro.....  | 79  |
| Tabla 34 Caudales de diseño Río Las Ceibas.....   | 79  |
| Tabla 35 Criterios de peligrosidad de calado máximo: referencias a nivel mundial.....   | 93  |
| Tabla 36 Criterios de peligrosidad de velocidad máxima: referencias a nivel mundial.....  | 93  |
| Tabla 37 Criterios de peligrosidad de calados (m) y velocidad (m/s): referencias a nivel mundial.....   | 94  |
| Tabla 38 Precios medios de construcción estimados para el cálculo del valor total expuesto en dólares por metro cuadrado.....                           | 110 |
| Tabla 39 Resultado del cálculo del valor expuesto para la inundación del Río del Oro.....   | 111 |
| Tabla 40 Cálculo de la PML para la inundación en el Río del Oro.....  | 114 |
| Tabla 41 Datos de cálculo de PML para la inundación del Río del Oro.....  | 115 |

Tabla 42 Datos de cálculo de la curva de excedencia de pérdidas para la inundación del Río del Oro ..... 115

Tabla 43 .Cálculo de la pérdida anual esperada (PAE) para el escenario actual . 116

Tabla 44 Número de personas en zona de riesgo por la amenaza de inundación del Río del Oro en el escenario actual ..... 119

Tabla 45 Número de viviendas en zona de riesgo por la amenaza de inundación del Río del Oro en el escenario tendencial ..... 119

Tabla 46.Esquema de las diversas fases que componen la estimación probabilista de la amenaza sísmica siguiendo un método zonificado..... 126

Tabla 47.Tabla de sismos históricos importantes con daños en ciudad de Neiva. .... 128

Tabla 48.Datos del sismo ocurrido el día 06 de febrero del presente año, sentido en Neiva. .... 130

Tabla 49.Ecuaciones de correlación aplicadas para la conversión de datos de magnitudes de ondas superficiales Ms y magnitudes de ondas internas Mb a magnitudes momento Mw. (Scordilis, 2006)..... 131

Tabla 50.Años de referencia establecidos a partir del análisis de completitud realizado para el presente estudio. .... 132

Tabla 51.Características del catálogo final de Colombia ..... 133

Tabla 52.Atributos contenidos en la tabla del catálogo ..... 133

Tabla 53. Tabla de fallas activas contenidas en zonas corticales y sus respectivos parámetros sísmicos. .... 139

Tabla 54. Características de los modelos de atenuación empleados en el estudio para las zonas de sismicidad cortical. .... 141

Tabla 55. Características de los modelos de atenuación utilizados para las zonas de Interplaca e Intraplaca (Subducción) ..... 141

Tabla 56. Sismos de control obtenidos por desagregación para un periodo de retorno de 475 años:..... 145

Tabla 57. Sismos de control obtenidos por desagregación para un periodo de retorno de 975 años:..... 145

Tabla 58. Escenarios sísmicos identificados para los dos ismos de control resultantes ..... 145

Tabla 59. Clasificación de suelo del NERHP. .... 146

Tabla 60. Factores de amplificación para diferentes tipos de suelo, periodos estructurales y valores de aceleración base. .... 147

Tabla 61. Normas de diseño sismo resistente de Colombia y Nivel de diseño sísmico. .... 162

Tabla 62. Descripción de tipologías constructivas identificadas en la ciudad de Neiva. .... 163

Tabla 63. Número de plantas establecido en las metodologías de Hazus y L&G para edificios de baja, mediana y elevada altura..... 166

Tabla 64. Correspondencia de nomenclatura de las curvas de capacidad y fragilidad seleccionadas con respecto a las tipologías constructivas de la ciudad de Neiva. .... 166

Tabla 65. Grados de daño, según RISK-UE (Milutinovic&Trendafiloski, 2003). ... 169

Tabla 66. Porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, dependiendo de la intensidad del movimiento. .... 170

Tabla 67. Porcentaje de víctimas por colapso en diferentes tipologías con distinto tipo de daño físico..... 171

Tabla 68. Porcentaje de personas atrapadas entre los escombros que mueren en función de la respuesta post-evento. .... 171

Tabla 69. Valores de construcción por clase social..... 172

Tabla 70. Superficie promedia de las viviendas en Neiva, por estrato social. .... 172

Tabla 71. Parámetros de la falla La Dina utilizados para la simulación del escenario 1..... 174

Tabla 72. Coordenadas X e Y del plano de ruptura generado..... 174

Tabla 73. Descripción de suelos utilizados en el estudio de atenuación de Zhao et. Al 2006 y su correspondencia con la clasificación de suelos del NEHRP. .... 176

Tabla 74. Parámetros del sismo asociado a la zona de subducción ..... 176

Tabla 75. Resultados de daño en viviendas para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva. .... 179

Tabla 76. Resultados de costes para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva. 179

Tabla 77. Resultados de víctimas para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva ..... 179

Tabla 78. Resultados de daño en viviendas para el escenario 2 (subducción, Mw 7.2) de Neiva. .... 181

Tabla 79. Resultados de costes para el escenario 2 (subducción, Mw 7.3) de Neiva. .... 181

Tabla 80. Resultados de víctimas para el escenario 2 (subducción, Mw 7.2) de Neiva. .... 181

Tabla 81 Número de viviendas en función del grado de daño ..... 184

Tabla 82 Número total de víctimas y costes estimados para los escenarios 1 (Mw 5.5) y 2 (Mw 7.2) ..... 185

Tabla 83 Resultado inversión ampliación del encauzamiento de la Quebrada La Toma ..... 189

## 1 INTRODUCCIÓN

El Objeto del presente documento es realizar una evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático y riesgo de desastre para la ciudad de Neiva.

Los objetivos prioritarios de este estudio son dos:

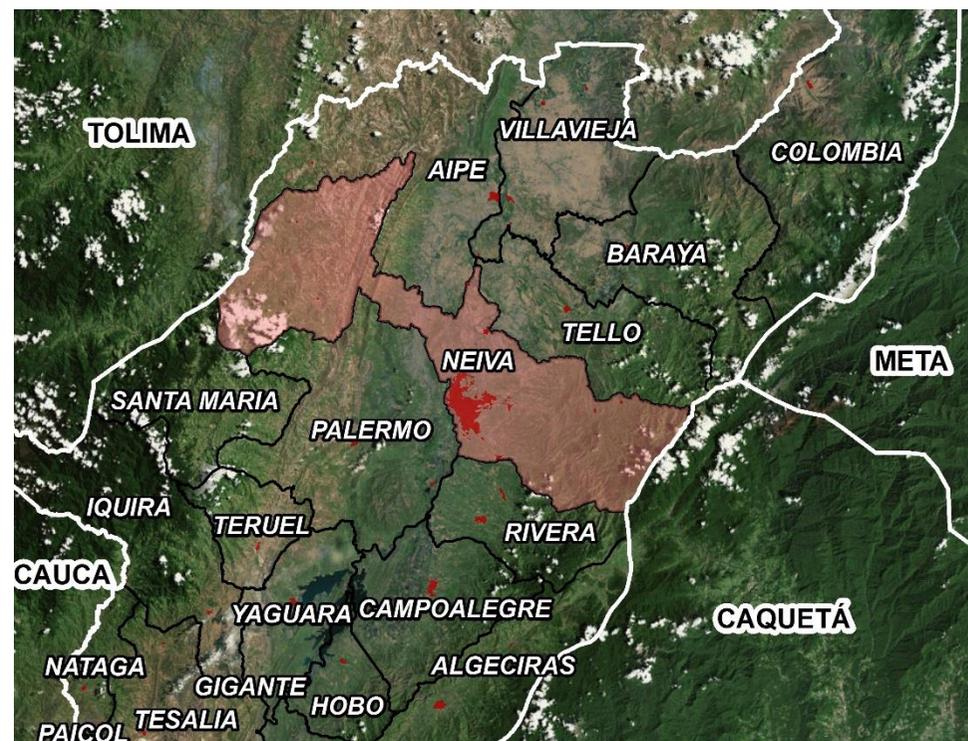
1. Análisis de riesgo y propuesta de medidas de mitigación que afecten a cualquiera de las componentes que lo forman, peligrosidad, exposición o vulnerabilidad de forma que se reduzca o se elimine en la medida de lo posible.
2. Establecer una zonificación de amenazas que sea un limitante al desarrollo urbano de forma que no se generen nuevas áreas de riesgo.

### 1.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Neiva se encuentra ubicado al norte del departamento Huila y limita al norte con los municipios de Aipe y Tello; al sur con los municipios de Rivera y Palermo; al oriente con el departamento del Caquetá y al occidente con el departamento del Tolima como se ilustra en la Figura 1.

El territorio municipal tiene una superficie total de 1.228 km<sup>2</sup>, que abarca desde la cordillera oriental hasta la cordillera central pasando por el Valle del Río Magdalena de los cuales 46 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana según información contenida en el POT.

Figura 1. Municipios vecinos de Neiva



Fuente: Elaboración propia

El área urbana de Neiva se encuentra ubicada a 326 km de Bogotá, sobre una planicie ubicada entre la Cordillera Central y Oriental entre los ríos las Ceibas y río del oro al costado oriental del Río Magdalena (ver Figura 2). Neiva es la capital del Departamento del Huila y principal centro administrativo, político, cultural y comercial de la región. Neiva se encuentra ubicada a 442 metros sobre el nivel del mar, su temperatura promedio es de 28°C y sus coordenadas geográficas son 2°55'39" N y 75°17'15" O.

Figura 2. Vista de la ciudad desde el río Magdalena



Fuente: <http://www.unimedicos.com>

Neiva fue fundada el 24 de mayo de 1612. La población total del municipio (urbana y rural) en la actualidad es de 344.130 habitantes (según proyecciones del DANE) de los cuales 324.466, equivalente al 94%, se localizan en la zona urbana y 19.664 habitantes en zona rural, equivalente al 6% del total de la población.

## 1.2 VALORACIÓN PROBABILÍSTICA DE RIESGOS NATURALES

El proceso de valoración o estimación de riesgos que se describe a continuación se basa en criterios propios del equipo técnico de IDOM, los cuales a su vez se apoyan principalmente en la metodologías de trabajo desarrolladas en el documento “*Multi-hazard risk assessment*”, versión 2011, de la Universidad de Naciones Unidas y el instituto holandés ITC

School on Disaster Geoinformation Management de la Universidad de Twente, Holanda, así como en el desarrollo metodológico propuesto en la plataforma CAPRA.

Cabe señalar que los estudios arrojan lineamientos generales para la planificación del territorio, acorde a la escala de intervención abordada, según lo estipulado en el contrato de consultoría No.26 de 2016 suscrito entre la Financiera de Desarrollo Territorial S.A e IDOM Ingeniería y Consultoría S.A.U; teniendo en cuenta lo anterior, aunque los estudios se convierten en herramienta fundamental de toma de decisiones, se recomienda al municipio adelantar estudios a una escala más detallada en caso de querer ejecutar intervenciones puntuales en las zonas de riesgo delimitadas por el presente estudio.

El análisis de riesgo (natural) es el proceso sistemático para comprender la naturaleza del riesgo y deducir diversas consecuencias desastrosas, de tal forma que constituye la base sobre la que planificar las políticas de gestión (emergencia, prevención, mitigación, etc.).

En líneas generales actualmente la evaluación de riesgos naturales se entiende como un proceso de análisis probabilístico basado en la siguiente secuencia de etapas:

- **Evaluación de amenazas**, entre las que cabe destacar, la sísmica, volcánica, deslizamientos, inundaciones fluviales y marinas, y otros de carácter ambiental como las sequías, etc. Dentro de la evaluación, varias están directamente relacionadas con el proceso de cambio climático en marcha por lo que este efecto debe ser considerado dentro de los posibles escenarios de estudio.

Como parte de la evaluación de las amenazas se debe considerar la frecuencia con la que un desastre natural con una intensidad concreta se puede producir. Este concepto aporta la variante probabilística al estudio.

- **Estudio de exposición**, en el que se evalúan la porción de edificios, infraestructuras y personas que eventualmente pueden sufrir daños debido a un desastre natural.
- **Estudio de vulnerabilidad**, que viene a representar el grado de daño que un edificio, infraestructura o grupo humano puede sufrir en relación con un desastre natural de una intensidad concreta.

- **Análisis de riesgos**, representa el valor monetario del daño probabilísticamente calculado a edificios, infraestructuras o seres humanos.
- **Gestión del riesgo**, las distintas formas de gestión de los riesgos derivados de las amenazas naturales que se pueden implementar destinados a minimizar los daños o facilitar la recuperación de la comunidad tras un desastre natural. Ejemplos pueden ser: la instalación de sistemas de pre-aviso, programas de concienciación de la población, obras de ingeniería, reubicación de poblaciones amenazadas, contratación de coberturas de seguro, etc.

A nivel internacional se pueden presentar las siguientes definiciones para los parámetros principales que componen el proceso de valoración de riesgos naturales<sup>1</sup>.

- **Amenaza, Peligro o Peligrosidad:** Probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un área (lugar) dada.
- **Elementos en Riesgo o Exposición:** Son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, la infraestructura expuesta a un área de peligro.
- **Vulnerabilidad:** Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 a 1, o pérdida total.
- **Riesgo Específico:** Grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.

<sup>1</sup> Definiciones propuestas por la Oficina de Naciones Unidas para Coordinar el Socorro y Desastres (UNDRO en inglés) en su informe de 1979 "Natural disasters and vulnerability analysis". La UNDRO fue reemplazada posteriormente por Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD).

- **Riesgo:** Número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir, el producto del riesgo específico, y los elementos en riesgo.

Lo cierto es que múltiples fuentes han propuesto definiciones para estos conceptos básicos del proceso de valoración de riesgos naturales, cada una con ligeros matices de significado, de tal forma que la propia Naciones Unidas presentó en 2009 una propuesta actualizada<sup>2</sup> de terminología en la que destacaban los siguientes términos:

- **Amenaza Natural:** Proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **Vulnerabilidad:** Características y las circunstancias de una comunidad, sistemas o bienes que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.
- **Desastre:** Seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos.
- **Riesgo:** Combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas.

Volviendo a la secuencia presentada anteriormente respecto al proceso de evaluación sistemática de riesgos naturales, cabe ampliar las explicaciones respecto a las etapas clave:

- a. Evaluación de amenazas;

<sup>2</sup> Documento: Terminología sobre reducción del riesgo de desastre" EIRD 2009.

- b. Evaluación de vulnerabilidad, y
- c. Cálculo de riesgo.

Brevemente se puede comentar que la base de la evaluación de las **amenazas** suele ser un registro de fenómenos y desastres naturales registrados, tal como se ha intentado recopilar en esta ocasión. Cuantitativamente la amenaza se puede definir como  $P(mi)$ , equivalente a la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de un evento ( $i$ ), expresado como %/año, de una magnitud ( $mi$ ), definida por parámetros como profundidad, velocidad, volumen, energía, etc.

En cuanto a la **vulnerabilidad**, esta determina el nivel de exposición y predisposición de daños y pérdidas ante una amenaza específica. Consiste en la identificación y evaluación de los elementos vulnerables y la estimación del porcentaje de pérdidas resultantes de una amenaza o fenómeno peligroso. Se puede identificar como  $V(mi)$  o porcentaje del valor monetario expuesto, en moneda ( $w$ ), que se perdería ante el impacto de un evento  $i$  de magnitud  $m$ .

Finalmente, el cálculo del **riesgo** consiste en estimar las pérdidas probables para los diferentes eventos peligrosos posibles, mediante un proceso de relación entre amenazas identificadas y vulnerabilidades estimadas con el fin de determinar las consecuencias sociales, económicas y ambientales. En este caso estamos incorporando el valor monetario de los daños sufridos por el elemento o sistema, es decir, grupo de elementos, objeto de análisis. Si el valor del sistema se define como  $W(\$)$ , la expresión matemática del riesgo que venimos desarrollando se plasmaría de la siguiente forma:

$$R_i = P(m_i) \times V(m_i) \times W \text{ medido en } \$/\text{año}$$

Donde,

$R_i$ : Riesgo;

$P(m_i)$ : Probabilidad de Ocurrencia;

$V(m_i)$ : Vulnerabilidad, y

$W$ : Valor Actual del Bien

En cuanto a la expresión matemática de riesgo, la bibliografía igualmente presenta diversidad de ecuaciones cada una con ligeros matices diferenciales, entre las que se podrían incluir, a título de ejemplo, las incluidas en la Guía de evaluación de riesgos naturales de la Universidad de Naciones Unidas-ITC:

Cualitativa:

**Riesgo = Amenaza x Vulnerabilidad / Capacidad o resiliencia;**

Añadiendo de esta forma la capacidad del sistema o sociedad para sobreponerse a las posibles consecuencias desastrosas, y

Cuantitativa:

**Riesgo = Amenaza x Vulnerabilidad x N° Elementos-en-riesgo (o expuestos)**

Esta guía presenta la siguiente expresión matemática para el riesgo específico ( $R_s$ ):

**$R_s = P_T \times P_L \times V \times A$** ; donde

- $P_T$**  equivale a la probabilidad temporal (p.e. anual) de ocurrencia de un escenario de peligro específico ( $H_s$ ) con un periodo de retorno concreto;
- $P_L$**  es la probabilidad espacial de ocurrencia de un escenario de peligro específico con un periodo de retorno concreto en un área dentro de la que se encuentren los elementos expuestos;
- $V$**  representa la vulnerabilidad física, definida como el grado de daño sufrido por los elementos expuestos, considerando la intensidad local causada por la ocurrencia de un peligro específico  $H_s$ ; y
- $A$**  coincide con el número de elementos de un tipo específico en riesgo o expuestos.

Respecto a este último parámetro, la guía destaca la importancia de entender que la cantidad o número se puede definir de diversas maneras, que a su vez repercuten en la expresión cuantitativa del riesgo. Por ejemplo, la cantidad se puede dar en números, tal como el número de edificios (que pueden sufrir un daño), personas (heridas, fallecidas o afectadas), tramos de tubería rotos por kilómetro, etc. Igualmente, y coincidiendo con la primera definición citada del riesgo, los elementos-en-riesgo o expuestos se pueden cuantificar como valor monetario, siendo esta la alternativa elegida en el presente documento de acuerdo con el enfoque histórico aplicado en estos proyectos.

La consideración del riesgo específico es importante como concepto elemental y parcial del cálculo probabilístico para un periodo de recurrencia e intensidad de la amenaza concretos. Sin embargo, de acuerdo a la metodología de trabajo elegida para este tipo de estudio igualmente en este caso se trabajará en términos de riesgo global o completo, realizando la interpolación e integración matemáticas de los resultados parciales obtenidos para cada cálculo específico dado que mediante estas operaciones se obtiene el riesgo probabilístico.

Como primer paso en el proceso de evaluación de riesgos se realizará a continuación la selección de las amenazas relevantes.

## 2 ENCUADRE GENERAL

Se analizan en los siguientes apartados aspectos generales para el desarrollo del estudio, tanto en relación con las principales amenazas potenciales en la zona como su relación con el marco físico en el que se encuadran.

### 2.1 SELECCIÓN DE AMENAZAS

El objeto de este estudio es estudiar las tres amenazas más importantes de la ciudad de Neiva, teniendo en cuenta, no solamente el nivel de afección que producen en términos de coste de reposición o de personas afectadas sino también otros parámetros como el impacto en el desarrollo urbano o el grado de estudio y de análisis existente de las amenazas, es decir, el objetivo final es cubrir esas amenazas menos estudiadas o sobre las que se tiene menor grado de conocimiento, para no ser redundantes con otros estudios ya realizados previamente y que igualmente se tendrán en cuenta en el presente análisis.

Las amenazas a estudiar serán también aquellas para las que se cuente con suficiente evidencia instrumental (registros) que permita su análisis por medio de modelos matemáticos probabilistas o de susceptibilidad.

Para ello, en la evaluación de amenazas y cálculo de riesgos desarrollados en este documento se tomarán en cuenta las siguientes variables que servirán para identificar las principales amenazas naturales a considerar para el área de estudio de Neiva:

- Daños y pérdidas históricas más importantes.
- Eventos naturales más importantes documentados.
- Información disponible que permita llevar a cabo la modelación probabilística de las amenazas naturales empleando metodologías científicas o análisis de susceptibilidad, con el uso de herramientas de cálculo.
- Utilidad de los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto para permitir llevar a cabo el análisis probabilista o de susceptibilidad por riesgos naturales, así como ser de utilidad para las siguientes etapas del estudio: planeación y crecimiento urbano, así como ordenamiento territorial.

Resulta preciso destacar el estudio adicional de una cuarta amenaza, en este caso la de inundación, de forma que han sido cuatro las amenazas analizadas finalmente.

#### 2.1.1 Registro histórico de eventos

Entre otras fuentes se ha consultado la base de datos DESINVENTAR (<http://online.desinventar.org/>). Esta base se empezó a construir a partir de 1994 por parte de grupos de investigadores, académicos y actores institucionales, agrupados en la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), que concibieron un sistema de adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres de pequeños, medianos y grandes impactos, con base en datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones en nueve países de América Latina. Esta concepción, metodología y herramienta de software desarrolladas se denominan Sistema de Inventario de Desastres DesInventar.

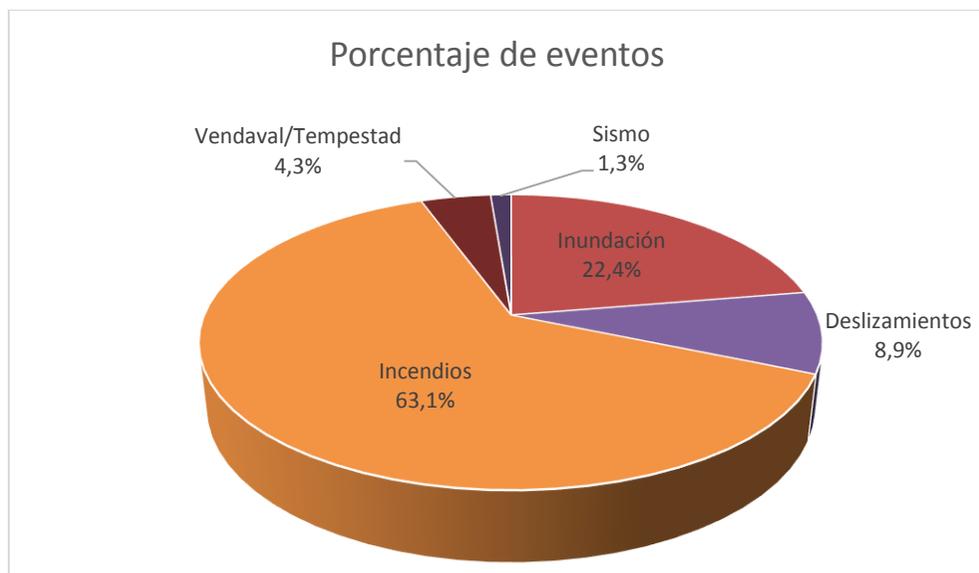
En la Tabla 1 y la Figura 3 se representan los eventos registrados en la mencionada base de datos, con un total de 305 de los cuales 248 (81.3%) corresponden a incendios, 88 (28.9%) a inundación, y 35 (11.5%) a deslizamientos.

Tabla 1 Eventos registrados en la base de datos Desinventar

| Evento                    | Nº fichas | %     | Recurrencia |
|---------------------------|-----------|-------|-------------|
| <b>Inundación</b>         | 88.0      | 22.4  | 0.89        |
| <b>Deslizamientos</b>     | 35.0      | 8.9   | 0.35        |
| <b>Incendios</b>          | 248.0     | 63.1  | 2.51        |
| <b>Vendaval/Tempestad</b> | 17.0      | 4.3   | 0.17        |
| <b>Sismo</b>              | 5.0       | 1.3   | 0.05        |
| <b>TOTAL</b>              | 305.0     | 100.0 | -           |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DesInventar (<http://online.desinventar.org/>)

Figura 3. Posición relativa según tipo de amenaza según los datos de Desinventar



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Desinventar

Sin embargo el simple análisis del porcentaje de eventos, como el que se muestra en la figura anterior, no es por si solo indicativo de su importancia relativa, ya que pueden ser eventos con pocas consecuencias desde el punto de vista social y económico. Por esto es muy importante analizar otras variables como personas afectadas, muertes (Tabla 2), viviendas afectadas (Tabla 3), costes económicos (Tabla 4) o infraestructura crítica afectada (Tabla 5).

Tabla 2 Impacto social según tipo de evento

| Evento             | Muertos | Desaparecidos | Heridos; enfermos | Afectados | Damnificados |
|--------------------|---------|---------------|-------------------|-----------|--------------|
| Inundación         | 22.0    | 1.0           | 561.0             | 27,863.0  | 7,032.0      |
| Deslizamientos     | 8.0     | 0.0           | 4.0               | 502.0     | 0.0          |
| Incendios          | 0.0     | 0.0           | 6.0               | 235.0     | 200.0        |
| Vendaval/Tempestad | 1.0     | 135.0         | 15.0              | 4,409.0   | 0.0          |
| Sequía             | 0.0     | 0.0           | 0.0               | 2,500.0   | 0.0          |
| Sismo              | 59.0    | 0.0           | 0.0               | 0.0       | 1.0          |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Desinventar

Tabla 3 Viviendas afectadas según tipo de evento

| Evento             | Viviendas afectadas | Viviendas destruidas |
|--------------------|---------------------|----------------------|
| Inundación         | 1,595.0             | 1,502.0              |
| Deslizamientos     | 55.0                | 111.0                |
| Incendios          | 2.0                 | 73.0                 |
| Vendaval/Tempestad | 271.0               | 442.0                |
| Sequía             | 0.0                 | 0.0                  |
| Sismo              | 0.0                 | 0.0                  |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Desinventar

Tabla 4 Pérdidas económicas en pesos colombianos

| Evento             | Valor pérdidas \$ |
|--------------------|-------------------|
| Inundación         | 10,631,143.0      |
| Deslizamientos     | 1,300,000.0       |
| Incendios          | 599,252,672.0     |
| Vendaval/Tempestad | 1,000,000.0       |
| Sequía             | 0.0               |
| Sismo              | 0.0               |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Desinventar

Tabla 5 Infraestructura crítica afectada según tipo de evento

| Evento             | Transporte | Comunicaciones | Instalaciones de socorro | Agropecuaria | Acueducto | Alcantarillado | Educación | Energía | Industrias | Salud |
|--------------------|------------|----------------|--------------------------|--------------|-----------|----------------|-----------|---------|------------|-------|
| Inundación         | 20         | 3              | 0                        | 18           | 18        | 1              | 3         | 3       | 0          | 2     |
| Deslizamientos     | 12         | 0              | 0                        | 0            | 4         | 0              | 0         | 0       | 0          | 0     |
| Incendios          | 2          | 0              | 0                        | 3            | 0         | 0              | 1         | 0       | 1          | 1     |
| Vendaval/Tempestad | 3          | 0              | 0                        | 1            | 0         | 1              | 1         | 2       | 0          | 0     |
| Sequía             | 0          | 0              | 0                        | 3            | 1         | 0              | 0         | 2       | 0          | 0     |
| Sismo              | 0          | 1              | 0                        | 0            | 0         | 0              | 0         | 2       | 0          | 0     |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DesInventar

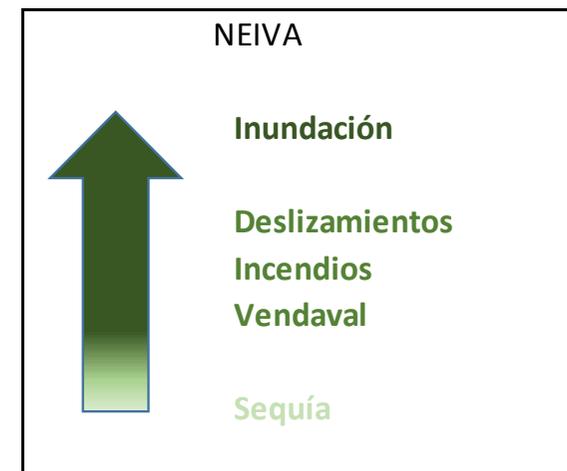
Una vez analizados estos datos y para facilitar la comparación entre las distintas amenazas, se muestra en Tabla 6 la posición relativa según categoría: frecuencia (número de eventos entre el número de años con datos), social (personas afectadas y muertes), viviendas afectadas, pérdidas económicas, afección a infraestructura crítica (Transporte, acueducto, alcantarillado, energía, salud, educación, etc) con los siguientes resultados:

Tabla 6 Comparativa por categoría según la base de datos DesInventar

|                           | Posición relativa por categoría |        |           |            |                 | Global |          |
|---------------------------|---------------------------------|--------|-----------|------------|-----------------|--------|----------|
|                           | Frecuencia                      | Social | Viviendas | Económicos | Infraestructura | MEDIA  | POSICIÓN |
| <b>Inundación</b>         | 2                               | 1      | 1         | 2          | 1               | 1.4    | <b>1</b> |
| <b>Deslizamientos</b>     | 3                               | 4      | 3         | 3          | 2               | 3.0    | <b>2</b> |
| <b>Incendios</b>          | 1                               | 5      | 4         | 1          | 4               | 3.0    | <b>2</b> |
| <b>Vendaval/Tempestad</b> | 4                               | 2      | 2         | 4          | 3               | 3.0    | <b>2</b> |
| <b>Sequía</b>             | 5                               | 3      | 5         | 5          | 5               | 4.6    | <b>3</b> |
| <b>Sismo</b>              | 5                               | 6      | 5         | 5          | 6               | 5.4    | <b>4</b> |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DesInventar

Figura 4. Posición relativa según tipo de amenaza según los datos de DesInventar



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DesInventar

### 2.1.2 Reuniones mantenidas con los principales actores

Se resumen a continuación las reuniones mantenidas con los principales actores, en temas de riesgo, con el objeto de aprovechar el conocimiento adquirido de la situación del municipio en cuanto a desastres naturales, y definir conjuntamente las principales amenazas naturales, los estudios existentes y la necesidad de estudios adicionales, sobre todo teniendo en cuenta la necesidad de incluir estudios de riesgos naturales en el POT.

#### DEFENSA CIVIL

En la Defensa Civil indican que no se cuenta con una base de datos con los desastres o las emergencias atendidas. Indican que les preocupa el tema de la sequía, si bien, no ha habido desabastecimiento sí ha habido situación de alarma, ya que considera que la época seca se está prolongando cada año.

### **CORPORACIÓN AUTÓNOMA DEL ALTO MAGDALENA (CAM)**

En la Corporación indican que han venido adelantando estudios de amenazas naturales en Neiva. La amenaza de deslizamientos la tienen estudiada en tres centros poblados pero no en la zona urbana ni en las áreas de expansión. Las inundaciones consideran que están suficientemente estudiadas en la zona urbana, tienen estudios de inundación relativamente recientes de las principales quebradas y ríos. El río del Oro y la quebrada La Toma, están encauzados, con la aprobación de la CAM, por lo que no ven de utilidad volver a analizarlos.

Con esto, se llega a la conclusión de que es más interesante un estudio de sequía urbana que de inundaciones, que lo consideran cubierto y válido como estudios básicos para la realización de un POT en zona urbana.

Por otro lado consideran interesante y necesario un estudio probabilístico del riesgo sísmico en la ciudad.

### **GESTIÓN DEL RIESGO DEPARTAMENTAL**

En la Oficina de Gestión del Riesgo Departamental exponen que se realizó a gran escala un Plan Departamental del Riesgo, que está recogido en el anterior POT.

Indican a su vez que los estudios más detallados de la ciudad son los que tienen la Corporación, en la oficina no tiene otros diferentes.

En Gestión del Riesgo Departamental abastecen la base de datos DesInventar con los eventos registrados en el departamento.

#### **2.1.3 Análisis multicriterio**

Para la selección de las cuatro amenazas principales a estudiar en el presente estudio se ha realizado un análisis multi-criterio, para facilitar la comparación y la priorización de ellas.

Se han tenido en cuenta distintos criterios principales a la hora de definir las amenazas a estudiar, dándole distintos pesos en función a su importancia relativa en la toma de decisión de las amenazas a estudiar.

El primer criterio que se tiene en cuenta ha sido la frecuencia o recurrencia de la amenaza, por motivos obvios, desde el económico donde las frecuencias más altas tienen mayor incidencia en la Pérdida Máxima Probable (PAE), hasta el social donde los eventos más recurrentes producen mayores estragos en la población afectada, pudiendo ser un motivo de segregación social. La clasificación le da mayor valor a las amenazas más recurrentes, en este caso las de ocurrencia anual, con un valor de 3, las de ocurrencia cada dos años se puntúan con un valor de 2 y con un valor de 1 las menos frecuentes cuya frecuencia supera los dos años. Aquí no se tiene en cuenta el valor de los impactos, ya que se pretende puntuar por separado el criterio de impacto del de frecuencia. Una amenaza recurrente podría en conjunto tener una puntuación baja si los impactos que produce son muy bajos.

El segundo criterio pretende reflejar la afección que causan estas amenazas, siendo esta el área afectada por la amenaza en relación al área total urbanizada, estos son valores aproximados, dándole una puntuación de 1 a 3, siendo 1 una afección menor al 5% de la superficie afectada, 2, mayor al 10% y 3 mayor a este valor.

La siguiente variable analizada va en el mismo sentido que la anterior, ya que está relacionada con las consecuencias de estos eventos amenazantes, este es el criterio de impacto potencial, se ha pretendido tener en cuenta no solo los impactos económicos sino los costes sociales, teniendo en cuenta las personas afectadas en los eventos que ya han sucedido. La valoración es relativa, ya que se pretende en este apartado no es obtener un valor de las pérdidas sino priorizar las distintas amenazas que se dan en Neiva, por lo que el valor que se le ha dado ha sido alto, medio y bajo.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de estudiar una u otra amenaza, son los datos de partida con los que se cuentan, ya que cuanto mejores sean estos, más fiables serán los resultados y más fácil será tomar decisiones en función a ellos. Por ejemplo una misma resolución de MDT puede ser aceptable para realizar un estudio de remoción en masa pero puede ser inaceptable para hacer un estudio hidráulico si no representa el cauce con cierta

precisión. Aquí se ha puntuado una vez más de 1 a 3, siendo 1 los datos de partida de peor calidad y 3 los de mejor calidad.

El cuarto criterio es la importancia que tiene la amenaza en la zonificación urbana, es decir, la importancia que tiene su conocimiento para evitar la construcción de riesgo en los nuevos desarrollos urbanos

Y el último criterio tenido en cuenta es el nivel de análisis de las amenazas, lo que se pretende en este punto es aportar nuevos datos y no ser redundantes con otros estudios ya realizados, obteniéndose una clasificación para cada uno de los peligros asociados.

En la Tabla 7 se muestra las puntuaciones establecidas para cada criterio.

Por último se ha ponderado cada criterio por su valor relativo, por ejemplo los impactos se podrían haber clasificado en distintas variables, y no por ello deberían tener mayor valor, en este caso se ha dividido en área afectada e impactos potenciales, dándoles a ambos un peso relativo de 1, mismo valor que se le ha dado a los datos de partida, la frecuencia se le ha dado un peso de 1.5, ya que tiene mucha importancia a la hora de clasificar el nivel de riesgo y además no hay más criterios relacionados, por último al nivel de análisis se le ha dado el mayor peso, ya que incluso en el caso de que sean muy buenos los datos de partida y muy frecuentes y graves los impactos de una amenaza, no supondría ningún aporte estudiarla si ya se ha estudiado anteriormente, o al menos, aportaría menos valor respecto al estudio de otra amenaza no estudiada. Igual peso (2) se le ha dado la importancia de la amenaza en el desarrollo urbano.

Tabla 7 Puntuaciones establecidas para cada criterio

|                                      |   |                   |
|--------------------------------------|---|-------------------|
| <b>Frecuencia</b>                    | 1 | Más de 2 años     |
|                                      | 2 | Cada 2 años       |
|                                      | 3 | Anual             |
| <b>Área afectada</b>                 | 1 | <5%               |
|                                      | 2 | >5%               |
|                                      | 3 | >10%              |
| <b>Impactos potenciales</b>          | 1 | Bajos             |
|                                      | 2 | Medios            |
|                                      | 3 | Altos             |
| <b>Datos de partida</b>              | 1 | Malos             |
|                                      | 2 | Intermedios       |
|                                      | 3 | Buenos            |
| <b>Importancia desarrollo urbano</b> | 1 | Bajos             |
|                                      | 2 | Medio             |
|                                      | 3 | Alto              |
| <b>Nivel de análisis</b>             | 1 | Alto              |
|                                      | 2 | Preliminar        |
|                                      | 3 | Incompleto o nulo |

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se muestran los resultados de este análisis, siendo la posición relativa de las amenazas clasificadas la siguiente:

1. Deslizamientos
2. Sequía
3. Sismo
4. Inundaciones

Tabla 8 Análisis multi-criterio para la selección de amenazas a estudiar

| AMENAZA \ VARIABLE | Frecuencia | Área afectada | Impactos potenciales | Calidad datos de partida | Importancia desarrollo urbano | Nivel de análisis | Puntuación total | Posición relativa |
|--------------------|------------|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Peso               | 1.5        | 1             | 1                    | 1                        | 2                             | 2                 |                  |                   |
| Inundación         | 2          | 1             | 1                    | 3                        | 2                             | 1                 | 14               | 4                 |
| Deslizamientos     | 3          | 2             | 2                    | 3                        | 3                             | 1                 | 19.5             | 1                 |
| Incendios          | 1          | 2             | 1                    | 2                        | 1                             | 2                 | 12.5             | 6                 |
| Vendaval/Tempestad | 1          | 3             | 1                    | 2                        | 1                             | 2                 | 13.5             | 5                 |
| Sequía             | 2          | 2             | 2                    | 2                        | 2                             | 3                 | 19               | 2                 |
| Sismo              | 1          | 1             | 3                    | 3                        | 3                             | 2                 | 18.5             | 3                 |

Fuente: Elaboración propia

Para la toma de decisión sobre las amenazas a estudiar se ha tenido muy en cuenta el criterio del municipio y de las autoridades responsables del riesgo, así como de todos los actores que han participado en las distintas reuniones mantenidas en Neiva.

## 2.2 MARCO GEOLÓGICO

### 2.2.1 Unidades Litoestratigráficas

A continuación se describen las principales unidades litológicas existentes en el municipio de Neiva.

#### ➤ PROTEROZOICO

##### Complejo Aleluya (Pea):

Se utiliza el nombre de Complejo Aleluya para describir las rocas metamórficas e ígneas que por sus relaciones complicadas no es posible separar cartográficamente.

Se asocian a la Formación Payandé; Fuquen y Núñez (1989) la denominan “Mármoles y Rocas Asociadas”, y en la cartografía de INGEOMINAS (1989) aparece como xenolitos, que corresponden parcialmente a la presente cartografía dan topografía abrupta con escarpes muy inclinados; eventualmente se distingue paisaje kárstico. La unidad está constituida por una asociación de mármoles, metareniscas, cuarcitas y rocas ígneas que intruyen las rocas metamórficas sin relación ordenada.

Por lo regular, están bien cristalizados, con tamaño de grano medio a grueso, con predominio de este último, indiferentemente del color. Mineralógicamente constan casi que esencialmente de calcita, en dos posibles fases de cristalización, como se desprende del análisis microscópico.

Las cuarcitas y metareniscas son de color gris oscuro, con brillo rojizo cuando hay presencia de biotita, estratificadas en bancos potentes entre 3 y 5 m de espesor. Constan esencialmente de cuarzo granoblástico, con aspecto de mosaico; algunas veces exhiben diópsido, plagioclasa, cuarzo, Tanto las cuarcitas como metareniscas contienen moscovita y biotita, que pueden indicar metamorfismo regional facies esquistoso verde.

De acuerdo con esta relación, la secuencia original debió ser entonces clástica calcárea, con intercalaciones arenosas y lodosas (bandas biotíticas en algunas metareniscas), afectada por un evento metamórfico regional; posteriormente sufrió metamorfismo de contacto por el emplazamiento del Batolito, aflorante al este, y cuyos apófisis se muestran como un enrejado complejo de diques y pequeños cuerpos que cruzaron indiscriminadamente la secuencia metasedimentaria.

El Complejo Aleluya está en contacto al oeste con la Formación Saldaña, a través de la Falla El Chimborazo, mientras que hacia el este y norte está intruido por el Batolito.

Se asume edad proterozoica para las rocas del Complejo Aleluya, tal como lo establecen Fuquen & Núñez (1989).

##### Granulitas (Peg)

Cuerpos pequeños de granulitas se presentan como xenolitos dentro del Monzogranito de Algeciras, en las estribaciones de la Cordillera Oriental, especialmente en la quebrada La

Ulloa, en el puente del carretero que lleva a cerro Neiva (8H); están intensamente cizalladas por efectos de la falla que levanta la Cordillera Oriental en este sector.

La roca dominante es de color rosado, grano medio a grueso, con bandeamiento, y constituida por cuarzo y feldespato potásico, como minerales esenciales, y un mineral oscuro inidentificable por la alteración; aparentemente se trata de un ortopiroxeno; como accesorios se presenta biotita y circón. La textura es granoblástica a holocristalina hipidiomórfica inequigranular, con cristales de cuarzo ahumado elongados en la dirección del bandeamiento. En algunos afloramientos se intercalan anfibolitas y neises anfibólicos

### ➤ PALEOZOICO

#### Lodolitas de cerro Neiva (Pzcn)

Intercalaciones de lodolitas calcáreas, areniscas y calizas con leve metamorfismo de contacto, que aflora al suroeste de Neiva, en el cerro del mismo nombre.

La secuencia expuesta en la carretera Neiva-Caguán-Cerro Neiva puede ser dividida en tres segmentos, cada uno de ellos con un espesor promedio de 150 m, para un total de 450 m; de base a techo su descripción es:

*Segmento A.* En los primeros 150 m predominan calizas esparíticas, gris claro a verde, con leve marmorización, ocasionada por efectos de contacto, estratificadas en capas gruesas y con venillas rellenas de calcita; se observan intercalaciones menores de limolitas silíceas grises, estratificadas en capas medias a delgadas, plano paralelas, algo recrystalizadas, y contienen abundante pirolusita.

*Segmento B.* La parte media de la secuencia, de aproximadamente 150 m de espesor, consta de lodolitas físlas, levemente metamorfoseadas, de color gris oscuro y laminación ondulosa delgada, con intercalaciones de limolitas silíceas de color gris oscuro con laminación interna no paralela. Se reportan algunos paquetes de areniscas cuarzosas de grano medio, color blanco amarillento, estratificadas en capas medias y areniscas subarcósicas color blanco a gris, estratificadas en capas medias. Las areniscas también exhiben leve recrystalización.

*Segmento C.* El tercio superior se inicia con una capa gruesa de arenisca cuarzosa de grano medio, tono amarillento y continúa con intercalaciones de lodolitas calcáreas en láminas medias, color gris claro con pirta diseminada; calizas gris oscuro en capas medias a gruesas, laminación muy delgada y venillas de calcita; micritas fosilíferas empaquetadas, color gris claro a oscuro. Hacia la parte más superior se encuentran lodolitas gris oscuro con laminación interna ondulosa a flaser, limolitas silíceas en capas delgadas, con laminación interna plano paralela y esporádicos niveles de areniscas cuarzosas blancas de grano medio y cemento silíceo.

Toda la secuencia se encuentra cortada por apófisis monzograníticos y diques de composición andesítica a dacítica, que ocasionan marmorización en las calizas y recrystalización en lodolitas, areniscas y limolitas.

Las lodolitas de Cerro Neiva están afectadas por leve metamorfismo de contacto, lo que evidencia contacto intrusivo con el Monzogranito de Algeciras. El contacto superior es discordante con lodolitas tobáceas rojo-violetas de la Formación Saldaña.

### ➤ MESOZOICO

#### Formación Saldaña (Js)

Secuencia volcano-sedimentaria conocida anteriormente como Post-Payandé que aflora en el Valle Superior del Magdalena.

La Formación Saldaña, en el área, es intruida por el Batolito y el Monzogranito de Algeciras con desarrollo de leve metamorfismo de contacto. De otra parte, la Formación Caballos la cubre discordantemente como se observa en la loma Guaduas Pintadas (4H). En otros sitios existe relación fallada con las rocas del Complejo Aleluya y de la Formación Caballos. Predominan las rocas ígneas efusivas, especialmente piroclásticas, flujos de lava y algunos cuerpos hipoabisales;

**Rocas piroclásticas:** Están representadas por tobas vítreas, de cristales y líticas, con predominio de las primeras, y aglomerados. Los colores más frecuentes son violeta, de tonos claros y oscuros, rosado, verde y gris, para las tobas, y ocre para los aglomerados. Las tobas se encuentran en paquetes de espesor variable, generalmente de más de 1 m de

espesor, forman secuencias que alcanzan varias decenas a cientos de metros de potencia, sin que se puedan levantar secciones estratigráficas debido a la falta de niveles guías. El tamaño de grano de las tobas varía entre medio y fino; frecuentemente se observan, macroscópica y microscópicamente, estructuras de flujo y amígdalas rellenas de calcedonia. En algunos afloramientos se observa diaclasado columnar.

Composicionalmente las tobas son andesitas a dacitas de textura fanerítica y porfirítica, conformadas por fenocristales de plagioclasa, normalmente muy alterados a sericita y saussurita, así como feldespato potásico difícil de identificar por el grado de alteración a caolín y otros minerales arcillosos. Algunas veces está ausente y en otras es muy abundante, por lo que cuando se meteoriza la roca da lugar a unos suelos caoliníticos de color blanco que se destacan bastante en el paisaje.

Los fragmentos de roca, en las tobas líticas, son también rocas volcánicas con estructuras amigdaláceas y texturas afaníticas y porfiríticas. La matriz es vítrea o micro cristalina, comúnmente con estructuras de flujo, vesículas y amígdalas; cuando la matriz es vítrea está totalmente desvitrificada

**Aglomerados volcánicos:** Se trata de rocas de color ocre con amígdalas de tamaño variable entre 1 cm a 5 cm de diámetro, de formas ovaladas, algunas rellenas y otras con el material que las ocupaba disuelto.

El relleno es cuarzo y calcedonia. Los fragmentos constituyentes son angulares, subangulares y muchos con formas redondeadas debido a procesos de corrosión por la matriz. El tamaño de los fragmentos líticos constituyentes es muy variable, y se reportan desde pocos centímetros hasta 20-30 cm de diámetro mayor; su composición es andesítica de texturas afaníticas y porfiríticas, con estructuras traquíticas o fluidales, presentándose en ocasiones texturas amigdaláceas. La matriz es afanítica a ligeramente porfirítica. El espesor de los paquetes es difícil de establecer, pero la zona en donde predomina la potencia debe ser mayor de 70 m.

**Lavas:** se trata de rocas faneríticas finas a muy finas que al microscopio muestran texturas holocristalinas porfídicas, microporfídicas y traquíticas, y hialocristalinas, menos abundantes. Las rocas, normalmente, muestran alteración por meteorización de los

minerales primarios, por lo que es difícil identificar la composición de los feldespatos. Están compuestas por plagioclasa, tanto en fenocristales, microfenocristales y en la matriz, con intensa alteración a sericita y saussurita.

**Rocas hipoabisales:** Son cuerpos pequeños de máximo 1 km<sup>2</sup> de exposición y diques de composición andesítica a dacítica que no se diferenciaron en el mapa geológico debido a su tamaño. Son rocas porfiríticas de matriz fanerítica fina a afanítica de color gris a gris verdoso. Están compuestas por fenocristales de plagioclasa con cantidades menores de cuarzo y algunas veces hornblenda y quizás piroxeno.

### Monzogranito de Algeciras (Ja)

El plutón intruye las lodolitas paleozoicas y las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Saldaña y contiene xenolitos de rocas granulíticas proterozoicas. Se encuentra en relación fallada con sedimentitas paleógenas y neógenas, y depósitos cuaternarios lo cubren discordantemente.

Macroscópicamente se observa una roca holocristalina, de color gris, con tonalidades rosadas, de grano medio, ocasionalmente grueso.

Los minerales esenciales son cuarzo (5-17%), plagioclasa (35-60%), feldespato potásico (19-41%), biotita (2%), hornblenda (3%) y clinopiroxeno (2-3%). Como accesorios se observan opacos, circón, apatito y esfena. Sericita, clorita y epidota son los productos de alteración más frecuentes.

### Formación Caballos (Kc)

Compuesta por capas muy gruesas a delgadas de areniscas con intercalaciones de lodolitas carbonosas, que se vuelven predominantes hacia el techo. Las areniscas de la base son cuarzo feldespáticas, con bajo porcentaje de líticos (tobáceos oscuros), de grano muy grueso y de color blanco a pardo, estratificadas en capas medias a muy gruesas. En la parte media las areniscas son cuarzosas, tienen estratificación cruzada y flaser, laminación delgada, ondulosa paralela y no paralela. Gradualmente, hacia el techo de la secuencia, las areniscas son de grano fino, cuarzosas, y con 5% a 10% de glauconita; hay niveles ferruginosos (sideríticos) considerados como guías; son capas delgadas de 3 a 5 cm de

espesor de areniscas de grano fino con glauconita, rojas y muy duras, intercaladas con arcillolitas grises y rojizas; esta parte es muy rica en fósiles, especialmente bivalvos y gasterópodos.

Otra secuencia de la serie:

*Segmento 1.* Conjunto de aproximadamente 80 m de espesor de areniscas de grano muy grueso a fino, cuarzo feldespáticas a cuarzosas, blancas, poco cementadas, estratificadas en capas muy gruesas a gruesas, con laminación ondulosa delgada a media y estratificación cruzada hacia el tope y la base del segmento.

*Segmento 2.* Se trata de un paquete de 80 m de espesor estimado, constituido por intercalaciones de areniscas, lodolitas y calizas. Las areniscas son cuarzosas, de grano muy fino, rojizas, bien cementadas en capas medias, ubicadas hacia la parte inferior y media del segmento. Las calizas son arenosas, micríticas, ralas a empaquetadas, amarillentas, estratificadas en capas medias y ubicadas en la parte superior del segmento. Las lodolitas tienen laminación ondulosa no paralela, delgada, y están estratificadas en capas gruesas; hacia la parte inferior del segmento son rojizas y hacia la parte superior, grises oscuras a negras; en la parte superior de este segmento se observa formación de septarias hasta de 30 cm de diámetro, ovaladas, en calizas.

*Segmento 3.* Conformado por un paquete de alrededor de 20 m de espesor constituido por areniscas de grano grueso hacia la base y fino al tope, estratificadas en capas gruesas, separadas por niveles lodosos carbonosos delgados, con contactos ondulados. En la parte superior del segmento la arenisca tiene estratificación cruzada.

*Segmento 4.* Intercalaciones de lodolitas y areniscas con espesor aproximado de 60 m. Las lodolitas son de coloración rojiza, con laminación fina y niveles ferruginosos discontinuos delgados y nódulos redondeados hasta de 4 cm de diámetro, estratificadas en capas gruesas. Las areniscas son cuarzosas, de grano fino a muy fino, tono rojizo, en capas gruesas hacia la base del segmento y medias en el tope, en donde empiezan a ser calcáreas; aparece glauconita que llega a ser tan abundante que le da coloración verdosa a la roca; la presencia de siderita, en forma de costras o en los niveles más delgados y superiores del segmento, colorea de rojo violáceo a las arenitas. En este segmento hay abundancia de microfósiles,

especialmente ostrácodos, gasterópodos y amonoideos. Se observaron algunos dientes de peces, o aparentemente de tiburón.

Morfológicamente forma cimas redondeadas, longitudinales, con contrapendiente abrupta y pendiente moderada coincidente con la dirección topográfica y estructural de los estratos

### **Formación Hondita (Kh)**

90 m de intercalaciones de calizas arenosas, lutitas y pizarras; el autor de la descripción original menciona la presencia de concreciones calcáreas hasta de 2 m de diámetro.

De base a techo de la secuencia, lo siguiente:

- Paquete de 37 m de calizas negras lodosas que hacia el techo se vuelven arenosas;
- 15,4 m de lodolitas con lentes de arena de grano muy fino;
- 10 m de areniscas de cuarzo, de grano muy fino, blancas, con estratificación ondulosa no paralela y flaser, bioturbadas
- 93,6 m restantes están parcialmente cubiertos, pero dejan ver tres paquetes de 3,5 m, 5,2 m y 2,5 m de espesor de intercalaciones de limolitas y areniscas de cuarzo, de grano muy fino, estratificadas con capas finas de lodolitas con laminación ondulosa.

Morfológicamente abarca zonas planas a levemente onduladas.

### **Formación Loma Gorda (Kl)**

El espesor total medido es 49,3 m. Para facilitar la descripción, se separaron tres segmentos que de base a techo son:

*Segmento 1.* 23,3 m de espesor constituidos por intercalaciones de lodolitas gris a negro, limolitas silíceas (chert) de color negro, calizas micríticas y esparíticas, capas de fosforita y arenisca de grano muy fino con lentes calcáreos y algo fosfóricos. En general, estas rocas se encuentran estratificadas en capas delgadas a medias, con contactos levemente ondulados y laminación ondulosa no paralela.

*Segmento 2.* De 11 m de espesor, conformado por areniscas de grano fino, color blanco, con laminación delgada no paralela.

*Segmento 3.* Tiene 15 m de espesor y está cubierto; consta muy posiblemente de lodolitas fósiles, muy alteradas.

### **Grupo Olini (Ko)**

Se levantó una columna estratigráfica del Grupo Olini de 93,8 m de espesor (Figura 21) en la quebrada La Guagua (3G) que presenta, de base a techo, los siguientes segmentos:

*Segmento 1.* Paquete de 11,7 m de espesor de intercalaciones de chert, lodolitas silíceas, areniscas de grano muy fino, estratificadas en capas delgadas, plana paralelas; los niveles de chert no tienen más de 5 cm de espesor y son de color negro a gris.

*Segmento 2.* Con 65,8 m de areniscas de grano fino a muy fino, cuarzosas, friables a bien cementadas, con intraclastos lodosos de color blanco a gris, con restos de peces y foraminíferos, estratificadas en capas medias a gruesas, separadas hacia la parte media alta del segmento por niveles muy delgados de limolitas negras.

*Segmento 3.* 16,4 m de intercalaciones de lodolitas calcáreas, areniscas de grano muy fino y cuarzosas, chert negro y gris, fosforitas pelletíferas, estratificadas en capas medias a delgadas, planas paralelas.

### **Formación La Tabla (Kt)**

La secuencia consta de areniscas cuarzosas, predominantes en la base y el techo que alternan con lutitas grises.

En la base de la secuencia las areniscas se encuentran bien cementadas, presentan porosidad por disolución fósiles. En algunas partes son abundantes los pellets de naturales fosfática.

La parte media es predominantemente lutítica con pequeñas intercalaciones de areniscas. Las areniscas del tope pasan a conglomerados de cantos de cuarzo, lidita y chert. La fracción

lutítica está compuesta por limolitas y arcilloitas caoliniticas blancas, presentando algunos niveles fosfáticos.

La parte superior presenta bancos potentes de areniscas blancas cuarzosas a arcillosas con bioturbación e incofósiles presentando en ocasiones pasadas de lodolitas carbonosas.

Se estima una potencia de la formación de 150 m.

### **Formación Seca (KPgs)**

Sucesión de capas de areniscas y lutitas rojas del Maestrichtiense al paleoceno. La base presenta dominio de arcillolitas y limolitas rojizas dominando las areniscas al techo de la unidad con estratos de lodolitas rojas de hasta 5 m de potencia. La formación se estima de 400 m de potencia perteneciendo 300 m a las unidades más arcillosas de la base. La edad de la unidad se localiza en el tránsito entre el Cretácico y el Paleógeno.

#### ➤ **CENOZOICO**

### **Formación Palermo (Pgp)**

Se trata de una secuencia de conglomerados de estratos potentes lenticulares y acuñaos separados por niveles de lodolitas rojas muy finos. A techo presentan estatificación cruzada en surco. A base la formación presenta granulometrías más finas dando bancos de areniscas separadas por finas intercalaciones de lodolitas de 10 cm de espesor, presentando laminaciones paralelas y cruzadas.

La Formación presenta un espesor de entre 20 a 60 m.

### **Formación Baché (Pgb)**

Está formada por intercalaciones de lodolitas rojizas y capas gruesas de conglomerados. Los conglomerados se disponen a lo largo de la secuencia y están formados por cantos tamaño gránulo a guijarro de chert negro, cuarzo y líticos de tobas y de rocas ígneas intrusivas. Los lentes de areniscas se presentan de manera irregular tanto en los conglomerados como en las lodolitas. Éstas son de grano fino a medio de tono rojizo con estratificación inclinada.

Están formadas principalmente por chert y cuarzo.

La formación se ha definido con unos 500 m de potencia total.

#### **Formación Tesalia (Pgt)**

Está conformada por intercalaciones de conglomerados polimícticos en capas lenticulares, con capas menores de areniscas.

Los conglomerados están constituidos por guijos de cuarzo lechoso, chert negro, pardo y gris, en matriz de arena fina y cemento ferruginoso. Las areniscas son de grano fino, cuarzosas, de color rojo y tono amarillento. El tamaño de los granos de los conglomerados oscilan entre 1 a 7 cm de diámetro. En ocasiones se observa secuencia granodecreciente que enlaza con las areniscas.

#### **Formación Potrerillo (Pgpo)**

Se trata de arcillolitas y lodolitas de tonos rojizos a verdoso, amarillentos por alteración. En la base se observan intercalaciones de capas lenticulares de conglomerados de hasta 3 m de espesor pasando en la parte media de la secuencia a un predominio de areniscas arcillosas verdosas en capas de 35 a 40 cm de espesor. A techo vuelen aparecer niveles lenticulares de conglomerados con matriz arenosa.

#### **Formación Doima (PgNgd)**

Se trata de una unidad de 170 m de potencia constituida por conglomerados masivos con lentes arenosas

#### **Grupo Honda (Ngh)**

Consiste en una intercalación de areniscas y arcilloitas con lentes de conglomerados todos ellos con un claro carácter cuneiforme. Los estratos oscilan entre 3 a 6 m de espesor. Las areniscas son gris verdosas con estratificación cruzada. Los conglomerados alcanzan hasta 6 m de espesor y están constituidos con cantos volcánicos (plutonitas, chert) las arcillas son

verdes ga rojizas en ocasiones grises. Los niveles arenosos en ocasiones presentan concreciones arenosas con cemento calcáreo de hasta 60 cm de diámetro.

En detalle se divide en las formaciones Victoria y Villavieja. Se estima una potencia de la unidad de 600 m.

#### **Formación Neiva (Ngn)**

Pertenece al Grupo Hulila. De base a techo ha sido descrita como una secuencia que se inicia con conglomerados gruesos de hasta 10 cm de diámetro, clastosoportados, con cantos procedentes de rocas extrusivas y metamórficas (macizo de Garzón). Presentan intercalaciones de areniscas conglomeráticas y pasadas de lodolitas. Las areniscas son arcósicas y líticas siendo estas últimas de origen volcánico. Masivas.

#### **Formación Gigante (NgQgi)**

Se trata de depósitos tobáceos depositados discordantemente sobre la Fm Neiva, con un espesor de entre 250- a 300 m en la zona de Neiva. Dentro de la formación se distinguen tres secciones en el muro se observan areniscas tobáceas (hasta 60 m de potencia) sobre las que superyacen tobas arenosas de grano fino con cenizas volcánicas (80 m de potencia) para finalizar a techo con areniscas tobáceas tabulares (120 m de potencia). Ver Figura 5.

#### **Unidad Fortalecillas (nggf)**

Conjunto de materiales sedimentarios y volcano sedimentarios que se diferencia de la Fm Gigante por un mayor contenido en materiales volcánicos (principalmente pumitas) No está clara s relación con la FM Gigante si bien se observan contactos paraconformes en algunos puntos. Se trata de areniscas de grano fino a medio con niveles de conglomerados de cuarzo y fragmento de rocas ígneas, en contacto con una secuencia de areniscas pumíticas blancas finas de origen volcánico. También se observan niveles de cenizas y laháricos. Geomorfológicamente dan lugar a cerros bajos, aislados, con un espesor de 80 m.

Figura 5 Izquierda, depósitos de la Formación Gigante. Derecha, depósitos de gravas pertenecientes a depósitos aluviotorrenciales de abanico aluvial.



Fuente: IDOM

### ➤ DEPÓSITOS CUATERNARIOS

#### Abanicos antiguos.

Abanicos aluviales, glaciares y conos de deyección de grandes dimensiones, producto de la peniplanización de los relieves existentes. Se depositan de manera discordante sobre los materiales del Paleógeno o del Neógeno. Se trata de materiales coluviales y aluviales en forma de arenas y gravas con cantos, en general subangulosos, poco re TRABAJADOS por la acción hídrica lo que implica transportes cortos. Los materiales que los componen son el producto de la erosión de materiales antiguos aflorantes en la zona. La matriz podrá ser arenosa arcillosa si bien en algunos casos los materiales pueden presentarse granosoportadas.

#### Terrazas.

Depósitos aluviales compuesto por gravas arenas limos y arcillas, los materiales que los componen suelen presentarse bien redondeados por el transporte fluvial. En la zona de Neiva se observan tres niveles como mínimo. Los espesores de éstos oscilan entre tres y 8 m. Generalmente a techo de la secuencia deposicional se encuentra un nivel de arcillas o limos que en ocasiones alcanzan y superan el metro de espesor.

#### Depósitos coluviales.

Depósitos de ladera producto de los deslizamientos y otros procesos de erosión de las mismas. Su litología es muy variada desde bloques y gravas angulosas, arenas y limos y arcillas. Se trata de depósitos heterogéneos poco clasificados de espesores muy variables en función de las dimensiones del proceso denudativo.

#### Depósitos aluviales.

Depósitos existentes en las llanuras de inundación actuales de los cursos de agua existentes. Se trata de bloques, gravas arenas y arcillas bien redondeadas que apenas presentan compactación.

### 2.2.2 Estructura y Tectónica

El valle del Magdalena se encuentra limitado al norte y al sur por la cordillera Central y la Oriental respectivamente, y es producto del levantamiento de las mismas durante las fases compresivas del Oligoceno, el Mioceno y ya en el Cuaternario. Los límites de ambas cordilleras se encuentran definidos por el sistema de Fallas de Chusma en la cordillera Central y el Sistema de Fallas Garzón Suaza en la cordillera oriental.

Los estudios de campo permiten dividir el valle en tres provincias tectónicas.

#### ➤ Provincia tectónica Occidental

Corresponde a las estribaciones orientales de la Cordillera Central controladas por la Falla de Chusma con una orientación principal N10°-15E con buzamiento 45° hacia el Oeste. La falla de Chusma es un cabalgamiento de las unidades jurásicas sobre los materiales del Paleoceno-Eoceno. Se estima una edad holocena de la misma.

La Falla inversa del Corozal pone en contacto materiales de la Fm Saldaña sobre materiales del precámbrico (Complejo Aleluya). Tiene dirección N15E subparalela a la anterior con buzamiento de 50° hacia el oeste.

Finalmente el lineamiento de Chiquilla con dirección N40°W está asociada a una zona de cizalla importante. Se considera de edad jurásica con reactivaciones más recientes y es coincidente con el lineamiento de Neiva por lo que se entiende que sus reactivaciones alcanzan hasta el Paleógeno y el Neógeno

#### ➤ **Provincia tectónica Central**

Asociada al valle del río Magdalena, corresponde al Cintrón de cabalgamiento y plegamiento generada por los esfuerzos compresivos del Oligoceno y mioceno. Presenta una combinación de fallas inversas y pliegues anticlinales y sinclinales con vergencia al este. Las superficies de despegue se sitúan en las formaciones Hondita y Honda. Este sistema de fallas y cabalgamientos se asocia al sistema de Fallas de Chusma con la misma dirección.

Otras estructuras tectónicas importantes en la zona son las fallas de Sanfrancisco, Baché y Betania, así como los anticlinales de La Guagua, El Indio San Francisco y Palo Grande y los sinclinales de Baché, Nazaret y Guarico, así como el lineamiento de Neiva. Todo ello compone una estructura tectónica compleja producto de las fases compresivas producidas por el levantamiento de las cordilleras que delimitan la provincia tectónica central.

#### ➤ **Provincia Tectónica Oriental**

Conformado por las estibaciones más occidentales de la Cordillera Oriental donde se localizan cabalgamiento con vergencia hacia el oeste y zonas de despegue dentro del basamento cristalino. La principal estructura es el sinclinal de San Antonio cuyo eje presenta una dirección N25°E.

### 2.2.3 Geomorfología

La zona de estudio se caracteriza por distintos dominios geomorfológicos. Los principales motores de la zona de estudio son el tectonismo, vulcanismo y erosión hídrica que ha dado lugar al modelizado de la cuenca del Alto Magdalena.

La zona se caracteriza por unos relieves jóvenes generados por las etapas compresivas del borde occidental sudamericano. Estas etapas compresivas dieron lugar a las cordilleras central y oriental, principales dominios geomorfológicos existentes en la zona de estudio.

El desarrollo tectónico del lugar dio lugar a una zona central entre ambas cordilleras donde los materiales cenozoicos, más flexibles, sufrieron el plegamiento de sus unidades dando un relieve más llano sobre el que se instaló la red hidrológica. Ya durante el cuaternario los procesos erosivos de origen hídrico han sido los predominantes dando lugar a la erosión de los valles fluviales así como a los depósitos de glaciares, terrazas y abanicos aluviales. También existe un agente modelador de menor intensidad como es el proceso de regularización de las pendientes. Los distintos procesos gravitacionales han dado lugar a depósitos coluviales de diversa entidad que se encuentran principalmente en las zonas de pendientes medias y altas.

A nivel regional el sector pertenece a la Unidad Fisiográfica Valle del río Magdalena, la cual está subdividida en dos unidades de paisaje, sobre las cuales se encuentra ubicada el área urbana de Neiva:

#### ➤ **Unidad Valle Aluvial:**

Compuesta por los depósitos recientes asociados al río Magdalena y demás drenajes permanentes que surcan la ciudad; posee morfología predominantemente plana y en ella se manifiesta la dinámica fluvial. En esta unidad domina la agradación sobre la degradación y se alcanzan las cotas topográficas más bajas (420 msnm, al norte del área urbana de Neiva, cerca de la confluencia del río Magdalena con la quebrada El Venado).

La unidad de paisaje Valle Aluvial se encuentra a su vez subdividida en dos unidades geomorfológicas: Unidad Aluvial (que abarca los canales activos y aluviones Qal dentro de las denominadas llanuras de inundación) y Unidad de Terrazas, las cuales están asociadas a los ríos Magdalena, Las Ceibas y del Oro.

#### **Unidad de terrazas.**

Una terraza aluvial, es un depósito de tope plano formado por una corriente de agua, que ha sido abandonado y actualmente se encuentra en un nivel más alto que el nivel activo de dicha corriente. Las terrazas se diferencian básicamente por la altura a la que se encuentran con respecto a la corriente que las originó. En el área de estudio se describirán las terrazas de acuerdo con el drenaje al cual estén asociadas.

*Terrazas asociadas al Río Magdalena.* Se presentan en franjas alargadas adyacentes a éstos ríos, ocupan una gran parte del área urbana, en ellas se pueden diferenciar 4 niveles, los cuales se describirán a continuación.

- Terraza alta del Río Magdalena (T1m). Se localiza sobre la margen derecha, entre la quebrada El Venado y el Río Las Ceibas, zona del aeropuerto y barrios La Inmaculada, Las Mercedes, Bosques de Tamarindos, Las Granjas, entre otros. También se observan sobre la margen izquierda, frente a la desembocadura del Río Las Ceibas y tanto al norte como al sur de ésta. Esta terraza presenta una altura, en la zona del barrio La Inmaculada, de 28 m con un ligero basculamiento hacia el Oeste; su escarpe posee una pendiente aproximada de 5°
- Terraza media del Río Magdalena (T2m). Se localiza adyacente directamente al río ó separados de éste por niveles más bajos. Sobre la margen derecha, se presenta preferencialmente al sur de la desembocadura de la quebrada El Venado, en los barrios Villa Magdalena, Chicalá y Calamarí; al norte del Río Las Ceibas, en la Universidad Surcolombiana y los barrios Cándido Leguizamo, Santa Inés, Acrópolis, entre otros; entre Río Las Ceibas y Río del Oro en la zona del Parque Santander y al sur del río del Oro (zona industrial), conformando una franja discontinua. Sobre la margen izquierda, se presenta como una franja disectada que cubre casi todo el frente de la ciudad. Su tope se presenta a una altura de 15 m aproximadamente, respecto al río; su escarpe presenta una pendiente muy vertical.
- Terraza baja del Río Magdalena (T3m). Se localiza sobre la margen izquierda, principalmente al norte y al sur de la desembocadura del Río Las Ceibas, y también como pequeños remanentes al norte de la ciudad, frente a los barrios Darío Echandía, Calamarí, entre otros. Su altura con respecto al río es aproximadamente 3.5 m; su talud es de longitud corta y pendiente fuerte.
- Terraza muy baja del Río Magdalena (T4m). Se ubica principalmente al norte de la ciudad, sobre la margen derecha, en una zona relativamente despoblada frente a los barrios Darío Echandía, Minuto de Dios, La Inmaculada, entre otros; también en inmediaciones de la desembocadura del Río las Ceibas, tanto al norte como al sur, y al sur de la desembocadura del Río del Oro. Sobre la margen izquierda, se localizan al norte del puente Santander. Presenta una altura de entre 1,5 y 2 m respecto a la corriente; su talud presenta una pendiente muy suave.

*Terrazas del Río Las Ceibas.* Se diferencian dos niveles de terrazas, que en algunas ocasiones se observan encajadas en el abanico.

- Terraza media del Río Las Ceibas (T1c). Se ubica en una zona del barrio Palmas II y en un área despoblada sobre la margen izquierda. Su altura con respecto al río varía de 15-25 m aproximadamente; su talud es casi vertical (Ver Foto 8).
- Terraza muy baja del Río Las Ceibas (T2c). Se localizan sobre su margen derecha, en la zona de los barrios Villa Milena, Santa Lucía, Granjas, Gualanday, entre otros, y en la zona de la desembocadura de la Quebrada Avichente y parte baja de ésta, así como también, en un área despoblada sobre la margen izquierda, frente al barrio Villa Cecilia. Su altura con respecto al río es de 1.5 a 2 m; su talud es corto, con pendiente suave y generalmente modificado por acciones antrópicas.

*Terraza baja del Río del Oro (T1o).* Se localiza sobre la margen izquierda, en la zona de los barrios Santa Isabel, Los Nazarenos, Las Lajas, entre otros, conformando una franja delgada y alargada, y también en inmediaciones de los barrios Altos del Limonar y Limonar, en un área más equidimensional. Además, se presentan sobre la margen derecha, al norte de la quebrada La Cabuya, zona del Barrio San Martín y en inmediaciones de los barrios Pozo Azul, Las Acacias y Villa Amarilla.

*Terraza de la Quebrada El Venado.* Se puede observar sobre la margen izquierda de la quebrada, en inmediaciones de las partes bajas de los barrios Carbonel, Luis Ignacio Andrade y Eduardo Santos. Presentan su tope a una altura aproximada de 1,5 a 2 m sobre el nivel de la corriente.

#### **Unidad aluvial.**

Comprende las llanuras de inundación de las diferentes corrientes de agua. Una llanura de inundación se caracteriza por tener forma plano cóncava, ser anegada por la corriente de agua periódicamente y estar ubicada inmediatamente adyacente a la misma. Estas se diferencian sólo teniendo en cuenta la corriente que las originó y que las inunda periódicamente, es decir, cada corriente se asocia con una llanura de inundación que es producto de la acción natural de la misma. A continuación se hará una breve descripción de las llanuras identificadas.

- *Llanura de inundación asociada al Río Magdalena (LI1m). Se presenta como grandes áreas en forma discontinua, localizadas a ambas márgenes del río, su amplitud se hace más acentuada hacia el sur del área urbana de la ciudad*
- *Llanura de inundación asociada al Río Las Ceibas (LI1c). La llanura de inundación del Río las Ceibas es una franja cuya amplitud en el área urbana de Neiva se aumenta cerca al antiguo Barrio Los Alamos, presentando un estrechamiento antes de llegar al barrio los Andes en donde vuelve a ampliarse para finalmente continuar como una franja con una amplitud promedio de 1000m.*
- *Llanura de inundación asociada al Río del Oro (LI1o). Es una franja que presenta una amplitud aproximada de 72 m, la cual se hace un poco más amplia en cercanías al barrio Altos del Limonar.*

➤ **Unidad de Piedemonte:**

Localizada sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental; está conformada principalmente por rocas del Jurásico y Terciario, suprayacidas localmente por depósitos del Cuaternario, con estructuras geológicas regionales. Son comunes los procesos degradacionales, especialmente los de erosión hídrica, laminar y concentrada, y localmente de remoción en masa.

Dentro de la unidad de paisaje de Piedemonte se reconocen a nivel urbano la Unidad Vertientes y Escarpes de la Formación Gigante y el Abanico de Neiva.

**Vertientes y escarpes de Gigante.** Se localizan al Norte, en las vertientes de la quebrada El Venado y en los escarpes de los diferentes niveles de terrazas que allí se presentan, donde se encuentran barrios como Carbonel, Eduardo Santos, Calamarí, La Inmaculada, entre otros. Al centroriente en las vertientes y escarpes del Río Las Ceibas y de la Quebrada la Toma y otras quebradas menores. (Figura 6).

Figura 6 Izquierda, planicie generada por el abanico de Neiva sobre la que se instala la ciudad. Derecha, vertientes y escarpes de la Fm Gigante.



Fuente: IDOM

**Abanico de Neiva:** Se pueden reconocer tres planicies principales: Planicie Norte, ubicada entre las quebradas Avichente y La Toma (barrios Los Colores, Los Libertadores y Enrique Olaya Herrera) (Figura 6); Planicie Central (barrios El Jardín, Bugambiles, La Orquídea, Los Guadales, El Vergel, Villa Café); y Planicie Sur (barrios Las brisas, La Floresta y urbanizaciones Ipanema, Villa Milena, etc.). Estas planicies se amplían y unen en una sola, más hacia el oriente. Las mayores altitudes del casco urbano de Neiva, cercanas a 560 msnm, se alcanzan en esta zona.

➤ **Agentes geomorfológicos actuales**

A nivel urbano se han definido los siguientes agentes geomorfológicos.

**Erosión Laminar o difusa.** Se da en las zonas en las que se presenta alta precipitación y poseen altas pendientes, poca cobertura vegetal, alta erodabilidad, es decir, el sustrato está compuesto por rocas o depósitos recientes deleznable o muy fracturados, lo que permite el fácil arrastre de las partículas de suelo por el agua, y no tienen canal de drenaje definido.

**Erosión Concentrada en Surcos y Cárcavas.** Este tipo de erosión se presenta cuando el agua de escorrentía se concentra formando pequeños canales, que se denominan surcos,

de poca profundidad y donde se produce arrastre de partículas de suelo, que pueden ser observadas dentro de los canales cuando éstos están secos. Cuando se da una mayor concentración del flujo de escorrentía, las irregularidades del terreno propician la unión de varios surcos, hasta convertirse en canales mucho más largos, amplios y profundos, conocidos con el nombre de cárcavas.

La formación de surcos y cárcavas se presenta generalmente en suelos poco permeables, en los que la escorrentía excede ampliamente a la infiltración durante las lluvias, y depende también de la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y el régimen de lluvias (Moreno y Múnera, 1994).

**Erosión Fluvial.** Este tipo de erosión se produce cuando en épocas de lluvias el aumento de los caudales de ríos y quebradas trae como consecuencia el aumento en la capacidad de carga y poder erosivo de las corrientes, dando lugar al socavamiento lateral de los cauces o a la profundización de los mismos, que puede llegar a desestabilizar los taludes alledaños.

La deforestación de las márgenes de los ríos y quebradas, así como el establecimiento de cultivos limpios en los taludes que dan hacia las corrientes favorece ampliamente la ocurrencia de la erosión fluvial (Bahamón & Gaitán, 1981).

**Remociones en masa.** Este término se utiliza de manera general para designar una variedad de procesos mediante los cuales masas de suelo y roca son movidas, como una sola unidad o en pocas unidades discretas, por acción de la fuerza de gravedad, en forma rápida o lenta, de un lugar a otro (Bahamón & Gaitán, 1981).

La gran mayoría de las remociones en masa que ocurren se presentan en suelos bien desarrollados y son desencadenadas como consecuencia de las fuertes lluvias. Los principales factores que favorecen el desencadenamiento de remociones en masa son el relieve, la geología, el clima e, indudablemente, la acción antrópica.

<sup>3</sup> Estudio Hidrogeológico y Plan de Manejo del Agua Subterránea en el sector Nororiental de la Cuenca del Río Magdalena en el Departamento Del Huila

#### 2.2.4 Hidrogeología

Los materiales que infrayacen a la ciudad de Neiva se han descrito como un acuífero libre, con un espesor de zona no saturada de entre 5 a 10 m de profundidad. Dicho acuífero se ha clasificado con una índice de vulnerabilidad de 0.95 (vulnerabilidad extrema).

Algunos estudios<sup>3</sup> han cifrado un total de 46 pozos profundos, 146 pozos de gran de diámetro o aljibes y 40 manantiales en la zona urbana de Neiva y alledaños. De los pozos profundos el 37% se encuentran abandonados debido especialmente a fallas de tipo mecánico en su construcción y el 17% se encuentran actualmente como pozos sin utilizar pero en reserva. El potencial de las unidades acuíferas explotadas los constituyen las primeras capas acuíferas las más sensibles hacer afectadas y las de potenciales de explotación más limitados.

Para el caso de los acuíferos profundos se identificó un bajo número de pozos y su explotación apenas empieza, el número de pozos activos también es todavía es bajo con respecto al potencial de los acuíferos.

Toda el área urbana es considera como zona de recarga excepto donde afloran rocas del Miembro Superior de la Formación Honda. Para la zona acuífera de mayor interés constituido por el paquete basal conglomerático del Miembro Medio de la Formación Gigante y de todo el Miembro Inferior de dicha Formación, se espera recarga por goteo de las capas suprayacentes del acuífero semiconfinado constituido por areniscas tobáceas y limolitas del Miembro Medio de la Formación Gigante. Adicionalmente se considera zona especialmente de recarga, el área donde aflora en superficie el paquete acuífero de mayor interés localizado al Oeste del área de estudio en una franja de dirección Sur - Noreste, caracterizada geomorfológicamente por unas colinas alargadas, y el eje de la cuenca hidrográfica de la Quebrada Cuicinde.

A continuación se describen las características acuíferas de los materiales existentes en la municipalidad.

### ➤ Unidades acuíferas por porosidad

Fm Caballos Por sus características litológicas la unidad puede constituirse como un excelente acuífero, por la alta porosidad primaria estimada que presenta.

Fm Seca La abundancia de niveles arcillosos la convierten en una unidad impermeable con algunos niveles arenosos que aparentemente son permeables, que actuarán como acuíferos.

Grupo Honda Villarroel y otros (1996), consideran que las areniscas, areniscas conglomeráticas y conglomerados arenosos son el 75% de la unidad, mientras las arcillolitas, lodolitas y limolitas y representan un 25% de la formación; en lo observado en campo se considera que el porcentaje de arcillolitas y limolitas puede alcanzar un 30 a 40%, y que las areniscas resaltan por su mayor dureza y resistencia a los agentes meteóricos.

La unidad se constituye como un potencial acuífero principalmente en el sector del denominado “Desierto de la Tatacoa”, ya que las areniscas son muy porosas, pero hay que tener en cuenta que las intercalaciones arcillosas son abundantes. Su espesor estimado es de 800 m, para el área del “Desierto de la Tatacoa”

Fm Gigante y Fm Neiva: Por su litología y su extensión geográfica, la Formación Gigante se constituye como el acuífero más importante de la zona de Neiva y sus alrededores y hacia el sur donde se encuentra cubierto por abanicos aluviales. Se considera que la unidad presenta buena porosidad primaria y secundaria, especialmente los niveles conglomeráticos superior e inferior; el nivel medio volcanoclástico, presenta unos niveles muy permeables, pero también presenta niveles muy arcillosos, que le disminuyen las posibilidades como acuífero.

Materiales cuaternarios. Abanicos aluviales y terrazas tienen un elevado potencial acuífero dada su naturaleza granular. Su disposición topográfica y relación con el nivel freático decidirá la presencia de un acuífero o no en su interior. De cualquier manera son unidades permeables que permiten la infiltración de agua de lluvia facilitando la recarga del acuífero.

### ➤ Unidades acuíferas por fracturación

Fm Saldaña, No presenta porosidad primaria por tratarse de rocas masivas, pero tiene porosidad secundaria debido al intenso fracturamiento y diaclasado, con poca importancia desde el punto de vista hidrogeológico.

Monzogranito de Algeciras El intrusivo presenta baja porosidad primaria pero se halla fracturado y superficialmente se han desarrollado horizontes saprolíticos de textura arenosa de aproximadamente 15 m de espesor; este horizonte en apariencia es muy permeable.

Fm Hondita y Fm Lomagorda Las Formaciones Hondita y Loma Gorda, por su composición son impermeables; pero en el sector existe una gran complejidad tectónica y la unidad se encuentra fracturada y con porosidad secundaria producida por este fenómeno.

Grupo Olini y Fm La Tabla Cuando se observó en los afloramientos del piedemonte de la cordillera Oriental, la roca se halla muy compacta, pero presenta porosidad secundaria por fracturamiento, pudiendo presentar algún interés para la prospección de aguas subterráneas.

Grupo Chicoral, Fm Potrerillo y Fm Doima, a pesar de tratarse de unidades compuestas por areniscas y conglomerados, la matriz se halla muy cementada; presentando una porosidad primaria baja, con pocas posibilidades como acuífero. Tampoco se encuentra fuertemente fracturada por lo que se descarta también la creación de un acuífero por fisuración.

### 3 ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa son eventos geológicos de alta recurrencia, en especial en países como el nuestro localizados en el trópico, en donde las condiciones geológicas, climatológicas, morfométricas y de uso del suelo, se combinan de manera especial para generar procesos que afectan a los pobladores y su infraestructura.

En el presente estudio y de acuerdo con el proceso metodológico mostrado en el apartado 3.3 de este documento, para evaluar la amenaza por movimientos en masa se debe evaluar inicialmente la susceptibilidad. La mayoría de los métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa incluyen como uno de sus elementos fundamentales, el conocimiento de la ocurrencia de los procesos de inestabilidad en el área estudiada y de sus factores cercanamente relacionados. La confiabilidad de los mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa depende principalmente de la calidad y cantidad de datos disponibles, de la escala de trabajo y de la selección de la metodología apropiada de análisis y modelación, dentro de las cuales se tienen enfoques cualitativos y cuantitativos. Hoy en día, con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), capaces de soportar una gran cantidad de datos, así como de extraer parámetros morfométricos e hidrológicos a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE), es posible analizar grandes regiones de forma ágil y precisa.

El presente estudio desarrolla un análisis de susceptibilidad basado en datos existentes facilitados por distintas corporaciones.

#### 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Susceptibilidad (S) predisposición del terreno de verse afectado por deslizamientos, no teniendo en cuenta el factor tiempo. Determinado por factores **CONDICIONANTES** (pendiente, geología geomorfología fallas, usos de suelo) Probabilidad Espacial.

Peligrosidad o amenaza: probabilidad de ocurrencia de un determinado tipo de deslizamiento en una determinada área y en un periodo de tiempo concreto (WHEN).

Determinado por la Susceptibilidad y los factores **DESENCADENANTES** (lluvias, terremotos). Probabilidad Espacial + Probabilidad Temporal. (UNDRO, 1991).

Riesgo: las pérdidas producidas en una determinada zona para un periodo de tiempo específico (HOW MANY). Determinado por la Peligrosidad y la Vulnerabilidad (UNDRO, 1991).

Vulnerabilidad: la fragilidad del territorio ante el evento, o el grado de daños potenciales, expresado de 0-1, sufridos por un elemento o grupo de elementos expuestos como consecuencia de un fenómeno natural de una intensidad dada. (Varnes 1984).

#### 3.2 LA PROBLEMÁTICA DE LA CIUDAD DE NEIVA

La ciudad se encuentra en una planicie donde se alternan los materiales del abanico de Neiva, procedente del desmantelamiento de las sierras orientales y de los depósitos de terrazas dejados por la acción fluvial del río Magdalena. Dicha planicie ha sido disectada por la red de drenaje formada por las quebradas del Venado, Las Ceibas, quebrada del Oro y el propio río Magdalena. La planicie desciende desde cotas de 570 m en la zona más occidental hasta la cota 435 m del río Magdalena presentando en las proximidades de éste algunos escalones que se pueden identificar con distintos niveles de terrazas.

La zona de estudio corresponde a un área con un importante desarrollo urbano, por lo que la naturalidad de los procesos de remoción en masa que actualmente ocurren en el interior de la ciudad está en entredicho. Hay que hacer notar que la presión urbana ha llevado a colonizar zonas no urbanizadas precisamente por su peligrosidad ante los procesos naturales, sufriendo actualmente las consecuencias. A ello hay que añadir las malas prácticas constructivas (cortes de taludes inestables, sobrecargas en los terraplenes, falta de redes de evacuación de aguas residuales y pluviales, etc) que aceleran la aparición de este tipo de procesos.

Analizada la información existente se puede concretar que las tipologías de procesos de remoción en masa más frecuentes encontradas en la zona más naturalizada del municipio de Neiva son del tipo deslizamientos rotacionales de suelos caídas y flujos de suelos coincidentes con las zonas de mayor relieve topográfico. Dichas zonas están asociadas a los

márgenes de los cauces y quebradas y con las zonas de los altos que rodean a la ciudad, como los ilustrados en la Figura 7.

Figura 7 Deslizamientos en la zona de estudio. Izquierda Deslizamiento rotacional en el Divino Niño. Derecha Alto mirador



Fuente. SIMMA e IDOM

En la zona urbana no se ha podido identificar la tipología de los procesos considerándose que la mayoría de ellos se deben a taludes artificiales inadecuados o sin elementos de protección en las laderas de los asentamientos. Ello unido a la presencia materiales altamente permeables y presencia de surgencias, implica la presencia de niveles freáticos someros que incrementan el grado de inestabilidad.

Dadas las dimensiones de la zona de estudio y la distinta naturaleza de las zonas de estudio propuestas, se propone la realización de un estudio de susceptibilidad a procesos de ladera desde una metodología de cartografía automática, en un entorno SIG.

### 3.3 METODOLOGÍA

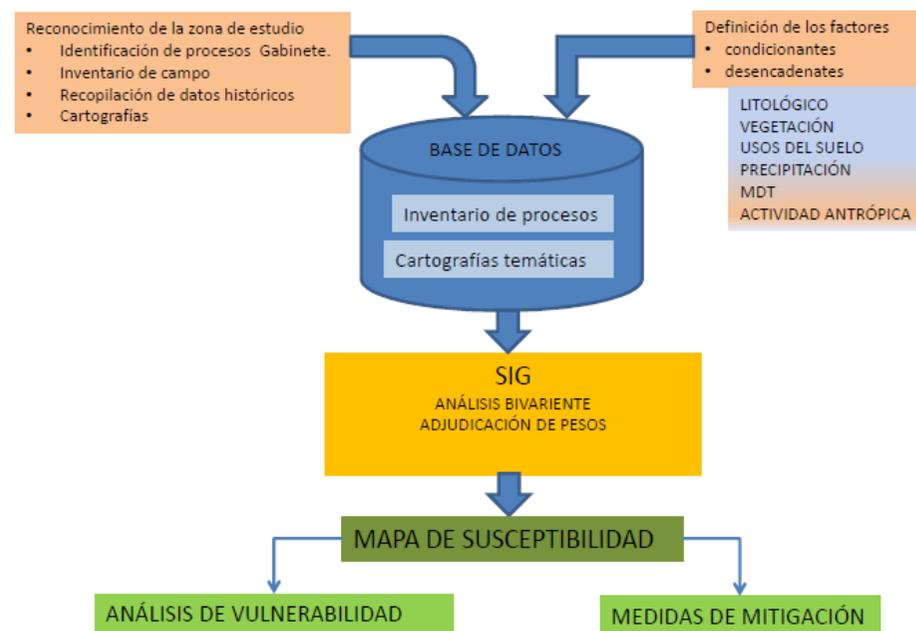
El pliego de condiciones del contrato en el que se enmarca el presente estudio exige la realización de un cálculo de la susceptibilidad de los movimientos en masa basado en preferentemente en el análisis bivariado.

La esencia de los análisis estadísticos bivariados radica en la evaluación de la densidad de movimientos en masa para cada una de las unidades de los factores que influyen

notablemente en la ocurrencia de movimientos en masa (parámetros intrínsecos); la importancia específica de cada parámetro o combinaciones de parámetros puede ser analizada de forma separada. Mediante la suma de los de valores normalizados de índices de densidad de movimientos en masa (pesos relativos) por cada clase de parámetro, los cuales tienen como base la densidad de movimientos en masa por clase de parámetro en relación a la densidad de deslizamientos para la totalidad del área de estudio, puede generarse un mapa integrado de susceptibilidad (Van Westen, 1996).

Para alcanzar dicho análisis se ha planteado la siguiente metodología que se resume en la Figura 8

Figura 8 Esquema metodológico para el análisis de susceptibilidad de movimientos en masa



Fuente: Elaboración propia

El flujo de trabajo se inicia con la recopilación de estudios previos, el inventario de procesos y el análisis de las variables involucradas en los procesos, así como una profunda revisión de los estudios realizados en la zona.

Una vez definidos la tipología de los eventos y sus factores desencadenantes y condicionantes se procederá a realizar un análisis bivariante en un entorno SIG. Para ello se empleará la herramienta ArcGis de ESRI, empleando principalmente las herramientas de Spatial Analyst y su calculadora raster.

### 3.3.1 Datos previos

La ciudad de Neiva, con el fin de estar acorde con la legislación vigente en Colombia, cuenta con varios estudios en los que se analiza la temática de riesgos. Algunos de ellos se limitan a zonas de expansión o con problemas recurrentes de riesgos y abarcan poca extensión. En la Tabla 9 se recogen los estudios analizados.

Tabla 9 Estudios realizados en la zona urbana de Neiva

| PROYECTO  | AUTOR   | CLIENTE               | AÑO  |
|---|---|-----------------------|------|
| Plan de ordenamiento y manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Las Ceibas      | CAM   | CAM                   |      |
| Estudio Ambiental Integral y Plan Parcial del Lote el Edén                      | Desconocido   | CAM/Alcaldía de Neiva |      |
| Estudio de Evaluación y Amenazas, Vulnerabilidad y _Riesgo del Lote Villa Nubia | Elmer J. Figeroa EspinaFam. Polania Andrade   |                       |      |
| Valoración Geotécnica de la Comuna 10   | BIL Ingenieria  | CAM                   |      |
| Estudio de Amenazas del Convenio 193-1998 CAM UN                                | Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia, Idea – UN | CAM                   | 1998 |

| PROYECTO  | AUTOR                                       | CLIENTE                        | AÑO  |
|---|---|--------------------------------|------|
| Valoración Ambiental del Oriente Urbano de Neiva  | SGI Ltda                                    | CAM                            | 2002 |
| Valoración ambiental de la microcuenca La Cabuya  | Germán Alfonso Reyes                        | EMVINEIVA LIQUIDACION          | 2005 |
| Evaluación de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo de Las Microcuencas Venado, Avichente, La Toma, Zanja Honda, La Torcaza, Río de Oro y Ribera del Magdalena en el Casco Urbano de La Ciudad de Neiva. | Servicios Geologicas Integrados             | CAM/Alcaldía de Neiva          | 2005 |
| Estudio de Amenazas de La Represa de Betania Aguas Abajo de la Desembocadura del Río Saldaña en el Rio Magdalena  | Geo Ingeniería Ltda                         | Central Hidroeléctrica Betania | 1998 |
| Estudio de Caracterización y Zonificación Ambiental Parte Baja Quebrada El Salado Municipio. de Neiva.  | ProHuila Ltda                               |                                | 2006 |
| Estudio de Caracterización y Zonificación Ambiental Líneas de Escorrentías de Aguas Lluvias Registradas en el POT del Mpio. De Neiva (H) Parte Alta Qda. Matamundo.                                 | ProHuila Ltda                               |                                |      |
| Estudio de Villa Nubia Polania  | Elmer J. Figeroa EspinaFam. Polania Andrade |                                |      |
| Plan Parcial los Dujos  | EIATEC SAS                                  |                                |      |
| Plan Parcial de Expansión Urbana Nororiental de Neiva   | Estupiñán Pulido et al                      | CAM/Alcaldía de Neiva          | 2011 |
| Análisis de la Estabilidad de las islas ubicadas en el río Magdalena frente a la ciudad de Neiva. UNC 2006.   | Ingesuelos de Colombia Ltda.                | COMFAMILIAR HUILA              |      |
| Valoración ambiental - geotécnica de la Comuna 10 de la ciudad de Neiva   | BIL Ingenieria                              | CAM                            |      |
| Formulación del plan ambiental de la unidad de planificación rural Pacolandia del Municipio de Neiva  | Sercoin                                     | Municipio de Neiva             |      |

Fuente: POT

Todos los estudios consultados analizan la problemática de los procesos de remoción en masa desde un punto de vista somero o en ocasiones ingenieril, no encontrándose en ninguno de ellos un inventario de eventos re procesos de remoción en masa.

La mayoría de ellos se limitan a zonificar zonas de riesgo en base a parámetros geomorfológicos siendo el estudio de Amenazas del Convenio CAM UN 193 de 1998 el que describe mejor las zonas de riesgo existentes en el municipio.

#### ➤ ESTUDIO DE AMENAZAS DEL CONVENIO 193-1998

Durante el desarrollo del “Estudio de Amenazas del Convenio 193-1998 “de la CAM con la Universidad Nacional se definieron las siguientes amenazas asociables a procesos gravitacionales (sic).

**Amenaza por remociones en masa.** Se refiere a la probabilidad de ocurrencia de procesos mediante los cuales masas de suelo y roca son movidas, como una sola unidad o en pocas unidades discretas, por acción de la fuerza de gravedad, en forma rápida o lenta, afectando a la población y/o la infraestructura de manera negativa.

Dadas las características geológico - geotécnicas que se presentan en la zona de estudio, no es común la ocurrencia de éste tipo de fenómeno, los casos identificados se presentan en los escarpes del abanico, tal como sucede en el barrio El Vergel.

**Amenaza por erosión.** Se define como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos erosivos que afecten a la población y/o la infraestructura. Las unidades litológicas que afloran en la ciudad de Neiva, presentan características como poca compactación, heterogeneidad en el tamaño de grano, entre otras, que las hacen susceptibles a los diferentes tipos de erosión, especialmente a la erosión concentrada (formación de surcos y cárcavas).

#### **Amenaza alta por erosión (AaE).**

- Río Magdalena. Principalmente en los barrios Darío Echandía y Villa Nazareth.

- Cuenca del Río Las Ceibas. Algunos de los barrios cercanos a ésta corriente que se encuentran dentro de ésta categoría son Oro Negro, Palmas II, Palmas III, San Bernardo.
- Río del Oro. En el sector del Río del oro se presenta principalmente en el barrio El Divino Niño.
- Quebrada La Toma. Entre los barrios que presentan AaE en este sector están las brisas, La Independencia, La Orquidea, Villa Milena.
- Quebrada Avichente. Principalmente en el barrio El Jardín.

**Amenaza media por erosión (AmE).** Este tipo de amenaza se puede encontrar en los siguientes sectores:

- Río Magdalena. Algunas zonas localizadas en el barrio Villa Magdalena Alberto Galindo, Darío Echandía, Los Libertadores.
- Quebrada la Toma. En los barrios La Independencia, San Antonio, Siete de Agosto.
- Zanja Honda. En los barrios El Ventilador y San Martín.

**Amenaza por erosión fluvial.** Se define como la probabilidad de que se genere un socavamiento lateral de los cauces o la profundización de los mismos, desestabilizando los taludes aledaños y afectando a la población y/o a la infraestructura. A continuación se mencionan los principales sectores que presentan éste tipo de amenaza.

- Río Magdalena. Existen muchos puntos indicados en el mapa, siendo los más destacados los ubicados en la Av Circumbalar barrio Caracol y en los barrios Chicalá, Las Mercedes.
- Río Las Ceibas. En Villa Patricia, José Eustacio Rivera.

Así pues el presente estudio deberá de concentrarse en los procesos de remoción en masa existentes en los escarpes producidos por la erosión hídrica.

Se plantea realizar un estudio de susceptibilidad a los procesos de ladera en las futuras zonas de crecimiento urbano de la ciudad de Neiva.

3.3.2 Análisis de eventos

➤ **DESINVENTAR**

Se ha consultado la base de datos del DESINVENTAR<sup>4</sup> donde se presentan 39 reportes de eventos relacionados con los deslizamientos entre los años 1942 a 2013 recogidos en la Tabla 10.

Tabla 10 Listado de eventos del Desinventar

| Serial      | Fecha Inicio | Muertos | Tipo de causa  | Serial     | Fecha Inicio | Muertos | Tipo de causa |
|-------------|--------------|---------|----------------|------------|--------------|---------|---------------|
| 1942-0101   | 10/11/1942   | 0       | Otra causa     | 2009-00005 | 07/01/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1963-0007   | 05/02/1963   | 0       | Otra causa     | 2009-00032 | 25/01/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1970-0038   | 05/02/1970   | 0       | Lluvias        | 2009-00059 | 16/02/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1970-0496   | 05/11/1970   | 0       | Lluvias        | 2009-00068 | 19/02/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1970-0603   | 15/11/1970   | 0       | Lluvias        | 2009-00131 | 26/03/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1984-0133   | 08/06/1984   | 0       | Lluvias        | 2009-00152 | 31/03/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1984-0528   | 30/10/1984   | 0       | Lluvias        | 2009-00175 | 08/04/2009   | 0       | Desconocida   |
| 1984-0769   | 09/11/1984   | 0       | Lluvias        | 2010-00392 | 20/06/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1989-0061   | 15/03/1989   | 0       | Lluvias        | 2010-00610 | 17/10/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1989-0109   | 15/04/1989   | 0       | Lluvias        | 2010-00617 | 22/10/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1989-0294   | 15/09/1989   | 0       | Lluvias        | 2010-00621 | 23/10/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1990-0395   | 10/11/1990   | 0       | Lluvias        | 2010-00667 | 10/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1992-0078   | 10/08/1992   | 3       | Lluvias        | 2010-00675 | 14/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1994-0648   | 27/10/1994   | 0       | Lluvias        | 2010-00680 | 17/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1994-0649   | 27/10/1994   | 4       | Desbordamiento | 2010-00686 | 18/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1996-0211   | 16/03/1996   | 0       | Lluvias        | 2010-00697 | 20/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1998-0675   | 20/11/1998   | 1       | Lluvias        | 2010-00713 | 24/11/2010   | 0       | Desconocida   |
| 1999-1100   | 07/12/1999   | 0       | Lluvias        | UNGRD-2012 | 13/12/2012   | 0       | Lluvias       |
| DGR-2008-01 | 20/11/2008   | 2       | Lluvias        | UNGRD-0147 | 24/04/2013   | 0       | Lluvias       |
|             |              |         |                | UNGRD-0367 | 26/12/2013   | 0       | Lluvias       |

Fuente: Desinventar

La información del DesInventar carece de información georreferenciada por lo que apenas ha sido útil con el fin de confirmar otras bases de datos, si bien su periodo de registros es superior al de otras bases de datos analizadas.

<sup>4</sup> <http://www.desinventar.org/es/>

➤ **SERVICIO DE INFORMACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA DEL SGC**

Se ha consultado la base de datos del SIMMA<sup>5</sup> referente a movimientos en masa existente en el Servicio Geológico Colombiano en donde se han localizado 20 registros entre los años 2011 a 2013. Se trata de un registro corto en cuanto al periodo de tiempo se refiere, pero muy completo con fichas en las que se recogen diversas características de los procesos inventariados. El registro se reduce a 9 eventos para todo el municipio de Neiva aportándose a continuación la tabla que resume dichos eventos de los que tan solo uno se encuentra en la zona de estudio resaltado en gris (ver tabla Tabla 11).

Tabla 11 Listado de eventos del SIMMA para el municipio de Neiva

| TIPO          | Fecha evento | Estado     | Geoforma   |
|---------------|--------------|------------|--|
| Caída         | 11/02/2013   | Activo     | sierra denudada                                  |
| Flujo         | 10/02/2013   | Activo     | sierra denudada                                  |
| Deslizamiento | 04/07/2012   | Activo     | abanico fluviotorrencial                         |
| Deslizamiento | 20/04/2012   | Activo     | terrazza de acumulación                          |
| Deslizamiento | 12/04/2012   | Reactivado | sierra denudada                                  |
| Deslizamiento | 05/03/2012   | Activo     | Montículos y ondulaciones denudacionales. (Dmo). |
| Deslizamiento | 01/02/2012   | Reactivado | Montículos y ondulaciones denudacionales. (Dmo). |
| Deslizamiento | 01/02/2012   | Reactivado | laderas de contrapendiente de sierra sinclinal   |
| Deslizamiento | 25/08/2011   | Activo     | Montículos y ondulaciones denudacionales. (Dmo). |

Fuente: SIMMA

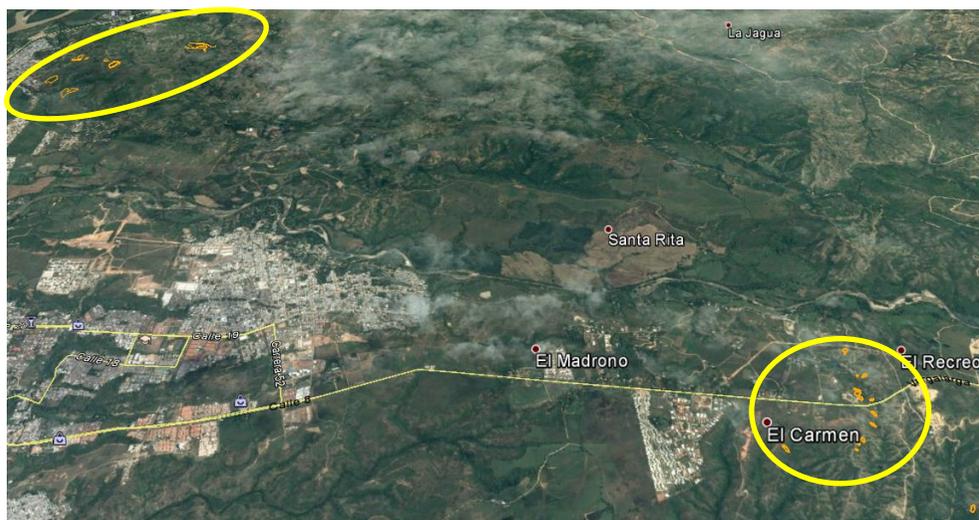
<sup>5</sup> <http://simma.sgc.gov.co/>

➤ **INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA A PARTIR DE LAS IMÁGENES DE GOOGLE EARTH**

Dentro de los trabajos de gabinete se ha procedido a identificar procesos de remoción en masa en la zona de estudio empleando para ello las ortoimágenes disponibles en Google Earth que cubren los años 2002, 2008, 2013 y 2014.

Catorce elementos fueron identificados principalmente como deslizamientos traslacionales y algunas caídas observándose en todos ellos una continuidad del proceso desde la fecha de 2002, tal y como se muestra en la Figura 9.

Figura 9 Procesos de remoción en masa inventariados a partir de las imágenes de Google Earth



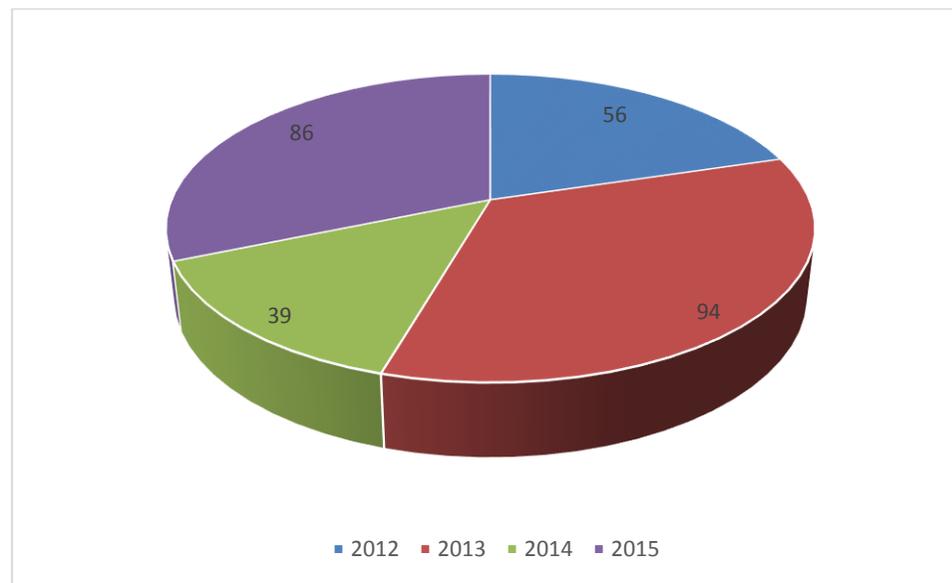
Fuente: Elaboración propia

➤ **INVENTARIO DE EVENTOS REALIZADO A PARTIR DE LA INFORMACIÓN FACILITADA POR LA OFICINA DE GESTIÓN DEL RIESGO Y VISITA DE CAMPO**

Durante la visita de reconocimiento efectuada en la ciudad de Neiva se contactó con la Oficina de Gestión del riesgo que facilitó un listado de las actuaciones emergenciales realizadas en la ciudad entre los años 2012 a 2015.

Durante dicho periodo de tiempo se atendieron del orden de 246 actuaciones relacionadas con procesos de remoción en masa en la zona urbana de Neiva siendo los años 2013 y 2015 los años que mayor concentración de registros presentaron (Figura 10). En cualquier caso es una secuencia demasiado corta para extraer conclusiones sobre el tema.

Figura 10 Actuaciones realizadas entre 2012 a 2015



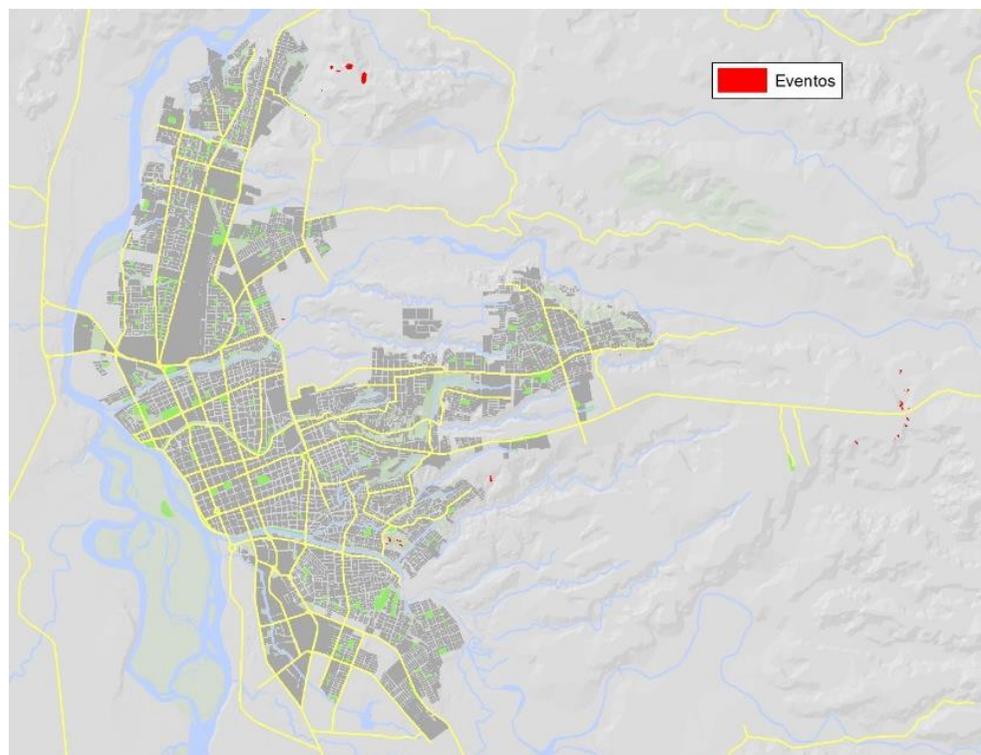
Fuente: Elaboración propia

De dichos listados se han extraído 26 puntos en los que se ha podido relacionar problemas derivados de procesos de remoción en masa.

Por otro lado y en base a los datos recogidos de la visita de campo se identificaron 10 zonas donde se producen o presentan rasgos que pueden generar deslizamientos.

Así pues el listado de eventos de referencia asciende a 49 zonas que presentan procesos de remoción en masa, como se recoge en la siguiente imagen Figura 11

Figura 11 Ubicación de eventos en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Análisis de los procesos, factores condicionantes y desencadenantes

En los estudios de susceptibilidad de movimientos en masa se analizan una serie de factores condicionantes que entran en la dinámica del proceso. Se trata de características del territorio que delimitan la mayor o menor susceptibilidad del mismo a sufrir un determinado proceso.

Estos factores son característicos de cada tipología de proceso, por lo que el análisis deberá llevarse a acabo en base a las tipologías existentes.

A continuación se citan los factores condicionantes empleados en el presente estudio. (Figura 12).

- Pendientes
- Curvatura
- Geología
- Geomorfología
- Unidades Geotécnicas

Las dos primeras se obtienen a partir del modelo de elevaciones del terreno, mientras que el resto caracterizan tanto el material que componen el sustrato, así como la actividad que se desarrolla sobre él y por tanto su mayor o menor probabilidad de sufrir afecciones.

Se ha obtenido un MDT de precisión elaborado a partir de las curvas de nivel cada 2 m procedentes del IGAC y se ha completado el recinto con curvas cada 25 m procedentes de la CAM hasta cubrir la totalidad de la zona de estudio.

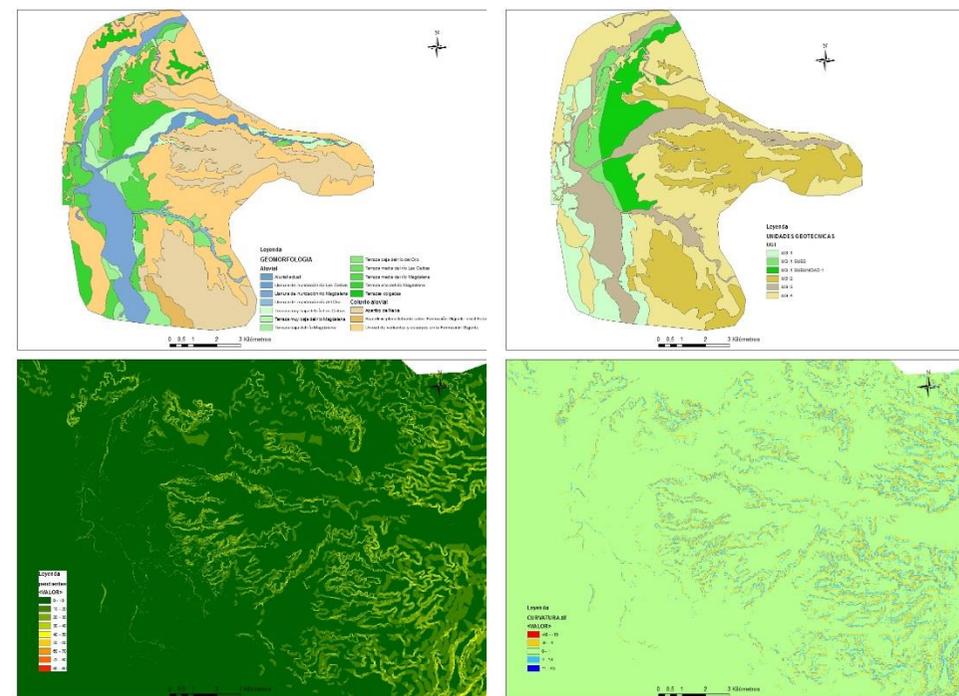
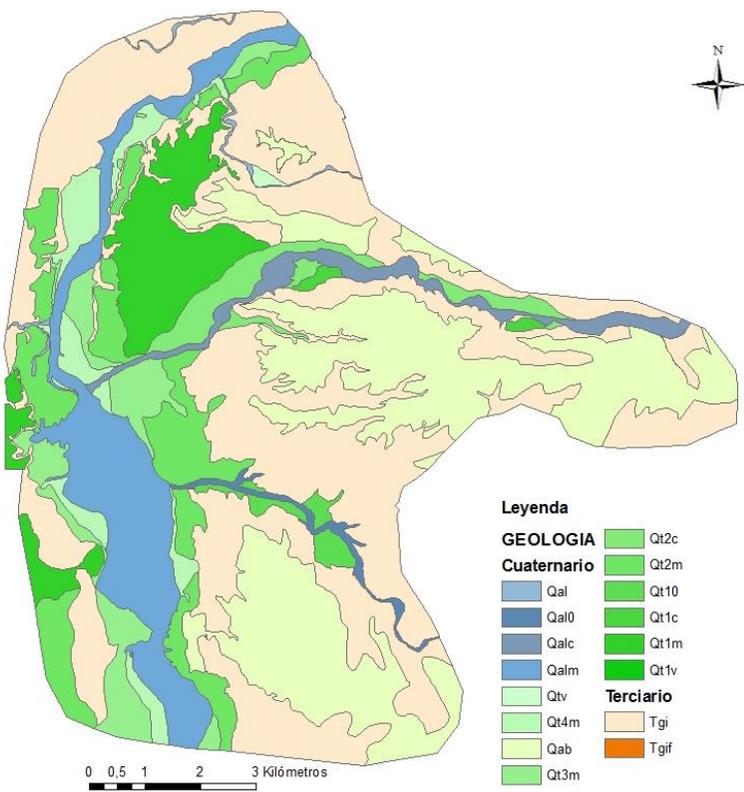
A partir del MDT se han obtenido las variables del terreno (pendientes, orientaciones etc) que se emplearán en el análisis.

Se han analizado las cartografías litológicas contenidas diversos estudios existentes y en formatos muy diversos. Se ha procedido en el ámbito de este proyecto a realizar una fusión de las informaciones existentes partiendo como base la información de la plancha 323 de

Ingeominas con el fin de obtener una cartografía adecuada para el presente estudio. Lo mismo ha ocurrido para las cartografías geomorfológicas.

Todas las cartografías se han ampliado hasta cubrir la totalidad de la zona de estudio a partir de procesos de fotointerpretación apoyado en campo durante la visita realizada a la localidad, resultando mapas tales como los mostrados en la Figura 12.

Figura 12 Mapas temáticos introducidos en el análisis



Fuente: IDOM

Por otro lado se encuentran los factores desencadenantes, son los elementos que desencadenan el proceso. Son habituales las precipitaciones intensas, sobresaturación de suelos, sismicidad, erosión fluvial y la acción antrópica.

Son los factores desencadenantes los que aportan la periodicidad temporal de los eventos analizados.

De las informaciones consultadas, los procesos de deslizamientos de ladera tienen cierta relevancia en la zona del núcleo de Neiva, afectando a edificaciones y generando daños a infraestructuras. Los procesos están fuertemente relacionados con la actividad erosiva acaecida durante la época de lluvias. Dado que no se han obtenido dataciones fiables de los procesos no ha sido posible confrontar esta información con datos de pluviosidad que confirmen este hecho.

Del análisis de los datos existentes se puede concluir que son los materiales neógenos de la formación Gigante los más proclives a sufrir procesos de remoción en masa, principalmente por ser una unidad poco resistente cuando se exhuma y que ha sufrido la principal acción erosiva de los cauces de desembocan en el río Magdalena dando lugar a una fuerte incisión de la red de drenaje.

Los procesos son principalmente deslizamientos rotacionales en combinación con tipologías tipo flujo dependiendo de la disponibilidad de agua en el momento del deslizamiento. También se han observado casos de caídas en la zona de Peña Redonda que afectan a las viviendas que se encuentran alrededor de la misma.

En el interior de la zona urbana cabe reseñar que principalmente los problemas vienen derivados por caídas de taludes e inestabilidades en las zonas de fuertes pendientes donde se han realizado asentamientos de mejor o peor calidad. Los acontecimientos se suelen generar en épocas de lluvias pero están fuertemente ligados a la ausencia de medidas de estabilización, sobrecargas en la cabeza del talud o filtraciones.

### 3.4 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD. MODELO BIVARIANTE

En los análisis estadísticos bivariados, se definen diferentes variables temáticas, una variable dependiente que viene representada como la capa que recoge los eventos sucedidos y cartografiados y diferentes factores condicionantes recogidos en las capas temáticas, cuya importancia relativa se analiza de forma separada para cada una.

Para el modelamiento de la susceptibilidad, el método calcula los pesos de cada variable o factor causante de movimientos basado en la presencia o ausencia de los movimientos dentro del área de estudio. Así, los datos históricos de eventos son esenciales para el pesaje de los factores. El modelamiento también se basa en la suposición de que los futuros movimientos ocurrirán en condiciones similares a aquellas que han contribuido a la ocurrencia de pasados movimientos. Además, asume que dichos factores permanecen constantes en el tiempo.

Para el cálculo de la susceptibilidad de los procesos de ladera se ha procedido a utilizar en método bivariante planteado por Van Westen. El método consiste en ponderar cada una

de las categorías de las respectivas capas temáticas en base a la superficie afectada por deslizamientos de cada una de ellas. Para ello se utiliza la totalidad del inventario de eventos existentes en la zona, habiéndose procedido a su restitución aproximada dada la dificultad de dicho proceso en zonas urbanas densamente pobladas.

El método se basa en la siguiente fórmula:

$$\ln W_i = \ln \frac{Densclass}{Densmap} = \ln \left( \frac{\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)}}{\frac{\sum Npix(Si)}{\sum Npix(Ni)}} \right)$$

- $W_i$ : el peso dado a una clase o categoría
- Densclass: densidad de deslizamientos para una determinada clase
- Densmap: densidad de deslizamientos para toda la zona de estudio
- $Npix(Si)$ : número de píxeles pertenecientes a deslizamientos contenidos en una clase
- $Npix(Ni)$ : número total de píxeles de una determinada clase

La Tabla 12 recoge los distintos pesos asignados en el análisis bivariante

Tabla 12 Pesos calculados para el análisis bivariante

| GEOLOGÍA | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
|----------|----------------|-------------|------------|-------------|
| Qab      | 22.493.192,257 | 6.442,528   | 0,00028642 | -0,1783887  |
| Qal      | 351.818,358    | 234,243     | 0,00066581 | 0,6651471   |
| Qal0     | 716.894,693    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qalc     | 2.291.330,698  | 893,328     | 0,00038987 | 0,1299685   |
| Qalm     | 9.095.278,152  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt10     | 938.099,134    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt1c     | 306.165,317    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt1m     | 6.750.062,599  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt2c     | 2.520.131,952  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt2m     | 8.342.877,088  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Qt3m     | 4.510.363,151  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |

| GEOLOGÍA          | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
|-------------------|----------------|-------------|------------|-------------|
| Qt4m              | 3.237.545,908  | 78,082      | 0,00002412 | -2,6529123  |
| Qtv               | 124.436,506    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Tgi               | 38.578.671,815 | 26.641,372  | 0,00069057 | 0,7016688   |
| GEOMORFOLO        | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
| AA                | 315.304,541    | 237,086     | 0,00075193 | 0,7867883   |
| GEOMORFOLO        | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
| Ab                | 22.190.045,014 | 3.948,877   | 0,00017796 | -0,6543094  |
| LL10              | 754.260,501    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| LL1c              | 1.849.575,053  | 904,177     | 0,00048886 | 0,3562170   |
| LL1m              | 9.710.877,211  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| Sp                | 1.456.531,393  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T0m               | 1.280.910,140  | 8.406,698   | 0,00656307 | 2,9533609   |
| T10               | 1.129.947,239  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T1c               | 346.185,873    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T1m               | 7.173.817,377  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T1v               | 100.664,398    |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T2c               | 2.683.700,168  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T2m               | 7.799.538,551  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T3m               | 3.723.091,554  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| T4m               | 2.710.490,118  | 79,037      | 0,00002916 | -2,4630685  |
| VE                | 38.253.361,947 | 21.126,609  | 0,00055228 | 0,4782049   |
| GEOTECNIA         | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
| UGI 1             | 10.326.945,471 |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| UGI 1 SUB2        | 4.331.123,531  | 78,082      | 0,00001803 | -2,9439237  |
| UGI 1 SUBUNIDAD 1 | 8.228.324,438  |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| UGI 2             | 22.490.054,841 | 6.442,528   | 0,00028646 | -0,1782492  |
| UGI 3             | 16.298.520,437 | 1.127,571   | 0,00006918 | -1,5991058  |
| UGI 4             | 38.585.396,023 | 26.641,372  | 0,00069045 | 0,7014945   |

| PENDIENTES | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
|------------|----------------|-------------|------------|-------------|
| 0 - 10     | 88.708.336,563 | 13.345,871  | 0,00015045 | -0,8222438  |
| 10 - 20    | 6.959.631,162  | 8.702,292   | 0,00125040 | 1,2953630   |
| 20 - 30    | 3.435.540,276  | 10.315,306  | 0,00300253 | 2,1713576   |
| 30 - 40    | 978.779,280    | 1.576,606   | 0,00161079 | 1,5486266   |
| PENDIENTES | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
| 40 - 50    | 155.468,914    | 255,935     | 0,00164621 | 1,5703810   |
| 50 - 60    | 21.524,391     | 88,027      | 0,00408962 | 2,4803559   |
| 60 - 70    | 3.871,634      | 5,516       | 0,00142471 | 1,4258719   |
| 70 - 80    | 478,677        |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| 80 - 90    | 2,739          |             | 0,00000001 | -10,4410224 |
| CURVATURA  | AREA TOTAL     | AREA EVENTO | DensClas   | Lmvi        |
| "-10 - -1" | 3.326.513,251  | 6.320,590   | 0,00190006 | 1,7137910   |
| "-1 - 1"   | 93.664.773,078 | 20.914,513  | 0,00022329 | -0,4273758  |
| "1 - 10"   | 3.272.347,367  | 7.054,449   | 0,00215578 | 1,8400540   |

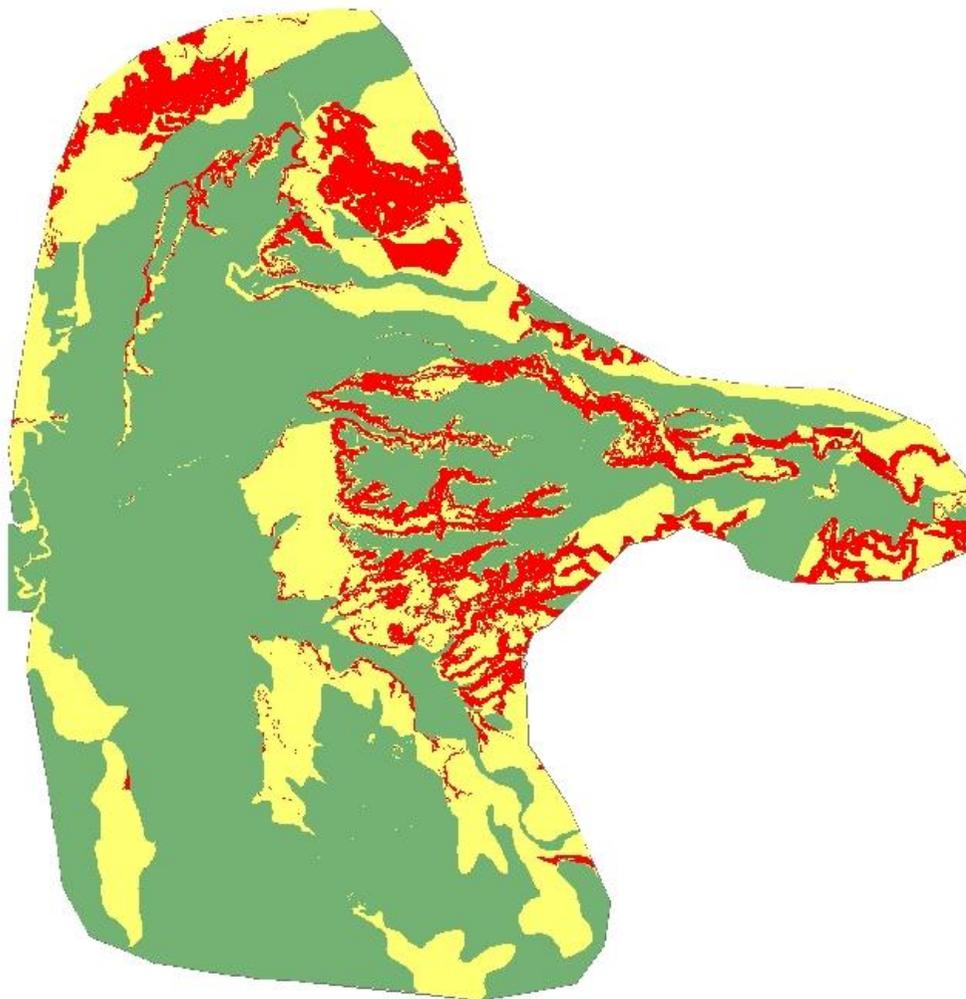
Fuente: IDOM

En los pesos se observa que clases son las que presentan mayor susceptibilidad a la generación de los procesos de remoción en masa. A partir de la Tabla 12 observamos que la unidad geológica más proclive a la generación de eventos es la formación Gigante. En cuanto a la geomorfología son los depósitos de terrazas colgadas del Magdalena (en principio se refiere a los existente en el Cerro de San Pedro) las que presentan mayores problemáticas seguidas de los vertientes de la Fm Gigante. Por otro lado son las pendientes entre 50 y 60° y entre 20 y 30° las que presentan mayor porcentaje de remoción en masa, las primeras principalmente debido al resalte topográfico de Peña Redonda, siendo el concepto más general el de los 20-30°.

El mapa final reclasifica según el resultado con el fin de definir clases categóricas de riesgo (alto, medio, bajo) teniendo en cuenta que pesos positivos implican unas condiciones favorables al desencadenamiento de los procesos, mientras que valores negativos indican

una falta de correlación entre el factor condicionante y el proceso de remoción en masa como se muestra en la Figura 13.

Figura 13 Mapa Bivariante para la ciudad de Neiva



Fuente: Elaboración propia

Se ha analizado la representatividad del mapa confrontando los deslizamientos descritos con carácter puntual extraídos de la base de datos excluyendo aquellos deslizamientos definidos en las cartografías geológicas como depósitos de procesos de remoción en masa. A partir de dichos deslizamientos se ha observado que el 75.3% se encuentran en zonas de susceptibilidad alta, mientras que un 16% se encontrarían en zonas de susceptibilidad media y solo un 8% en la clase baja.

La zona de susceptibilidad alta se entiende como las zonas que son más propensas a sufrir procesos de remoción en masa. Se trata de zonas en las que se han observado procesos de inestabilidad activos, que involucran al sustrato existente. Se trata principalmente de los materiales de la Fm Gigante que se encuentran en zonas con pendientes altas. Debido a las altas pendientes y susceptibilidad a la falla de los terrenos de estas zonas, cualquier actividad ingenieril tendrá que analizar y garantizar la estabilidad de los taludes diseñados. El mal manejo de aguas superficiales y en general del suelo pueden acelerar la profundización y extensión de las cárcavas y deslizamientos. La construcción y mantenimiento de obras requieren el diseño detallado de medidas preventivas, correctivas o de control de los procesos gravitacionales. Es decir, son zonas donde es técnicamente posible construir pero con un coste mayor al del resto.

Las zonas de susceptibilidad media se encuentran en transición con las de alta conforme se suavizan las pendientes. Se trata de zonas naturalmente estables, en las que la realización de taludes o cortes del terreno pueden dar lugar a inestabilidades si estos no son diseñados con geometrías estables, o en su defecto se deberán prever medidas de estabilización de los mismos una vez abiertos.

Finalmente las zonas de baja susceptibilidad se caracterizan por áreas estables donde no se observan procesos de inestabilidad recientes y donde predominan las áreas de baja pendiente. Se debe tener especial cuidado con las zonas adyacentes a los ríos y quebradas, donde por efecto de socavación lateral se pueden llegar a inestabilizar las laderas adyacentes.

### 3.5 EXPOSICIÓN DE VIVIENDAS E INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS

En este apartado se procederá a determinar cuáles son las infraestructuras críticas expuestas en la ciudad de Neiva a fenómenos de remoción en masa.

Para ello, una vez obtenido el modelo bivariante, se ha cruzado con el *shape* que contiene la información de la localización de las mismas en base a la información obtenida del POT de la ciudad, así como la superficie construida de estas edificaciones.

Del total de infraestructuras en la ciudad solo aparece en zona de susceptibilidad alta el centro de salud “ESE Carmen Emilia Ospina Oriente” más conocido como *7 de Agosto*.

Análogamente, se ha determinado el número de viviendas expuestas en zonas de susceptibilidad a remoción en masa alta, estimándose un total de 8.011.

### 3.6 ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD/AMENAZA

Cabe señalar que los estudios arrojan lineamientos generales para la planificación del territorio, acorde a la escala de intervención abordada, según lo estipulado en el contrato de consultoría No.26 de 2016 suscrito entre la Financiera de Desarrollo Territorial S.A e IDOM Ingeniería y Consultoría S.A.U; teniendo en cuenta lo anterior, aunque los estudios se convierten en herramienta fundamental de toma de decisiones, se recomienda al municipio adelantar estudios a una escala más detallada en caso de querer ejecutar intervenciones puntuales en las zonas de riesgo delimitadas por el presente estudio.

Como se ha visto anteriormente en la zona de estudio se pueden diferenciar dos ambientes distintos en los que se generan problemas de procesos de remoción en masa.

Por un lado la zona urbana donde los asentamientos han llegado a cubrir completamente las laderas de vertientes fuertes, ejecutando terraplenes y cortes de manera poco controlada (ver Figura 14). Ha llegado el caso de que en ocasiones en zonas donde se han producido deslizamientos y la alcaldía ha actuado reubicando personal y ejecutando obras de contención (muros de gaviones en la Comuna 8) se ha vuelto a producir una invasión de la zona poniendo en riesgo a los nuevos moradores.

Figura 14 Edificaciones en riesgo en la ciudad de Neiva



Fuente: Elaboración propia

Los principales factores desencadenantes son antrópicos, como mala ejecución de los cortes, terraplenes mal ejecutados, mala gestión de redes de abastecimiento y residuales que generen pérdidas, sobrecarga de los taludes etc. Los eventos se pueden ver finalmente desencadenados ante una época de lluvias que incremente la presión de agua en el terreno desestabilizando los materiales.

Por otro lado se observan zonas de riesgo en zonas más naturales donde la invasión urbana se está produciendo en el momento actual (Zona de la Loma de San Pedro, Mirador Alto y Bajo, Escandal I y II, Tesoro, Peña Redonda) Figura 15 y 3-10. En estas zonas existen taludes de pendientes medias a altas que presentan vestigios de procesos de remoción en masa lo que las clasifica de susceptibilidad alta y en ocasiones media a los procesos de remoción en masa.

Figura 15 Laderas con vestigios de procesos de remoción en masa en la Loma de San Pedro.



Fuente: Elaboración propia

En estas zonas es importante un fuerte control desde las administraciones con el fin de gestionar correctamente las actuaciones, definiendo algunas actuaciones de mitigación que se citan a continuación:

- Zonas de resguardo en cabecera y pie de los taludes en forma de bandas de protección de no menos de 5 m donde se evite la colocación de viviendas, redes de abastecimiento o elementos que puedan producir filtraciones de agua en el terreno.
- Evitar la realización de cortes de taludes subverticales sin muros o elementos de protección.
- Evitar la generación de terraplenes a media ladera que no estén íntegramente cimentados en su totalidad en el interior de la ladera.
- Planificación de redes de abastecimiento y de residuos con el fin de evitar pérdidas de las mismas.
- Prohibición de ejecución fosas sépticas y lanzamientos de aguas residuales, en zonas de susceptibilidad alta o media.
- Dotar a las zonas superiores de los taludes de cunetas de guarda que eviten la erosión de los mismos.
- Evitar descalces en el pie de las laderas o taludes que presentan rasgos de inestabilidad

- Realizar estudios de estabilidad global de la ladera ante cortes de taludes o laderas inestables que sean inevitables.

Figura 16 Viviendas en zonas de riesgo en la zona de la Loma de San Pedro (Izqda) y Escandal (Dcha)



Fuente: Elaboración propia

Dentro de las actuaciones de mitigación se pueden plantear medidas normativas. Se trata de un tipo de actuación que iría relacionada con la minimización de la vulnerabilidad de las construcciones. Dada la clara tendencia de ocupación de zonas de elevadas pendientes sería bueno definir un manual de buenas prácticas constructivas para dichas zonas en las que se defina calidad de los materiales de construcción, la tipología y cimentación de los palafitos, empotramientos mínimos en roca sana, distancias mínimas al borde de talud y sistemas de lanzamiento de aguas residuales y pluviales con el fin de minimizar al máximo la erosión del talud. Dicho manual debiera ser de obligado cumplimiento.

Por otro lado están las medidas referidas a la planificación, como las contempladas en este documento excluyendo zonas de edificación o limitando la tipología de las construcciones en ciertas zonas donde la susceptibilidad puede ser mayor. Los asentamientos ilegales presentan vulnerabilidades muy altas, y ante procesos de pequeñas dimensiones pueden generarse pérdidas elevadas.

Finalmente existen las medidas ingenieriles en forma de muros, y redes de cables que sostienen la ladera, que se ejecutan directamente en la zona afectada o en la zona propensa a sufrir este tipo de procesos. Este tipo de estructuras deben de tener un mínimo de garantías tanto técnicas como de materiales, suelen implicar costos elevados.

Como se ha venido diciendo en el presente documento, el riesgo es una combinación de distintos factores. Dado que la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa está muy limitada en la zona de estudio, las medidas basadas en la planificación y en correctas prácticas constructivas son las idóneas para la zona de estudio que nos concierne.

## 4 ESTUDIO DE SEQUÍA URBANA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La sequía representa una amenaza no solo para el sector de la agricultura, sino también para el desarrollo de la población en las áreas afectadas por este fenómeno.

Es así que en los últimos años se está incrementando su estudio con el objetivo de estimar sus potenciales impactos, de forma que se puedan establecer predicciones de disponibilidad de agua, complementando esto con su análisis bajo los escenarios de cambio climático y crecimiento urbano.

### 4.2 SISTEMA DE ACUEDUCTO DE NEIVA.

La fuente de captación del acueducto del municipio de Neiva, es el río Las Ceibas. El sistema está formado por tres bocatomas, El Guayabo I, el Guayabo II y El Tomo cuya localización respecto a la cuenca (límite rojo) y la ciudad (gris) se muestra en la Figura 17.

En este apartado se describen las estructuras de captación, así como la capacidad máxima de cada una de ellas, según la información recopilada en el diagnóstico de las bocatomas del Plan Maestro de Acueducto de la Empresa de Aguas de Neiva.

Figura 17: Localización de las bocatomas del sistema de acueducto de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1 Sistema El Guayabo

El sistema de abastecimiento de **El Guayabo**, se encarga de abastecer una parte de la población del casco urbano del municipio de Neiva, la zona sur y oriental. Este sistema tiene una captación con una capacidad de **1200 l/s**, de acuerdo a la Empresa de Aguas de Neiva.

La bocatoma El Guayabo, se encuentra ubicada 100 m aproximadamente. aguas arriba del puente El Guayabo, estructura que pertenece a la vía que conduce de Neiva al Municipio de San Antonio. Sus coordenadas geográficas son  $75^{\circ}08'57''\text{O}$  y  $2^{\circ}55'15''\text{N}$  y se encuentra a una altura de 660 m.s.n.m. Es una captación de tipo lateral, se encuentra ubicada en la

margen derecha del río, tiene una presa derivadora (Figura 18 derecha) construida en concreto ciclópeo con una longitud de 22 m y altura de 3.5 m con vertedero frontal.

La estructura de captación tiene un canal derivador de 1.5 m de ancho y 11 m de largo (Figura 18 izquierda) que dirige las aguas hacia el sistema de abastecimiento. Al final de este canal se tiene una compuerta en acero de 36" de diámetro, la cual regula las aguas que se dirigen a los desarenadores, presenta un rebose de excesos mediante un vertedero lateral con una longitud de 6 m y a una altura sobre la solera del canal de 0.95 m, la elevación de los muros del vertedero se prolonga hasta 0.55 m por encima de la cresta de dicha estructura; este vertedero graduable mediante láminas de acero permite variar la altura de agua captada y los excesos los dirige hacia un canal de salida de 1.3 m de ancho, 14 m de longitud y una pendiente longitudinal de 24%.

Figura 18: Canal (izquierda) y presa de derivación en la captación el Guayabo I.



Fuente: Plan Maestro de Acueducto de EPN.

#### 4.2.2 Sistema El Guayabo II

El sistema de captación, construido en 2006 (Figura 19), aumentó la capacidad de captación del Guayabo en **300 l/s**, de acuerdo a la Empresa de Aguas de Neiva. La ampliación de la

captación **El Guayabo** es de tipo lateral y fue construida en concreto reforzado. El muro de cerramiento izquierdo sirve como apoyo lateral de la nueva estructura. La nueva longitud del muro lateral izquierdo es de 47 m acompañado de una aleta de 6.7 m de longitud con un ángulo de 70° dirigida hacia aguas arriba del río, con el objetivo de prevenir la erosión y posterior inestabilidad de las bancas en época de crecientes.

Figura 19: Construcción en 2006 del cuerpo de la nueva bocatoma (El Guayabo II).



Fuente: Plan Maestro de Acueducto de EPN.

#### 4.2.3 Sistema El Tomo

El sistema **El Tomo** capta aguas del río Las Ceibas y las entrega a las Plantas de Tratamiento de Agua Potable, PTAP El Jardín y Kennedy. Provee parte del suministro para las zonas norte, sur, centro y oriental baja del casco urbano de Neiva mediante los tanques ubicados en los predios de la PTAP El Jardín; los tanques de la PTAP Kennedy se encargan de realizar el abastecimiento a parte de las zonas centro, centro norte y centro sur del municipio de Neiva.

Sus coordenadas geográficas son 75°13'13" O y 2°56'46"N, en la cota 530 msnm. Se encuentra ubicada la captación de El Tomo o Antigua. Esta obra tiene una capacidad de **1500 l/s** y se encarga de abastecer a las plantas de tratamiento de El Jardín y Kennedy. La captación fue construida en marzo de 1972.

Es una estructura de toma de tipo lateral que se encuentra localizada sobre la margen izquierda del Río Las Ceibas tiene una presa vertedero ubicada transversalmente (Figura 20) sobre el cauce del río con una longitud de 28 m y una altura de 3.83 m. Presenta un canal de excesos y de limpieza localizado entre el canal de toma y el cuerpo de la presa derivadora, el cual tiene un ancho de 1.5 m, presenta altura variable, la pendiente del canal es del 10% y está provisto con una compuerta deslizante de sección cuadrada de lado 1 m la cual en el momento de la apertura permite arrastrar o limpiar hidráulicamente los sedimentos que se acumulen en esta estructura de captación, y verterlos nuevamente al Río Las Ceibas aguas abajo de la bocatoma. La captación tiene un muro deflector de 34 m de longitud, localizado dentro del cauce del río con el fin de orientar el flujo hacia la toma.

Figura 20: Bocatoma el Tomo



Fuente: Plan Maestro de Acueducto de EPN.

### 4.3 OFERTA HÍDRICA

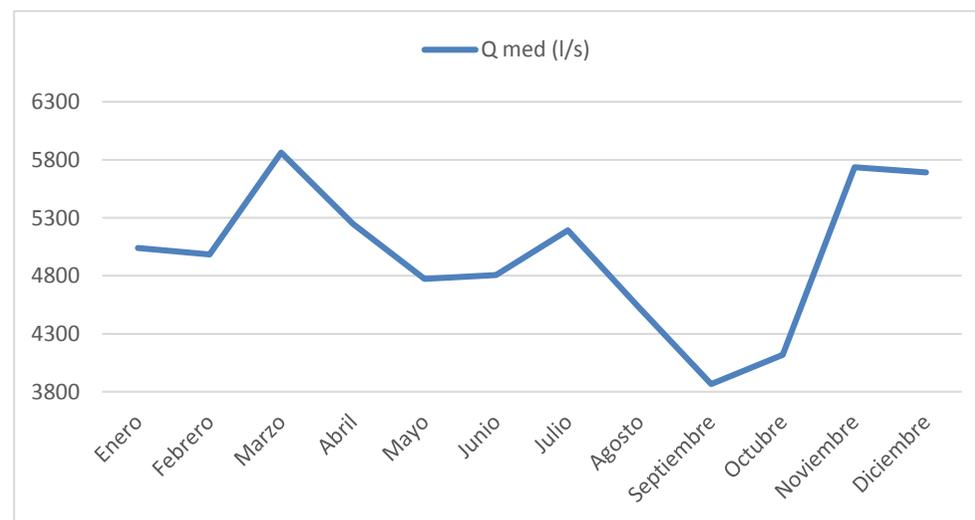
El comportamiento del caudal medio del río Las Ceibas durante el año toma importancia toda vez que es la base para la determinación de la oferta hídrica indispensable para regulación de corrientes y determinación del índice de escasez.

#### 4.3.1 Oferta hídrica clima presente

Para la determinación de la oferta hídrica con clima presente se han analizado los caudales medios históricos en la estación Guayabo, coincidente con la localización de la principal bocatoma de la red de acueducto del Municipio.

La serie obtenida de la estación fluviométrica del IDEAM 2111780 "El Guayabo" cuenta con datos medios mensuales desde 1980 hasta 2014, por lo que se considera fiable para el análisis requerido. Los caudales medios son muy heterogéneos a lo largo del año, siendo mayores en invierno y menores en verano tal y como se muestra en la Figura 21.

Figura 21: Caudales medios mensuales (l/s) en la estación El Guayabo



Fuente: Elaboración propia

### REDUCCIÓN POR CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua es factor que limita la disponibilidad del recurso hídrico y restringe en un amplio rango de posibles usos. La mayoría de los ríos colombianos reciben y acarrean cargas de agua utilizada para los diferentes procesos de la actividad socioeconómica y son vertidos en gran porcentaje sin tratamiento previo, además son los receptores de altos volúmenes de sedimentos, originados por procesos de erosión sea esta de origen natural o derivada de la acción antrópica. (ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA, 2000).

Se ha definido la oferta hídrica como los caudales medios mensuales de la serie histórica reducida un 25% como consecuencia de la calidad del agua, siendo éste un limitante de la disponibilidad del recurso.

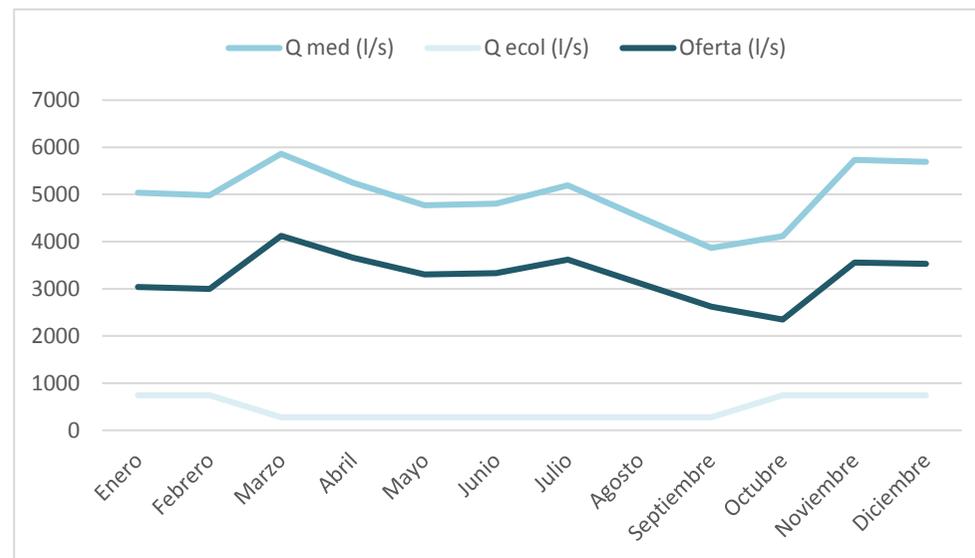
### CAUDAL ECOLÓGICO

El caudal ecológico se puede definir como aquel que contribuye a alcanzar el buen estado o buen potencial ecológico en los ríos o en las aguas de transición y mantiene, como mínimo, la vida piscícola que de manera natural habitara o pudiera habitar en el río, así como su vegetación de ribera.

En el caso del río Las Ceibas, este caudal está fijado por la Corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM), recogido en el Plan de Ordenación de la Cuenca Hidrográfica del río Las Ceibas. Este caudal es diferente en el periodo de bajas precipitaciones y en el de altas precipitaciones consecuente con los caudales naturales del río. El caudal establecido es de 742 l/s en tiempo de lluvias y 271 l/s en tiempo seco.

En la Figura 22 se muestra la oferta hídrica en metros cúbicos mensuales.

Figura 22: Oferta hídrica en m<sup>3</sup>/mes teniendo en cuenta la reducción por calidad y caudal ecológico.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2 Oferta hídrica con cambio climático en 2050.

En el Anexo A “Proyecciones de precipitación y temperatura por Cambio Climático” se muestran los resultados obtenidos para cada horizonte temporal, modelo de proyección utilizado y escenario de cambio climático, obteniéndose las conclusiones que se muestran a continuación:

En cercanías de la ciudad de Neiva y aguas arriba del río Las Ceibas, en el clima futuro 2041-2070 bajo el escenario optimista, la precipitación mensual muestra en promedio disminuciones porcentuales con respecto al clima presente en el mes de enero y diciembre, hasta de 30%, los otros meses indican aumentos entre el 14% y 1065%, los mayores cambios ocurrirán para los meses de junio, julio y agosto, con variaciones entre 415-953%, 244-655% y 432-1065%, respectivamente. Bajo el escenario moderado, la precipitación

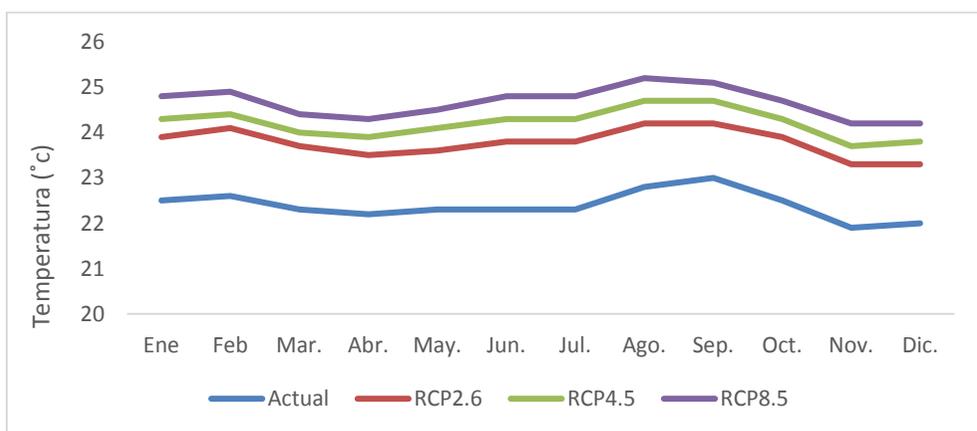
muestra disminuciones con respecto al clima presente principalmente en algunos meses de final de año, con reducciones hasta de 22%, mientras que en el resto del año muestra aumentos que fluctuarán entre 27% y 327%, presentando junio el mayor cambio. En el escenario pesimista, el promedio de los modelos indican que la precipitación disminuirá entre el 3% y 15% en los meses de febrero, mayo, septiembre y octubre con respecto al clima actual, en el resto del año los cambios serán positivos, con valores porcentuales entre 4% y 3117%, los meses de junio, julio y agosto se destacarán por los mayores cambios, 311%, 172% y 230%, respectivamente.

La temperatura media mensual tendrá aumentos bajo el escenario optimista entre 5% y 7%, en el escenario moderado entre el 7% y 9% y en el escenario pesimista el 9% y 11%.

En la Figura 23 se muestra la temperatura media mensual con clima actual y en los tres escenarios de cambio climático estudiados (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5), donde se aprecia el aumento de las temperaturas en todos los meses del año.

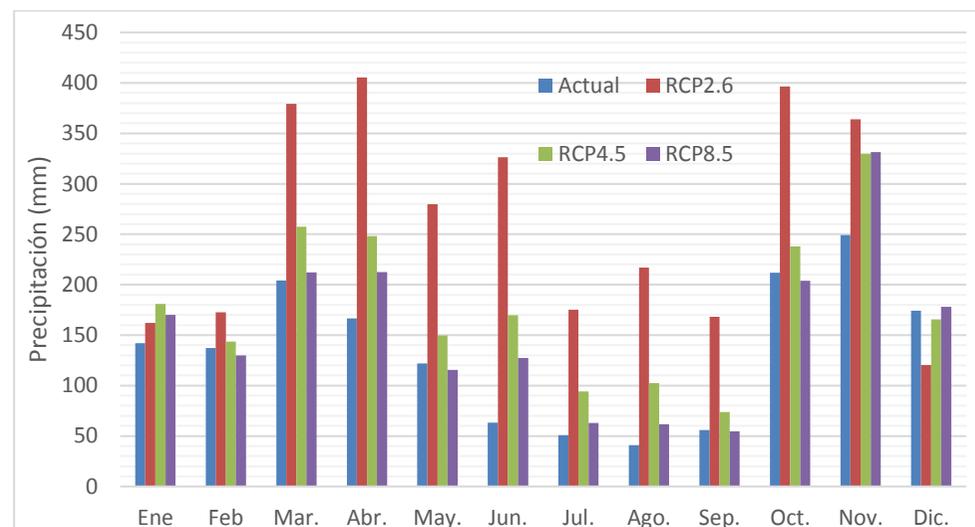
En la Figura 24 se muestran las precipitaciones medias mensuales para clima actual y para los tres escenarios de cambio climático analizados.

Figura 23: Temperatura media mensual actual y en 2050 bajo tres escenarios de CC.



Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Precipitaciones medias mensuales en la actualidad y en 2050.



Fuente: Elaboración propia

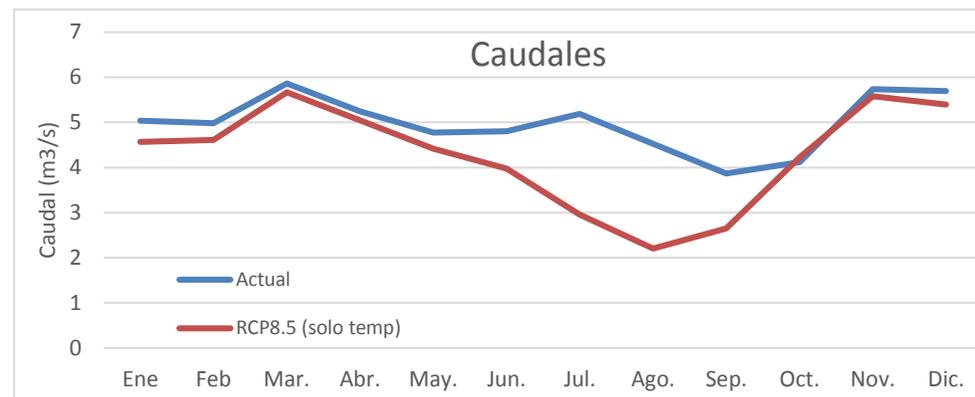
Con los nuevos datos de precipitación y temperatura se han obtenido los nuevos caudales en el cauce a la altura de la estación El Guayabo. El aumento de la temperatura incidirá en los caudales al aumentar la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera por evapotranspiración, no llegando al cauce en forma de escorrentía superficial. Para calcular los nuevos valores de evapotranspiración potencial y real se ha utilizado la fórmula de Thornwaite que tiene en cuenta la temperatura y las horas de luz diarias.

A modo de ejemplo la temperatura media en enero pasará de 22,5 a 24,8 en el escenario RCP8.5 de cambio climático, eso lleva que los caudales actuales en ese mes que alcanzan de media los 5 m3/s no superen los 4,5 m3/s. En el lado opuesto las proyecciones indican un aumento de las precipitaciones medias especialmente en los meses más secos, siguiendo el mismo ejemplo, en el mes de enero la precipitación media en la actualidad es de 142.1 mm, que podría llegar a los 170.1 mm en el escenario RCP8.5, pasando el caudal de los mencionados 5 m3/s a 6,4 m3/s.

Con esto se podría pensar que el aumento de las precipitaciones medias compensará el aumento de la temperatura y que la oferta hídrica no se verá afectada por el efecto del cambio climático, sin embargo, la incertidumbre asociada a las proyecciones de las precipitaciones es mucho mayor que la asociada a las proyecciones de la temperatura, de hecho todos los modelos de proyección de temperatura suelen dar, para una misma región, unos datos coherentes, lo que no pasa con las proyecciones de precipitación, que varían mucho con el modelo utilizado y con el escenario seleccionado. Esto se debe a que el aumento de la temperatura es una consecuencia directa del cambio en el balance energético terrestre al disminuir la cantidad de energía que se devuelve al espacio por efecto de los gases de efecto invernadero, este aumento de la temperatura modifica el ciclo hidrológico, aumentando la precipitación en algunos lugares, disminuyéndolos en otros, variando su distribución y su intensidad, parámetros cuyo comportamiento es más caótico y está asociado a un nivel de incertidumbre mucho mayor. Es por ello que en el presente estudio se ha tomado la hipótesis conservadora que supone considerar el aumento de la temperatura y mantener las precipitaciones actuales.

Con esto el caudal medio mensual y por tanto la oferta hídrica se vería disminuida por efecto del aumento de la evapotranspiración, obteniéndose los caudales medios mensuales en el escenario pesimista de cambio climático (RCP8.5) en 2050 que se muestran en la Figura 25.

Figura 25: Caudales medios mensuales con clima actual y con aumento de la temperatura por efecto del cambio climático (RCP8.5)



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 DEMANDA HÍDRICA

##### 4.4.1 Demanda hídrica actual.

La demanda hídrica es la suma del consumo doméstico, comercial, industrial, agrícola y pecuario.

##### DEMANDA ACUEDUCTO

Para la estimación de la dotación por habitante se han tenido en cuenta los consumos históricos recogidos en el Plan Maestro de Acueducto de Empresas Públicas de Neiva.

En dicho informe se presenta el volumen de agua tratada y el volumen de agua facturada desde al año 2001 hasta 2010, siendo la diferencia de ambas medidas la cantidad de agua no contabilizada, tal y como se detalla en la Tabla 13.

Tabla 13 Volúmenes de agua tratada y facturada en Neiva

| Año  | Volumen del agua tratada (m <sup>3</sup> /año) | Volumen del agua facturada (m <sup>3</sup> /año) | Índice del agua no contabilizada |
|------|--|--|----------------------------------|
| 2001 | 44,471,926                                     | 20,490,694                                       | 53,92%                           |
| 2002 | 46,515,868                                     | 20,113,931                                       | 56,76%                           |
| 2003 | 47,386,980                                     | 20,320,135                                       | 57,12%                           |
| 2004 | 48,334,720                                     | 25,322,678                                       | 47,61%                           |
| 2005 | 49,301,418                                     | 28,247,523                                       | 42,70%                           |
| 2006 | 49,301,418                                     | 28,247,523                                       | 42,70%                           |
| 2007 | 49,301,418                                     | 28,247,523                                       | 42,70%                           |
| 2008 | 49,301,418                                     | 28,247,523                                       | 42,70%                           |
| 2009 | 49,301,418                                     | 28,247,523                                       | 42,70%                           |
| 2010 | 42,980,129                                     | 17,579,358                                       | 59.10%                           |

Fuente: Plan Maestro de Acueducto de EPN

Se muestra a continuación, en la Tabla 14 el consumo per cápita, bruto y facturado, teniendo en cuenta el índice de agua no contabilizada así como la población cubierta por el sistema de acueducto de Neiva:

Tabla 14 Consumo per cápita en Neiva

| Año  | Población estimada | Cobertura | Población cubierta | Consumo bruto per cápita (l/día) | Consumo facturado per cápita |
|------|--------------------|-----------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 2008 | 357,260            | 98,60%    | 352,258            | 383.45                           | 219.70                       |
| 2009 | 363,105            | 98,60%    | 358,022            | 377.27                           | 216.16                       |
| 2010 | 368,950            | 98,60%    | 363,785            | 371.30                           | 212.74                       |

Fuente: Plan Maestro de Acueducto de EPN

Teniendo en cuenta que el consumo neto per cápita o dotación de la serie, ha ido disminuyendo desde 220 l/día en 2008 hasta los 213 l/día en 2010, se estima para el año 2016, que esta tendencia continúa pero de forma más gradual, estableciendo el consumo en 210 l/día. Respecto a el índice de agua no contabilizada, donde las pérdidas técnicas en la red, tienen un peso importante se supone que éstas se mantienen desde 2010, si bien, en dicho Plan se recoge la intención de disminuirlas gradualmente hasta el 25% en 2020, no se tiene constancia de que se haya implementado ningún proceso de revisión y actualización de la red, tomando como índice conservador el mostrado en la tabla anterior para los años 2008, 2009 y 2010.

Con esto obtenemos los siguientes consumos como demanda del sistema de acueducto al río Las Ceibas mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15 Demanda de acueducto

| Año                                  | 2016       |
|--------------------------------------|------------|
| Habitantes                           | 326,770    |
| Dotación (l/hab/día)                 | 210        |
| Agua no contabilizada (%)            | 43         |
| Consumo diario (m <sup>3</sup> /día) | 120,389    |
| Consumo anual (m <sup>3</sup> /año)  | 43,941,966 |
| Q (l/s)                              | 1393.4     |

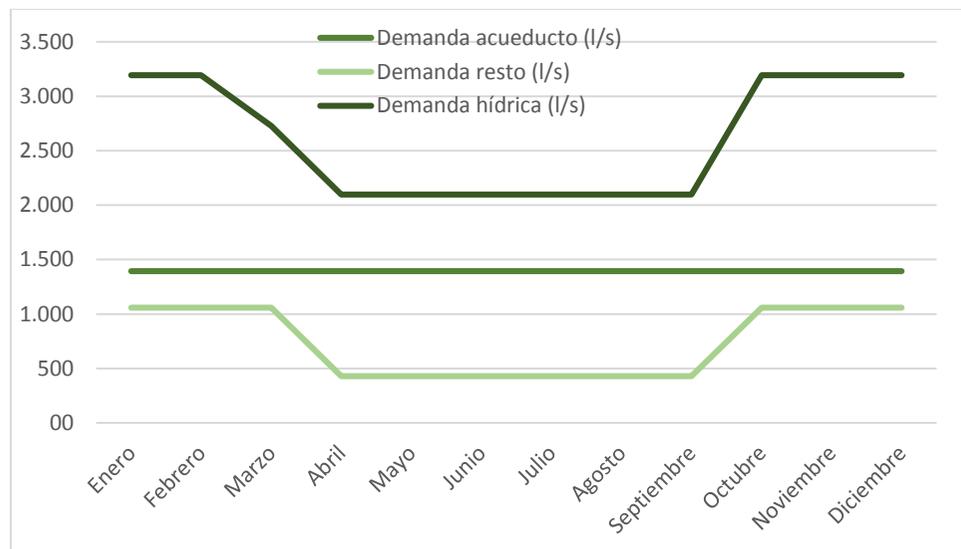
Fuente: Elaboración propia

### RESTO DE CONSUMOS

Para el resto de consumos, no se cuenta con contadores que faciliten datos fiables del consumo real para agricultura principalmente, pero sí se conocen las concesiones dadas en el Plan de Ordenación de la Cuenca Hidrográfica del río Las Ceibas, siendo estas, variables entre el verano y el invierno, para no afectar el caudal ecológico del río como consecuencia de la diferencia en los caudales naturales del río a lo largo del año. El total de las concesiones asciende a 1.058 l/s en invierno y a 429 l/s en verano, época en la que se prohíbe el cultivo de arroz para no agravar la escasez en estos meses.

En la Figura 26 se muestra la **demanda hídrica** como suma del caudal ecológico, acueducto y el resto de concesiones recogidas en el POCH del río Las Ceibas.

Figura 26: Demanda hídrica en l/s



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2 Demanda hídrica en 2050.

Para el cálculo de la demanda en el año 2050, se ha considerado el aumento poblacional esperado, detallado en el módulo 3 de desarrollo urbano, suponiendo constante las pérdidas en la red y aumentando la dotación por habitante a 250 l/hab/día en vez de los 210 l/hab/día actuales. En la Tabla 16 se muestran los caudales esperados en el año 2050 para consumo urbano en Neiva.

El resto de demandas se ha considerado constante en la cuenca.

Tabla 16 Demanda de acueducto actual y en 2050.

| Año                                  | 2016       | 2050       |
|--------------------------------------|------------|------------|
| Habitantes                           | 326.770    | 407.398    |
| Dotación (l/hab/día)                 | 210        | 250        |
| Pérdidas en la red (%)               | 43         | 43         |
| Consumo diario (m <sup>3</sup> /día) | 120,389    | 145,645    |
| Consumo anual (m <sup>3</sup> /año)  | 43.941.966 | 53.160.347 |
| Q (l/s)                              | 1393,4     | 1685,7     |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 BALANCE HÍDRICO. ÍNDICE DE ESCASEZ

##### 4.5.1 Balance hídrico e índice de escasez actual

Se registra escasez de agua cuando la cantidad del recurso tomada de las fuentes existentes es tan grande que se suscitan conflictos: de acuerdo con la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo (UN et al, 1997).

En la Tabla 17 se muestra las categorías de índice de escasez recogidas en el Estudio Nacional del Agua realizado por el IDEAM en el año 2000. En la Tabla 18 se muestran los resultados específicos obtenidos en el presente estudio.

Tabla 17 Categorías del índice de escasez

| Categoría        | Índice de escasez | Definición  |
|------------------|-------------------|---|
| No significativo | < 1               | Demanda no significativa con relación a la oferta |
| Mínimo           | 1 - 10%           | Demanda muy baja con respecto a la oferta         |
| Medio            | 11 - 20%          | Demanda baja respecto a la oferta                 |
| Medio alto       | 21- 50%           | Demanda apreciable                                |
| Alto             | > 50              | Demanda alta con respecto a la oferta             |

Fuente: Estudio Nacional del Agua, IDEAM 2000

Tabla 18 Índice de escasez actual, sin pérdidas en la red y con las pérdidas objetivo del Plan Maestro de Acueducto.

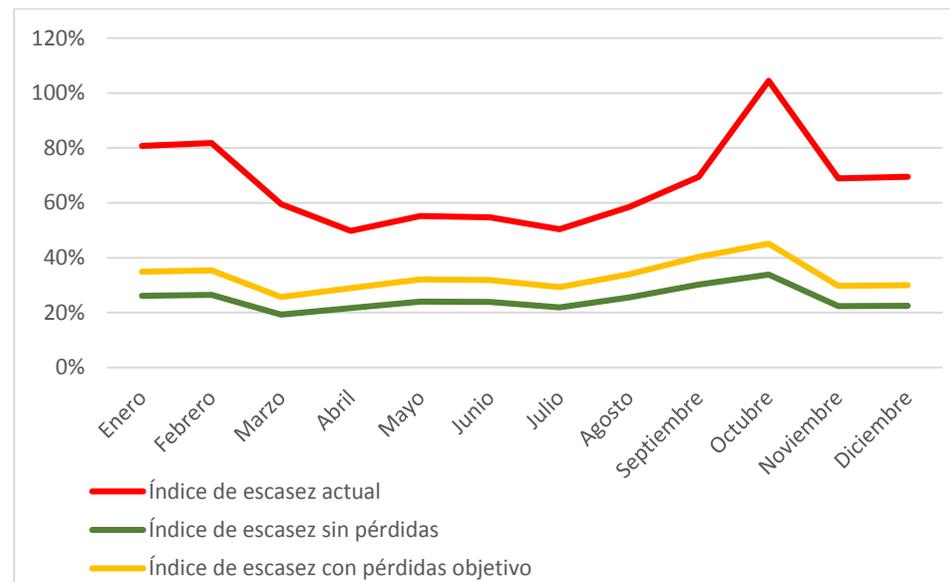
|                   | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-------------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| le actual         | 81%   | 82%     | 59%   | 50%   | 55%  | 55%   | 50%   | 58%    | 69%        | 104%    | 69%       | 70%       |
| le (sin pérdidas) | 26%   | 27%     | 19%   | 22%   | 24%  | 24%   | 22%   | 25%    | 30%        | 34%     | 22%       | 23%       |
| le (pérdidas obj) | 35%   | 35%     | 26%   | 29%   | 32%  | 32%   | 29%   | 34%    | 40%        | 45%     | 30%       | 30%       |

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27 se muestra el índice de escasez actual, con la oferta hídrica correspondiente al clima presente y con los consumos de acueducto en 2016, con las pérdidas actuales en la red (rojo), con las pérdidas objetivo según el Plan Maestro de Acueducto para 2020 (naranja) y sin pérdidas (verde).

Se aprecia como el índice de escasez es alto durante todos los meses del año, al superar la demanda el 50% de la oferta disponible.

Figura 27: Índice de escasez actual, sin pérdidas en la red y con pérdidas objetivo

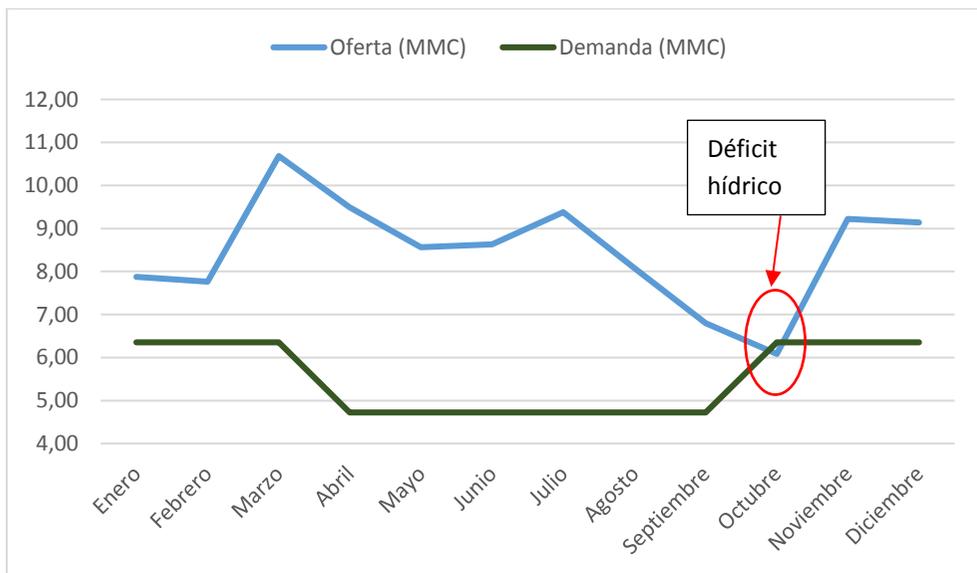


Fuente: Elaboración propia

A continuación en la Figura 28 se muestra el balance hídrico en la cuenca del río Las Ceibas, siendo esta la principal fuente de abastecimiento de la ciudad. Se muestra el balance como la resta de la oferta hídrica y la demanda, existiendo superávit en 11 de los 12 meses del año, siendo negativo el balance para el mes de octubre, al estar permitido en este mes el cultivo de arroz, pero siendo los caudales medios para ese mes aún bajos respecto al resto del año.

La situación con el incremento poblacional a 2050, el aumento de las temperaturas que aumenta la evapotranspiración y la disminución de las precipitaciones medias en el escenario pesimista de cambio climático agravará la situación actual de déficit, por lo que resulta necesario buscar fuentes alternativas de abastecimiento, como puede ser el río Magdalena.

Figura 28: Balance hídrico para clima presente y población de 2016.

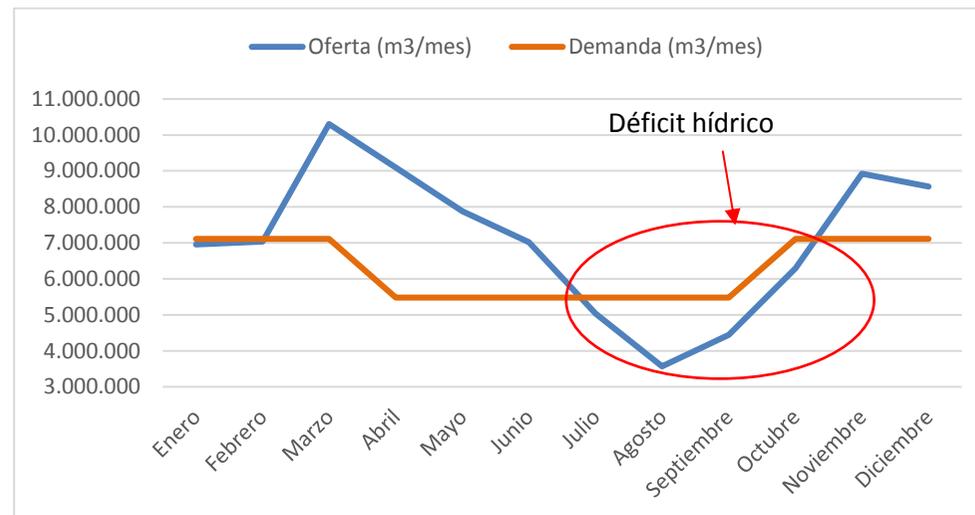


Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.2 Balance hídrico en 2050.

Se ha calculado el balance hídrico en 2050 bajo el supuesto de aumento poblacional (aumento de la demanda) y aumento de la temperatura por efecto del cambio climático suponiendo constantes las precipitaciones (disminución de la oferta), obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 29.

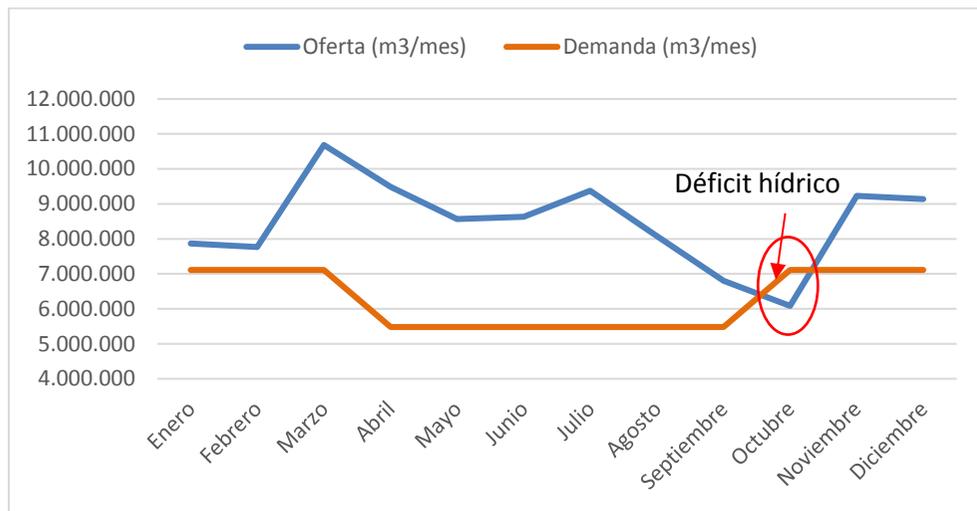
Figura 29: Balance hídrico en 2050 con aumento demográfico teniendo en cuenta el cambio climático



Fuente: Elaboración propia

En el apartado anterior se vio como el balance hídrico era prácticamente cero en el mes de octubre, por lo que se ha procedido a calcular el balance sin tener en cuenta consideraciones de cambio climático pero sí el aumento demográfico esperado, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 30.

Figura 30: Balance hídrico en 2050 con aumento demográfico sin tener en cuenta el cambio climático



Fuente: Elaboración propia

#### 4.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El índice de escasez actual en la cuenca del río Las Ceibas es alto todos los meses del año, esto quiere decir que la demanda supera el 50% de la oferta. Observando el balance hídrico, es decir, la diferencia entre la oferta (los caudales que discurren por el río restándole el caudal ecológico y minimizándolos por temas de calidad) y la demanda (todos los consumos, urbanos y rurales), se observa como éste es nulo en el mes de octubre teniendo en cuenta valores medios. Esta situación se agrava preocupantemente en 2050 con el aumento demográfico esperado y por tanto con el aumento de la demanda por consumo urbano, si a esta situación le añadimos la altamente probable aumento de la temperatura por efecto del cambio climático la situación se agrava, adelantándose la situación de octubre al mes de julio y continuando el balance negativo los meses posteriores hasta alcanzar en noviembre valores positivos.

Con estos datos, se aprecia, como ya en la actualidad, el recurso hídrico en la cuenca Las Ceibas se encuentra cercano al agotamiento, poniéndose en peligro el mantenimiento del caudal ecológico y todo el ecosistema que de él depende. Es necesario buscar una fuente de abastecimiento alternativa, probablemente el río Magdalena.

## 5 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de inundaciones fluviales se centra fundamentalmente en el estudio hidrológico e hidráulico y análisis de las áreas de inundación de las diferentes redes de drenaje que quedan contenidas en el ámbito de estudio de vulnerabilidad y riesgos naturales.

Para ello será necesario conocer las características hidrológicas del terreno constituyente de las cuencas de captación, de cada uno de los ríos, arroyos y afluentes principales que se han analizado simultáneamente. A partir de estos puntos, se toman los datos de registro de lluvias con los que posteriormente a través del análisis de un modelo de pérdidas de transformación de la lluvia-escorrentía y de propagación de los caudales obtenidos, obtendremos los datos de los caudales máximos de avenida para cada uno de los periodos de retorno en estudio en los puntos críticos de análisis.

Estos caudales máximos de avenida serán necesarios para poder elaborar posteriormente un estudio hidráulico de los cauces en estudio, del cual podremos obtener una relación de calados, velocidades y áreas inundadas adecuadas a la realidad.

De esta forma, los ríos a analizar en el presente estudio serán el Río del Oro, realizando para su estudio un modelo hidrológico e hidráulico; Quebrada La Toma, llevando a cabo un modelo hidrológico-hidráulico de su cuenca completa; y Río Ceibas, realizando un modelo hidráulico en base al estudio hidrológico llevado a cabo en el documento “Estudios y diseños de obras de control y mitigación del cauce del Río Las Ceibas, sector comprendido entre el límite del perímetro urbano de la ciudad de Neiva y la desembocadura al Río Magdalena, Municipio de Neiva, Departamento del Huila”, elaborado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

Resulta preciso añadir los estudios proporcionados por la CAM para los ríos Las Ceibas, Magdalena y del Oro, los cuales han servido para contrastar y corroborar los resultados obtenidos de los estudios objeto del presente documento.

Igualmente se ha incluido en el plano de amenaza realizado, los resultados obtenidos de los proyectos facilitados por la CAM (ver anexo B Planos), representándose los siguientes:

- Evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de las microcuencas El Venado, Avichente, La Toma, Zanja Honda, La Torcaza, Río de Oro, Ribera del Río Magdalena en el casco urbano del Municipio de Neiva (Huila).
- Estudios y diseños de obras de control y mitigación del cauce del río Las Ceibas, sector comprendido entre el límite del perímetro urbano de la ciudad de Neiva y la desembocadura al río Magdalena, Municipio de Neiva.
- Evaluación de las amenazas potenciales de origen geológico (actividad sísmica y volcánica), geomorfológico (remociones en masa y erosión) e hidrometeorológico (dinámica fluvial, inundaciones y sequías), y caracterización geotécnica preliminar de las cabeceras municipales del departamento del Huila".
- Zonificación Ambiental Quebrada Carpeta Predio Gas País.
- Estudio de caracterización y zonificación ambiental Lote Villa Nubia. Análisis de escorrentía de aguas lluvias registradas en el POT del Municipio de Neiva, Zonificación de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo, y Zonificación ambiental.
- Análisis de la estabilidad de las islas ubicadas en el Río Magdalena frente a la Ciudad de Neiva.
- Estudio de Caracterización y zonificación ambiental Proyecto Los Dujos (Neiva)
- Valoración ambiental del Oriente Urbano de la Ciudad de Neiva.

### 5.2 ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

La Tercera Comunicación de Cambio Climático para Colombia (IDEAM *et al.*, 2015) indica que en el departamento de Huila, para fin de siglo podrá presentar aumento promedio de temperatura de 2.1°C, con respecto al clima promedio de 1976-2005. Los cambios de temperatura presentan una relación inversa con la elevación, los mayores cambios estarían a lo largo del valle del Magdalena, con variaciones entre 2.2 y 3.0°C, y los menores aumentos se podrían presentar sobre las partes más altas de los Andes, en general, en las zonas montañosas, los incrementos de la temperatura serían entre 0.5 y 2.2°C. Mayormente, en el Huila se podría esperar aumentos en la precipitación entre 10 y 40%. El cambio gradual en la temperatura y la precipitación por el cambio climático, podría

ocasionar que los efectos de fenómenos de variabilidad climática como El Niño o La Niña tengan mayor impacto en los territorios.

Muchos riesgos globales del cambio climático se concentran en las zonas urbanas. El estrés térmico, la precipitación extrema, las inundaciones continentales y costeras, la contaminación del aire, la sequía y la escasez de agua plantean riesgos en las zonas urbanas para las personas, los activos, las economías y los ecosistemas. Los riesgos se amplifican para las personas que carecen de infraestructuras y servicios esenciales o viven en viviendas de mala calidad y en zonas expuestas (IPCC, 2014). Se prevé que los impactos rurales más importantes en el futuro ocurran a corto plazo y posteriormente en relación con la disponibilidad y el suministro de agua, la seguridad alimentaria y los ingresos agrícolas, especialmente en relación con cambios de las zonas de producción de cultivos alimentarios y no alimentarios en todo el mundo.

Por otro lado, los sistemas montañosos andinos y valles interandinos albergan ecosistemas únicos, los cuales poseen gran biodiversidad. Por otro lado poseen una variedad de gradientes ecoclimáticos y además cuentan con múltiples factores de estrés sobre los sistemas naturales y humanos derivados en parte de los cambios significativos de uso del suelo y exacerbados por la variabilidad del clima y el cambio climático. Por ello, los Andes tropicales fueron declarados como una de las regiones más vulnerables al cambio climático global (IPCC, 2007). Además, en el último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC, pone de manifiesto las evidencias sobre el retroceso de los glaciares andinos y modificación de los patrones de descarga en los ríos en la región de los Andes (IPCC, 2014). Se han registrado cambios en los caudales de los ríos, que resultan coherentes con los cambios producidos en las precipitaciones y en las temperaturas a partir de 1950, y es evidente su impacto sobre el ciclo hidrológico, que afectan a la disponibilidad de agua dulce y su calidad. En las zonas urbanas, los riesgos relacionados con el cambio climático están aumentando. Entre ellos se incluyen además de los ya mencionados con anterioridad, el aumento de la aridez y la escasez de agua, derivándose impactos negativos y generalizados sobre los medios de subsistencia y la salud de las poblaciones urbanas, así como sobre los ecosistemas y las economías locales. Se han observado impactos del cambio climático “en cascada”, que se transmiten interconectados en cadena, desde el sistema físico hasta los sistemas humanos, pasando a través de distintos ecosistemas.

En Colombia se han detectado tendencias muy importantes en la precipitación durante las tres últimas décadas, se destacan aumentos de las precipitaciones medias anuales en gran parte de las regiones Caribe, Orinoquía, Amazonía y en ciertas regiones del territorio colombiano, incluida la ciudad de Neiva (Benavides & León, 2005; Benavides et al., 2007; IDEAM, 2010; Ruiz, 2010; Mayorga et al., 2011); incremento de la frecuencia de precipitaciones extremas en amplios sectores de las regiones Caribe, Andina, Pacífica y Orinoquía (Mayorga, 2011), asimismo, las proyecciones de cambio climático, con base en los resultados del ensamble con distintos escenarios de PRECIS, para el periodo 2011-2040, muestra aumento de los días de precipitaciones moderadas y fuertes en Huila (Armenta & Ruiz, 2012).

El riesgo de eventos meteorológicos extremos asociados al cambio climático (olas de calor, precipitaciones intensas, inundaciones o sequías) es moderado en la actualidad, pero será alto para un calentamiento adicional de 1°C (IPCC, 2014). Es de anotar que entre enero y septiembre de 2015, la temperatura de la Tierra superó por primera vez el grado de diferencia sobre los niveles preindustriales. De acuerdo a la oficina meteorológica británica (Met Office), la temperatura global media alcanzó 1.02°C por encima del nivel previo a la Revolución Industrial, el fenómeno de El Niño ha tenido también un efecto en esta alza, pero también se suma el impacto provocado por el hombre. Por otro lado, la NASA y European Centre for Medium Range Weather Forecasting confirmaron que el agosto del 2016 ha sido el mes más caluroso de los últimos 136 años. El riesgo asociado a la distribución de los impactos es en general mayor en las latitudes bajas y en las zonas menos desarrolladas. No obstante, estos riesgos se distribuyen de forma desigual, siendo en general mayores para las personas y las comunidades más desfavorecidas, independientemente del nivel de desarrollo de los países. Las proyecciones climáticas señalan que el porcentaje de población mundial afectada por la escasez de agua y por grandes inundaciones fluviales aumentará con el nivel de calentamiento durante el Siglo XXI.

Para el final del siglo XXI, el número de personas expuestas anualmente a una crecida de 100 años de período de retorno será tres veces superior para el escenario de calentamiento alto (por encima de 3°C), que para el caso de calentamiento bajo de entre 0°C y 1°C (IPCC, 2014).

Las ciudades y regiones urbanas influyen en su microclima local. El cambio climático va a interactuar con estas condiciones microclimáticas de múltiples maneras, exacerbando en algunos casos el nivel de riesgo, por ejemplo en lo referido al efecto “isla de calor urbana” y a las inundaciones locales (IPCC, 2014).

Los impactos observados y futuros del cambio climático son múltiples y multidimensionales, y así, resulta la necesidad de evaluar estos cambios y en particular los eventos extremos para poder desarrollar la ejecución de medidas adecuadas de adaptación. Razón por la cual en este documento se examinan las proyecciones de precipitación máxima por efecto del cambio climático en el marco del proyecto “Consultoría para la realización de los estudios de Gases Efecto Invernadero (GEI) vulnerabilidad al cambio climático y desarrollo urbano para la ciudad de Neiva”.

### 5.2.1 Escenarios de cambio climático

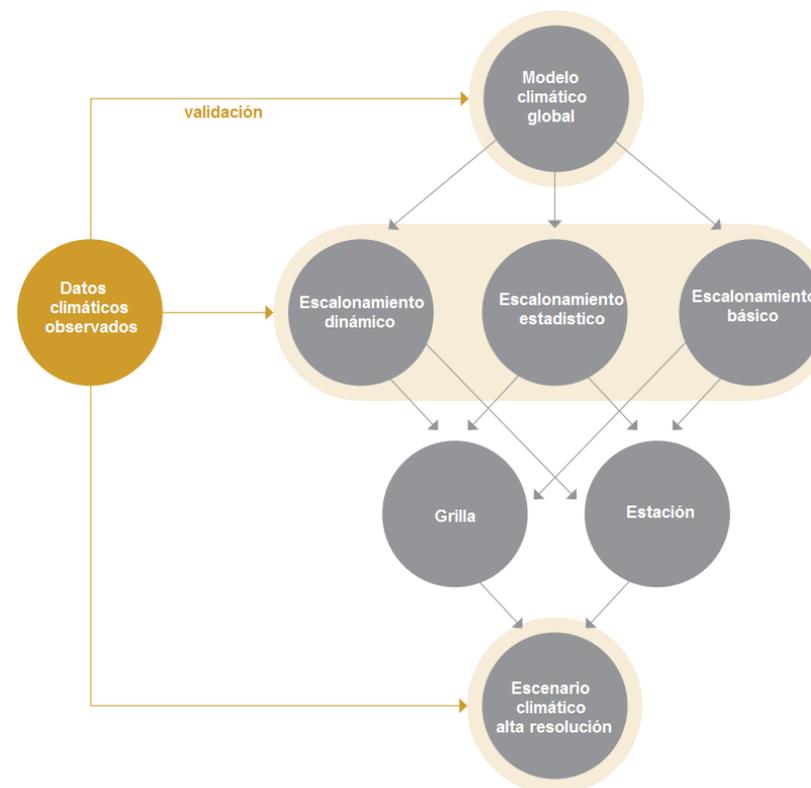
Los escenarios en su forma más simple son descripciones plausibles de cómo las cosas pueden cambiar en el futuro. La metodología empleada para la construcción de escenarios varía de acuerdo al propósito de la evaluación. El IPCC (2001) los “escenarios climáticos” son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro.

El concepto de incertidumbre está implícito en la filosofía de desarrollo del escenario y su caracterización. La incertidumbre que se tiene al predecir el clima futuro se da por dos razones relacionadas con los gases de efecto invernadero (UNDP, 2011). La primera está asociada al calentamiento global, el cual sabemos que se ha debido en gran parte en los últimos 50 años al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Lo que no sabemos es cómo van a ser las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro. En segundo lugar no sabemos con exactitud cuáles van a ser los efectos que tendrán estas emisiones sobre el sistema climático.

Debido a estas dos fuentes de incertidumbre, se van a presentar incertidumbres en los escenarios generados por los modelos de circulación de la atmósfera. Existen otras fuentes de incertidumbres como las que provienen de la respuesta de los modelos de cambio climático global, la regionalización o reducción de escala (se utilizan generalmente para

combinar información sobre el clima a escala gruesa, que proviene de los modelos globales, con otra de mayor resolución, como los datos que provienen de estaciones meteorológicas, para elaborar predicciones de las variables climáticas con mayor resolución, representado esquemáticamente en la Figura 31 y la variabilidad natural del sistema climático que también deben ser consideradas al analizar las salidas de los modelos (Mearns et al., 2003; Quintana Seguí et al., 2009).

Figura 31: Diagrama esquemático de las técnicas principales de reducción de escala como parte del proceso de desarrollo de escenarios climáticos. Nota: Basado en la Figura 9 de UNDP, 2011.

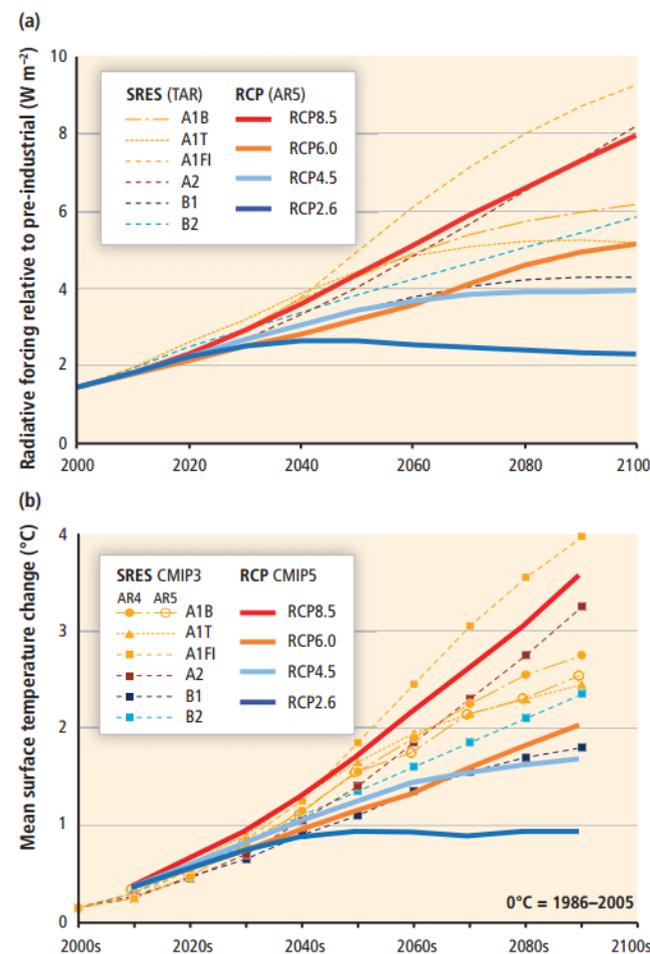


Fuente: IPCC, AR5

Existen escenarios del “posible clima futuro”, que son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de asunciones sobre las emisiones futuras de los gases de invernadero y otros agentes contaminantes; es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones. Un panorama en el cual la emisión de gases de invernadero es baja, debe conllevar a un cambio menos rápido del clima que uno en el cual las emisiones son altas. Un panorama del cambio del clima por lo tanto es una descripción coherente de un cambio futuro del clima bajo asunciones específicas sobre el crecimiento de emisiones de gases de invernadero y de otros agentes contaminantes, y sobre otros factores que puedan influenciar en el clima futuro.

El Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2014), definió un grupo nuevo de escenarios, denominados “trayectorias de concentración representativas” (RCP, por sus siglas en inglés). Estos escenarios se centran en las emisiones antropogénicas. Los RCP representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750, que oscila entre 2.6 y 8.5W/m<sup>2</sup> (Figura 32). Se podría decir que el RCP2.6 representa un escenario de mitigación (escenario optimista), el RCP4.5 y RCP6.0 son escenarios de estabilización (escenario moderado) y el RCP8.5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (escenario pesimista). Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono. De acuerdo a simulaciones recientes las concentraciones de CO<sub>2</sub> al año 2100 llegarán a 421 ppm (RCP2.6), 538ppm (RCP4.5), 670ppm (RCP6.0) y 936ppm (RCP8.5). Si a esto se le agregan las concentraciones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, las concentraciones de CO<sub>2</sub> equivalente combinadas alcanzarían 475 ppm, 630 ppm, 800 ppm y 1313 ppm respectivamente. Es importante tener en cuenta que los RCP representan una variedad de políticas climáticas y difiere de los escenarios A1, A2, B1, B2 utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación del IPCC.

Figura 32: a) Forzamiento radiativo proyectado (RF, W m<sup>2</sup>) y (b) cambio de la temperatura media global en superficie (°C) durante el siglo 21 para escenarios SREA y RCP. Nota: Basado en la Figura 1-4 de IPCC, 2014.



Fuente: IPCC, AR5

En el presente trabajo se utilizaron 11 modelos de la base CMIP5 (Stouffer *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2012), para generar las proyecciones de cambio climático (Tabla 19).

Tabla 19 Modelos de la base CMIP 5 utilizados para la construcción de proyecciones de cambio climático.

| NOMBRE DEL MODELO | INSTITUCIÓN   |
|-------------------|---|
| bcc-csm1-1        | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China.   |
| CCSM4             | National Center for Atmospheric Research NCAR, USA.   |
| CSIRO-Mk3-6-0     | CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia).  |
| GFDL-CM3          | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA.   |
| IPSL-CM5A-LR      | Institut Pierre-Simon Laplace, France.  |
| IPSL-CM5A-MR      | Institut Pierre-Simon Laplace, France.  |
| MIROC-ESM         | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology, Japan. |
| MIROC-ESM-CHEM    | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology, Japan. |
| MIROC5            | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology, Japan. |
| MRI-CGCM3         | Meteorological Research Institute, Japan.   |
| NorESM1-M         | Norwegian Climate Centre.   |

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Datos utilizados

Los datos analizados para el estudio del clima presente, se utilizaron los datos diarios de la cantidad de precipitación en milímetros (mm), correspondientes a 3 estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, situadas en el municipio de Neiva y que disponen de información de por lo menos de 25 a 30 años (Tabla 20 y Figura 33) para el periodo 1981-2010, cumpliendo con el mínimo de extensión del registro recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2007), para obtener estadísticas confiables.

Tabla 20 Emplazamiento de las estaciones meteorológicas.

| ID | CÓDIGO   | ESTACIÓN                | CORRIENTE     | LONGITUD      | LATITUD      | Elevación (m.s.n.m.) |
|----|----------|-------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------|
| 1  | 21115020 | AEROPUERTO BENITO SALAS | LAS CEIBAS    | 75°17'35.0" W | 2°56'55.5" N | 439                  |
| 2  | 21115100 | PALACIO-VEGALARGA       | FORTALECILLAS | 75°3'59.7" W  | 2°56'33.5" N | 1100                 |
| 3  | 21110400 | SANTA HELENA            | LAS CEIBAS    | 75°6'29.5" W  | 2°51'4.1" N  | 1160                 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Localización de las estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3 Control de calidad

El control de calidad y la comprobación de la falta de homogeneidad son esenciales cuando se trata de datos diarios. Una falta de homogeneidad en una serie de tiempo se define como cualquier cambio que no se debe a un cambio propio en el estado del tiempo o en el clima (Peterson *et al.*, 2001). Entre las causas que pueden dar lugar a este tipo de faltas de homogeneidad son los cambios en: instrumentación, procesamiento, emplazamiento y entorno de la estación o prácticas de observación. A veces cambios abruptos o graduales

pueden ser de origen natural o artificial (humano) que indujo los cambios. Por ello, es necesario efectuar previamente un control de calidad para detectar y/o explicar los cambios de origen natural como también para eliminar o mitigar los efectos de los cambios artificiales, para tener una aceptable confiabilidad de la información meteorológica que se va a utilizar.

Una vez seleccionado el periodo de estudio o clima presente, en este caso 1981-2010, se evaluó la calidad de los datos siguiendo 3 criterios:

- a) Evaluación observacional y posterior validación con el uso de boxplots (diagrama de cajas) marcando los valores atípicos (outliers) para sus revisión espacial y temporal, en particular aquellos que superan la media más 3.5 veces la desviación estándar de los valores diarios históricos para definir si son datos extraordinarios o errores.
- b) Eliminación de valores no razonables: cantidades de precipitación diarias menores que cero o valores fuera de los rangos climatológicos.
- c) Revisión para detectar valores raros o extremos, como: periodos con datos iguales, fechas consecutivas con el mismo valor y valores extremadamente altos.

#### 5.2.4 Metodología

Para el análisis de tendencia de la precipitación máxima y otros índices extremos de precipitación, tanto para el clima presente como para el clima futuro (2011-2070) bajo diferentes escenarios se utilizaron los definidos por el CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team (ET) on Climate Change Detection and Indices – ETCCDI (Karl et al., 1999; Peterson et al., 2001; Peterson, 2005) disponibles en [http://etccdi.pacificclimate.org/indices\\_def.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/indices_def.shtml) y ampliamente usados en muchos trabajos sobre evidencias del cambio climático (Peterson et al., 2002; Peterson, 2005; Aguilar et al., 2005; Haylock et al., 2006; IPCC, 2014).

Los índices considerados fueron los siguientes:

- a) Rx1day - Cantidad máxima de lluvia en 1 día  
Sea  $RR_{ij}$  el total diario de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 1-día para el periodo  $j$  son:

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij})$$

- b) R99p - Cantidad total de precipitación mayor al percentil 99 en un año  
Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo ( $RR \geq 1.0mm$ ) en el periodo  $j$  y sea  $RR_{wn99}$  el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si  $W$  representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn99}$$

- c) PRCPTOT - Lluvia total anual  
Sea  $RR_{ij}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $I$  representa el número de días en  $j$ , entonces

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$

- d) SDII - Precipitación total anual/días húmedos al año  
Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, ( $RR \geq 1mm$ ) en el periodo  $j$ . Si  $W$  representa el número de días húmedos en  $j$ , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$$

Para el cálculo de los valores del periodo base, la metodología utilizada es el remuestreo (bootstrapping), de manera que no hay discontinuidad en la serie temporal de los índices para el principio o el final de la base del periodo base (Zhang *et al.*, 2005). El análisis de los extremos se basa en el cálculo de las tendencias de cada uno de estos valores. Para la estimación de la presencia de tendencias, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall que establece para la hipótesis nula  $H_0$ : los datos de una serie de tiempo son

independientes e idénticamente distribuidos y la hipótesis alternativa H1: la serie tiene tendencia positiva o negativa. Sin embargo bajo la existencia de una correlación positiva en los datos, se incrementa la posibilidad de detectar tendencias cuando realmente no existen y viceversa. Una vez detectada la tendencia en las series de tiempo de los índices calculados se estudiaron los parámetros del modelo de regresión lineal, estimando el intervalo de confianza de la pendiente y la ordenada al origen para un nivel de significancia de 95%. (Wilks, 1995; Onoz & Bayazit, 2003). Los resultados se incluyen el Anexo 1.

El Periodo de Retorno de cualquier evento extremo (lluvias máximas, temperaturas extremas, huracanes, entre otros), se define como el lapso o número de años que en promedio, se cree que será igualado o excedido, es decir, es la frecuencia con la que se presenta un evento (Mélise & Reason, 2007). El grado de magnitud de un fenómeno extremo está relacionado de forma inversa con su frecuencia de ocurrencia, las precipitaciones muy intensas ocurren con una frecuencia menor que las moderadas o débiles. Las zonas urbanas tiene un alto grado de riesgo debido a las inundaciones ocasionadas por el fenómeno meteorológico de lluvias torrenciales o máximas en 24 horas. Para contribuir a minimizar los impactos negativos que estos fenómenos producen, se determinaron los periodos de retorno de lluvias máximas diarias a 3, 25, 50 y 100 años. Para tal fin, se utilizó la función de probabilidad de Gumbel o distribución doble exponencial, por ser una de las más adecuadas para analizar frecuencias de eventos extremos.

La función de probabilidad de Gumbel queda definida por la siguiente expresión (Ojo, 2001):

$$F(X) = P\{\varepsilon \leq X\} = e^{-e^{-d(x-u)}}$$

Con  $-\infty \geq X \leq \infty$

Donde x se calcula así:

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(X)))}{d}$$

Posteriormente se calculan los parámetros d y u para cada estación, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$u = x - 0.450047 * \sigma$$

$$1/d = 0.779696 * \sigma$$

donde:

x = media aritmética de la serie de datos de lluvias máximas diarias.

$\sigma$  = desviación estándar de la serie de datos.

En este trabajo se consideró como periodo de retorno al intervalo de recurrencia de un determinado valor extremo o al intervalo medio (T) entre dos sucesos que igualan o superan el valor extremo considerado y se expresa en años. Normalmente se toma la precipitación máxima en 24 horas de cada año o mes en particular, lo cual asegura la independencia de los sucesos, y la serie resultante se ajusta a una distribución de probabilidad de valores máximos. La probabilidad de excedencia es la probabilidad de que un evento de una determinada magnitud sea igualado o excedido en cualquier año. La probabilidad de excedencia se define por la siguiente expresión:

$$P_{\text{excedencia}} = P(X) = \frac{1}{T}$$

La función asume que la variable x (aleatoria) tome un valor igual o inferior a un valor dado, como se muestra en la siguiente expresión:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Lo inverso sería que x fuera mayor que el valor de X, en función de la siguiente ecuación:

$$P(x > X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T}$$

Con la finalidad de verificar el ajuste estadístico de los datos de lluvias torrenciales de las estaciones meteorológicas en estudio, se utilizaron dos pruebas de bondad de ajuste como son la de Kolmogorov Smirnov.

### 5.2.5 Clima presente

El clima de Neiva es cálido – seco. El promedio de lluvia total anual es de 1346 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses de junio, julio y agosto, son los más secos del año. Las temporadas de lluvia se extienden desde febrero hasta finales de abril y de octubre a diciembre. A principios de año se presenta una disminución de lluvias en enero, tras lo cual, nuevamente comienzan a incrementarse. En los meses secos de mediados de año, llueve entre 6 y 10 días/mes; en los meses de mayores lluvias puede llover de 15 a 17 días/mes. La temperatura promedio es de 27°C. Al medio día la temperatura máxima media oscila entre 32 y 35°C. En la madrugada la temperatura mínima está entre 22 y 23°C. El sol brilla cerca de 5 horas diarias en los meses lluviosos y pero en los meses secos, la insolación llega a 6 horas/día. La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 54 y 74 %, siendo mayor en la época lluviosa del segundo semestre (IDEAM, 2005).

### EVENTOS EXTREMOS DE LLUVIA

Para los índices extremos de precipitación para las estaciones fueron calculadas las tendencias a lo largo del periodo. Estas tendencias pueden ser crecientes (positivas) o decrecientes (negativas), lo que indica el incremento o disminución anual, respectivamente, que presentan cada uno de los índices. Las tendencias cuentan con

significancia estadística al 95%. Al no detectar una tendencia con significancia estadística alta, no indica que dicha tendencia no sea válida o que no haya probabilidad de que algún cambio se estén presentando en la variable, solo que la información de las series de datos no son lo suficientemente robustas para identificar los cambios de forma estadísticamente significativa (Klein, 2009), por lo tanto estos resultados no deben ser descartados y deben ser analizados de igual manera.

### Estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas

En la estación Aeropuerto Benito Salas, existe una leve tendencia anual a la disminución de los eventos extremos de corta duración (aguaceros) y por el contrario los eventos de larga duración (acumulada anual), de la precipitación la tendencia es al aumento (Tabla 21 y Tabla 24). Es decir, la cantidad máxima de la precipitación en un día está disminuyendo en razón de 0.1 mm/año, asimismo, la cantidad total anual de lluvia caída en eventos extremos como las tormentas o aguaceros (mayor al percentil 99) está aumentando aproximadamente 0.3 mm/año.

Los umbrales de la cantidad máxima de precipitación caída en 1 día son: máximo de 160.3 y mínimo de 50.6 mm/año.

La precipitación acumulada durante el año (total anual) tiene un promedio de 1288.0 mm y también registra una tendencia al aumento de 3.4 mm/año. En cuanto a la precipitación total anual durante los días lluviosos no ha sufrido cambios.

Tabla 21 Índices extremos de la precipitación para la estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas.

| Índice  | Tendencia Anual (mm) | Promedio (mm) | Extremos (mm) |            | Desviación (mm) |
|---------|----------------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
|         |                      |               | Máximo/año    | Mínimo/año |                 |
| Rx1day  | -0.1                 | 90.0          | Máximo/año    | 160.3      | 22.2            |
|         |                      |               | Mínimo/año    | 50.6       |                 |
| R99p    | 0.3                  | 89.9          | Máximo/año    | 665.7      | 125.7           |
|         |                      |               | Mínimo/año    | 0.0        |                 |
| PRCPTOT | 3.4                  | 1288.0        | Máximo/año    | 2154.3     | 317.6           |
|         |                      |               | Mínimo/año    | 536.5      |                 |

| Índice      | Tendencia Anual (mm) | Promedio (mm) | Extremos (mm) |            | Desviación (mm) |
|-------------|----------------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
|             |                      |               | Máximo/año    | Mínimo/año |                 |
| <b>SDII</b> | 0.0                  | 13.3          | 21.4          | 9.9        | 2.0             |

Nota: Celda en negrita indica que la serie es estadísticamente significativa al 95%.

Fuente: Elaboración propia

**Estación 21115100 Palacio-Vegalarga**

En la estación Palacio-Vegalarga, se presenta una sutil y no significativa tendencia al aumento anual de los eventos de corta duración (aguaceros), mientras los eventos de larga duración (acumulada anual) de la precipitación la tendencia es a la disminución (Tabla 22). Es decir, la cantidad máxima de la precipitación en un día está aumentando en razón de 0.4 mm/día, en tanto que la cantidad total anual de lluvia caída en eventos extremos como las tormentas o aguaceros (mayor al percentil 99) está disminuyendo aproximadamente 0.1 mm/año.

Los umbrales o valores extremos de la cantidad máxima de precipitación registrada en 1 día son: máximo de 117.0 y mínimo de 46.8 mm/año.

La precipitación acumulada durante el año, con un total anual promedio de 1526.6 mm, por el contrario registra una leve tendencia al aumento de 3.2 mm/año. En cuanto a la precipitación total anual durante los días lluviosos no ha sufrido cambios.

Tabla 22 Índices extremos de la precipitación para la estación 21115100 Palacio-Vegalarga.

| Índice         | Tendencia Anual (mm) | Promedio (mm) | Extremos (mm) |            | Desviación (mm) |
|----------------|----------------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
|                |                      |               | Máximo/año    | Mínimo/año |                 |
| <b>Rx1day</b>  | 0.4                  | 76.9          | 117.0         | 46.8       | 19.5            |
| <b>R99p</b>    | -0.1                 | 115.8         | 447.7         | 0.0        | 122.2           |
| <b>PRCPTOT</b> | 3.2                  | 1526.6        | 2588.9        | 896.0      | 321.6           |

| Índice      | Tendencia Anual (mm) | Promedio (mm) | Extremos (mm) |            | Desviación (mm) |
|-------------|----------------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
|             |                      |               | Máximo/año    | Mínimo/año |                 |
| <b>SDII</b> | 0.02                 | 9.9           | 13.5          | 7.6        | 1.3             |

Nota: Celda en negrita indica que la serie es estadísticamente significativa al 95%.

Fuente: Elaboración propia

**Estación 21110400 Santa Helena**

En la estación Santa Helena, se observa una tendencia a la disminución de la cantidad máxima de la precipitación caída en un día, en proporción de 0.9mm/año, por lo contrario, la cantidad total anual de lluvia registrada en eventos extremos como las tormentas o aguaceros (mayor al percentil 99) está aumentando aproximadamente 4.9 mm/año (Tabla 23 y Tabla 26).

Los umbrales de la cantidad máxima de precipitación caída en 1 día son: máximo de 123.0 y mínimo de 52.6mm/año.

Entre tanto, la precipitación acumulada durante el año, con promedio anual de 1739.6 mm, tiende a aumentar aproximadamente 20.7 mm/año. Asimismo, en cuanto a la precipitación total anual durante los días lluviosos también aumenta 0.1 mm anualmente.

Tabla 23 Índices extremos de la precipitación para la estación 21110400 Santa Helena.

| Índice         | Tendencia Anual (mm) | Promedio (mm) | Extremos (mm) |            | Desviación (mm) |
|----------------|----------------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
|                |                      |               | Máximo/año    | Mínimo/año |                 |
| <b>Rx1day</b>  | -0.9                 | 87.5          | 123.0         | 52.6       | 23.2            |
| <b>R99p</b>    | 4.9                  | 179.6         | 763           | 0.0        | 186.8           |
| <b>PRCPTOT</b> | 20.7                 | 1739.6        | 3537          | 1327.9     | 504.6           |
| <b>SDII</b>    | 0.1                  | 11.3          | 21.2          | 8.0        | 2.8             |

Nota: Celda en negrita indica que la serie es estadísticamente significativa al 95%.

Fuente: Elaboración propia

**PERIODOS DE RETORNO**

**Estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas**

En la estación Aeropuerto Benito Salas una precipitación máxima de 46.2 mm en 1 día es posible que se repita o sea superada por lo menos una vez en 3 años. Además, existe una probabilidad media que se presente este evento (Tabla 24). Por otro lado, los valores de precipitación máxima diaria para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años son de 98.1, 114.0 y 129.8 mm/día, respectivamente; y las probabilidades de presentarse son entre bajas y muy bajas.

Tabla 24 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21115020 Aeropuerto Benito Salas.

| Indicador                        | Periodo de Retorno (años) |      |          |          |
|----------------------------------|---------------------------|------|----------|----------|
|                                  | 3                         | 25   | 50       | 100      |
| Precipitación máxima diaria (mm) | 46.2                      | 98.1 | 114.0    | 129.8    |
| Probabilidad de Ocurrencia (%)   | 33.3%                     | 4.0% | 2.0%     | 1.0%     |
| Probabilidad de frecuencia       | Media                     | Baja | Muy baja | Muy baja |

Fuente: Elaboración propia

**Estación 21115100 Palacio-Vegalarga**

En la estación Palacio-Vegalarga una precipitación máxima de 40.5 mm en 1 día es posible que se repita o sea superada por lo menos una vez en 3 años. Además, existe una probabilidad media que se presente este evento. Por otro lado, los valores de precipitación máxima diaria para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años son de 83.3, 96.5 y 109.5 mm/día, respectivamente, y las probabilidades de presentarse son entre bajas y muy bajas (Tabla 25).

Tabla 25 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21115100 Palacio-Vegalarga.

| Indicador                        | Periodo de Retorno (años) |      |      |       |
|----------------------------------|---------------------------|------|------|-------|
|                                  | 3                         | 25   | 50   | 100   |
| Precipitación máxima diaria (mm) | 40.5                      | 83.3 | 96.5 | 109.5 |
| Probabilidad de Ocurrencia (%)   | 33.3%                     | 4.0% | 2.0% | 1.0%  |

| Indicador                  | Periodo de Retorno (años) |          |          |          |
|----------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|
|                            | 3                         | 25       | 50       | 100      |
| Probabilidad de frecuencia | Media                     | Muy baja | Muy baja | Muy baja |

Fuente: Elaboración propia

**Estación 21110400 Santa Helena**

En la estación Santa Helena una precipitación máxima de 41.7mm en 1 día es posible que se repita o sea superada por lo menos una vez en 3 años. Además, existe una probabilidad media que se presente este evento. Por otro lado, los valores de precipitación máxima diaria para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años son de 88.0, 102.1 y 116.2 mm/día, respectivamente, y las probabilidades de presentarse son entre bajas y muy bajas (Tabla 26).

Tabla 26 Precipitaciones máximas diarias (mm) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años en la estación 21110400 Santa Helena.

| Indicador                        | Periodo de Retorno (años) |      |          |          |
|----------------------------------|---------------------------|------|----------|----------|
|                                  | 3                         | 25   | 50       | 100      |
| Precipitación máxima diaria (mm) | 41.7                      | 88.0 | 102.1    | 116.2    |
| Probabilidad de Ocurrencia (%)   | 33.3%                     | 4.0% | 2.0%     | 1.0%     |
| Probabilidad de frecuencia       | Media                     | Baja | Muy baja | Muy baja |

Fuente: Elaboración propia

**5.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO**

**5.3.1 Metodología de abstracciones**

Esta metodología pretende obtener la lluvia eficaz o neta, es decir, la parte de la precipitación total del aguacero que realmente contribuye a la generación de caudales, contemplándose los siguientes fenómenos:

*Intercepción*, que es la parte de la precipitación que es “atrapada” por la vegetación antes de que alcance el suelo, quedando retenida y volviendo posteriormente a la atmósfera como evaporación.

**Retención**, que es la parte de la precipitación que se deposita en pequeñas oquedades del terreno en forma de charcos, que no contribuyen a la escorrentía superficial hasta que no se llenan por completo y rebosan.

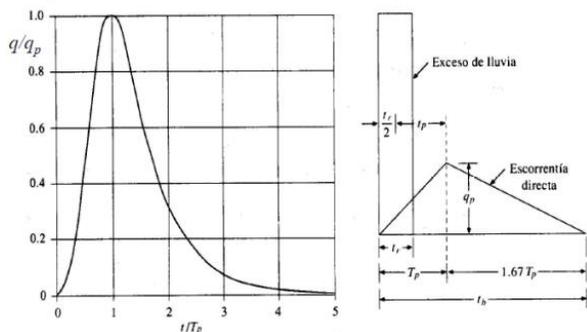
**Infiltración**, por la cual parte de la lluvia pasa a las capas de suelo superficiales en las que queda almacenada hasta que se supera la capacidad de retención de agua de las partículas, momento en que se produce un drenaje vertical hacia los acuíferos profundos, y horizontal, que devuelve el agua a los cauces a través del terreno, constituyendo el “interflujo”, que tiene un considerable retraso sobre los caudales principales.

Los fenómenos de intercepción y retención tienen una incidencia fundamental al comienzo de la tormenta, constituyendo la denominada “abstracción o pérdida inicial”, mientras que el de la infiltración tiene una importancia decreciente con el tiempo, pero influye durante todo el desarrollo temporal de la lluvia.

### 5.3.2 Hidrograma unitario del SCS

El diagrama adimensional del SCS, es un hidrograma unitario sintético en el cual se expresan los caudales en función del caudal pico,  $q_p$  y los tiempos en función del tiempo al pico,  $T_p$  (ver Figura 34).

Figura 34. Hidrograma unitario del SCS



Fuente: Hidrología Aplicada. Ven T. Chow

De lo que podemos deducir mediante fórmulas empíricas que:

Donde ( $t_r$ ) es la duración de la lluvia efectiva y ( $T_c$ ) es el tiempo de concentración de la cuenca.

El tiempo de concentración (hrs) determinado en llegar al punto final de desagüe de la subcuenca, se ha calculado teniendo en cuenta diferentes metodologías y adoptando como resultado la media ponderada de los resultados calculados.

Para calcular estas pérdidas existen diferentes métodos; uno de los más utilizados es el método del número de curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS). En este método, se establece que para un evento de precipitación, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa  $P_e$  es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación  $P$ ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca  $F_a$  es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . Existe una cierta cantidad de precipitación la (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es  $P - I_a$ . La hipótesis del método del número de curva consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir (Chow, 1994):

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

A continuación se describen los conceptos de número de curva, retención potencial máxima y pérdidas por intercepción, que se utilizan en el método del número de curva.

#### Número de Curva, CN:

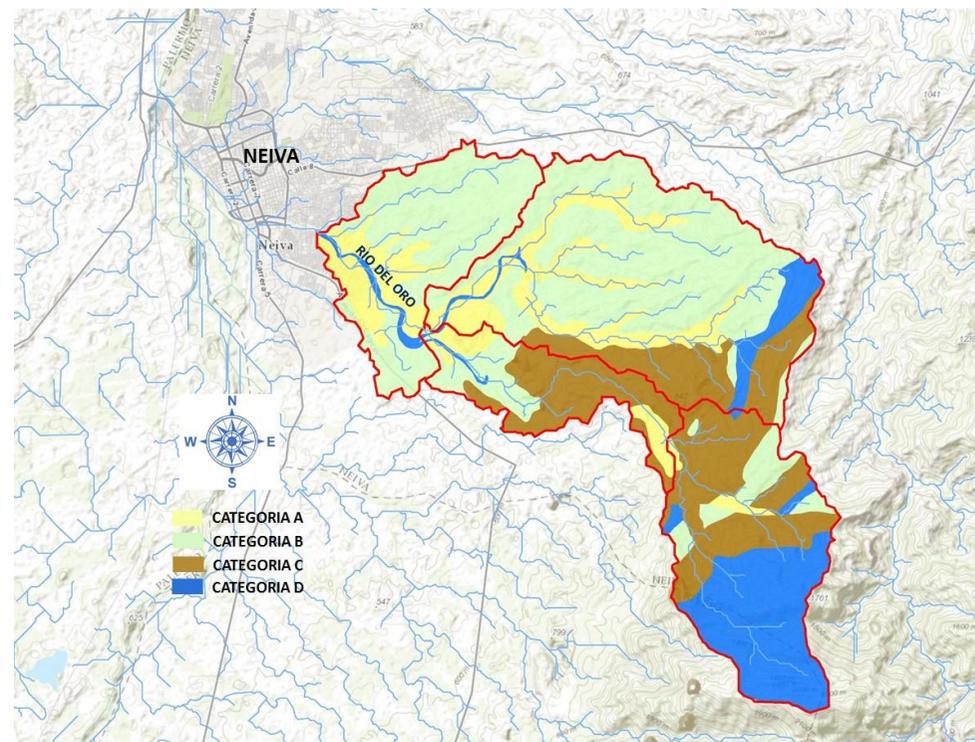
El SCS elaboró curvas con la relación entre escorrentía directa  $P_e$  y precipitación  $P$ . Para superficies impermeables, el número de curva, CN, es igual a 100. Para otras superficies, CN es menor que 100 (Chow, 1994).

Se han elaborado tablas para obtener el CN según los siguientes aspectos:

- a) Condiciones de humedad antecedente, con base en la lluvia anterior de 5 a 30 días.
  - Condición AMC(I): Suelo seco. No aplicable a crecida de proyecto. Caudales bajos.
  - Condición AMC(II): Suelo medio. Asociado a crecidas anuales o promedios.
  - Condición AMC(III): Suelo húmedo. Crecidas máximas. Caudales altos.
- b) Tipo de terreno: se refiere al uso del suelo, la cubierta vegetal y las prácticas de cultivo.
  - Poca densidad de vegetación: Condición que conduce a mayores valores de CN y mayores valores de escorrentía.
  - Alta densidad de vegetación: Condición que conduce a menores valores de CN y menores valores de escorrentía.
- c) Condiciones hidrológicas de los suelos. Existe una clasificación según las condiciones hidrológicas de los suelos, donde “A” es suelo muy permeable, como las arenas, “B” es suelo permeable, como un suelo arenoso-limoso, “C” es un suelo poco permeable, como un suelo limoso o una roca fracturada y “D” es muy poco permeable, como una roca sin fracturar o un suelo arcilloso.

Esta clasificación del suelo frente al drenaje se ha realizado a partir de la información hidrogeológica obtenida a través del Servicio Geológico Colombiano, obteniéndose la siguiente clasificación frente al drenaje según la metodología del SCS para el estudio del Río del Oro (Figura 35).

Figura 35. Clasificación del suelo frente al drenaje Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

Ven Te Chow (1994) propone una clasificación en función de uso de la tierra y de la clasificación del suelo frente al drenaje, que se recoge en la Tabla 27. Como se comentaba al principio del apartado el CN refleja el grado de impermeabilización del suelo, donde 100 es completamente permeable, siendo más bajo este valor a medida que es mayor la capacidad del terreno para infiltrar, retener o evaporatranspirar el agua de lluvia.

Tabla 27 Número de curva para condición antecedente de humedad II según el uso del suelo y su grupo hidrológico. Tomado de Chow, 1994.

| Descripción del uso de la tierra                             | Grupo hidrológico del suelo |    |    |    |
|--|-----------------------------|----|----|----|
|  | A                           | B  | C  | D  |
| Tierra cultivada   |                             |    |    |    |
| Sin tratamientos de conservación                             | 72                          | 81 | 88 | 91 |
| Con tratamientos de conservación                             | 62                          | 71 | 78 | 81 |
| Pastizales   |                             |    |    |    |
| Condiciones pobres   | 68                          | 79 | 86 | 89 |
| Condiciones óptimas  | 39                          | 61 | 74 | 80 |
| Vegas de ríos: condiciones óptimas                           | 30                          | 58 | 71 | 78 |
| Bosques  |                             |    |    |    |
| Cubierta pobre, sin hierbas                                  | 45                          | 66 | 77 | 83 |
| Cubierta buena   | 25                          | 55 | 70 | 77 |
| Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios |                             |    |    |    |
| Condiciones óptimas: 75% de pasto o más                      | 39                          | 61 | 74 | 80 |
| Condiciones aceptables: 50-75% de pasto                      | 49                          | 69 | 79 | 84 |
| Áreas comerciales (85% impermeables)                         | 89                          | 92 | 94 | 95 |
| Distritos industriales (72% impermeables)                    | 81                          | 88 | 91 | 93 |

| Descripción del uso de la tierra       |               | Grupo hidrológico del suelo |    |    |    |
|--|---------------|-----------------------------|----|----|----|
|  |               | A                           | B  | C  | D  |
| Residencial                            |               |                             |    |    |    |
| Tamaño                                 | % impermeable |                             |    |    |    |
| 1/8 acre                               | 65            | 77                          | 85 | 90 | 92 |
| 1/4 acre                               | 38            | 61                          | 75 | 83 | 87 |
| 1/3 acre                               | 30            | 57                          | 72 | 81 | 86 |
| 1/2 acre                               | 25            | 54                          | 70 | 80 | 85 |
| 1 acre                                 | 20            | 51                          | 68 | 79 | 84 |
| Parqueaderos pavimentados, techos      |               | 98                          | 98 | 98 | 98 |
| Calles y carreteras:                   |               |                             |    |    |    |
| Pavimentos con cuneta y alcantarillado |               | 98                          | 98 | 98 | 98 |
| Grava                                  |               | 76                          | 85 | 89 | 91 |
| Tierra                                 |               | 72                          | 82 | 87 | 89 |

Fuente: Hidrología Aplicada; Ven Te Chow et al 1994

Para calcular el número de curva para una condición antecedente de humedad diferente a la II, se utilizan las siguientes expresiones (Chow, 1994):

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

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

### Retención potencial máxima, S

Es la máxima precipitación absorbida por la cuenca.

S se relaciona con el número de curva CN de escorrentía mediante la siguiente fórmula:

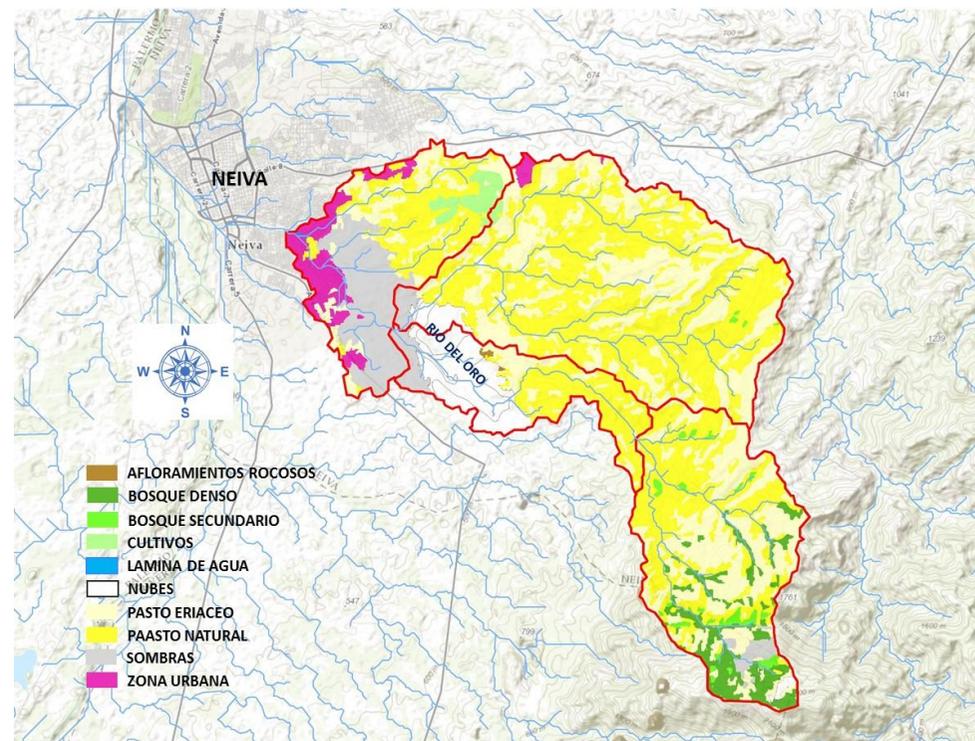
$$CN = \frac{1000}{(10 + S)}$$

Para áreas impermeables, S = 0 y CN = 100. Para área sin escurrimiento, S = ∞ y CN = 0.

Para la elaboración del mapa de uso de la tierra se ha realizado un análisis de las imágenes LANDSAT de los años 1987 y 2015 (Figura 36 y Figura 37) y se ha realizado un análisis de la evolución de los usos del suelo durante el periodo comprendido entre ambos años. Así, de acuerdo a las conclusiones extraídas se observa una notable pérdida de superficie forestal, pasando a ocuparse en su mayor parte por los pastos, que ven aumentada su superficie en un 7%. El aumento más importante en términos relativos lo experimenta el área urbana, que ve incrementada su superficie en un 107%.

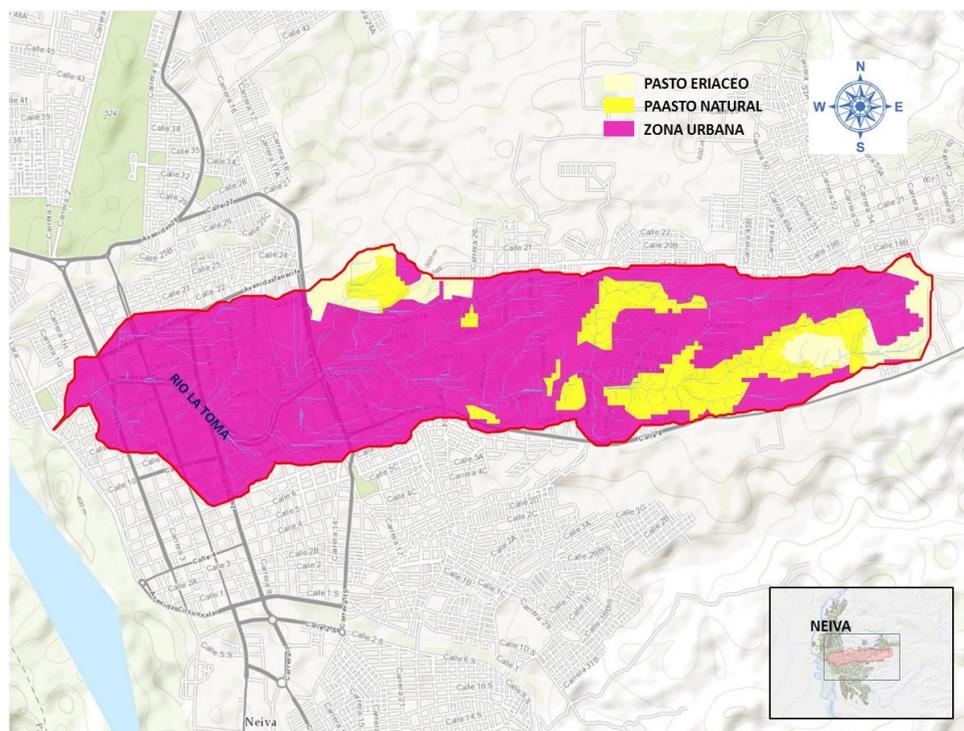
De esta forma, a continuación se muestran en la Figura 36 y Figura 37 los mapas de usos del suelo elaborados para el estudio del Río del Oro y la Quebrada La Toma respectivamente.

Figura 36. Usos del suelo cuenca Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Usos del suelo cuenca Quebrada La Toma



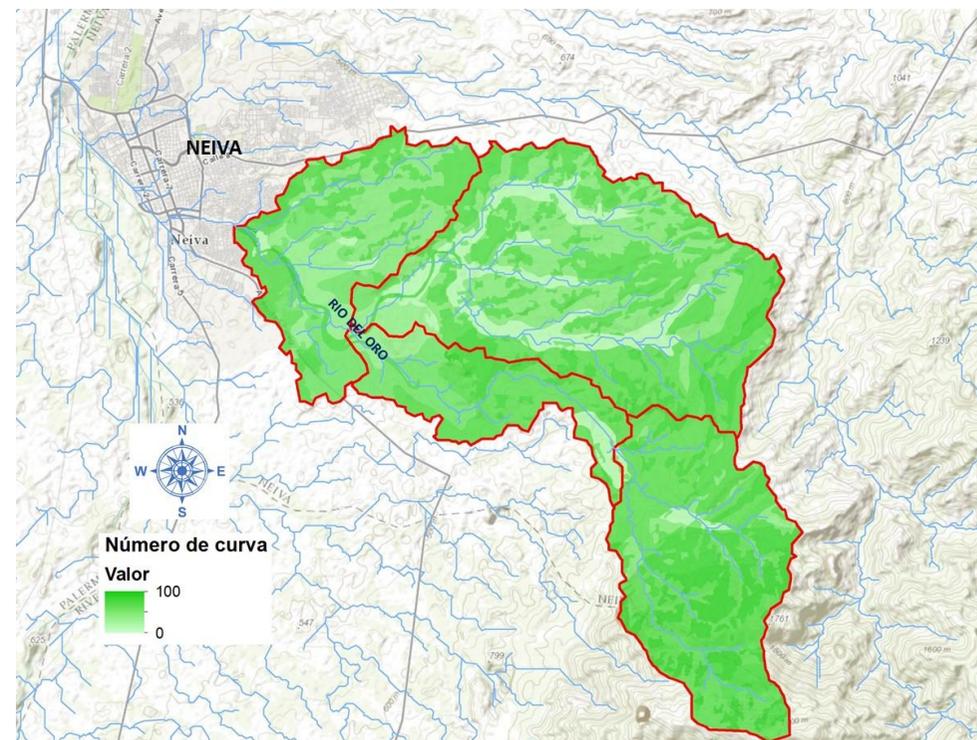
Fuente: Elaboración propia

Como se mostró en la Tabla 27, los usos del suelo definen el número de curva, por tanto, uno de los principales factores que influye en la cantidad de lluvia que no se convierte en escorrentía es la cobertura vegetal del suelo, cuanto más densa es esta menor es la escorrentía.

Con esto, en función de la clasificación del suelo frente al drenaje y los usos de la tierra se ha obtenido en Número de Curva para toda la zona de estudio para un antecedente humedad II, explicada anteriormente, correspondiente a unos 15 días secos.

En la Figura 38 se define el Número de Curva con el que se han caracterizado la cuenca del Río del Oro.

Figura 38. Número de Curva (CN) en la cuenca del Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

**Pérdidas por interceptación, la**

Es el almacenamiento en superficie e infiltración antes de presentarse la escorrentía. Para elevada precipitación, ésta se hace igual a la escorrentía. Por experiencia, se tiene que las pérdidas por infiltración “la” son el 20% de la retención potencial máxima S, así (Chow, 1994):

$$I_a = 0.2S$$

### Relación entre el coeficiente de escorrentía y el número de curva

Por definición, el coeficiente de escorrentía medio final de un aguacero vale

$$C = \frac{E_s}{P}$$

La escorrentía superficial (ES) que genera cualquier aguacero (P) se puede cuantificar mediante el método del Número de Curva. Admitiendo la relación habitual

$I_a = P_0 = 0.2 \cdot S$  se tiene que:

$$E_s = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si} \quad P > P_0$$

Sustituyendo en el cociente de C se tiene

$$C = \frac{E_s}{P} = \frac{\left(\frac{P}{P_0} - 1\right)^2 \cdot P_0^2}{P^2 + 4 \cdot P \cdot P_0}$$

Y a su vez, el umbral de escorrentía  $P_0$  es función del número de curva:

$$P_0 = 0.2 \cdot \frac{25400 - 254 \cdot N}{N} = \frac{5080 - 50.8 \cdot N}{N}$$

Se observa cómo el coeficiente de escorrentía depende de la precipitación analizada y del Número de Curva.

### 5.3.3 Distribución temporal de la lluvia

Para una distribución adecuada de la lluvia es necesaria la relación intensidad-duración del aguacero. Para ello se ha realizado un ajuste a una ecuación logarítmica para cada periodo de retorno.

### 5.3.4 Modelo HMS, propagación de hidrogramas

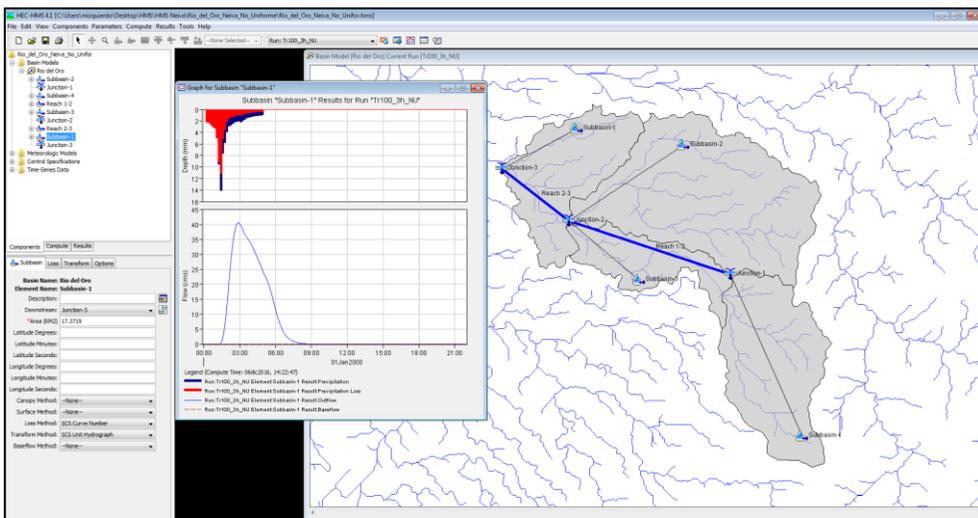
El software HMS, (Flood Hydrograph Package) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, es una herramienta de ayuda al cálculo donde se obtienen hidrogramas de salida en los puntos de estudio o de unión determinados sobre el cauce, mediante la aplicación del modelo matemático de transformación lluvia-escorrentía-propagación

El modelo está diseñado en general para simular la respuesta de una cuenca compleja a la precipitación, representándola como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos; un componente puede ser una subcuenca, un tramo de río, un embalse, etc.; el resultado del proceso de simulación es el cálculo del hidrograma de avenida en los puntos deseados. Se muestra en la la interfaz de usuario del programa donde se pueden apreciar los elementos que componen el modelo del Río del Oro y algunos ejemplos de resultados obtenidos.

Para el presente estudio se ha realizado un modelo hidrológico para el Río del Oro tal y como se muestra en la Figura 39 donde se plantea el esquema del modelo realizado con el programa HEC-HMS.

Para el modelo del Río del Oro se han planteado un total de 4 subcuencas y 2 interconexiones para la propagación de caudales entre unas subcuencas y otras, y por último los puntos de unión, de control o estudio, donde podemos conocer los resultados del hidrograma de salida.

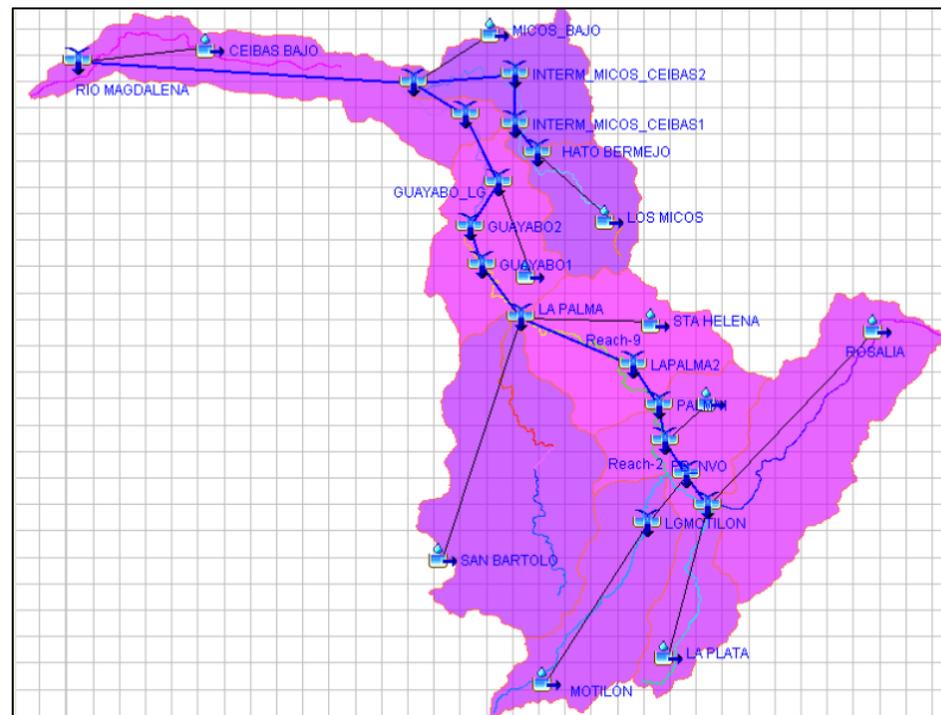
Figura 39. Esquema del modelo hidrológico HEC-HMS realizado para la cuenca del Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

Referente al Río Las Ceibas, tal y como se expuso en el apartado 5.1, se han obtenido los caudales máximos para su estudio del documento elaborado por la Universidad Nacional de Colombia, donde se plantea el siguiente esquema de modelo hidrológico elaborado igualmente con el programa HEC-HMS que se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Esquema de representación de la cuenca del Río Las Ceibas en el modelo HEC-HMS.



Fuente: UNAL, 2007

El objetivo mediante diferentes hietogramas de entrada para cada subcuenca, es conocer el caudal punta en hidrograma de salida para los periodos de retorno y puntos de control o estudio.

La transformación del exceso de precipitación en escorrentía, y por lo tanto caudales a la salida de la cuenca, se ha realizado mediante el método del hidrograma unitario del SCS, considerando el transporte del hidrograma mediante el método de Muskingum.

El hidrograma unitario es característico de la subcuenca considerada y no depende de la tormenta, pudiendo ser linealmente superpuestas las escorrentías debidas a diferentes periodos de precipitación.

El método del hidrograma unitario del SCS requiere para el cálculo:

- El tiempo de retardo de la subcuenca (t-lag).

$$T_{lag} = 0.6 * 0.0136 * L^{0.8} * \frac{\left(\frac{1000}{CN-9}\right)^{0.7}}{S^{0.5}}$$

- Número de Curva (CN).
- Características físicas de la subcuenca (longitud de cauce (L), área (A), pendiente (S)).

Para el transporte del hidrograma mediante el método de Muskingum se han calculado los parámetros correspondientes al mismo (K, X), siendo (K) el tiempo de viaje de la onda en hrs y (X) el coeficiente de ponderación que depende de los flujos de entrada y salida.

El coeficiente de ponderación suele tomar valores entre 0.1 y 0.3; en este caso se establece 0.2 de acuerdo con lo propuesta para cauces naturales en “Applied Hydrology” de Ven Te Chow.

El tiempo de viaje depende de la longitud del tramo y la velocidad de la onda.

$$K = \frac{L}{V_w}$$

V<sub>w</sub>= velocidad de la onda (m/s).

L= longitud del cauce principal (m).

La velocidad de la onda ha sido estimada a partir del producto de la velocidad media del cauce por el ratio V<sub>w</sub>/V, el cual es función de la forma del canal, que para el caso de cauces

naturales toma un valor de 1.5 de acuerdo con la publicación “Flood-Runoff Analysis” del U.S. Army Corps of Engineers.

La velocidad media en el tramo en cuestión la estimaremos mediante la fórmula empírica propuesta por el Michigan Department of Natural Resources - Land and Water Management Division.

$$V = k * S^{0.5}$$

Siendo:

V; velocidad media en fps.

S; la pendiente del tramo (%).

k; coeficiente basado en el tipo de cauce.

Los parámetros hidrológicos así obtenidos para cada subcuenca del modelo planteado para el Río del Oro se muestra a continuación en la Tabla 28 para el caso del cálculo de abstracciones, y en la Tabla 29 para la propagación de hidrogramas en los diferentes tramos del Río del Oro.

Tabla 28 Parámetros para el cálculo de abstracciones Río del Oro

| Identificación | Total km <sup>2</sup> | CN medio* | Retenc.Máx (mm) | Pérdida Inicial (mm) | Retardo t-lag (h) | Retardo t-lag (min) |
|----------------|-----------------------|-----------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 1              | 17.37                 | 69.08     | 113.67          | 22.73                | 0.93              | 55.62               |
| 2              | 10.35                 | 67.05     | 124.83          | 24.97                | 1.2               | 72.01               |
| 3              | 38.41                 | 71.45     | 101.47          | 20.29                | 1.22              | 73.38               |
| 4              | 22.93                 | 79.05     | 67.33           | 13.47                | 0.65              | 39.27               |

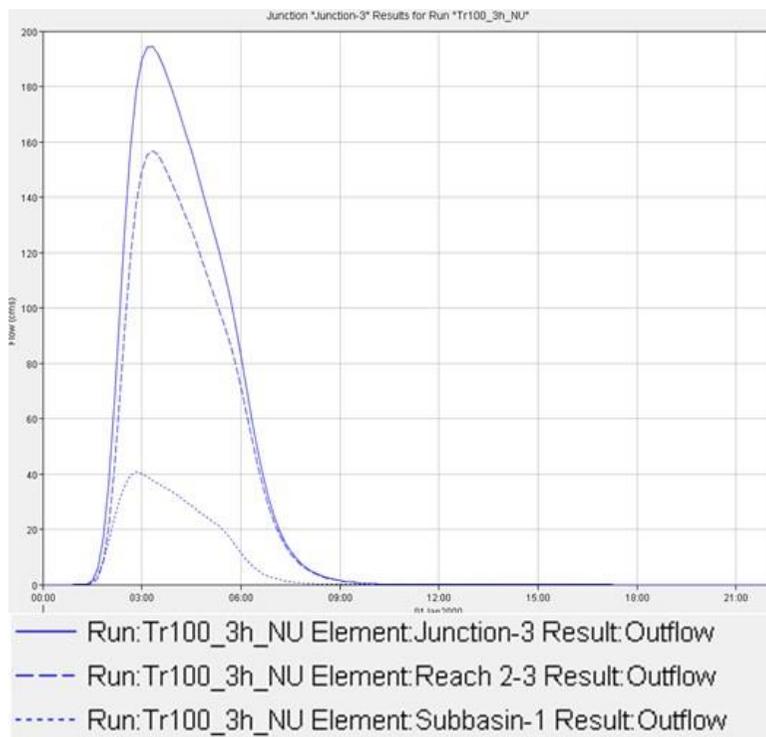
Fuente: Elaboración propia

Tabla 29 Parámetros hidrológicos para la propagación del hidrograma en cada tramo del Río del Oro

| Conexiones | Cota máx (m) | Cota mín (m) | Pendiente (%) | Pendiente (m/m) | Pendiente e (m/km) | Longitud (km) | CN    | K (h) | X   |
|------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|-------|-------|-----|
| Reach 1-2  | 645          | 472          | 2.2           | 0.022           | 21.982             | 7.87          | 87.33 | 0.37  | 0.2 |
| Reach 2-3  | 490          | 434          | 1.56          | 0.016           | 15.599             | 3.59          | 86.31 | 0.25  | 0.2 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Hidrograma a la salida del Río del Oro para el modelo de 100 años de periodo de retorno



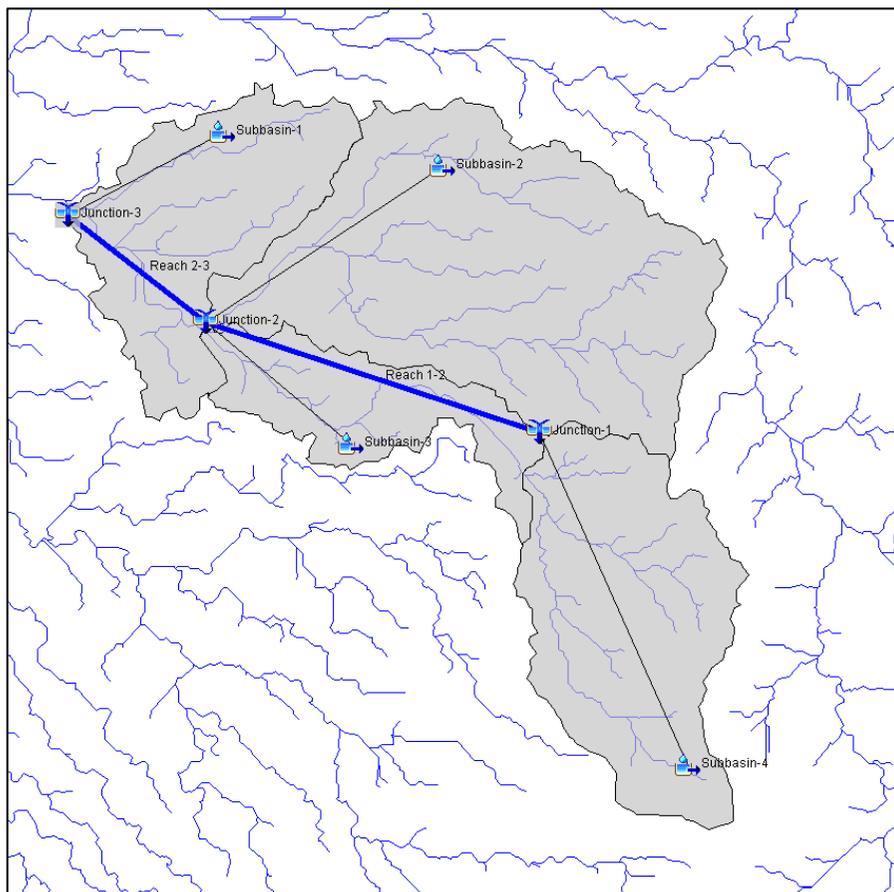
Fuente: Elaboración propia

La salida del programa otorga datos y gráficas descriptivas para cada cuenca, A título ilustrativo se ha adjuntado el hidrograma de salida de caudal del modelo del Río del Oro, en la unión a la salida de la cuenca para el periodo de retorno de 100 años.

### 5.3.5 Salidas

Se muestran a continuación los principales resultados obtenidos para cada uno de los elementos hidrológicos analizados en la cuenca del Río del Oro (Tabla 30, Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33) para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años. Además en la Figura 42 se muestra el esquema del modelo hidrológico del Río del Oro.

Figura 42. Esquema modelo hidrológico Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

Tabla 30 Salidas para el periodo de retorno de 3 años Río del Oro

| Elemento   | Área de drenaje (Km <sup>2</sup> ) | Caudal punta (m <sup>3</sup> /s) | Tiempo al pico | Volumen (mm) |
|------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|
| Subbasin-2 | 38.41                              | 3.4                              | 05:30          | 0.82         |
| Junction-1 | 22.93                              | 13.5                             | 3:30           | 4.63         |

| Elemento   | Área de drenaje (Km <sup>2</sup> ) | Caudal punta (m <sup>3</sup> /s) | Tiempo al pico | Volumen (mm) |
|------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|
| Subbasin-4 | 22.93                              | 13.5                             | 03:30          | 4.63         |
| Reach 1-2  | 22.93                              | 12.2                             | 3:50           | 4.63         |
| Subbasin-3 | 10.35                              | 2.1                              | 05:00          | 2.16         |
| Junction-2 | 71.69                              | 15.3                             | 04:10          | 2.23         |
| Reach 2-3  | 71.69                              | 15.1                             | 04:30          | 2.23         |
| Subbasin-1 | 17.3719                            | 3                                | 5:00           | 1.63         |
| Junction-3 | 89.0619                            | 18                               | 4:30           | 2.11         |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31 Salidas para el periodo de retorno de 25 años Río del Oro

| Elemento   | Área de drenaje (Km <sup>2</sup> ) | Caudal punta (m <sup>3</sup> /s) | Tiempo al pico | Volumen (mm) |
|------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|
| Subbasin-2 | 38.41                              | 30.5                             | 4:00           | 10.3         |
| Junction-1 | 22.93                              | 50.2                             | 02:20          | 20.73        |
| Subbasin-4 | 22.93                              | 50.2                             | 02:20          | 20.73        |
| Reach 1-2  | 22.93                              | 45.8                             | 2:50           | 20.73        |
| Subbasin-3 | 10.35                              | 12.1                             | 03:30          | 15.15        |
| Junction-2 | 71.69                              | 81.1                             | 3:10           | 14.34        |
| Reach 2-3  | 71.69                              | 80.3                             | 3:30           | 14.34        |
| Subbasin-1 | 17.3719                            | 19.6                             | 03:10          | 13.77        |
| Junction-3 | 89.0619                            | 99.6                             | 03:30          | 14.23        |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32 Salidas para el periodo de retorno de 50 años Río del Oro

| Elemento   | Área de drenaje (Km²) | Caudal punta (m³/s) | Tiempo al pico | Volumen (mm) |
|------------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------|
| Subbasin-2 | 38.41                 | 45.3                | 03:40          | 15.33        |
| Junction-1 | 22.93                 | 70.3                | 02:20          | 27.68        |
| Subbasin-4 | 22.93                 | 70.3                | 2:20           | 27.68        |
| Reach 1-2  | 22.93                 | 63.1                | 02:50          | 27.68        |
| Subbasin-3 | 10.35                 | 17.5                | 03:20          | 21.37        |
| Junction-2 | 71.69                 | 117.7               | 3:10           | 20.15        |
| Reach 2-3  | 71.69                 | 116                 | 3:20           | 20.15        |
| Subbasin-1 | 17.3719               | 29.3                | 3:00           | 19.8         |
| Junction-3 | 89.0619               | 144.1               | 03:20          | 20.08        |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33 Salidas para el periodo de retorno de 100 años Río del Oro

| Elemento   | Área de drenaje (Km²) | Caudal punta (m³/s) | Tiempo al pico | Volumen (mm) |
|------------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------|
| Subbasin-2 | 38.41                 | 63                  | 3:30           | 20.98        |
| Junction-1 | 22.93                 | 91.9                | 02:20          | 35.08        |
| Subbasin-4 | 22.93                 | 91.9                | 2:20           | 35.08        |
| Reach 1-2  | 22.93                 | 82.2                | 02:40          | 35.08        |
| Subbasin-3 | 10.35                 | 23.5                | 3:20           | 28.17        |
| Junction-2 | 71.69                 | 159.4               | 03:00          | 26.53        |
| Reach 2-3  | 71.69                 | 156.8               | 03:20          | 26.53        |
| Subbasin-1 | 17.3719               | 40.7                | 02:50          | 26.43        |
| Junction-3 | 89.0619               | 194.3               | 3:20           | 26.51        |

Fuente: Elaboración propia

Además, en la Tabla 34 se muestran los caudales máximos obtenidos del documento elaborado por la Universidad Nacional de Colombia, para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 34 Caudales de diseño Río Las Ceibas

| Resultados simulación caudales zona urbana (m³/s) | Periodo de Retorno (años) |      |       |       |       |       |
|---|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2                         | 5    | 10    | 25    | 50    | 100   |
|   | 59.2                      | 97.4 | 126.4 | 158.5 | 196.1 | 227.3 |

Fuente: UNAL, 2007

## 5.4 ESTUDIO HIDRÁULICO

### 5.4.1 Modelo hidráulico

Para la simulación del flujo en lámina libre se ha usado el modelo IBER desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya y la Universidad de La Coruña en el marco de un Convenio entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la Dirección General del Agua del Gobierno de España.

El modelo trabaja sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros (Figura 43 y Figura 44). En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como la hipótesis de distribución uniforme de velocidad.

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

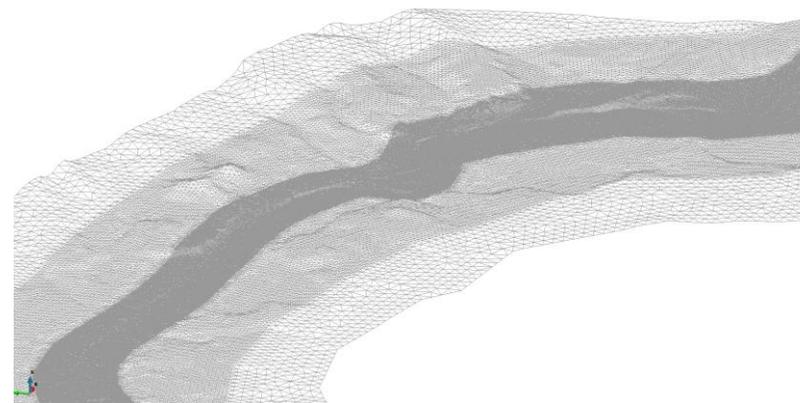
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

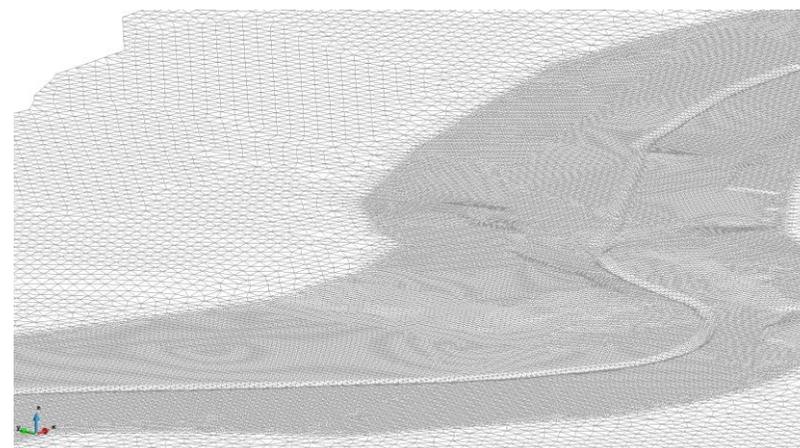
En donde h es el calado, U<sub>x</sub>, U<sub>y</sub> son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z<sub>s</sub> es la elevación de la lámina libre, τ<sub>s</sub> es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ<sub>b</sub> es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ<sub>xx</sub>, τ<sub>xy</sub>, τ<sub>yy</sub> son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M<sub>s</sub>, M<sub>x</sub>, M<sub>y</sub> son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Figura 43. Malla de cálculo no estructurada desarrollada para el cálculo hidráulico del Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Malla de cálculo no estructurada desarrollada para el cálculo hidráulico de la Quebrada La Toma



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2 Resultados

Se muestra a continuación las cotas de inundación máximas alcanzadas para los periodos de retorno de 3, 25, 50 y 100 años. Es la envolvente de los máximos calados alcanzados durante la simulación. En la Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54 y Figura 55 se muestran los calados máximos de inundación fluvial de los ríos del Oro y Las Ceibas y de la Quebrada La Toma.

Referente al Río del Oro, se muestran los calados máximos obtenidos en la zona de estudio cuyo tramo está comprendido entre la cuenca alta del río, en el barrio de Bosques de San Luis, al sureste de la ciudad de Neiva; y su desembocadura en el río Magdalena. En el tramo analizado se distingue entre una primera parte no encauzada, de aproximadamente 2 kilómetros de longitud, y una segunda parte canalizada de unos 2.5 kilómetros de longitud, desde la zona de Peñón Redondo hasta la desembocadura en el Río Magdalena.

Las mayores afecciones asociadas a la inundación del Río del Oro aparecen al comienzo del primer tramo, en la parte alta de la cuenca, donde se localizan, ocupando la ribera de la margen izquierda, fundamentalmente viviendas de clase baja y asentamientos precarios, las cuales se ven afectadas con cierta recurrencia. En esta zona, se registran afecciones desde el periodo de retorno de 3 años, donde se alcanzan calados de aproximadamente 1 metro de profundidad. Para las recurrencias de 25, 50 y 100 años, en las viviendas situadas junto al cauce, se llegan a alcanzar calados comprendidos en un rango de 1.5 y 2 metros.

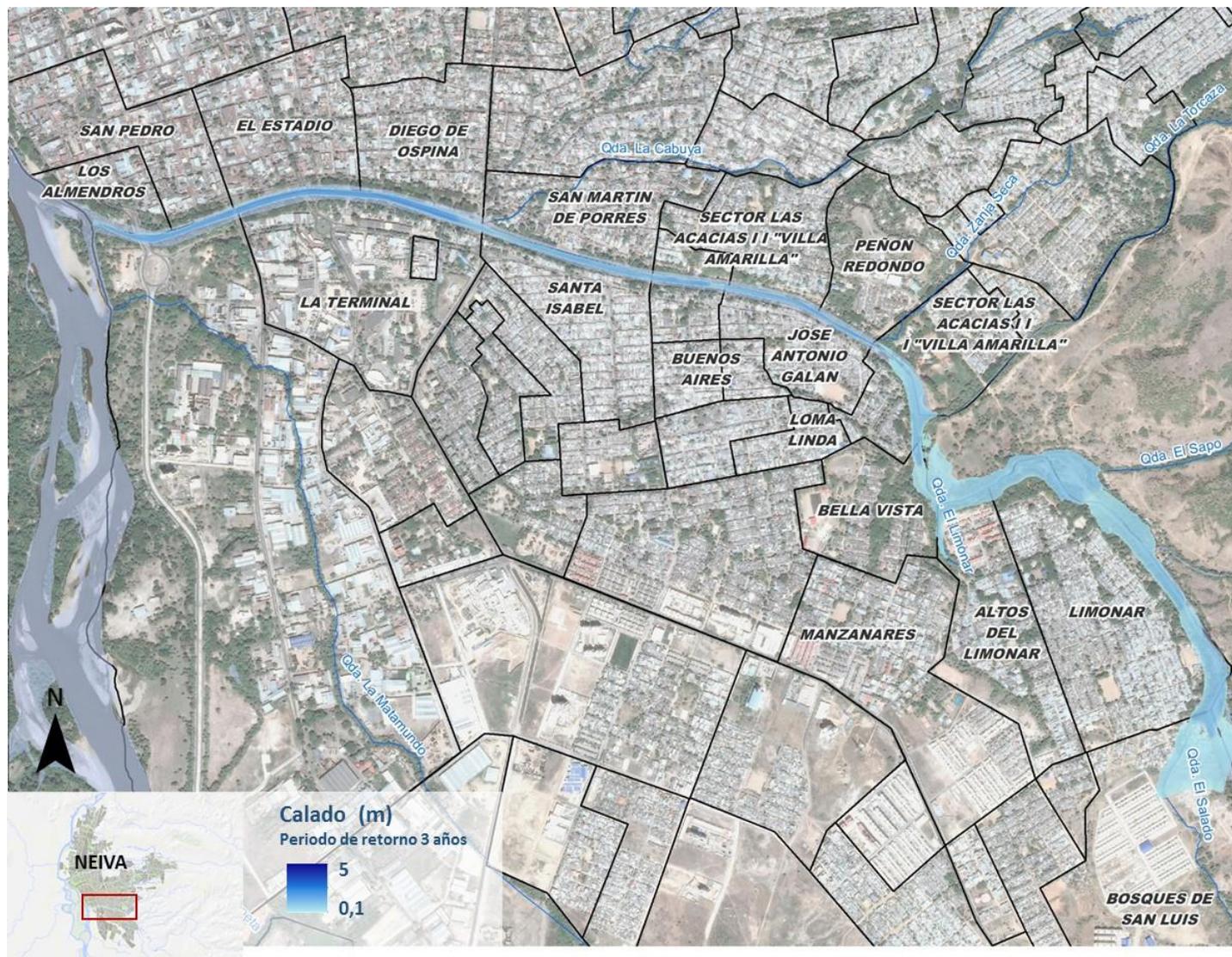
Referente a la parte canalizada del Río del Oro, no hay afecciones hasta un periodo de retorno de 25 años, donde aparecen inundaciones por el desbordamiento del canal, fundamentalmente en lo que han sido denominadas *áreas verdes* próximas al mismo. En estas zonas se han localizado puntualmente viviendas clasificadas como *precarias*, donde se alcanzan calados de aproximadamente 1 metro de profundidad.

En el caso del Río Las Ceibas se muestra el mapa de calados máximos para el periodo de retorno de 100 años, calculado con el cauce en su disposición final, según los planos constructivos facilitados por la Alcaldía de Neiva, ya que es una obra en ejecución. Resulta preciso añadir, que de acuerdo a los resultados de inundaciones estudiados por la CAM,

aguas arriba del tramo a canalizar se localizan asentamientos fundamentalmente de tipo precario en zona calificada como inundable.

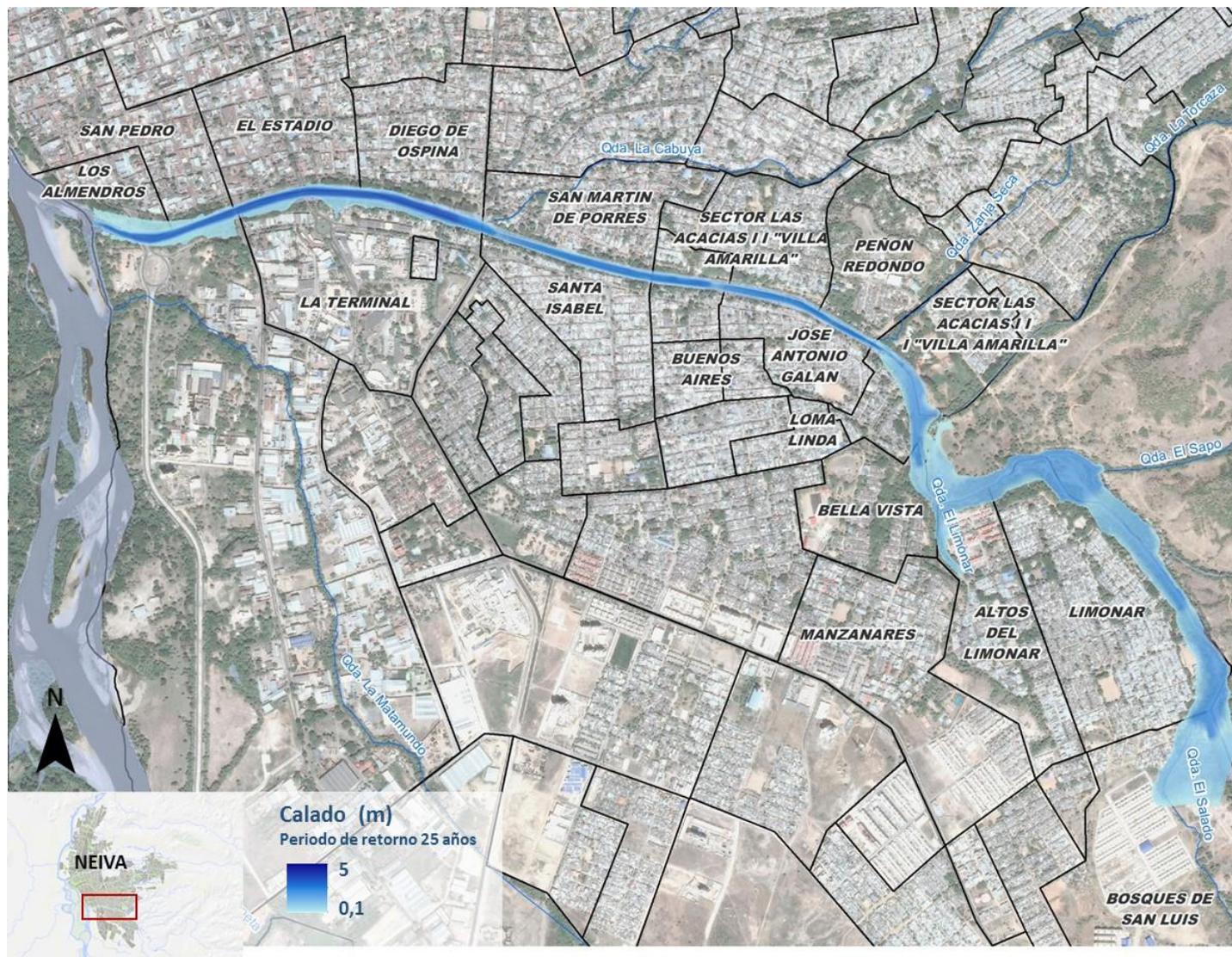
Respecto a la Quebrada La Toma, se ha llevado a cabo su estudio en la zona encauzada, de aproximadamente 2.5 kilómetros de longitud, no registrándose afecciones significativas. Para el análisis de la parte no canalizada se precisa de un estudio a un mayor nivel de detalle.

Figura 45. Calados máximos para el periodo de retorno de 3 años en el Río del Oro



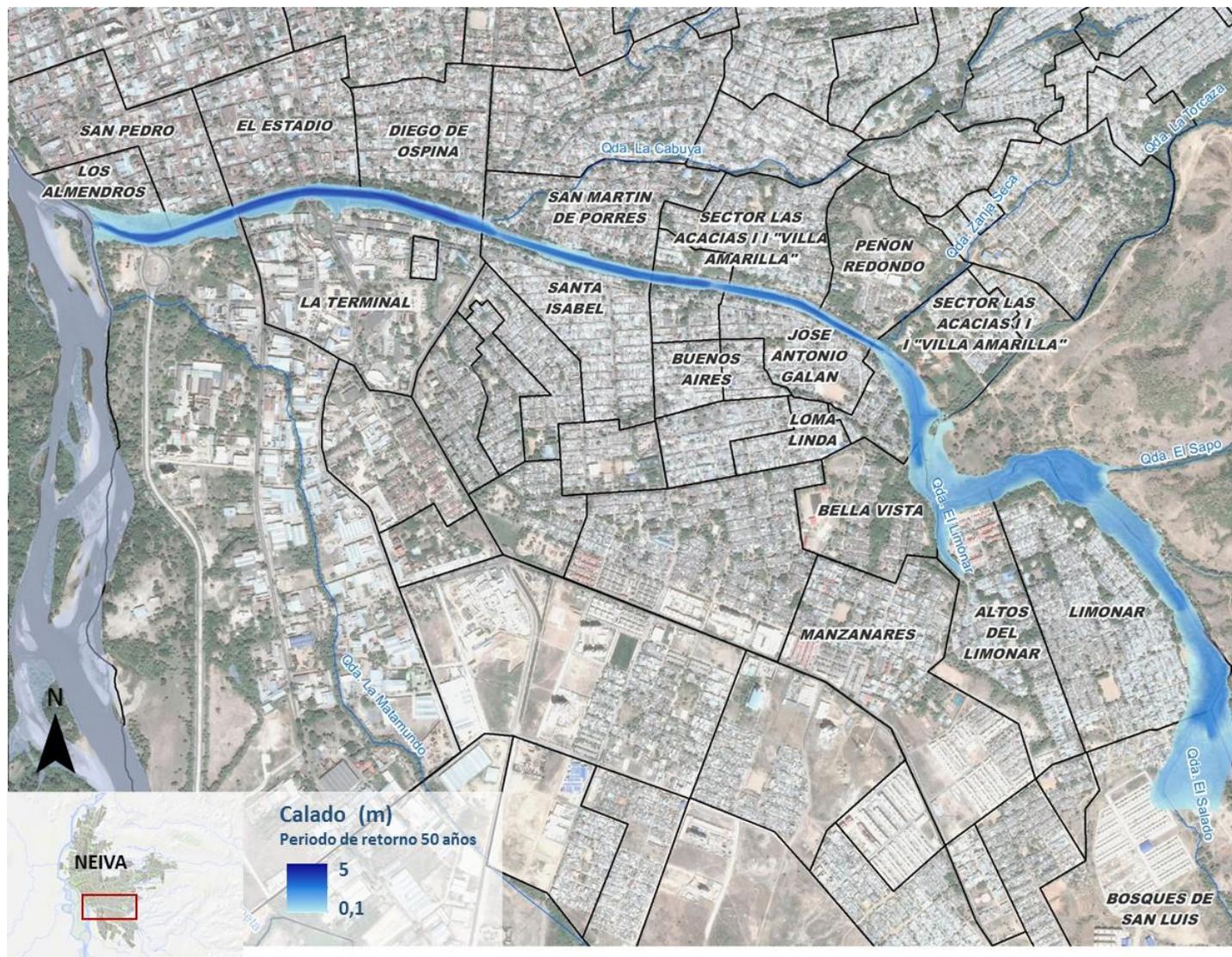
Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Calados máximos para el periodo de retorno de 25 años en el Río del Oro



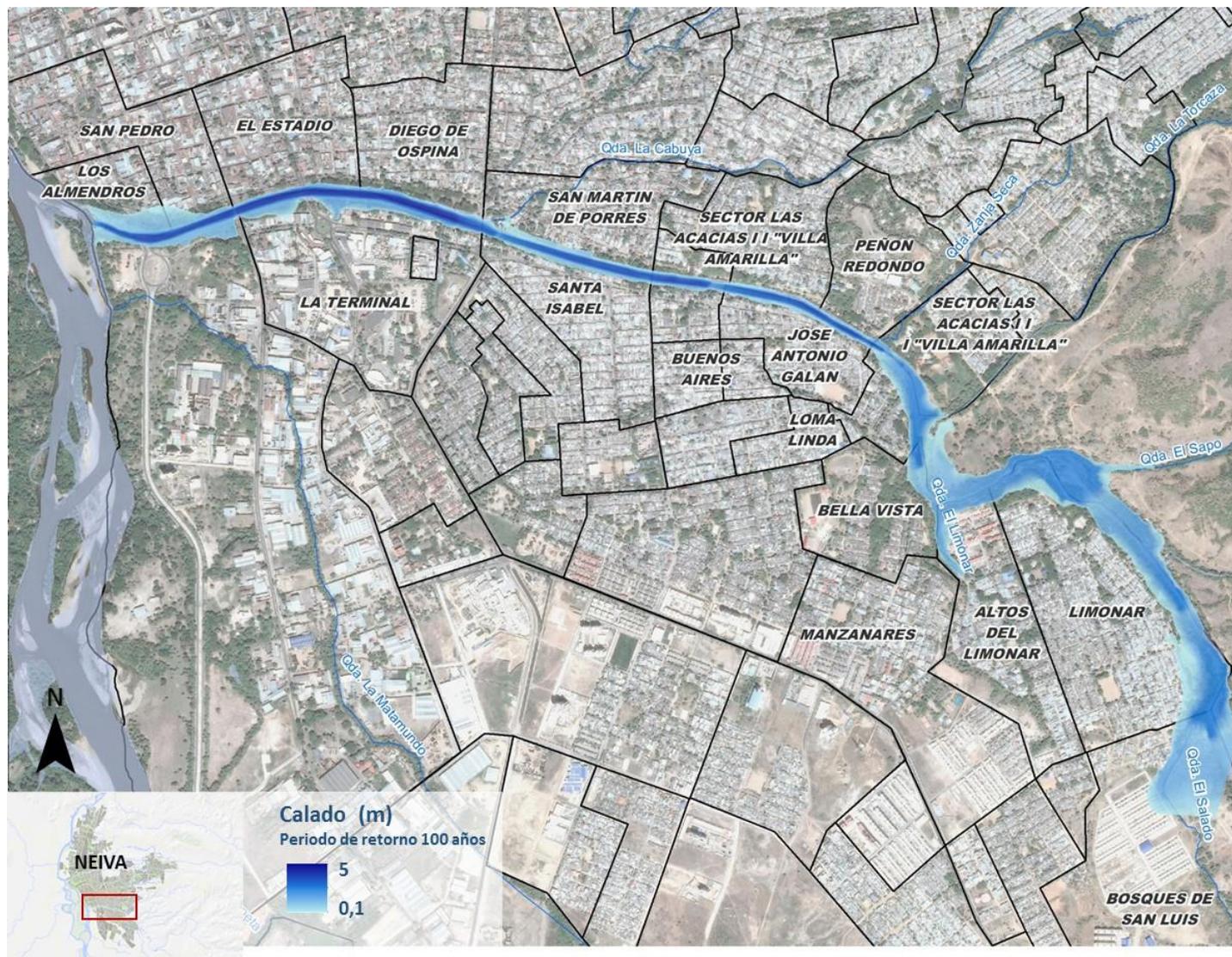
Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Calados máximos para el periodo de retorno de 50 años en el Río del Oro



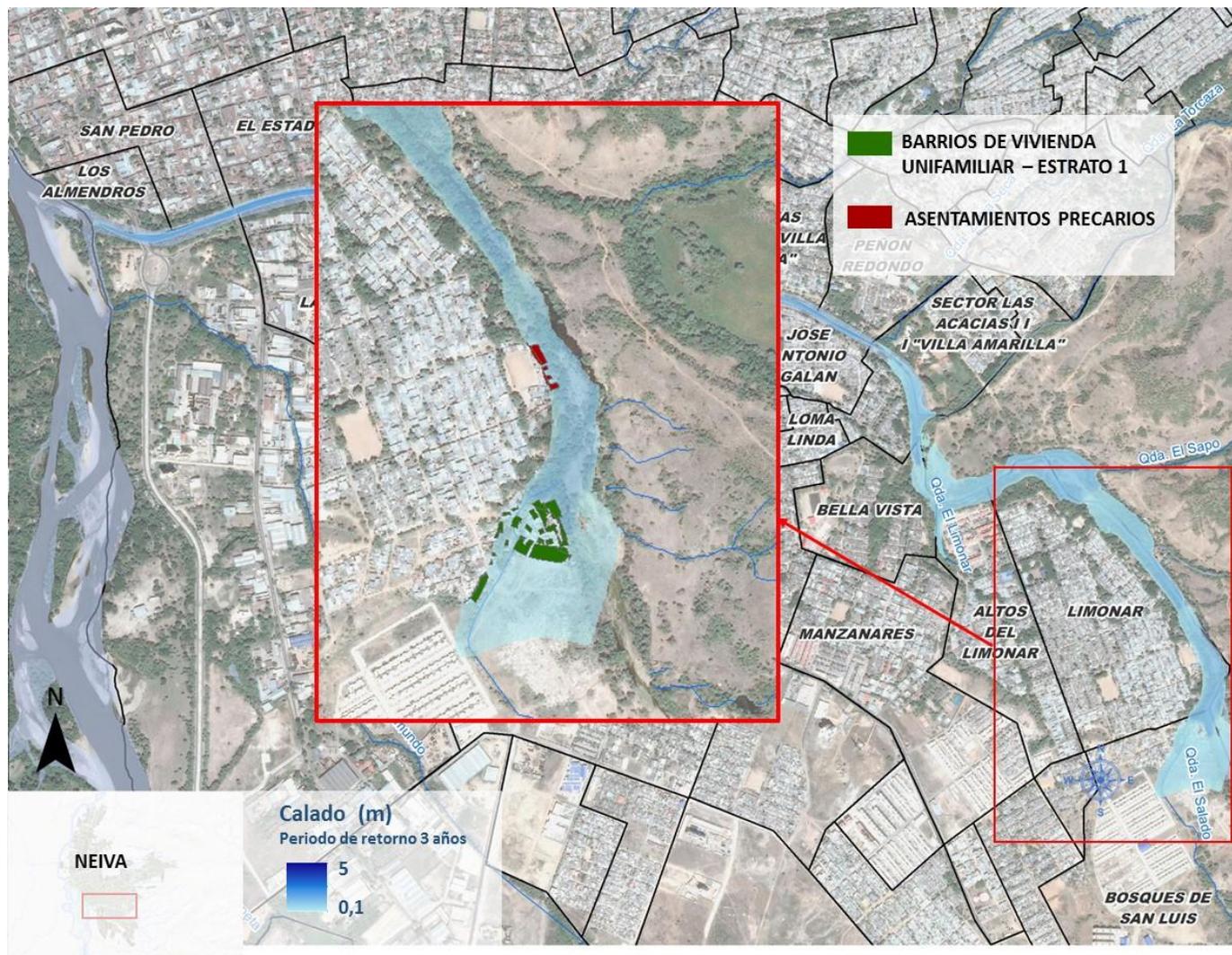
Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en el Río del Oro



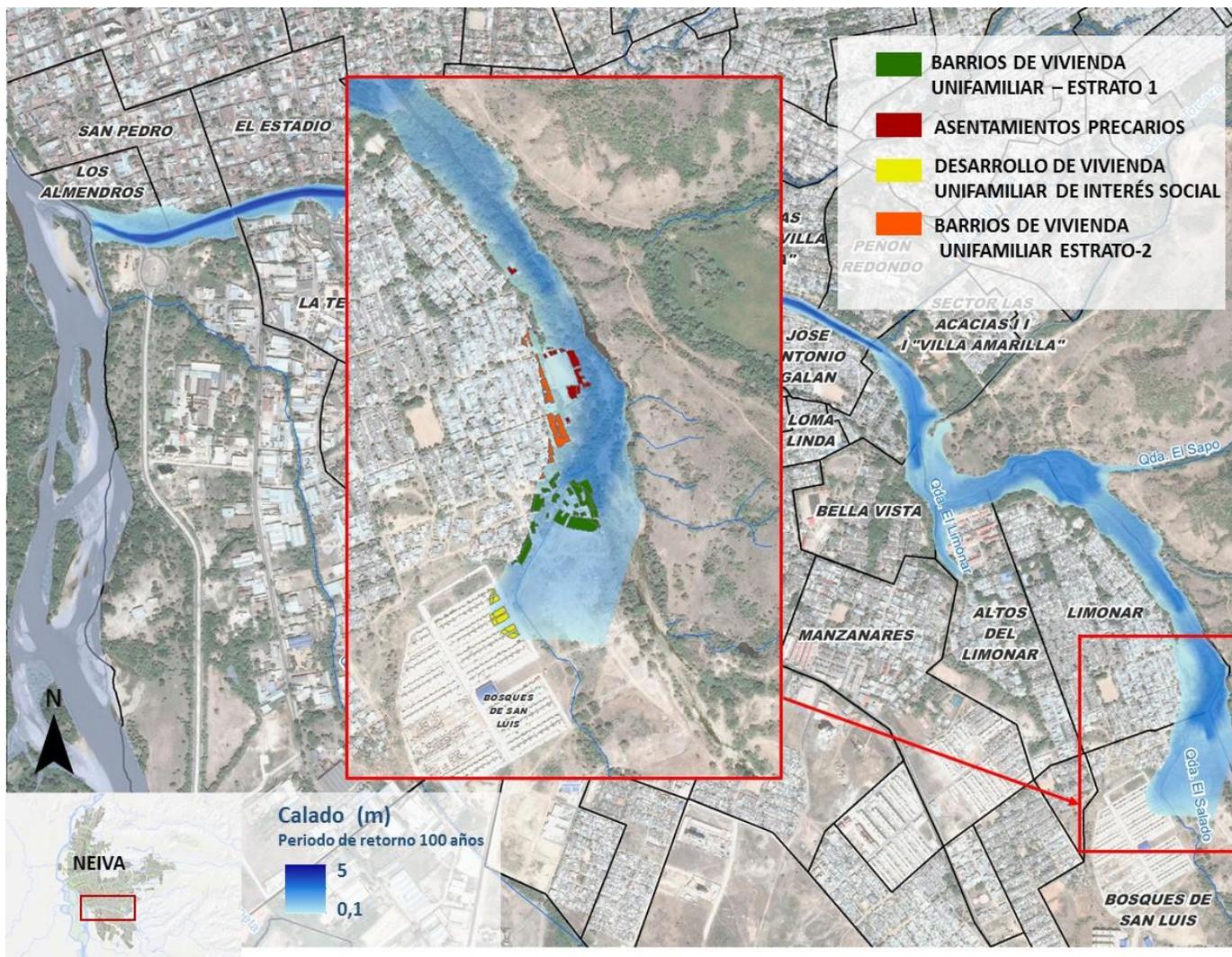
Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Zoom calados máximos del tramo no encauzado del Río del Oro para el periodo de retorno de 3 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Zoom calados máximos del tramo no encauzado del Río del Oro para el periodo de retorno de 100 años



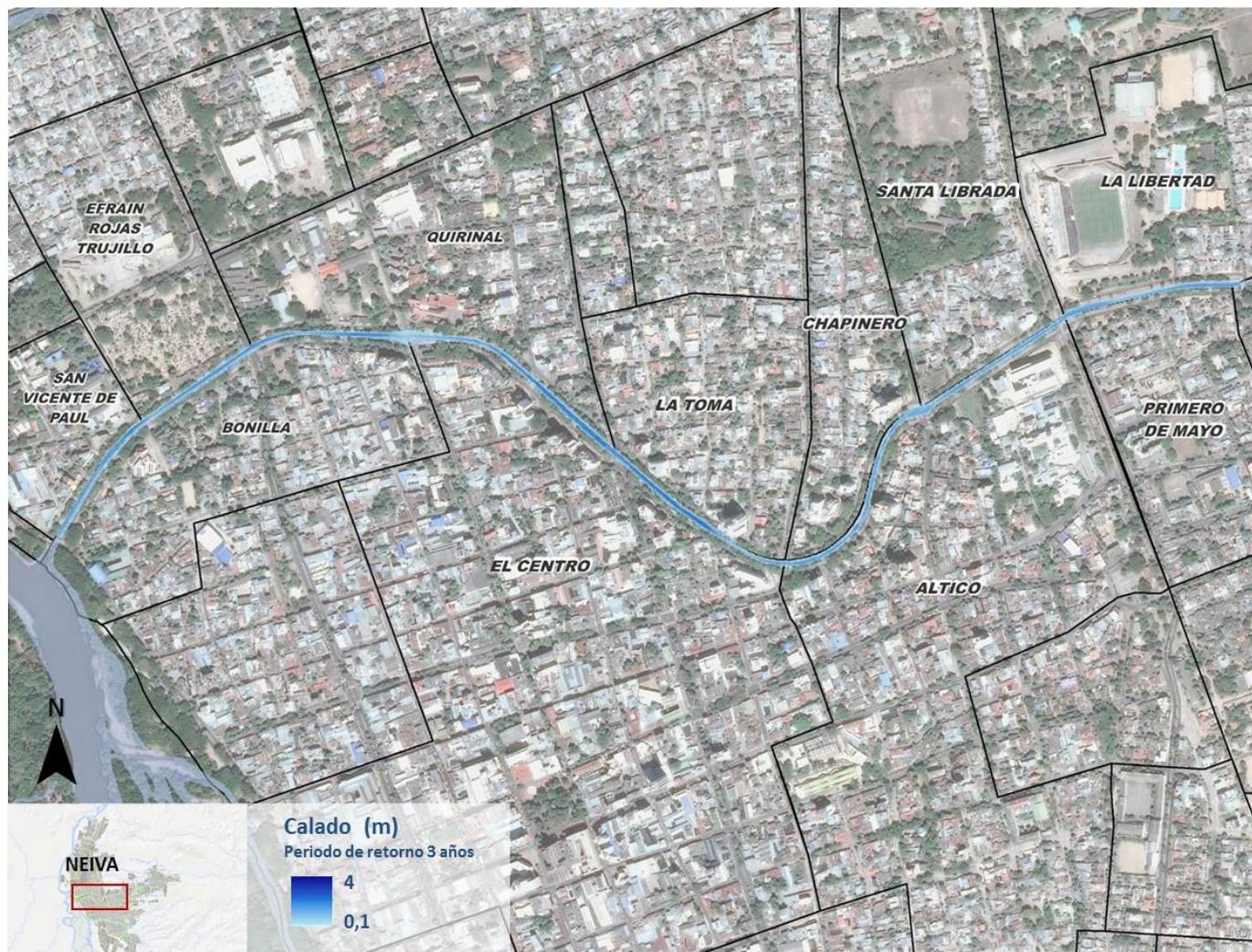
Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en el Río Las Ceibas (encauzamiento)



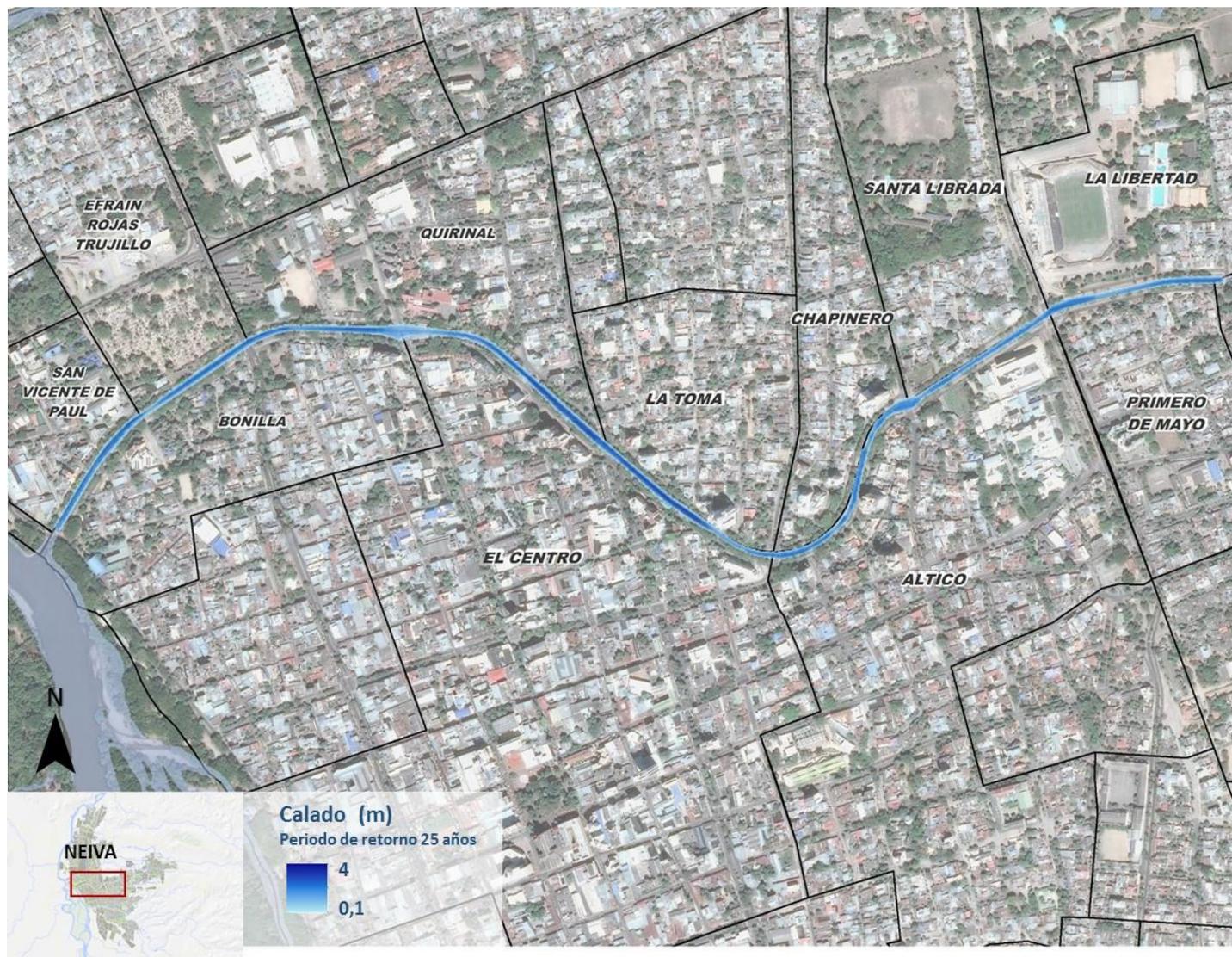
Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Calados máximos para el periodo de retorno de 3 años en la Quebrada La Toma



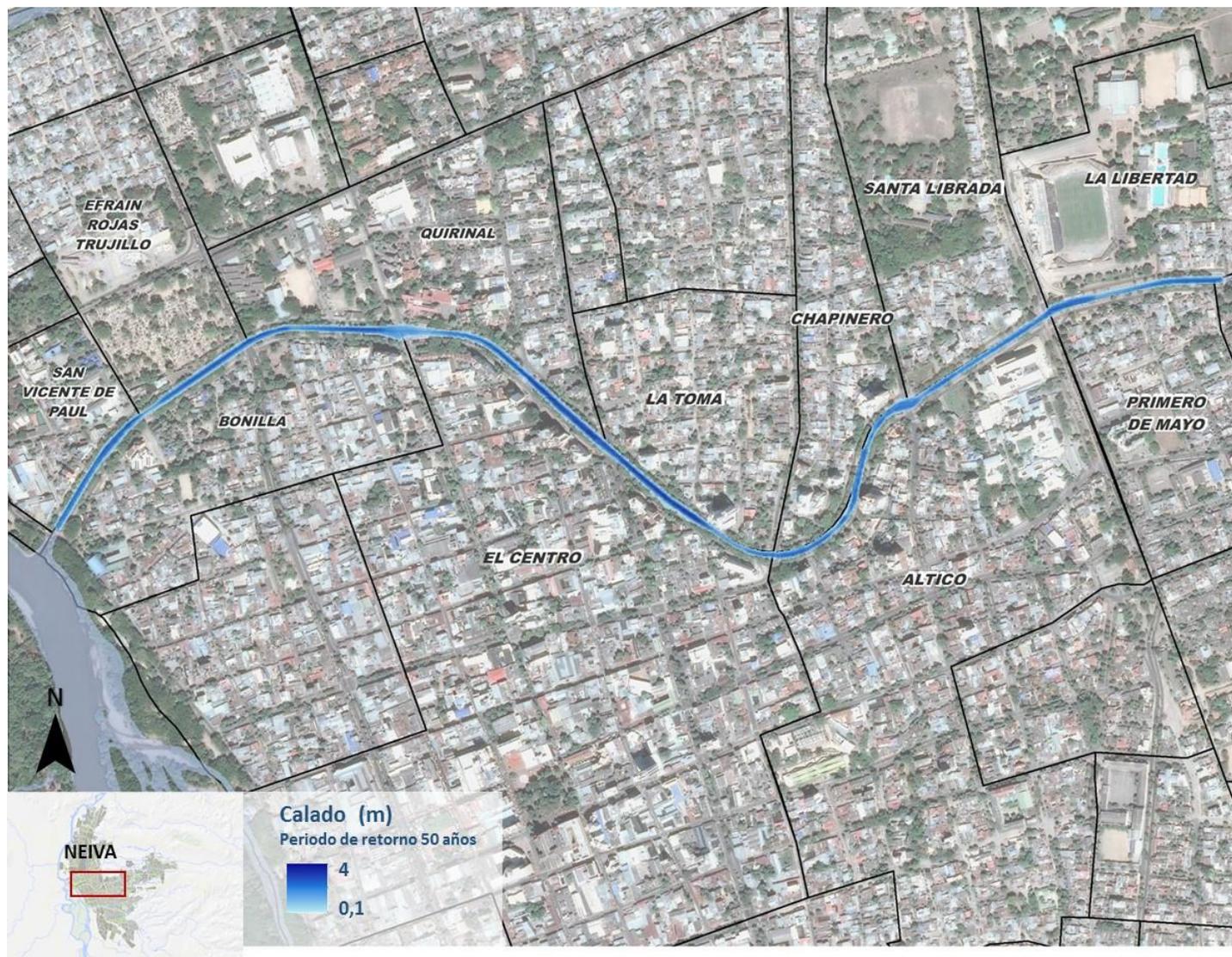
Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Calados máximos para el periodo de retorno de 25 años en la Quebrada La Toma



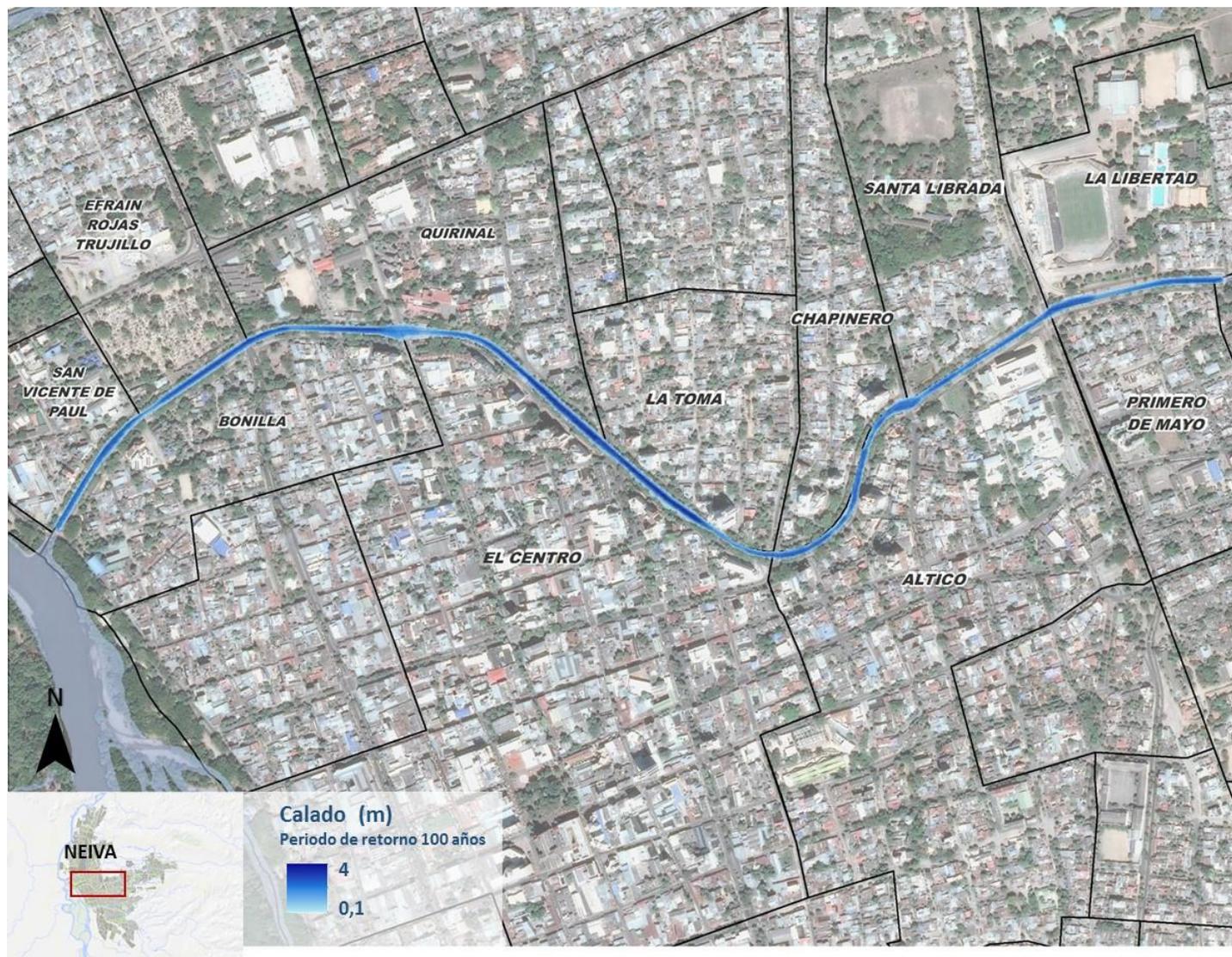
Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Calados máximos para el periodo de retorno de 50 años en la Quebrada La Toma



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Calados máximos para el periodo de retorno de 100 años en la Quebrada La Toma



Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3 Peligrosidad

El análisis de la peligrosidad por inundaciones está relacionado no solamente con las zonas inundables sino con las velocidades alcanzadas en cada punto, por ejemplo se considera más peligrosa una pequeña área con calados mayores de un metro y altas velocidades que una gran área con velocidades bajas y calados menores de medio metro.

Diversos estudios delimitan la peligrosidad como la función de la velocidad y el calado que produce un fenómeno de vuelco o deslizamiento en un individuo.

En la Tabla 35 se muestra los criterios de peligrosidad según calados establecidos en distintos estudios a nivel mundial, en la Tabla 36 se muestran los criterios de peligrosidad en función de la velocidad y en la Tabla 37 los criterios referidos a la combinación de ambas variables.

Por tanto para determinar la peligrosidad en cada punto de estudio se tendrán en cuenta los calados y las velocidades así como una función de ambas que pueda suponer un peligro.

Para este estudio se han considerado como zonas de peligrosidad alta todas las que el calado alcanza 1 metro de profundidad, que la velocidad supera 1 m/s o que el producto de ambas supera los 0.5 m/s<sup>2</sup>, valores medios de los estudios numerados anteriormente.

Tabla 35 Criterios de peligrosidad de calado máximo: referencias a nivel mundial

| Fuente   | Referencia               | Y <sub>máx</sub> (m) |
|--|--------------------------|----------------------|
| Urban Storm Drainage Criteria Manual. Urban Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado (EE.UU.)                     | Wright-Mc Laughlin, 1969 | 0,45                 |
| Control del desarrollo urbano en las zonas inundables (España)   | Témez, 1992              | 1                    |
| Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD). Hydrological criteria and drainage design manual, Clark County (EE.UU.) | CCRFCD, 1999             | 0,3                  |
| Criterio de Mendoza (Argentina)  | Nania, 1999              | 0,3                  |

| Fuente  | Referencia             | Y <sub>máx</sub> (m) |
|---|------------------------|----------------------|
| Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC). Floodplain Management in Australia (Australia y Nueva Zelanda ) | ARMC, 2000             | 1,20-1,50            |
| Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations/risque, aléa et vulnérabilité/DDS-TUE364/9 (Suiza)  | Belleudy, 2004         | 0,00-1,00            |
| PICBA06: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2007 (España)   | CLABSA, 2007           | 0,06                 |
| Road Drainage Manual, National Transport Commission (República de Sud África)   | Rooseboom et al., 1981 | 0,06                 |
| Piano di bacino stralcio per la difesa idraulica e idrogeologica (Italia)   | Región Liguria, 1993   | 1,30-2,00            |

Fuente: Varios Autores

Tabla 36 Criterios de peligrosidad de velocidad máxima: referencias a nivel mundial

| Fuente  | Referencia           | V <sub>máx</sub> (m/s) |
|---|----------------------|------------------------|
| Control del desarrollo urbano en las zonas inundables (Spain)   | Témez, 1992          | 1                      |
| Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC). Floodplain Management in Australia (Australia y Nueva Zelanda ) | ARMC, 2000           | 1,5                    |
| Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations/risque, aléa et vulnérabilité/DDS-TUE364/9 (Suiza)  | Belleudy, 2004       | 0,25-1,00              |
| Piano di bacino stralcio per la difesa idraulica e idrogeologica (Italia)   | Región Liguria, 1993 | 0,30-0,70              |

Fuente: Varios Autores

Tabla 37 Criterios de peligrosidad de calados (m) y velocidad (m/s): referencias a nivel mundial

| Fuente  | Referencia                      | Expresión  |
|---|---------------------------------|--|
| Federal Emergency Management Agency (FEMA). The floodway: a guide for community permit officials (EE.UU)  | FEMA, 1979 Y 1997               | $v \cdot y \leq 0,56$  |
| Australia Runoff and Runoff, A guide of flood estimation. Vol. 1&2 (Australia)  | Institution of Engineers (1997) | $v \cdot y \leq 0,40$  |
| Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA Water Resources Bulletin (EE.UU)  | Abt et al., 1989                | $v \cdot y \leq (0,50)$ (para monolite)  |
| Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA Water Resources Bulletin (EE.UU)  | Abt et al., 1989                | $v \cdot y \leq 0,0929e^{0,022(22M \cdot H/25.4)1.09}2$  |
| Management urban development in floodplain (España)   | Témez, 1992                     | $v \cdot y \leq 0,50$  |
| Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD). Hidrological criteria and drainage Design manual. Clark County (EE.UU)                       | CCRFCD, 1999                    | $v \cdot y \leq 0,55$  |
| PhD Dissertation. Tech. Univ. Of Catalonia (España)   | Nania, 1999                     | $v^2 \cdot y \leq 1,00$  |
| PhD Dissertation. Tech. Univ. Of Catalonia (España)   | Nania, 1999                     | $v \cdot y \leq 0,45$  |
| EU-Project RESCDAM. Helsinki PR Water Consulting (Finlandia)  | Reiter, 2000                    | $v \cdot y \leq (0,25-0,70)$   |
| EU-Project RESCDAM Helsinki University of Technology. Finnish Environment Institute. Finlandia  | Karvonen et al.2000             | $v \cdot y \leq 0,006H.M 0,3$<br>(Condiciones buenas)<br>$v \cdot y \leq 0,004H.M 0,2$<br>(Condiciones normales)<br>$v \cdot y \leq 0,002H.M 0,1$<br>(Condiciones malas) |
| Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources (DIPNR). NSW Floodplain Development Manual. South Wales Government, Sydney, Australia. | DIPNR, 2005                     | $v \leq 3,3y + 2,7$<br>Límites: $v \leq 2$ ; $y \leq 0,8$  |

| Fuente  | Referencia            | Expresión   |
|---|-----------------------|---|
| Flood Risks to People Project (Phase 2) Department for Environment Food and Rural Affairs, Reino Unido. | Ramsbottom et al.2006 | Peligrosidad hidráulica= $y(v+0,5)+DF$<br>(DF: Debris Factor entre 0-1)<br>0,75-1,5: Peligro para algunos<br>1,5-2,5: Peligro para muchos<br>>2,5: Peligro para todos |

Fuente: Varios Autores

En el caso del Río del Oro, en términos de velocidad, resulta preciso distinguir entre la parte canalizada, que supone la mayor parte del tramo estudiado; y la no canalizada, aguas arriba del encauzamiento, en la parte alta de la cuenca.

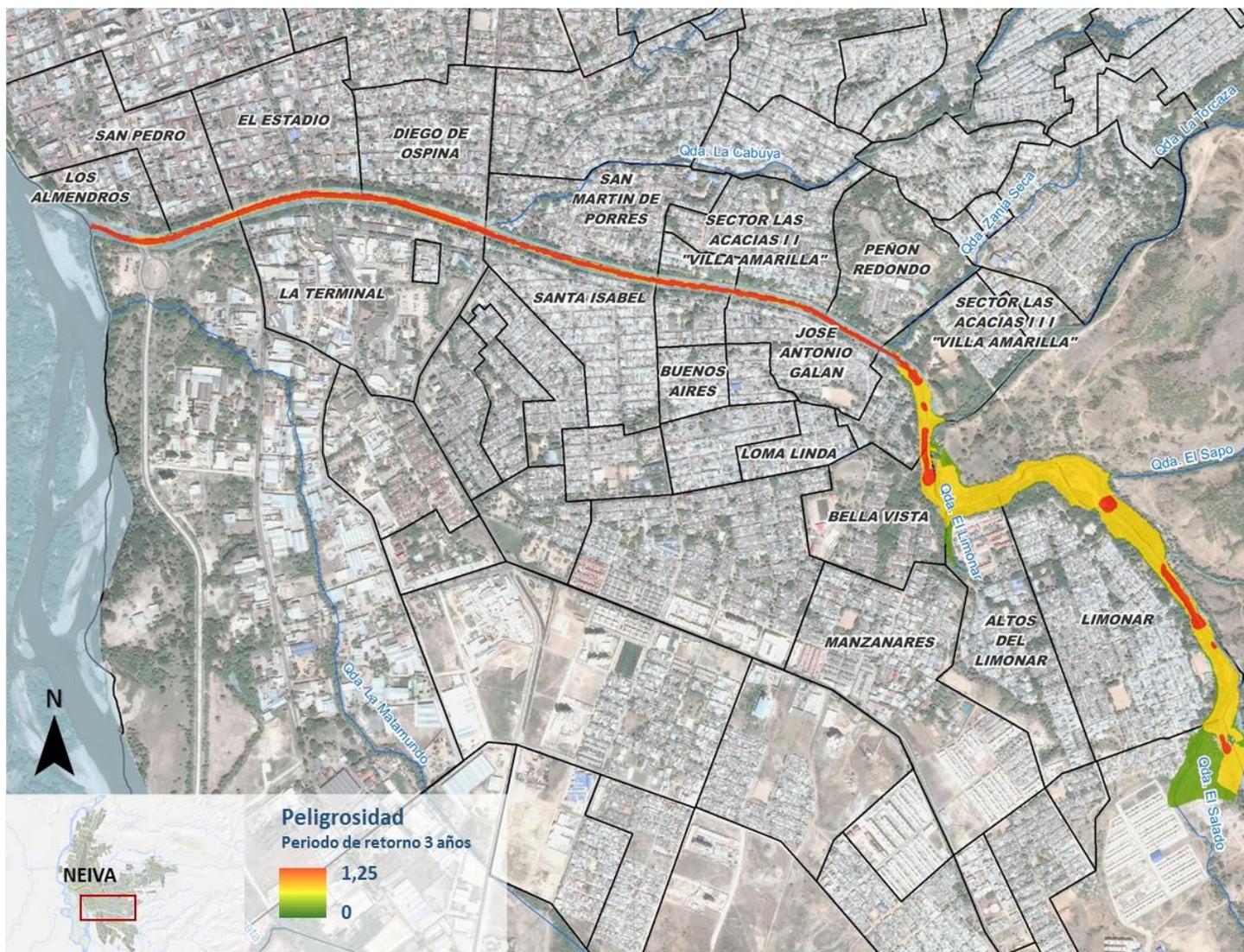
Así para un periodo de retorno de 3 años, en la parte no encauzada las velocidades en general oscilan entre 0.25 y 0.5 m/s y los calados son inferiores a 1 m, de forma que se alcanzan niveles de peligrosidad medios, en torno a 0.75. En la parte canalizada, las velocidades alcanzadas están en un rango de 0.5 a 1 m/s, de forma que se alcanzan niveles de peligrosidad máximos a lo largo de todo el canal.

Para una recurrencia de 100 años, se alcanzan niveles de peligrosidad máximos a lo largo de todo el tramo estudiado, exponiendo por tanto a todas las viviendas localizadas en dichas huellas.

Referente al Río Las Ceibas y la Quebrada La Toma, de acuerdo los modelos realizados, los niveles de peligrosidad alcanzados son superiores a 1 a lo largo de todo el cauce principal, aunque en ningún caso se observa que se exponga a las viviendas de los alrededores.

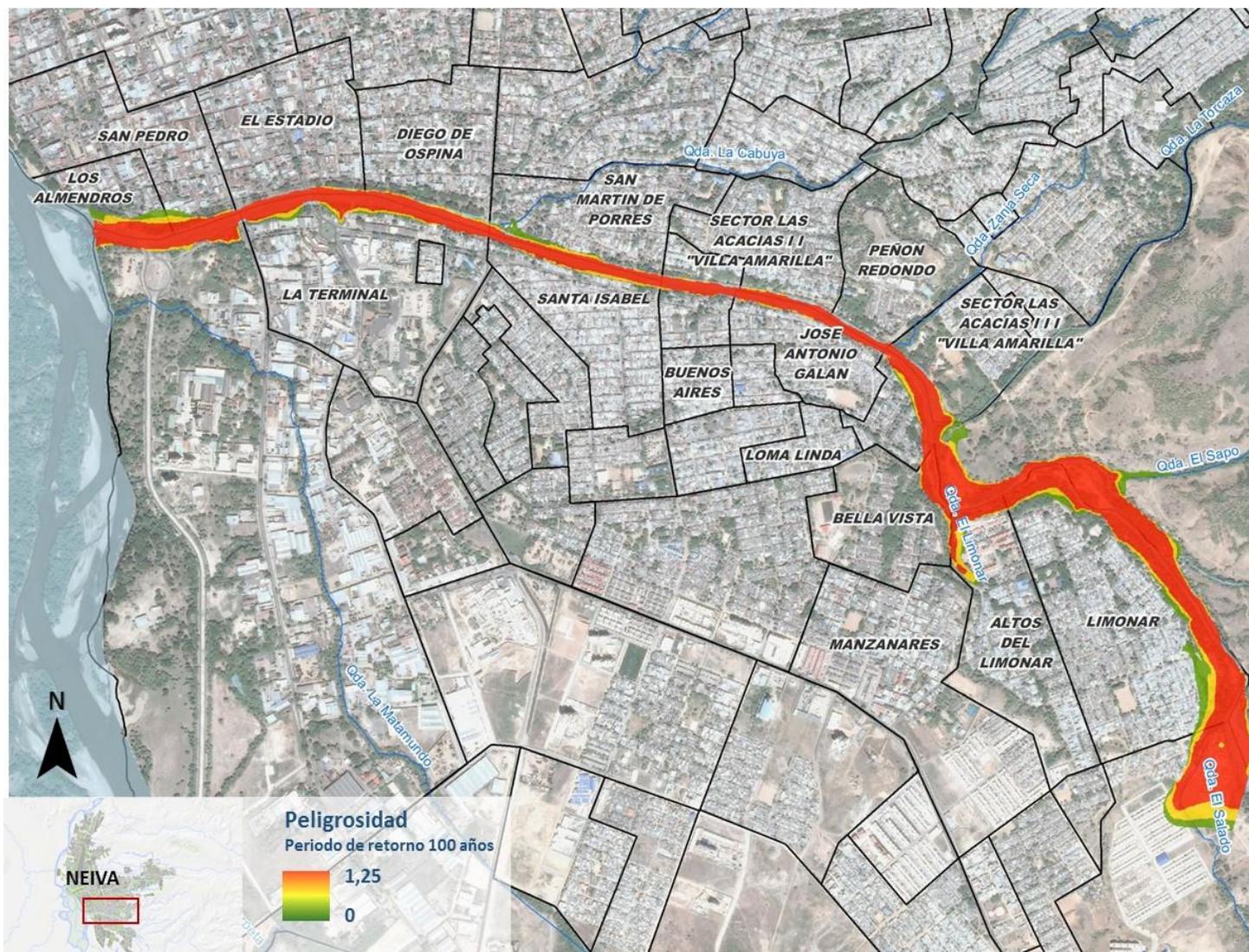
A continuación en la Figura 56, Figura 57, y Figura 58 se muestran los mapas de peligrosidad para el Río del Oro, Río Las Ceibas y Quebrada La Toma; para los periodos de retorno de 3 y 100 años.

Figura 56. Mapa de peligrosidad del Río del Oro para el periodo de retorno de 3 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Mapa de peligrosidad del Río del Oro para el periodo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Mapa de peligrosidad del Río Las Ceibas para el periodo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 59. Mapa de peligrosidad de la Quebrada La Toma para el periodo de retorno de 3 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Mapa de peligrosidad de la Quebrada La Toma para el periodo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4 Amenaza de inundación. Conclusiones

El estudio de la amenaza de inundación en la zona de estudio se ha realizado para el Río del Oro, el encauzamiento de la Quebrada La Toma y el proyecto de canalización del Río Las Ceibas. Los tres ríos se encuentran encauzados en su parte final antes de la desembocadura en el río Magdalena.

En el caso del río Del Oro y La Toma, se ha mejorado la representación de los encauzamientos en el Modelo Digital del Terreno (MDT) con medidas tomadas en campo.

De esta forma se ha comprobado que en el caso del encauzamiento del Río del Oro, tiene capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de 3 años, mientras que para el resto de recurrencias es posible que se produzca el desbordamiento del canal principalmente en zonas que han sido clasificadas como áreas naturales. El problema detectado en estas zonas es que en parte de ellas se localizan asentamientos de carácter precario, exponiendo por tanto a la población ahí situada.

En el caso de la Quebrada La Toma, de acuerdo a los resultados de los modelos realizados, tiene capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de 100 años.

El caso del río Las Ceibas, las dimensiones del encauzamiento se han tomado de los planos record de las obras que se están realizando en la actualidad, dando como resultado el modelo hidráulico realizado capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de hasta 100 años.

En los tres casos, se encuentran algunos problemas en las partes altas de los cauces, previos al encauzamiento, por asentamientos cercanos al cauce afectados con cierta recurrencia.

### 5.5 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

#### 5.5.1 Introducción

Una vez valorada la amenaza de inundación en la ciudad de Neiva, en este apartado se procede a realizar un análisis de los elementos expuestos.

La evaluación constituye una de las variables de la función de riesgo, describiéndose como el inventario de aquellas personas o elementos expuestos a un peligro en una zona y periodo de tiempo determinados (adaptado de UN/ISDR, 2004).

En este contexto y teniendo en cuenta que el trabajo a realizar se centra en la evaluación de los riesgos en las edificaciones y las infraestructuras críticas, y en los riesgos humanos relacionados con la pérdida y afectación de vidas humanas, la evaluación de la exposición y la vulnerabilidad se orienta a estos aspectos fundamentales: edificaciones, infraestructuras críticas y población.

Para evaluar el riesgo y los impactos socioeconómicos de una amenaza específica en el área de estudio, un modelo de riesgo probabilista requiere, además de la caracterización de la amenaza, presentada en el apartado anterior, la siguiente información:

- Inventario de los elementos existentes en el área de estudio (población, infraestructura y edificaciones).
- Caracterización de cada uno de los elementos inventariados, de forma que permita determinar su vulnerabilidad frente a la amenaza estudiada.

Esta información sobre exposición, constituye, por tanto, una parte fundamental de los modelos de riesgo.

A continuación se desarrollará la exposición física siguiendo el esquema antes mencionado. Para ello se procederá a inventariar los elementos, caracterizar los mismos y presentar los resultados en forma de mapas y tablas.

Las variables representadas tienen como base cartográfica la huella urbana de la ciudad de Neiva.

#### 5.5.2 Exposición física

Debido al gran número de edificios residenciales, plantas y naves industriales y construcciones de otro tipo, que pueden verse afectados por inundaciones periódicas resulta imposible evaluar las características de cada uno de forma individual a objeto de establecer la vulnerabilidad del conjunto de elementos que componen el sistema

vulnerable. Por esta razón se suele trabajar de acuerdo a una caracterización geométrica del grupo de elementos recogidos en un formato *Shape* para su gestión dentro de una plataforma de datos GIS en combinación con los registros catastrales, u otra información disponible, en los que se especifican las características del elemento y eventualmente su ocupación para finalmente aplicar una ponderación referencial por unidad de elementos, por ejemplo la manzana o cuadra para los distintos componentes del elemento a considerar.

#### ➤ INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES

En este apartado se procederá a realizar un análisis preliminar de la exposición del Río del Oro en el tramo estudiado, puesto que en el caso del Río Las Ceibas y la Quebrada La Toma, en el estudio de sus encauzamientos no se han registrado afecciones.

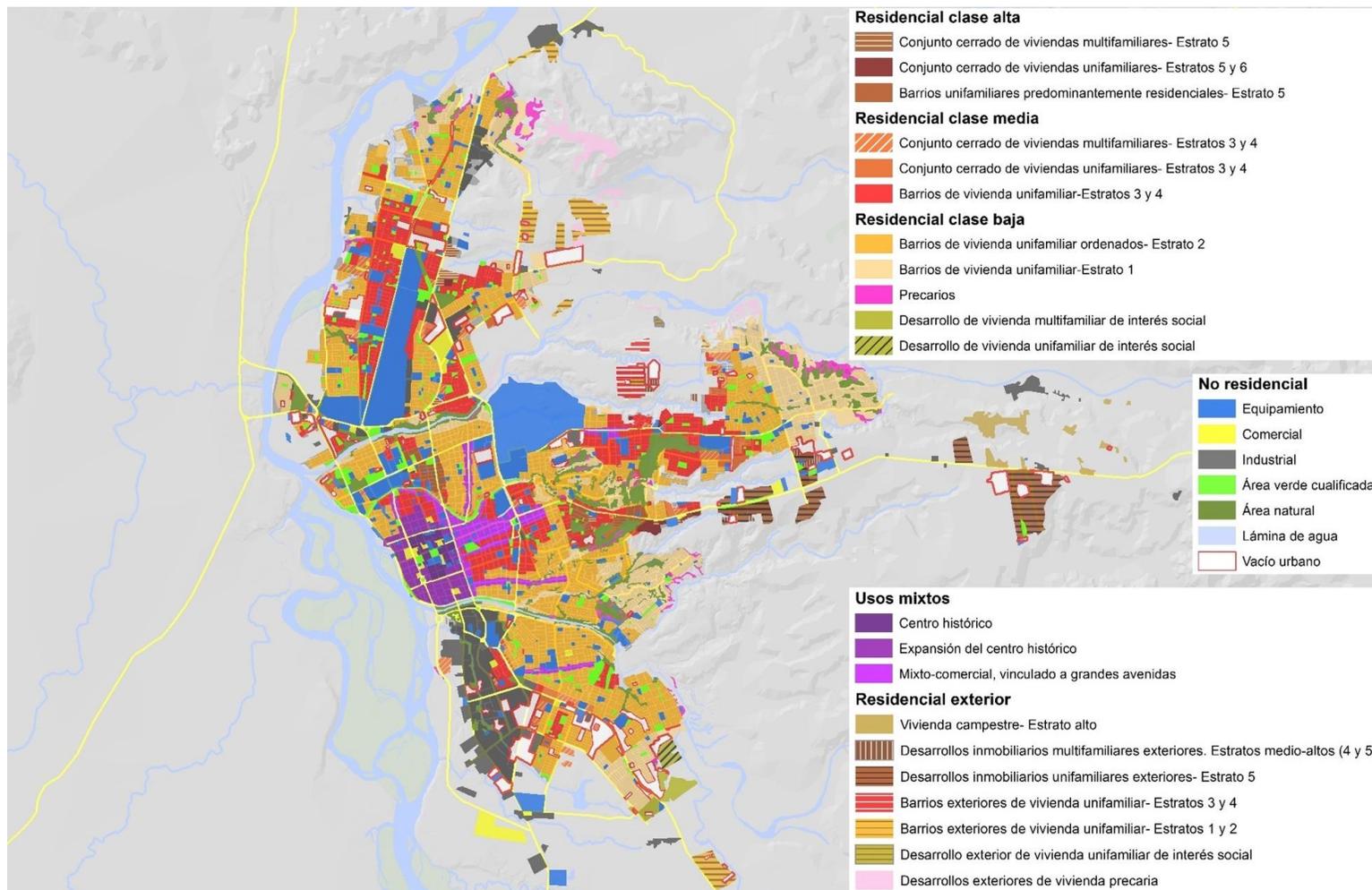
Así, la clasificación de las viviendas coincidentes con la huella de la amenaza de inundación del Río del Oro se ha realizado de acuerdo a la evaluación de distribución de tipo y nivel económico de edificaciones elaborado para el Estudio 3 de este proyecto, habiéndose distinguido las siguientes clases de análisis afectadas:

- Barrios de vivienda unifamiliar-Estrato 1
- Barrios de vivienda unifamiliar ordenados- Estrato 2
- Desarrollo de vivienda unifamiliar de interés social
- Expansión del centro histórico
- Precarios
- Área natural

De esta forma se evaluarán los elementos expuestos en base a esta clasificación, diferenciando por un lado edificaciones en zonas residenciales, y edificios públicos y sociales por otro.

A continuación en la Figura 61 se muestra un mapa del conjunto de clases de Análisis correspondientes a la zona de estudio.

Figura 61. Mapa Clases de Análisis zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Una vez expuestas las distintas clases de análisis, a continuación se procederá a describir las tipologías constructivas más representativas:

#### *Barrios de vivienda unifamiliar-Estrato 1*

Las edificaciones pertenecientes a esta clase de análisis están localizadas en áreas precarias ubicadas en las zonas periféricas de la ciudad en cercanía de las principales rondas hídricas en áreas de alto riesgo.

Estas construcciones se pueden calificar como humildes, compuestas en general por mampostería de ladrillo, incluso en muchos casos provistas de hormigón armado, lo que les confiere una resistencia relativamente buena ante inundaciones no violentas.

A continuación en la Figura 62 se muestra la imagen de las construcciones representativas:

Figura 62. Vivienda Unifamiliar-Estrato 1



Fuente: IDOM

#### *Barrios de vivienda unifamiliar ordenados- Estrato 2*

La tipología constructiva de las edificaciones correspondientes a esta clase de análisis se podría clasificar, de forma similar al caso anterior, como humilde, compuestas en general por mampostería de ladrillo, y en muchos casos provistas de hormigón armado.

En los asentamientos localizados hacia la periferia, en algunos casos las calles se pueden encontrar en malas condiciones o sin pavimentar, especialmente en las cercanías de las rondas hídricas. A continuación, en la Figura 63 se muestra una imagen de las construcciones representativas de esta clase de análisis.

Figura 63. Vivienda Unifamiliar Ordenados- Estrato 2



Fuente: IDOM

*Desarrollo de vivienda unifamiliar de interés social*

Las viviendas afectadas por la amenaza de inundación del Río del Oro, se pueden encontrar al sur de la ciudad en el barrio Bosque de San Luis.

Estas construcciones se pueden calificar como humildes, compuestas en general por mampostería de ladrillo, incluso en muchos casos provistas de hormigón armado, lo que les confiere una resistencia relativamente buena ante inundaciones no violentas.

A continuación en la Figura 64 se muestra una imagen de la tipología constructiva perteneciente a esta clase de análisis.

Figura 64. Vivienda Unifamiliar de interés social



Fuente: IDOM

*Expansión del centro histórico*

Las viviendas correspondientes a esta clase de análisis afectadas por la amenaza de inundación del Río del Oro están situadas en la margen derecha, en las proximidades de su desembocadura en el Río Magdalena.

La tipología constructiva de las edificaciones situadas en esta zona es de viviendas unifamiliares de una o dos plantas en general y de aparente buena calidad, tal y como se muestra en la Figura 65.

Figura 65. Vivienda expansión del centro histórico



Fuente: Google earth

*Precarios*

Las viviendas correspondientes a esta clase de análisis son el resultado de asentamientos informales y de invasión, sin infraestructura vial, espacio público o equipamientos.

Las zonas correspondientes a estos asentamientos, expuestos a la amenaza de inundación del Río del Oro son los situados al sureste de la ciudad de Neiva junto al Barrio del Limonar.

Como tipología constructiva representativa, las viviendas son en general de baja calidad, tal y como se muestra en la Figura 66, pudiéndose distinguir entre las compuestas por estructura flexible, hechas de materiales tales como tablas de madera y chapa; así como, al igual que en los dos primeros casos descritos, las de mampostería de ladrillo, provistas en muchos casos de hormigón armado.

Figura 66. Viviendas zona de Precarios



Fuente: Google Earth

*Área natural*

En estas zonas protegidas, aparecen invasiones de viviendas pertenecientes al segmento de población más bajo.

Se trata en general de viviendas de baja calidad, compuestas por estructura flexible y construidas con materiales tales como tablas de madera y láminas metálicas.

En la Figura 68 se muestra un ejemplo de construcciones precarias en zonas calificadas como áreas naturales junto al Río del Oro.

Figura 67. Invasiones en Áreas naturales



Fuente: Google earth

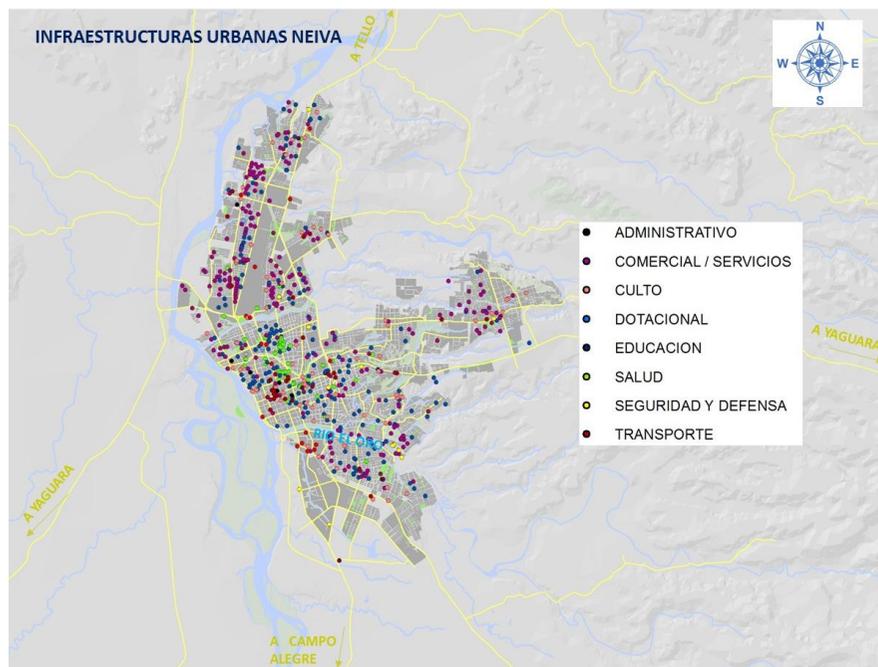
➤ **EDIFICIOS PÚBLICOS Y SOCIALES**

A objeto de evaluar preliminarmente la vulnerabilidad funcional y social de la ciudad ante los eventos de inundación descritos se han plasmado, de acuerdo a los datos disponibles en el Registro Catastral de la ciudad de Neiva, los edificios públicos o privados de uso público distribuidos por el casco urbano. Concretamente se han podido evaluar los siguientes centros:

- Sanitarios: centros de salud, hospitales y clínicas (públicos y privados).
- Educativos.
- Seguridad (Policía, Bomberos, etc.).
- Instalaciones comerciales/servicios.
- Instalaciones de transporte.
- Dotacional.
- Lugares de Culto.
- Instalaciones tipo administrativo.

Así, en la siguiente Figura 68 se muestra un mapa de la localización de los edificios públicos y sociales inventariados:

Figura 68. Mapa de edificios de uso social e infraestructuras en la ciudad de Neiva



Fuente: Elaboración propia

El análisis detallado de este plano indica que la exposición de los servicios sociales de la ciudad de Neiva a los eventos de inundación es a priori prácticamente inexistente, debido a que no coincide ninguna de las instalaciones con la huella de inundación determinadas en la zona de estudio.

#### Otras infraestructuras

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del valor expuesto para las siguientes infraestructuras:

- Vías.
- Agua potable.
- Saneamiento y drenajes.
- Líneas eléctricas.
- Instalaciones de gestión y eliminación de residuos sólidos.

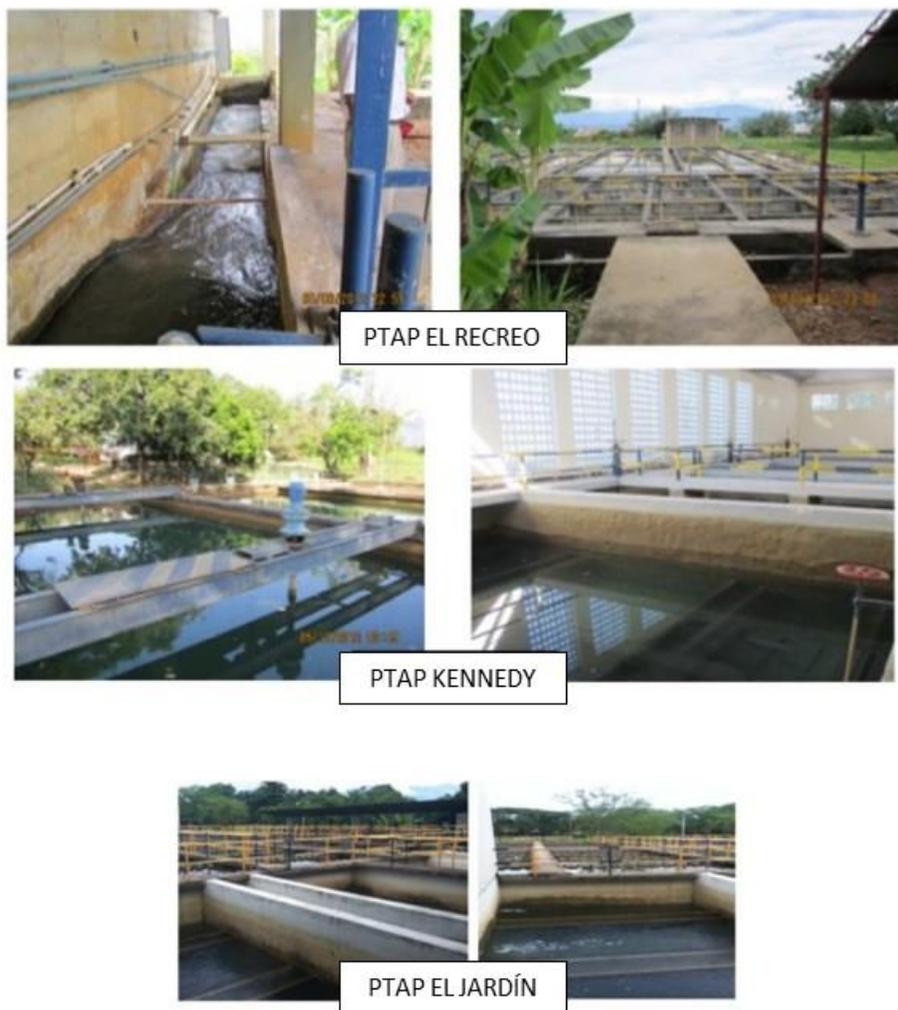
#### Vías

Por otro lado, en lo relativo a la exposición de las vías de acceso y circulación principales de la ciudad (Figura 68), la huella de inundación no corta ninguna carretera o calle principal, de tal forma que este riesgo es igualmente despreciable.

#### Agua potable

La fuente de abastecimiento del sistema de acueducto de Neiva es el Río Las Ceibas. El sistema cuenta con tres plantas de tratamiento de agua potable-PTAP: El Recreo, Kennedy y El Jardín (Figura 69), cuya ubicación se muestra en la Figura 71, localizándose fuera de la zona de estudio.

Figura 69. Plantas de tratamiento de agua potable de la ciudad de Neiva



Fuente: Las Ceibas Empresas Públicas de Neiva E.S.P.

El Sistema de abastecimiento se realiza a través de dos bocatomas de tipo lateral, siendo estas El Guayabo y El Tomo (Figura 70), ubicadas en el Río Las Ceibas y conducidas a las tres plantas de tratamiento mencionadas. El sistema es complementado por estructuras de desarenación, reservorio “Poco a Poco”, almacenamiento (tanques) y red de distribución.

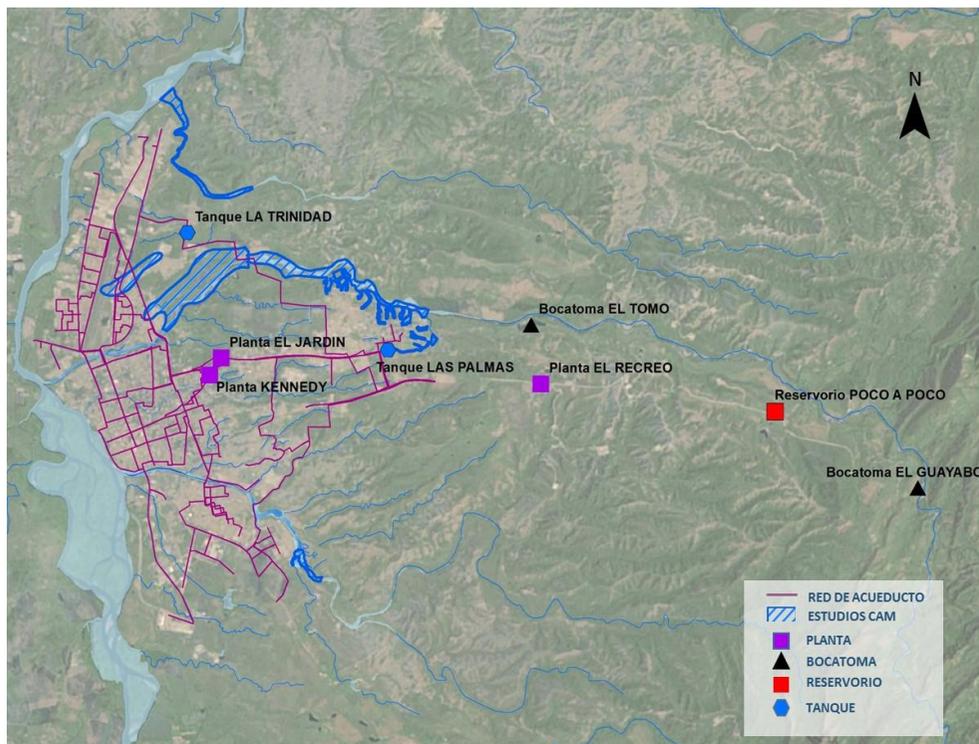
Figura 70. Bocatomas El Guayabo y El Tomo



Fuente: Las Ceibas Empresas Públicas de Neiva E.S.P.

A continuación, en la Figura 71 se muestra un mapa con la inundación para el periodo de retorno de 100 años de los ríos del Oro y Las Ceibas y de la Quebrada La Toma, el cual muestra la exposición de la red acueducto, bocatomas y plantas de tratamiento.

Figura 71. Mapa de la exposición de la red de agua potable a posibles inundaciones de periodo de retorno 100 años



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al documento *Evaluación Integral de Prestadores de Empresas Públicas de Neiva E.S.P.* de Junio de 2015, en época de invierno, se han presentado avenidas torrenciales en la cuenca del Río Las Ceibas, generando altas turbiedades y cierres transitorios en las dos captaciones.

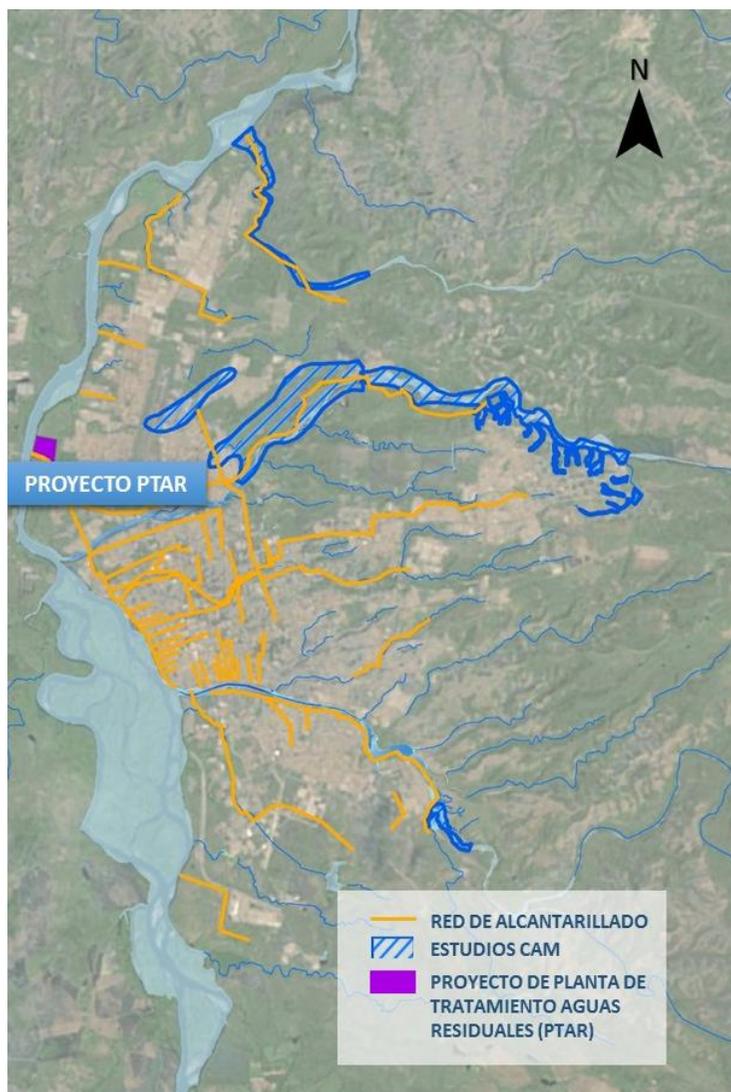
### Sistema de alcantarillado

El sistema de alcantarillado es de tipo sanitario, combinado y pluvial. No cuenta con Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por lo que actualmente, las aguas negras se vierten sobre el Río Magdalena mediante 13 descargas directas. Resulta preciso añadir que existe un proyecto de construcción de una planta de tratamiento cuyo objetivo es tratar el 97% de las aguas residuales de Neiva.

La red de alcantarillado de aguas lluvias cuenta con 2.563 metros lineales construidos y una capacidad de 250.000 m<sup>3</sup>, mientras que la red de alcantarillado sanitario, presenta un total de 6.277 metros lineales

A continuación en la Figura 72 se muestra un mapa con la red de alcantarillado de la ciudad de Neiva, así como con la ubicación del todavía proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Figura 72. Mapa de la red de alcantarillado



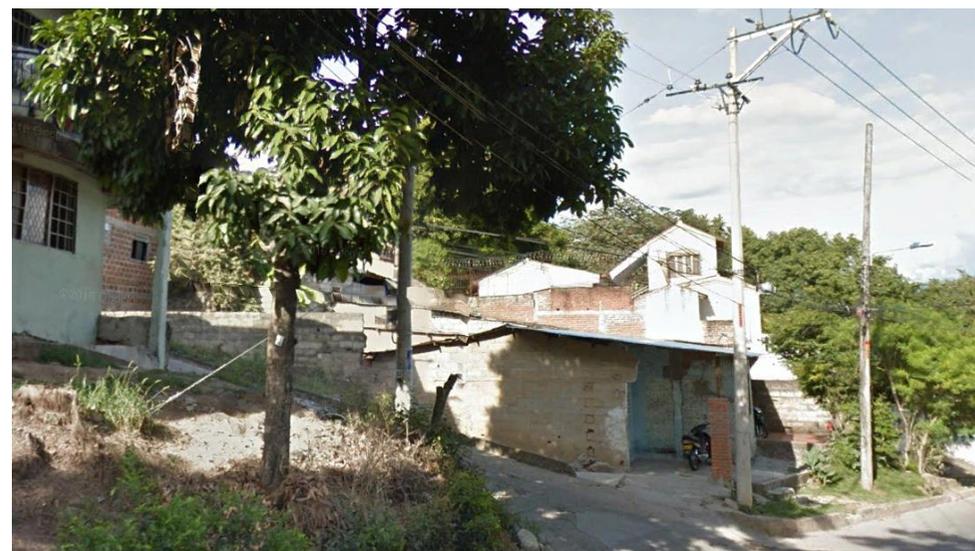
Fuente: Elaboración propia

En base al documento *Evaluación Integral de Prestadores de Empresas Públicas de Neiva E.S.P.* de Junio de 2015, en temporadas de alta pluviosidad en el casco urbano de Neiva se presentan inundaciones y taponamientos de la red de alcantarillado del municipio, producto del arrastre de sedimentos de las calles que dificultan la normal operación del sistema combinado que allí se tiene

Líneas eléctricas

Las líneas eléctricas en las zonas que coinciden con la huella de inundación son aéreas, tal y como se muestra en la Figura 73, de tal forma que el riesgo por esta amenaza a las mismas sería, en principio, inexistente.

Figura 73. Líneas eléctricas



Fuente: Google Earth

Instalaciones de gestión de residuos

De acuerdo con los datos disponibles no existe ningún vertedero en la zona inundable de la ciudad, de Neiva.

Valoración global

De acuerdo a los datos aportados, se cree poder concluir que la susceptibilidad funcional de la ciudad ante las amenazas de inundación es prácticamente nula.

➤ **ESTIMACIÓN DEL VALOR EXPUESTO**

Para llevar a cabo la estimación del valor expuesto de las edificaciones a la amenaza de inundación, se realizará sólo sobre las de tipo residencial, considerando por tanto que el valor de la exposición de edificaciones correspondientes a infraestructuras urbanas es nulo tal y como se indicó en el apartado 7.

De esta forma, la estimación del valor total expuesto se realiza mediante el cruce del mapa de zonificación de edificaciones según nivel económico local y el plano de la huella de amenaza de inundación. Esta operación se realiza además para todos los mapas de distintos periodos de retorno considerados.

La extensión de los polígonos resultantes se vuelca en una serie de matrices para calcular en primer lugar la extensión de las edificaciones expuestas mediante la suma de polígonos. A continuación se suma la superficie construida de similares polígonos de acuerdo a la base catastral de la ciudad con la que se ha contado.

En relación con las viviendas de nivel humilde, definida como de construcción precaria, se ha realizado una subclasificación diferenciando entre aquellas que presentan una estructura de mampostería, incluyendo frecuentemente columnas de hormigón armado, y las que están compuestas de materiales flexibles y relativamente endebles, tales como tablas de madera y chapa. La proporción entra ambos grupos se ha estimado en 70-30%, de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, así como de las bases fotográficas disponibles en la aplicación *Google Earth* para aquellas zonas a las que por razones de seguridad no se pudo acceder.

Los precios de reposición de los daños se han estimado de acuerdo a precios medios de mercado de construcción de acuerdo a experiencias internacionales similares. Debido al valor del peso colombiano se realizarán los cálculos en dólares americanos de cara a facilitar el manejo de los datos, así como la presentación y legibilidad de los resultados.

A partir de estas referencias se realizará una estimación de ponderación para cada tipo de edificación seleccionado según el uso, nivel social y económico (céntrico-periférico) al que corresponde. En el caso de las viviendas precarias la estimación es más intuitiva que el coste real de su construcción debido a la carencia de registros oficiales para este tipo de edificación así como la variedad que entre viviendas se puede dar.

Por ello las unidades presentadas deben ser consideradas en algunos casos en términos de orden de magnitud.

A continuación se presenta la Tabla 38 con los precios medios de construcción aplicados.

Tabla 38 Precios medios de construcción estimados para el cálculo del valor total expuesto en dólares por metro cuadrado

| Tipo de Edificación                         | Valor Reposición Estimado (US\$/m <sup>2</sup> ) |
|---|--|
| Vivienda precaria (Ladrillo/Hormigón - 70%) | 350  |
| Vivienda precaria (Madera/Chapa - 30%)      | 200  |
| Vivienda unifamiliar clase media            | 750  |

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el valor expuesto se ha obtenido de la multiplicación entre superficie expuesta (m<sup>2</sup>) y coste unitario de construcción-reposición (US\$/m<sup>2</sup>).

En la Tabla 39 se presentan los resúmenes de los valores expuestos para la amenaza de inundación del Río del Oro.

Tabla 39 Resultado del cálculo del valor expuesto para la inundación del Río del Oro

| Periodo de retorno | Superficie expuesta (m <sup>2</sup> ) | Valor expuesto (US\$) |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 3                  | 3,252                                 | 1,114,361             |
| 25                 | 5,940                                 | 1,966,870             |
| 50                 | 6,920                                 | 2,292,502             |
| 100                | 9,272                                 | 3,031,813             |

Fuente: Elaboración propia

El valor expuesto de viviendas ante la amenaza de inundación del Río del Oro en la ciudad de Neiva varía aproximadamente entre 1.1 y 3 millones de dólares americanos para los periodos de retorno de 3 y 100 años respectivamente.

## 5.6 VULNERABILIDAD

### 5.6.1 Introducción

De acuerdo a la definición reflejada en el programa “Aproximación holística para la evaluación probabilística del riesgo” (*Central America Probabilistic Risk Assessment CAPRA*, 2005) la vulnerabilidad es la predisposición de un sistema, elemento, componente, grupo humano o cualquier grupo biológico o no, a sufrir afectación ante la acción de una situación de amenaza específica.

El análisis de vulnerabilidad debe identificar los elementos componentes o sistemas de una comunidad o grupo de comunidades (ciudad, región, país, etc.) objeto de evaluación, tales como los sistemas de educación, sanidad, protección civil (policía y bomberos), redes eléctricas y de alcantarillado, etc.

<sup>6</sup> Multi-hazard risk assessment guide book: United Nations University – ITC School on Disaster Geoinformation Management, 2011

Existen distintos enfoques para la evaluación de este parámetro, destacándose bibliográficamente, por ejemplo<sup>6</sup>:

- **Vulnerabilidad física:** el potencial de impacto físico sobre el entorno construido y la población; expresado numéricamente como un valor entre 0, ningún deterioro, y 1, derrumbe total.
- **Vulnerabilidad económica:** los potenciales daños generados por el conjunto de amenazas a activos económicos y procesos, por ejemplo, interrupción de una actividad económica, pérdida de puestos de trabajo, incremento de la pobreza, etc.
- **Vulnerabilidad social:** los potenciales daños sufridos por grupos sociales concretos, tal como los pobres, ancianos, niños, etc.
- **Vulnerabilidad ambiental:** los potenciales impactos derivados de una amenaza sobre el entorno ambiental de una zona.

En el caso presente vamos a centrarnos en la valoración de la vulnerabilidad física, edificaciones y personas, considerando que el análisis de exposición ha mostrado que la vulnerabilidad funcional de la ciudad es despreciable y, por otro lado, tanto el análisis de la vulnerabilidad económica como ambiental, tal como están aquí definidas, caen fuera del alcance de trabajo de este proyecto.

### 5.6.2 Vulnerabilidad material ante inundaciones

La metodología seguida para la definición de la vulnerabilidad ante inundaciones se ha basado en la proyección de la llamada Relación Media de Daño (RMD) presentada en las curvas de vulnerabilidad propuestas por la plataforma CAPRA.

Como resulta difícil concretar qué curva se asemeja con el tipo de vivienda identificado dentro de la huella inundable de la ciudad se ha realizado una selección entre las distintas

alternativas disponibles en base a criterio experto cuyo resultado se puede resumir de la siguiente manera:

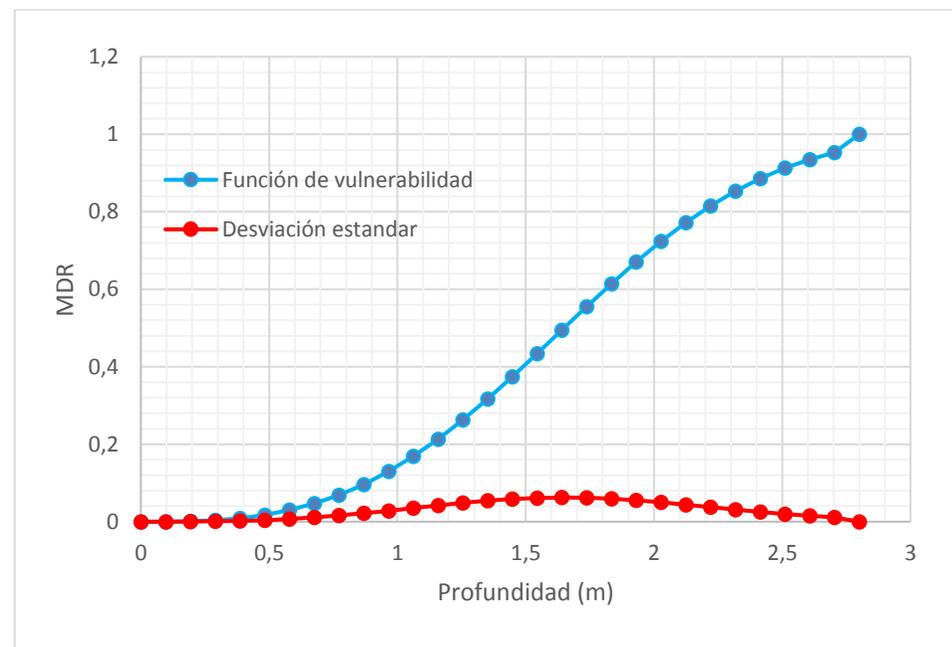
- Curva M1 (Mampostería 1 piso): Casas unifamiliares de buena calidad y viviendas precarias con estructura de ladrillo y, eventualmente, hormigón (Figura 75); y
- Curva W1 (Madera 1 piso): Viviendas precarias construidas con planchas de madera o chapa (Figura 74).

A continuación se presentan las dos curvas referidas. Donde la curva azul representa la función de vulnerabilidad que relaciona la profundidad alcanzada por el agua en metros con el porcentaje de daño respecto al valor de reposición del elemento expuesto en tanto por uno. La línea roja representa la desviación estándar de los puntos utilizados en la obtención de la función de vulnerabilidad.

Respecto a la selección y aplicación de las mismas, cabe indicar los siguientes criterios:

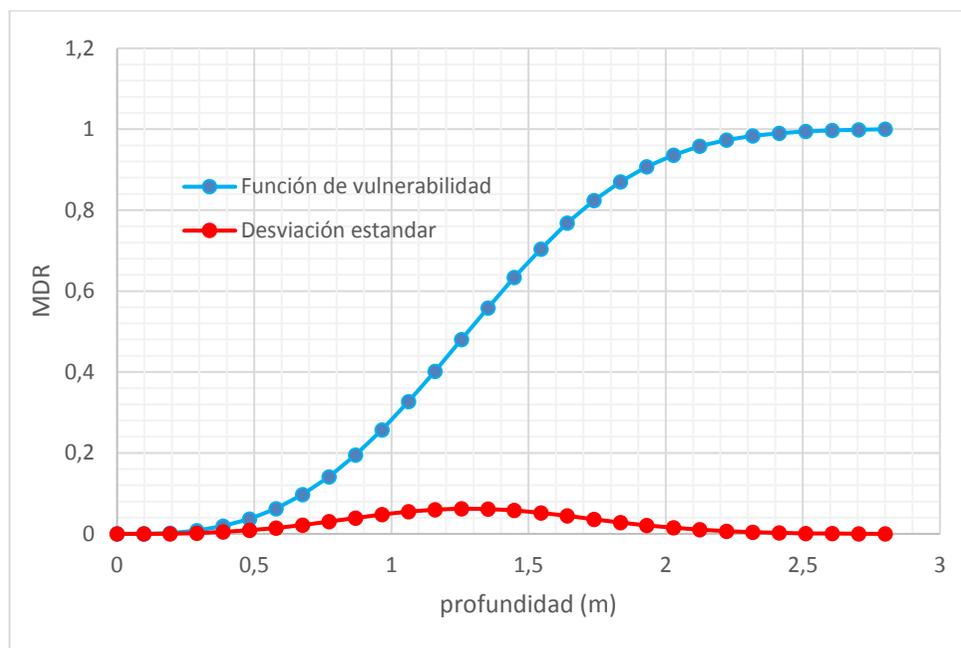
- De acuerdo a las profundidades máximas de inundación constatadas, de hasta unos 2,5 m, se ha manejado exclusivamente la inundación de viviendas de un piso, independientemente de que algún edificio podría disponer de algún piso superior.
- La curva M1 (mampostería) se ha aplicado tanto para viviendas unifamiliares de buena calidad, como para aquellas precarias que igualmente estén construidas con ladrillo y, en muchos casos, provistas estructura de hormigón. Sin embargo, se entiende que el porcentaje de daño sería mayor en este segundo grupo de construcciones, por lo que se ha optado por asignar a cada categoría un grado de vulnerabilidad distinto, partiendo de la media representada por la curva como tal. Así a las casas unifamiliares se les ha asignado un valor inferior a la media, mientras que al sector precario se le ha asociado una vulnerabilidad inferior a esta media, con el grado de variación opuesto al anterior.

Figura 74. Curva de vulnerabilidad ante inundación M1 (Mampostería 1 piso)



Fuente: CAPRA

Figura 75. Curva de vulnerabilidad ante inundación W1 (Mampostería 1 piso)



Fuente: CAPRA

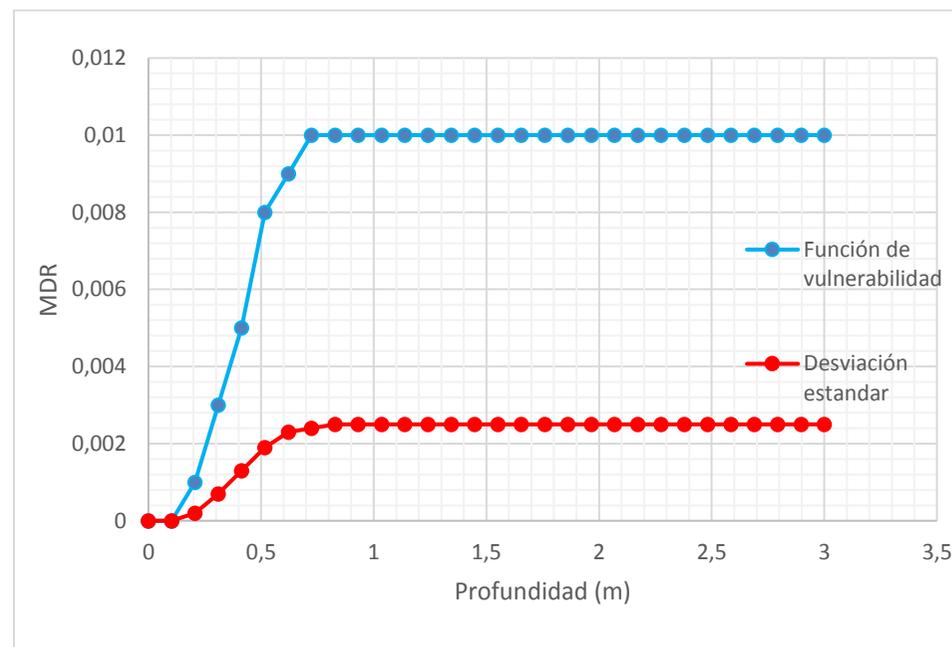
### 5.6.3 Vulnerabilidad humana ante inundaciones

La plataforma CAPRA plantea las funciones de vulnerabilidad humana en términos de número esperado de víctimas mortales medidas en porcentaje con respecto al nivel de ocupación del componente y su desviación estándar correspondiente para diferentes niveles de intensidad del evento.

CAPRA incorpora la curva de vulnerabilidad humana ante inundaciones reflejada en la .

Figura 76, la cual tiene carácter empírico y está basada en el número estimativo total de víctimas, o afectados, en eventos recientes.

Figura 76. Función de vulnerabilidad humana ante inundaciones para estructuras de mampostería;



Fuente: CAPRA

Básicamente esta curva se interpreta en términos de víctimas mortales potenciales respecto a la población expuesta, y de acuerdo a estadísticas empíricas históricas, según los siguientes calados:

- Hasta 0,25 m: 0,05%.
- Hasta 0,6 m: 0,05 - 0,8%.
- Hasta 1 m: 0,8 - 1%.
- > 1 m: 1%.

Sin embargo, en términos menos extremos se considerará toda la población residente en la zona cubierta por la huella de inundación como “afectada” debido a que su vida diaria se verá trastocada de alguna manera negativa por el evento de inundación.

## 5.7 CÁLCULO DEL RIESGO

### 5.7.1 Metodología seguida para la amenaza de inundación

El cálculo del riesgo se ha realizado de acuerdo a los siguientes pasos y asunciones:

- Mediante el shape del catastro de Neiva se ha intentado establecer la superficie construida de las edificaciones que caen dentro de las huellas de inundación de los cauces estudiados. Para el caso del Río del Oro, se han tenido que digitalizar manualmente las viviendas pertenecientes a la clase de análisis *precarios*, asociando así una superficie estimada de construcción para los distintos tipos de edificación identificados.
- Los polígonos obtenidos se han ordenado en una hoja de cálculo *Excel* de acuerdo a su clasificación acorde con la distribución de tipo de vivienda predominante y su correspondiente coste por metro cuadrado presentado en la Tabla 38. Se ha establecido un segundo nivel de categorización basado en la profundidad de inundación de los cauces estudiados.
- A continuación se ha estimado el valor de edificación expuesto multiplicando la superficie de edificación expuesta con el coste medio de reposición para la correspondiente categoría, de acuerdo a los precios estimativos recogidos en la Tabla 38.
- La vulnerabilidad de la edificación de acuerdo al nivel de profundidad de la inundación se ha extraído de las curvas de vulnerabilidad y criterios de estimación presentados en el apartado 5.6.2.
- Para obtener el riesgo parcial de la superficie construida por cada clase de análisis y profundidad de inundación se ha multiplicado el producto del valor expuesto y

su vulnerabilidad de acuerdo con los rangos de profundidad de inundación establecidos.

- Finalmente se ha realizado la suma de riesgos parciales para el conjunto de superficies por cada clase de análisis, determinando así el riesgo total para un periodo de retorno concreto.
- Esta operación se ha repetido para todos los periodos de retorno modelizados, es decir, 3, 25, 50 y 100 años.
- Este nivel de riesgo por cada clase de análisis afectada para un periodo de retorno específico se define igualmente como la pérdida máxima probable (*PML-probable maximum loss*) para ese periodo de retorno.
- A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la finalización de este proceso para la inundación del Río del Oro. En el caso de la Quebrada La Toma, una vez realizado este proceso se ha comprobado que en el tramo canalizado no hay afecciones a edificaciones en los distintos periodos de retorno estudiados. Análogamente, en el caso del Río Las Ceibas, se ha comprobado que el canal proyectado cumple para todos los periodos de retorno estudiados.

### 5.7.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

Como primer resultado numérico se presenta a continuación en la Tabla 40 la pérdida máxima probable (PML) de acuerdo al reparto explicado anteriormente, correspondiente al Río del Oro.

Tabla 40 Cálculo de la PML para la inundación en el Río del Oro

| PERIODO DE RETORNO | SUPERFICIE CONSTRUIDA EXPUESTA (m2) | PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PML (US\$) |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 3                  | 3,252                               | 177,781                            |
| 25                 | 5,940                               | 571,496                            |

| PERIODO DE RETORNO | SUPERFICIE CONSTRUIDA EXPUESTA (m2) | PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PML (US\$) |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 50                 | 6,920                               | 829,408                            |
| 100                | 9,272                               | 1,520,523                          |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a estos resultados, se estima que la pérdida máxima probable (PML) por inundación del Río del Oro varía entre aproximadamente 178.000 y 1.521.000 dólares americanos para los periodos de retorno respectivos de 3 y 100 años.

### 5.7.3 Representación gráfica del riesgo por inundación

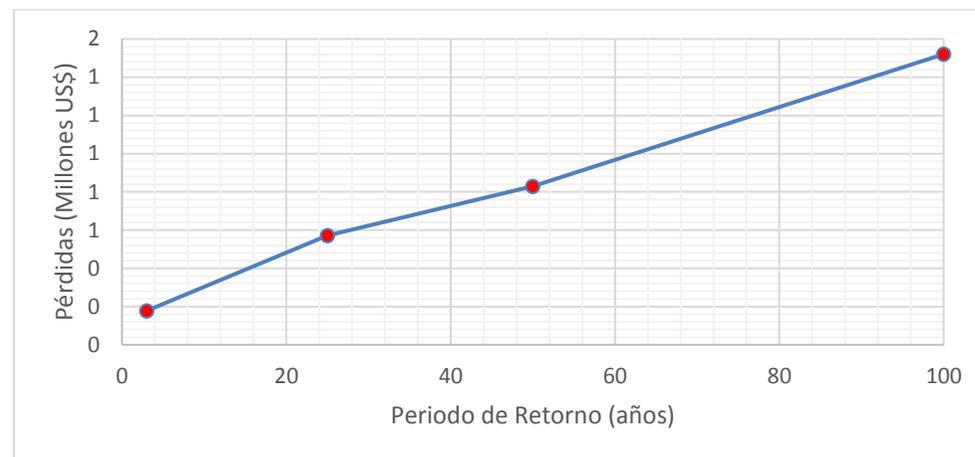
A continuación se presentan el gráfico por pérdida máxima probable (PML) y curva de excedencia de pérdidas elaborado para la inundación del Río del Oro (Figura 77 y Figura 5-48). Para facilitar la lectura y comprensión de cada gráfico, este va precedido de una tabla con los datos numéricos de una tabla con los datos numéricos en los que el mismo se basa (Tabla 41 y Tabla 42).

Tabla 41 Datos de cálculo de PML para la inundación del Río del Oro

| PERIODO DE RETORNO | PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PML (US\$) | ORIGEN DATO |
|--------------------|------------------------------------|-------------|
| 3                  | 177,781                            | Calculado   |
| 25                 | 571,496                            | Calculado   |
| 50                 | 829,408                            | Calculado   |
| 100                | 1,520,523                          | Calculado   |

Fuente: Elaboración propia

Figura 77. Representación gráfica de la PML para la inundación del Río del Oro



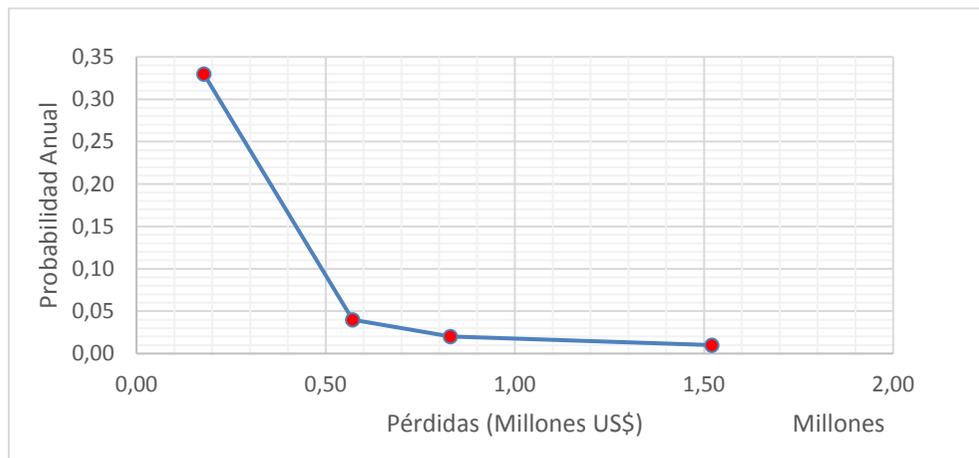
Fuente: Elaboración propia

Tabla 42 Datos de cálculo de la curva de excedencia de pérdidas para la inundación del Río del Oro

| PÉRDIDAS (US\$) | PROBABILIDAD ANUAL | ORIGEN DATO |
|-----------------|--------------------|-------------|
| 177,781         | 0.33               | Calculado   |
| 571,496         | 0.04               | Calculado   |
| 829,408         | 0.02               | Calculado   |
| 1,520,523       | 0.01               | Calculado   |

Fuente: Elaboración propia

Figura 78. Representación gráfica de la curva de excedencia de pérdidas para la inundación del Río del Oro



Fuente: Elaboración propia

### 5.7.4 Cálculo de la pérdida anual esperada por inundación

De acuerdo con el gráfico de curva de excedencia de pérdidas para la inundación del Río del Oro presentado en el anterior apartado, se ha estimado la Pérdida Anual Esperada (PAE) para esta amenaza. La Tabla 43 presenta el resultado de la estimación de este parámetro junto al valor total expuesto para el periodo de retorno de 100 años y la relación porcentual entre ambos, todo ello para el escenario actual.

Tabla 43 .Cálculo de la pérdida anual esperada (PAE) para el escenario actual

| RÍO     | PAE (US\$) | VALOR TOTAL EXPUESTO - VTE (US\$) | PAE/VTE (%) |
|---------|------------|-----------------------------------|-------------|
| del Oro | 212,041    | 3,031,813                         | 7           |

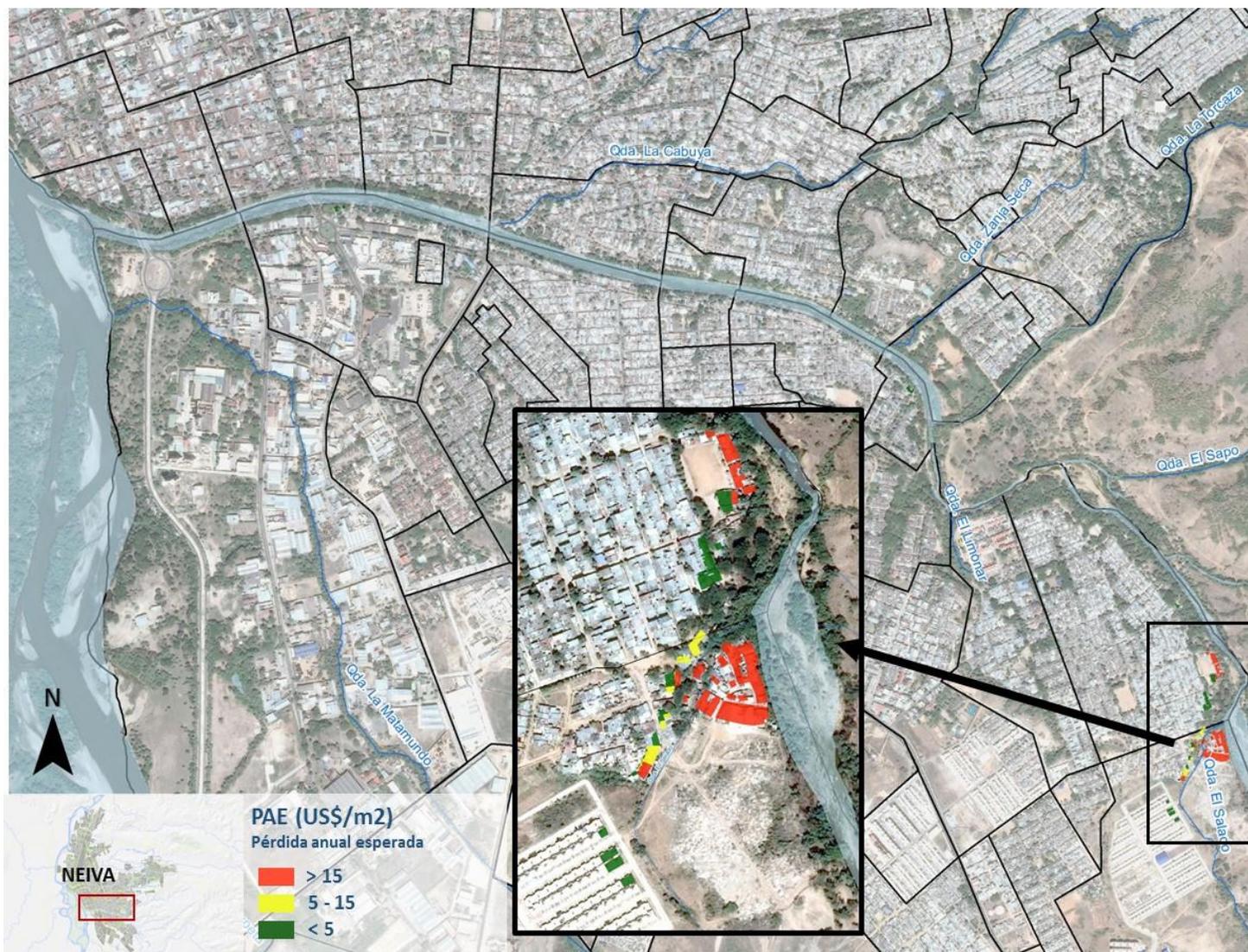
Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 79 se muestra un mapa que representa la Pérdida Anual Esperada (PAE) por la amenaza de inundación para la zona de estudio en el escenario actual.

Adicionalmente, tal y como se muestra en la Figura 80. Se ha realizado una comparativa de escenarios representando para ello en rojo la PAE en el escenario actual, y en azul la PAR en el escenario tendencial de crecimiento (2050).

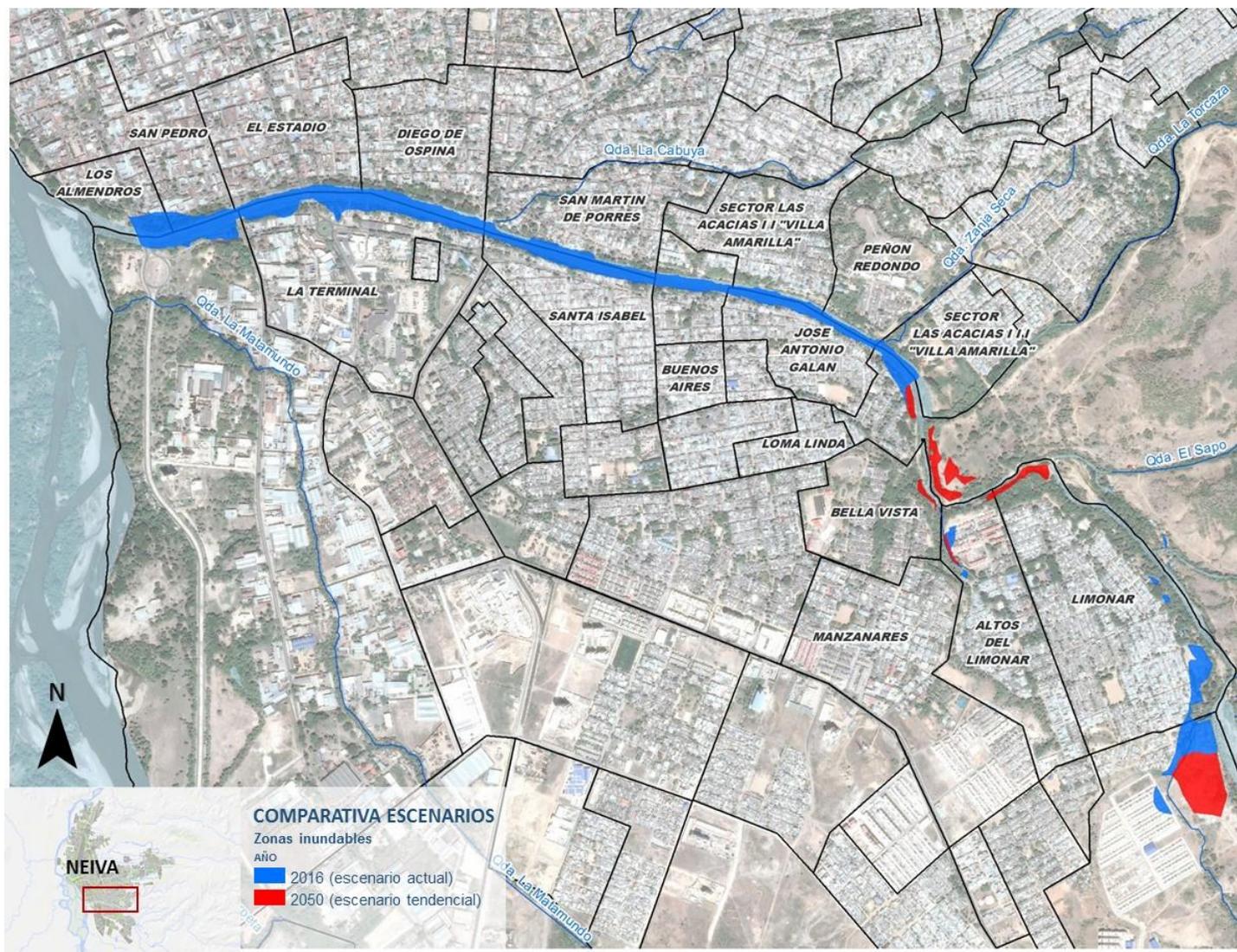
En el Anexo B, se encuentran los mapas de Pérdida Anual Esperada en el escenario actual y de comparativa con el escenario tendencial escala 1:5.000 de la zona de estudio.

Figura 79. PAE Pérdida Anual Esperada en la Zona de Estudio por inundación del Río del Oro en el escenario actual



Fuente: Elaboración propia

Figura 80. PAE Pérdida Anual Esperada en la Zona de Estudio por inundación del Río del Oro en el escenario tendencial



Fuente: Elaboración propia

## 5.8 ESTIMACIÓN DE RIESGOS PARA LAS PERSONAS

Para el cálculo de la población residente en la zona coincidente con la huella de inundación para los diferentes periodos de retorno, se ha obtenido el número de viviendas afectadas para cada uno de los dos casos estudiados y se ha determinado el número de viviendas afectadas.

Una vez obtenidas, se ha determinado el número de personas en situación de riesgo de acuerdo a los datos de densidades de habitante por vivienda establecidos en el Módulo 3 para cada clase de análisis, todo ello en el escenario actual.

A continuación en la Tabla 44 se muestra el número de personas en zona de riesgo por la amenaza de inundación del Río del Oro.

Tabla 44 Número de personas en zona de riesgo por la amenaza de inundación del Río del Oro en el escenario actual

| Periodo de retorno (años) | Número de viviendas expuestas | Nº personas en zona de riesgo por amenaza de inundación |
|---------------------------|-------------------------------|---|
| 3                         | 48                            | 202   |
| 25                        | 79                            | 310   |
| 50                        | 99                            | 385   |
| 100                       | 118                           | 458   |

Fuente: Elaboración propia

Análogamente, se ha determinado el número de viviendas expuestas a la amenaza de inundación en el escenario tendencial, es decir, teniendo en cuenta el crecimiento de la ciudad para el año 2050, tal y como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45 Número de viviendas en zona de riesgo por la amenaza de inundación del Río del Oro en el escenario tendencial

| Periodo de retorno (años) | Número de viviendas expuestas |
|---------------------------|-------------------------------|
| 3                         | 124                           |
| 25                        | 193                           |
| 50                        | 225                           |
| 100                       | 253                           |

Fuente: Elaboración propia

## 5.9 CONCLUSIONES VALORACIÓN DE RIESGOS

Para el estudio de la amenaza de inundación en la ciudad de Neiva, se han estudiado el Río del Oro, el proyecto de encauzamiento del Río Las Ceibas y el tramo canalizado correspondiente a la Quebrada La Toma.

Para el estudio del Río del Oro, se ha diferenciado entre la parte canalizada y la no canalizada, aguas arriba del encauzamiento, en la parte alta de la cuenca. Referente al encauzamiento del Río del Oro, tiene capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de 3 años, mientras que para el resto de recurrencias es posible que se produzca el desbordamiento del canal principalmente en zonas que han sido clasificadas como áreas naturales. El problema detectado en estas zonas es que en parte de ellas se localizan asentamientos de carácter precario, exponiendo por tanto a la población ahí situada.

En el caso de la Quebrada La Toma, de acuerdo a los resultados de los modelos realizados, tiene capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de 100 años.

El caso del río Las Ceibas, las dimensiones del encauzamiento se han tomado de los planos record de las obras que se están realizando en la actualidad, dando como resultado el modelo hidráulico realizado capacidad hidráulica suficiente para un periodo de retorno de hasta 100 años.

En los tres cauces estudiados, aparece la problemática de asentamientos, generalmente de carácter precario, localizados en las riberas de los tramos previos a los encauzamientos, ocupando zonas que han sido determinadas como inundables.

Respecto al riesgo, las pérdidas analizadas por la amenaza de inundación corresponden al Río del Oro, variando entre aproximadamente 178.000 US\$, para un periodo de retorno de 3 años, y 1.5 Millones US\$ para una recurrencia de 100 años.

Se ha determinado un número de viviendas afectadas de entre 48 y 118 para los periodos de 3 y 100 años respectivamente, lo cual representa, empleando las densidades establecidas en el Módulo 3 para cada clase de análisis, una población en riesgo comprendida entre 202 y 458 personas para los periodos de retorno de 3 y 100 años, respectivamente.

## 6 CÁLCULO PROBABILÍSTICO DEL RIESGO SÍSMICO

### 6.1 INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la amenaza y riesgo sísmico en la ciudad de Neiva, capital del departamento de Huila, Colombia.

Según la definición de UNDRO (1979) oficialmente aceptada, el Riesgo Sísmico  $R$ , en una determinada población, se define como:

$$R = H * V * E * C$$

siendo:

$H$ , Peligrosidad sísmica que determina el movimiento esperado en la población.

$V$ , Vulnerabilidad de las estructuras.

$E$ , Exposición o densidad de estructuras y habitantes.

$C$ , Coste de reparación o de pérdidas.

Siguiendo estrictamente la definición anterior, el riesgo vendría expresado en términos económicos, que representarían el coste de reparación por pérdidas ante el movimiento estimado en el cálculo de la peligrosidad. Numerosas variantes han sido propuestas, a fin de expresar el riesgo en otros términos, por ejemplo, porcentaje de un determinado grado de daño en una cierta tipología estructural, daño medio, número de víctimas mortales y heridos, número de viviendas inhabitables, etc. La elección del índice o parámetro de riesgo depende de la aplicación a la que vaya dirigido el estudio, pero en cualquier caso su estimación requiere conocer: 1) la amenaza sísmica a la que está expuesta la población, 2) la distribución de vulnerabilidad sobre el parque inmobiliario en la zona, es decir el número de estructuras de cada tipología o clase de vulnerabilidad, y 3) la relación entre el movimiento de entrada y los daños esperados en cada tipología, es decir las curvas de

fragilidad. Esta es la secuencia de actuación que se sigue en el presente estudio de riesgo, en el que se obtendrán, como principales resultados, los daños físicos en la edificación (ligero, moderado, extenso, completo), las pérdidas humanas y las pérdidas económicas para los escenarios sísmicos definidos.

Se comienza estimando la amenaza y caracterizando la acción sísmica que servirá como input para el posterior cálculo del riesgo. Se caracterizarán así los movimientos esperados por sismos futuros, con dos probabilidades de excedencia: 10 % en 50 años y 5 % en 50 años. Estos movimientos corresponden a periodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente, que se eligen como referencia por ser los manejados habitualmente en normativas para edificaciones convencionales (475 años) y de especial importancia (975 años). A su vez estos periodos de retorno suelen asociarse al sismo frecuente y al sismo extremo, respectivamente.

El cálculo de peligrosidad se realizará primero con carácter probabilista para obtener las aceleraciones esperadas con las probabilidades mencionadas integrando la acción de sismos futuros. Como resultado de este primer cálculo se obtendrán los mapas de aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales SA(T) para los dos periodos de retorno mencionados. Esos mapas no representan la acción de un sismo concreto, sino las aceleraciones con las probabilidades de excedencia mencionadas por cualquier sismo futuro durante el tiempo de exposición, que en nuestro caso se fija en 50 años.

A partir de estos mapas se efectuará la desagregación de la peligrosidad para obtener los sismos con mayor contribución a esos movimientos, llamados *sismos de control*, que definen los escenarios sísmicos dominantes. Este resultado tiene un carácter híbrido determinista- probabilista, ya que corresponde a un cierto escenario, pero lleva una probabilidad asociada. Se caracterizan entonces los movimientos correspondientes a esos escenarios, integrando los resultados de la modelización de los efectos fuente, propagación y suelo. Resultan así espectros de respuesta en diferentes partes de la ciudad, que se identifican con las curvas de demanda y constituyen los inputs para el cálculo del riesgo. El escenario derivado del movimiento de PR 475 años se considerará probable, mientras que el de PR 975 años se considera extremo.

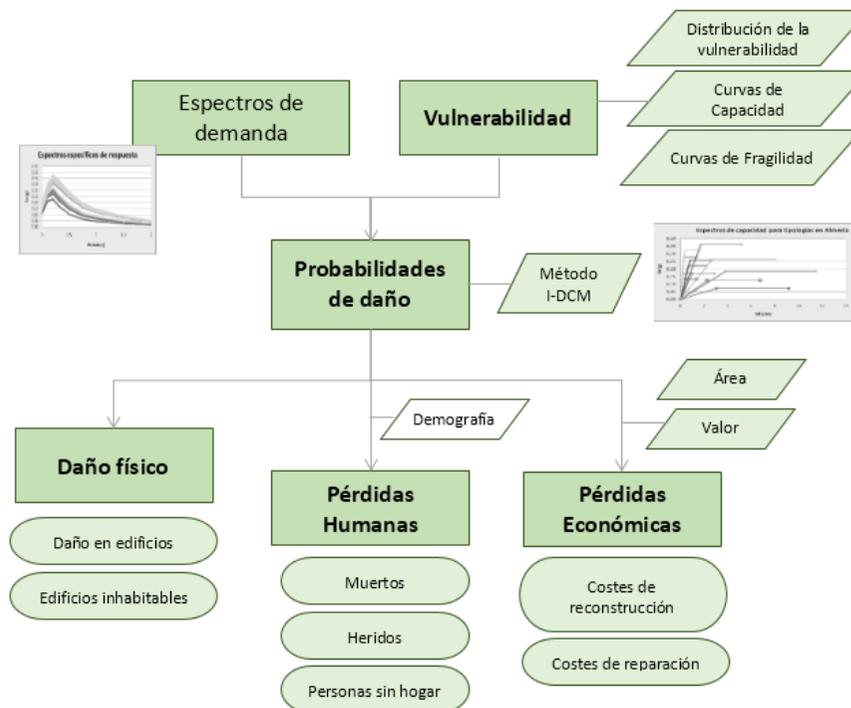
Para el cálculo probabilista se ha seguido la línea metodológica conocida como PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), que incluye la cuantificación de incertidumbres inherentes al cálculo, tanto epistémicas como aleatorias. Las primeras se asocian a los diferentes modelos de fuente, atenuación etc., que pueden incluirse en el cálculo. Las segundas se refieren a la desviación de los datos reales respecto a los modelos considerados, y se tienen en cuenta a partir de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los parámetros modelizados.

Todos los espectros resultantes del estudio de amenaza tanto probabilista, como los correspondientes a los escenarios deterministas definidos, son comparados a su vez con los espectros propuestos por la Norma Colombiana de diseño Sismo Resistente (NSR-10).

Tras la estimación de la amenaza, se procede a caracterizar la exposición y vulnerabilidad teniendo en cuenta el parque inmobiliario de Neiva. Después se cuantifica el daño esperado mediante las llamadas curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño, que son una expresión del porcentaje de cada grado de daño en cada clase de vulnerabilidad, para diferentes niveles de movimiento del suelo. Como unidad de trabajo para asignación de la vulnerabilidad y cuantificación del riesgo se toma la comuna, dentro de la cual se desglosarán primero los daños para cada clase de vulnerabilidad identificada y se efectuará después la estimación del daño total, independientemente de su vulnerabilidad.

En la Figura 81 se presenta un esquema del estudio completo que se requiere para el cálculo del riesgo que se llevará a cabo en Neiva, con todas las fases descritas anteriormente: Caracterización de la peligrosidad y obtención de espectros de demanda, estimación de la vulnerabilidad, estimación del daño estructural en las edificaciones y estimación de indicadores de riesgo.

Figura 81. Esquema general del estudio de riesgo sísmico que se plantea en Neiva



Fuente: Elaboración propia

## 6.2 PELIGROSIDAD SÍSMICA

De acuerdo al estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (1996), y Normativa actual (Norma NSR-10. (2010)), Neiva se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta. Ello es debido a la proximidad a dos zonas de subducción asociadas a los límites de las placas de Nazca y Caribe con la placa de Sudamérica, unido a la presencia de un sistema de fallas locales.

Algunos estudios de amenaza sísmica han sido desarrollados en la ciudad o en regiones incluyendo la misma, que han aportado información relevante para el presente estudio. (Ver apartado 6.2.1). Este se ha desarrollado con información actualizada de las bases de datos que contienen el catálogo sísmico, información sismotectónica, modelos de atenuación, geotecnia, etc. En este estudio, además de actualizar esos datos, se ha llegado a caracterizar los escenarios sísmicos dominantes, tanto para el sismo probable como para el extremo. Los espectros resultantes tienen carácter híbrido determinista-probabilista y constituyen después las curvas de demanda a incluir en el cálculo del riesgo sísmico. Esto supone un paso más respecto a los estudios previos desarrollados, acorde al estado del arte, si bien toda la información recabada de esos estudios ha sido de gran utilidad y ha constituido la base de datos de partida del presente estudio.

La estimación de la peligrosidad o amenaza sísmica se efectuará, en primer lugar, por medio de un cálculo probabilista zonificado. Se tendrán en cuenta todas las fuentes sísmicas incluidas en una zona de influencia de 300 km alrededor de Neiva y se estimará la probabilidad anual de excedencia de distintos niveles de movimiento a causa de todas esas fuentes. Esta calculo dará como resultado las aceleraciones pico PGA y espectrales SA(T), para periodos T en el rango (0.1 a 2s), y para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

A partir de ahí, se definirán los “movimientos objeto” correspondientes a los periodos de retorno fijados, y para corto y largo periodo estructural, y se determinarán los sismos de control, o escenarios que más contribuyen a esos movimientos. Esta operación es conocida como “desagregación de la peligrosidad”.

Los escenarios estimados mediante la desagregación constituirán el input sísmico para el posterior estudio de riesgo, en el que se estimarán las pérdidas asociadas a dichos escenarios.

A continuación se exponen, en primer lugar, los antecedentes de estudios de peligrosidad previos en Neiva, la metodología a seguir en el análisis de peligrosidad y desagregación, desglosada en diferentes fases que se describen en sucesivos subapartados. Primeramente se comentará el marco teórico, y después seguidos, resultados parciales y resultados finales obtenidos. que proporcionen una curva de probabilidad de exceder la aplicación práctica desarrollada, con los criterios seguidos, resultados parciales y resultados finales obtenidos.

### 6.2.1 Antecedentes de estudios de peligrosidad

Se han desarrollado algunos estudios previos de amenaza sísmica, bien a escala local o regional incluyendo la zona de Neiva, entre los que cabe resaltar los realizados por Ingeominas y por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Algunos resultados han sido implementados en las Normas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes NSR-98 de Colombia (Norma AIS 100-81. (1981), Norma NSR-98. (1998), Norma NSR-10. (2010)). Estos estudios exigen una microzonificación sísmica para ciudades con poblaciones mayores a cien mil habitantes en zonas de alta amenaza sísmica, lo cual permitiría estimar a futuro posibles daños asociados a sismos esperados sobre la infraestructura en la ciudad.

También se han desarrollado estudios geológicos y geotectónicos de los suelos del área, entre los que cabe resaltar el realizado en el año 2000 por **el Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana en conjunto con la Consultoría Colombiana**. En dicho estudio se realizó una Microzonificación Sísmica, a partir de investigaciones con datos de sismos previos. Se obtuvo así una aproximación sobre el comportamiento dinámico de las diferentes zonas de Neiva en caso de un sismo, permitiendo establecer recomendaciones más detalladas para el diseño, construcción y actualización de edificaciones.

Otro estudio de interés es el realizado por Romero y Alfaro (2009), en el cual se desarrolló un análisis probabilístico de la amenaza sísmica de Neiva-Colombia en el que se determinó

el nivel de aceleración que se puede exceder en cierta área para un período de tiempo específico.

### 6.2.2 Metodología de cálculo del nuevo estudio desarrollado

La concepción probabilista de la peligrosidad sísmica considera la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia durante un período de tiempo especificado. Matemáticamente, la peligrosidad H queda definida por la expresión:

$$H = P [y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E] \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde Y es el nivel de movimiento cuya probabilidad de excedencia se evalúa en la definición de peligrosidad en el emplazamiento E, y t es el periodo de exposición o intervalo de tiempo durante el cual se calcula la probabilidad de que se produzca, al menos, una excedencia del movimiento del terreno Y.

Lo más común en estimaciones de peligrosidad es considerar que la sismicidad que afecta a un emplazamiento sigue un proceso de Poisson. Entonces se puede suponer que el movimiento fuerte del suelo en dicho emplazamiento también se rige por un proceso poissoniano. En este caso, la probabilidad de que haya al menos una excedencia del parámetro de movimiento en un tiempo de exposición t, está relacionada con la tasa anual de excedencia  $\lambda$  o con el periodo de retorno T (la inversa de la probabilidad anual de excedencia del movimiento), mediante la expresión:

$$P(\text{al menos 1 excedencia en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-t/T} \quad [\text{Ec. 2}]$$

La metodología probabilista concreta que se empleará en este estudio es la conocida como PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), que fue originalmente propuesta en la guía metodológica del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (NRC-DOE-EPRI 1997). Con ella se pretende conseguir que el estudio de peligrosidad y los resultados obtenidos representen de la manera más general y completa posible el punto de vista de la comunidad científica involucrada en la materia. Para ello se hace hincapié en la importancia de

identificar la naturaleza de la incertidumbre de los diversos factores que intervienen en el cálculo y cuantificarla apropiadamente.

La metodología PSHA (1997) constituye una mejora de los métodos previos y más convencionales del cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica, porque incorpora nuevos elementos cuya relevancia se ha venido evidenciando durante las últimas décadas, como son el análisis cuantitativo de incertidumbres, el concepto de árbol lógico y la desagregación de la peligrosidad.

La estimación de la peligrosidad sísmica parte de la definición de tres elementos principales:

1. Caracterización de las fuentes sísmicas. Supone la identificación de las fuentes potencialmente activas que afectan al emplazamiento o población de estudio; en este caso la ciudad de Neiva. Estas fuentes son estudiadas y caracterizadas por medio de modelos matemáticos que se ajustan a las características de una determinada fuente, representando su patrón de sismicidad. Estos modelos establecen la frecuencia de ocurrencia de los sismos en la zona en función de su tamaño (dado por la magnitud de los sismos), quedando así definido el potencial sísmico de cada fuente.
2. Caracterización de la atenuación del movimiento, lo que supone identificar el comportamiento de la onda sísmica desde la fuente al emplazamiento de estudio por medio de modelos empíricos o teóricos.
3. Caracterización del efecto de sitio, donde se identifican los efectos debido a las características litológicas, topográficas y de la estructura del subsuelo bajo el emplazamiento de cálculo y que pueden variar drásticamente las características del movimiento del terreno en la base rocosa.

Una vez definidos estos tres elementos, la peligrosidad sísmica se calculará en puntos de una malla cubriendo la ciudad, mediante la suma de las contribuciones a la excedencia de un cierto nivel de movimiento fuerte (movimiento de referencia) - en cada punto de la malla- debidas a la actividad de todas las fuentes sísmicas contenidas en la zona de influencia, con sus niveles de probabilidad asociados. Para ello, primero debe modelizarse cada fuente sísmica de forma independiente, definiendo su geometría y su patrón de recurrencia de terremotos. Seguidamente, se debe considerar el efecto de la atenuación

del movimiento a través del medio de propagación entre la fuente y el emplazamiento, y por último, determinar el efecto de las condiciones locales sobre el movimiento sísmico en sustrato rocoso.

La ecuación 3 proporciona la peligrosidad en un emplazamiento por una única fuente, dada como probabilidad anual de excedencia de un nivel del movimiento  $Y$  del parámetro  $y$ .

$$P_{anual}(y > Y) = \lambda_{anual}(y > Y) \tau \iiint P(y > Y | m, r, \epsilon) \cdot p(m) \cdot p(r) \cdot p(\epsilon) dm dr d\epsilon$$

[Ec. 3]

Donde:

$y$  representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (habitualmente aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA (T)) e  $Y$  es el valor fijado de movimiento cuya excedencia se evalúa.

$\tau$  es la tasa anual de ocurrencia de sismos y se considera constante dentro de una misma fuente.

$p(m)$  se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado *efecto de la fuente*. Esta función se deriva a partir de la ley de recurrencia de la fuente, que refleja la distribución del número de terremotos en función de su magnitud

$p(r)$  se refiere a la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que, si se produce un terremoto en la fuente, su foco se encuentre a una distancia  $r$  del emplazamiento de cálculo. Esta función representa la posible localización de un sismo dentro de la fuente sísmica y se relaciona con el *efecto de la atenuación del movimiento* a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

$p(\epsilon)$  está relacionada con la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud  $m$  y una distancia  $r$ , cabe esperar distintos

niveles de movimiento debido a la aleatoriedad del mismo, que se considera mediante una distribución log-normal de  $y$  en base a observaciones empíricas. El parámetro  $\epsilon$  indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar  $y$ .

$P(y > Y | m, r, \epsilon)$  es un término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables  $m, r$  y  $\epsilon$  determinadas. Es por tanto un término que solo puede tomar dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario.

$$P(y > Y | m, r, \epsilon \text{ fijos}) = 1 \quad \text{ó} \quad P(y > Y | m, r, \epsilon \text{ fijos}) = 0$$

[Ec. 4]

La integral triple se extiende al rango de variación de las tres variables ( $m, r$  y  $\epsilon$ ) y se resuelve numéricamente, dado que en la mayor parte de los casos no existe solución analítica. Sumando la contribución de todas las zonas se obtiene la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales (p. ej., Kramer 1996). Bajo la hipótesis de que la excedencia del movimiento es un proceso poissoniano, entonces esta probabilidad anual se traduce en una probabilidad en  $t$  años mediante la expresión:

$$P(y > Y \text{ en } t \text{ años}) = 1 - \exp(-t \cdot \lambda_{anual})$$

[Ec. 5]

### 6.2.3 Fases del estudio de peligrosidad sísmica

Siguiendo la metodología expuesta anteriormente, el estudio se estructurará en las siguientes fases:

**Fase I.** Recopilación de información y configuración de una base de datos de partida, con toda la información sísmica y tectónica disponible de la zona de influencia.

**Fase II.** Preparación de los inputs de cálculo de la peligrosidad sísmica necesarios para la aplicación del método probabilista zonificado.

**Fase III.** Cálculo de la peligrosidad propiamente dicho, lo que a su vez conlleva la ejecución de las siguientes subfases:

III.1 Cálculo del movimiento esperado en un emplazamiento genérico en roca.

III.2. Desagregación de la amenaza sísmica, con objeto de reconocer aquel sismo que presenta la mayor contribución a la amenaza total para un nivel de probabilidad determinado. Este sismo se denomina sismo de control y viene representado por su magnitud (M) y distancia (R) características, es decir por un par (M, R), además de un parámetro  $\epsilon$ , relacionado con la variabilidad del modelo de predicción del movimiento fuerte, también conocido como Ley de atenuación. Este parámetro representa el número de desviaciones típicas que se consideran en la predicción sobre el valor medio que proporciona el modelo.

III.3. Estimación de la amenaza incluyendo el efecto local del suelo en el emplazamiento de estudio, que amplifica o atenúa el movimiento sísmico con respecto al movimiento que incide en la base rocosa. Este estudio requiere caracterizar geotécnicamente el suelo en el emplazamiento y asignar, si procede, los correspondientes factores de amplificación sobre el movimiento de entrada en condiciones de roca.

III.4. Caracterización del movimiento coherente con los resultados del estudio de peligrosidad, por medio de espectros de respuesta representativos de dicho movimiento. Estos espectros constituirán el input de cálculo del riesgo sísmico, identificándose con las curvas de demanda.

- Cálculo de la peligrosidad incluyendo el efecto local

La Tabla 46 muestra un esquema de las fases que se han seguido para desarrollar el estudio de peligrosidad sísmica, desde la confección de los datos de partida hasta la estimación de los mapas de peligrosidad sísmica.

Tabla 46. Esquema de las diversas fases que componen la estimación probabilista de la amenaza sísmica siguiendo un método zonificado.

| Datos de partida   | Modelos                         | Resultados                             |
|--|---------------------------------|--|
| Catálogo sísmico   | Modelo de fuentes sísmicas.     | Mapas de peligrosidad sísmica          |
| Catálogo de fallas activas   | Geometría y potencial sísmico   |  |
| Zonificación sísmica   |                                 |  |
| Selección de MMF de la literatura                                  | Modelo de movimiento fuerte MMF | Espectros de peligrosidad uniforme UHS |
| Clasificación geotécnica de los suelos de Neiva                    | Modelo de efectos de suelo      |  |
| Factores de amplificación por tipo de suelo y valor de aceleración |                                 |  |

Fuente: Elaboración propia

El estudio a desarrollar en las diversas fases conlleva a su vez varias tareas, cuya descripción y desarrollo se presenta más adelante:

- Análisis de la sismicidad y de la tectónica del área de estudio.
- Elaboración del catálogo de proyecto.
- Definición y caracterización de fuentes sísmicas.
- Elección del modelo del movimiento fuerte del terreno o de atenuación.
- Cálculo de la peligrosidad propiamente dicho, resolviendo la ecuación de probabilidad.
- Desagregación e identificación de los sismos de control.
- Caracterización del movimiento del suelo asociado a los sismos de control

A continuación, se describen cada una de estas fases.

➤ **ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y DE LA TECTÓNICA DE LA ZONA.**

La primera etapa de todo estudio de amenaza o peligrosidad sísmica en un cierto emplazamiento o población se centra en el análisis de la sismicidad y de la tectónica del área de influencia, a fin de determinar qué fuentes sísmicas pueden suponer peligro potencial. De este análisis se establecerá el marco de referencia para el resto del estudio, delimitando la extensión de la zona cuyos terremotos pueden tener influencia significativa, así como las características generales de las fuentes sísmicas englobadas.

➤ MARCO SISMOTECTÓNICO REGIONAL

Colombia se encuentra localizada en el cinturón de fuego del Océano Pacífico, al noroccidente de Sudamérica. Su actividad sísmica es causada principalmente por la subducción de la Placa Oceánica de Nazca y la presencia de un complejo sistema de fallas activas locales.

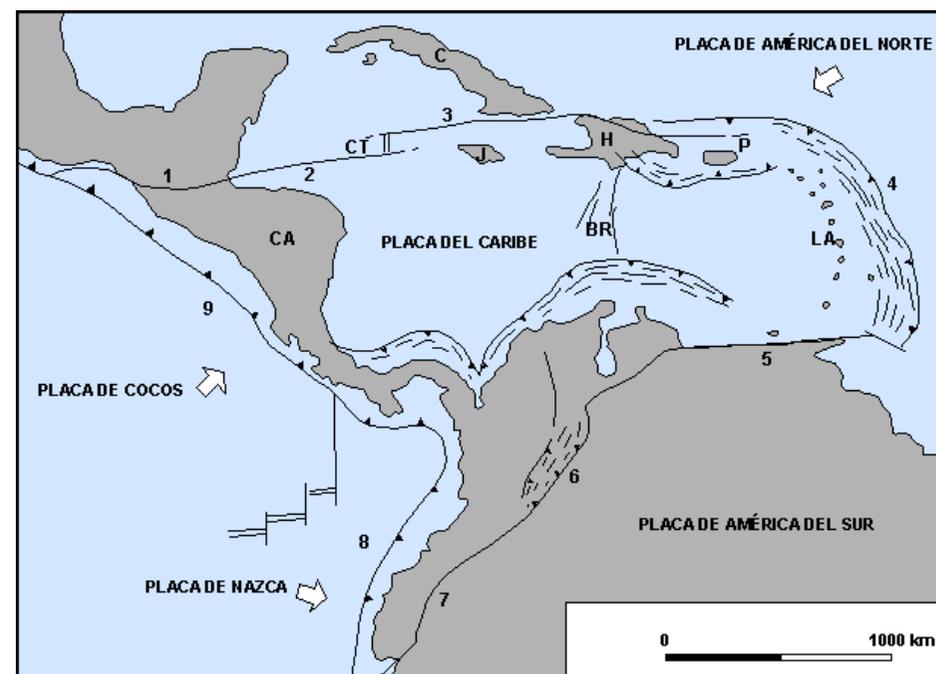
Al oeste de Colombia, se localiza un límite de placas convergente que conforma la trinchera o fosa, a partir de la cual comienza la subducción de la placa de Nazca bajo el bloque continental de América del Sur, con una velocidad estimada en 6 cm/año. La convergencia en este límite de placas podría haber contribuido a la formación de un arco volcánico activo en la corteza continental, ocasionando además el incremento de la tensión al inicio de la subducción (Egbue y Kellogg, 2010; Witt et al., 2006). Existe así una cadena de volcanes en el país, que se extiende desde Manizales, con el Volcán Nevado del Ruiz, hasta el Ecuador.

Al norte de Colombia, se localiza el límite con la placa del Caribe, que también presenta una zona de subducción con una velocidad de 1 a 2 cm/año.

La confluencia de movimientos entre placas genera una serie de fallas de sentido SE-NW, como las fallas de Romeral, Cauca-Patia, Soapaga y la del borde este de la Cordillera Oriental. También se originan fallas de rumbo, como la falla de Bucaramanga-Santa Marta, que desplazó la Sierra Nevada de Santa Marta situada en la Cordillera Central, hacia el noroeste. Estas fallas son responsables de buena parte de la sismicidad que se genera en el país.

En este marco tectónico (Figura 82), se generan terremotos, tanto en las zonas de subducción al Oeste y Norte de Colombia, como en el sistema de fallas locales.

Figura 82. Mapa Tectónico de la Región de Colombia, Centroamérica y Caribe.



Fuente: Alfonso, L. et. al. (2013).<sup>7</sup>

**Marco Sismotectónico y geológico Local**

A escala local, Neiva se encuentra localizada en la zona sur-occidental de Colombia, a unos 304 km de Bogotá, entre las cordilleras central y oriental de los Andes. Bajo la zona de Neiva se encuentran tres sistemas de fallas activas: El Romeral, Magdalena y Borde Llanero (Revista Épsilon, 2008). Todas éstas estructuras se consideran muy activas y han generado importantes sismos de intensidades medias, como los de 1824 y 1942 y de grandes

<sup>7</sup> Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2013, vol.7 no.3 ISSN 1990-8830 / RNPS 2125.

intensidades, como los sismos de 1827, 1834, así como el macrosismo del Huila en 1967. Dichas fallas se caracterizan por haber tenido actividad en el Cuaternario, son normales y con una dirección general NNE-SSW.

Entre los sismos ocurridos por el sistema de fallas asociado a la ciudad de Neiva, existen algunos emblemáticos como: el sismo de noviembre de 1827, el sismo de abril de 1967 y el macrosismo de febrero de 1967, el cuál fue registrado en más de 500 estaciones sismológicas en el planeta y tuvo alrededor de cinco réplicas en las primeras horas siguientes al sismo, más de veinte en los primeros tres días y un poco más de 350 réplicas al cabo de un mes. El foco se encontró a 58 km por debajo de la cordillera oriental (Revista Épsilon, 2008) con intensidad de 9 en la escala de Mercalli modificada, I MM.

La Tabla 47 muestra los sismos históricos con daños reportados en ciudad de Neiva y sus respectivos parámetros. Los epicentros de estos sismos aparecen representados en la Figura 83.

Tabla 47. Tabla de sismos históricos importantes con daños en ciudad de Neiva.

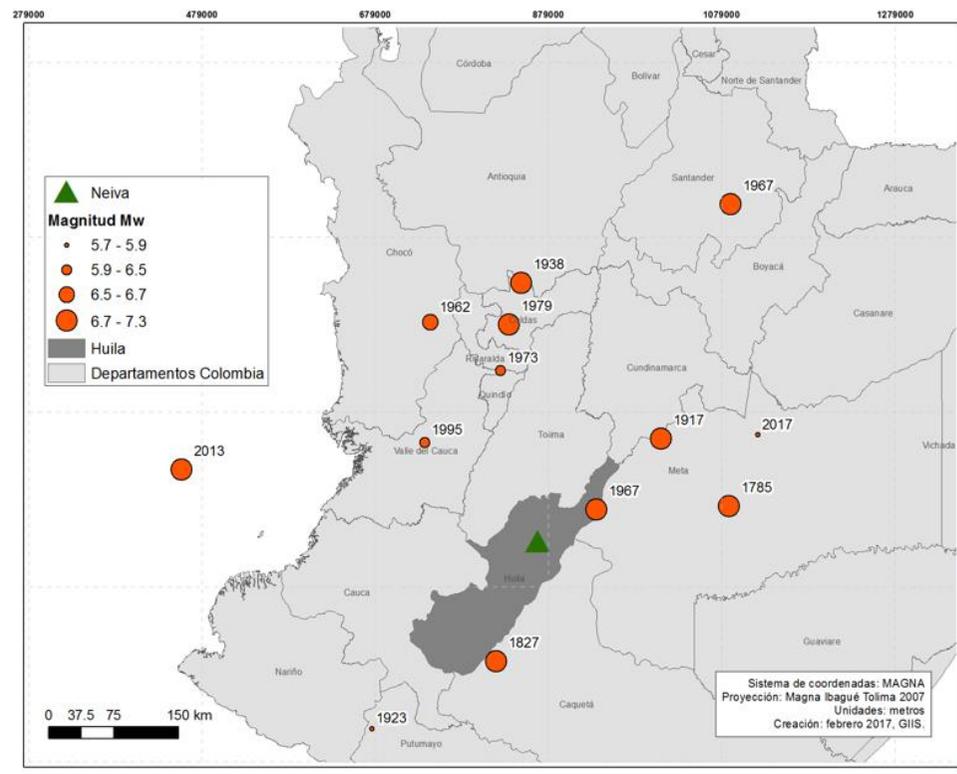
| Fecha      | Hora  | Latitud | Longitud | Magnitud           | Prof (km) | Daños   |
|------------|-------|---------|----------|--------------------|-----------|---|
| 12/07/1785 | 07:45 | 2.97    | -73.41   | 7.1 M <sub>w</sub> | 10        | Destrucción de Iglesias, torres y colegios  |
| 17/06/1826 | 22:30 | 5.01    | -73.59   | 6.5 M <sub>w</sub> | 15        | Caída de algunos edificios, varias réplicas en los días vecinos.  |
| 16/11/1827 | 18:00 | 1.8     | -76.40   | 9.0 M <sub>w</sub> | 15        | 524 muertos. 29 templos y 80 casas derrumbadas. En el valle de Neiva cayeron todas o la mayor parte de las casas de paredes y tejas, lo mismo que las iglesias. |

| Fecha      | Hora  | Latitud | Longitud | Magnitud           | Prof (km) | Daños   |
|------------|-------|---------|----------|--------------------|-----------|---|
| 31/08/1917 | 06:36 | 4       | -74      | 6.9 M <sub>s</sub> | 35        | Hubo daños ligeros en casi toda la ciudad, con excepción de algunas catedrales y edificios gubernamentales que colapsaron. 4 réplicas. 6 muertos a causa del sismo. |
| 22/12/1923 | 04:56 | 4.64    | -73.36   | 5.9 M <sub>w</sub> | 15        | Entre 200-300 muertes, 2000 damnificados.   |
| 04/02/1938 | 21:23 | 5.61    | -75.45   | 7.0 M <sub>s</sub> | 128       | Daños intensos, al menos 5 muertos. Fisuras en edificaciones  |
| 30/07/1962 | 15:18 | 5.4     | -75.9    | 6.8 M <sub>s</sub> | 69        | Algunos campanarios y edificios se desplomaron. Entre 15-25 muertes. 500 casas destruidas, 500 casas con daño moderado y 300 con daño ligero.                       |
| 09/02/1967 | 10:24 | 2.93    | -74.83   | 7.0 M <sub>w</sub> | 36        | Dejó 98 víctimas, 7896 edificaciones afectadas y generando costes de más de 130 millones de pesos   |
| 29/07/1967 | 05:24 | 6.84    | -73.09   | 6.8 M <sub>w</sub> | 160       | 20 muertos y más de 160 heridos. El 60% de las casas se vieron afectadas  |

| Fecha      | Hora  | Latitud | Longitud | Magnitud           | Prof (km) | Daños   |
|------------|-------|---------|----------|--------------------|-----------|---|
| 03/04/1973 | 08:53 | 4.6     | -75.66   | 6.1 M <sub>b</sub> | 151       | 1 víctima, 10 heridos. Daños leves  |
| 23/11/1979 | 18:40 | 4.79    | -76.19   | 7.2 M <sub>w</sub> | 108       | 42 muertes y más de 500 heridos. Daños moderados y severos en las edificaciones   |
| 19/01/1995 | 10:05 | 5.03    | -72.95   | 6.5 M <sub>w</sub> | 17        | Hubo colapsos y daños severos en construcciones, especialmente en el área rural. Se reportaron más de 30 heridos y 6 muertos. |
| 08/02/1995 | 13:40 | 4.13    | -76.74   | 6.4 M <sub>w</sub> | 77        | 40 muertos y 200 heridos. Daños ligeros/moderados   |
| 09/02/2013 | 09:16 | 1.11    | -77.56   | 7.0 M <sub>w</sub> | 162       | El sismo no dejó ninguna víctima mortal. Sin embargo, dejó 37 heridos, 1896 viviendas averiadas.                              |
| 06/02/2017 | 13:02 | 3.38    | -74.72   | 5.3 M <sub>w</sub> | 0         | 1 herido, una escuela con daños leves   |

Fuente: Elaboración propia

Figura 83. Mapa de sismos históricos sentidos en la ciudad de Neiva, cuyos datos de localización y tamaño se indican en la Tabla 1.



Fuente: Elaboración propia

**Sismo reciente con daños en Neiva: 06 de febrero de 2017**

El día 6 de febrero del año 2017, un sismo de magnitud Mw 5.7, con epicentro en el departamento de Huila (ver figura 6-4), fue sentido en la ciudad de Neiva. A la fecha no han sido publicados informes oficiales de los daños generados. Sin embargo, diversos medios de comunicación locales han reportado entre los daños principales una escuela afectada

con el desplome parcial del techo dejando una víctima lesionada, así como daños en la catedral de la ciudad.

La Tabla 48 muestra las coordenadas y características del sismo publicadas por el USGS, y la Figura adjunta muestra su localización con respecto a la ciudad de Neiva.

Tabla 48. Datos del sismo ocurrido el día 06 de febrero del presente año, sentido en Neiva.

| Fecha      | Hora  | Latitud | Longitud | Magnitud           | Prof (km) | Daños                                     |
|------------|-------|---------|----------|--------------------|-----------|---|
| 06/02/2017 | 13:02 | 3.383   | -74.716  | 5.3 M <sub>L</sub> | >30       | Dstrucción de Iglesias, torres y colegios |

Fuente: Elaboración propia

Figura 84. Mapa Localización del sismo del 06 de febrero de 2017.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

➤ **ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE PROYECTO.**

Tras el análisis sismotectónico, el segundo paso a desarrollar es la confección de un catálogo de proyecto que incluya todos los terremotos que potencialmente puedan afectar a nuestra población. Se define para ello un área de influencia de 300 km alrededor de la misma, tal como establecen la mayor parte de las normativas.

El catálogo sísmico ha sido actualizado al día 11 de septiembre de 2016, con datos oficiales del Servicio Geológico Colombiano. Para esto se realizó la correspondiente homogeneización de magnitudes, depuración del catálogo e identificación de años de referencia en los distintos rangos de magnitudes, a partir de los cuales el catálogo puede considerarse completo. Se filtraron también los sismos de muy baja magnitud que no presentan incidencia significativa en la peligrosidad. Se obtuvo así un catálogo homogeneizado a magnitud momento Mw y se efectuó la corrección por falta de completitud en diferentes rangos de magnitud para la correcta estimación de las tasas de actividad.

A continuación se describen brevemente las tareas realizadas para la confección del catálogo sísmico actualizado.

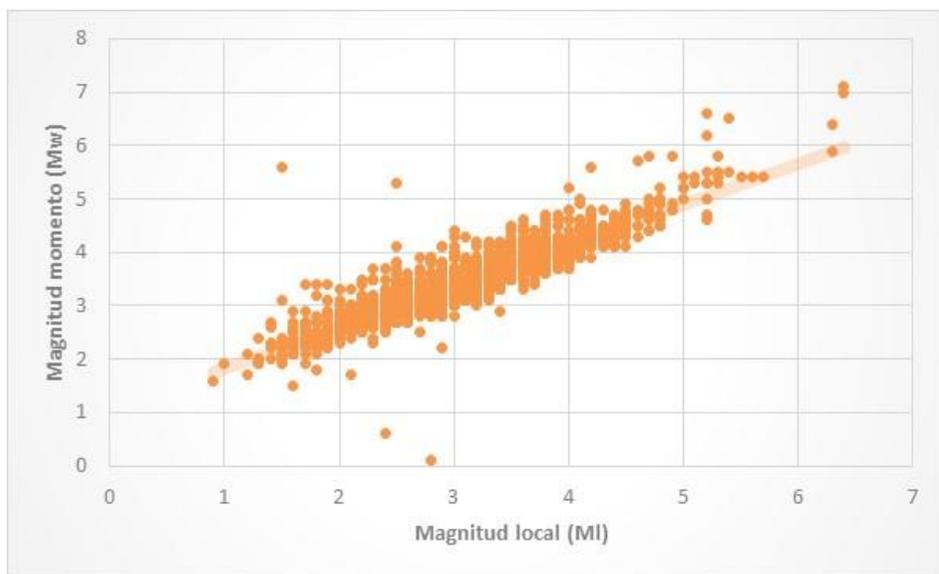
**Homogeneización y Depuración del Catálogo**

Un catálogo sísmico es homogéneo, en lo referente al tamaño de sismos, cuando el parámetro que lo define es el mismo para todos los terremotos. Frecuentemente en un mismo catálogo se incluyen medidas de magnitud en diferentes escalas, o incluso dentro de una misma escala, obtenidas a partir de diferentes fórmulas. Es imprescindible realizar las conversiones pertinentes entre las diferentes estimaciones de magnitud, a fin de obtener un catálogo sísmico homogéneo. En este trabajo se utiliza la magnitud momento Mw como parámetro de tamaño, siguiendo la tendencia habitual en estudios de amenaza sísmica.

Como base de datos de partida se ha obtenido el catálogo sísmico para toda Colombia, con un total 151044 registros, los cuales presentan un rango de magnitudes locales entre 0.1 - 6.8 y cubriendo un periodo entre las fechas: 01/06/1993 – 17/09/2016.

Para homogeneizar las magnitudes a Mw, en primer lugar se ha deducido una regresión lineal, con el fin de obtener la expresión que relaciona las magnitudes locales ML del catálogo original con magnitudes momento Mw. Se han seleccionado para ello aquellos registros que disponían del dato en los dos tipos de magnitudes. En la Figura 85 se muestran los valores de ML y Mw empleados para el ajuste, junto con la correlación deducida por regresión lineal.

Figura 85. Ajuste lineal y ecuación obtenida para la homogeneización de datos de Magnitud local MI a Magnitud Momento Mw



**Ecuación de correlación:  $Mw = 0,7691MI + 1,0543$**

Fuente: Elaboración propia

Se ha realizado un filtrado considerando únicamente aquellos registros de magnitud momento mayor o igual a 3, resultando un total de 46921 registros.

Además, se ha incluido en el catálogo la sismicidad histórica con parámetros extraídos de la base de datos de sismos históricos del Servicio Geológico de Colombia. Estos sismos presentan magnitudes de ondas superficiales Ms y magnitud de ondas internas Mb, por lo que se han aplicado ecuaciones de correlación entre estas magnitudes con la magnitud momento, Mw, propuestas por Scordilis (2006). A pesar de la incertidumbre que conlleva esta transformación, dichos sismos no pueden ser excluidos del análisis, por ser en muchos casos los mayores terremotos ocurridos en la zona y por tanto determinantes a la hora de estimar los mayores movimientos esperados. Las correlaciones utilizadas para la homogeneización de magnitudes a magnitud momento Mw se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49. Ecuaciones de correlación aplicadas para la conversión de datos de magnitudes de ondas superficiales Ms y magnitudes de ondas internas Mb a magnitudes momento Mw. (Scordilis, 2006).

| Magnitud de origen | Correlación aplicada para la estimación de Mw (Scordilis, 2006)         |
|--------------------|---|
| Ms                 | $Mw = 0.67(\pm 0.005)M_S + 2.07(\pm 0.03),$<br>$3.0 \leq M_S \leq 6.1,$ |
|                    | $Mw = 0.99(\pm 0.02)M_S + 0.08(\pm 0.13),$<br>$6.2 \leq M_S \leq 8.2,$  |
| Mb                 | $Mw = 0.85(\pm 0.04)m_b + 1.03(\pm 0.23),$<br>$3.5 \leq m_b \leq 6.2,$  |

Fuente: Elaboración propia

Además, en este trabajo se asume que la sismicidad sigue un proceso de Poisson. Esto significa independencia entre sismos de una misma zona, lo que solo puede asumirse entre eventos principales. Por tanto, para que esta condición se verifique, es necesario eliminar del catálogo aquellos sismos que se identifiquen como réplicas o premonitores (Gardner y Knoppoff, 1974). Por esta razón, el catálogo ha sido depurado de series sísmicas, mediante el uso de ventanas espaciales y temporales que permiten identificar las réplicas y premonitores asociados a un sismo principal. Concretamente se aplicaron las ventanas definidas por los mismos autores, de uso extendido a nivel mundial.

**Compleitud**

Un catálogo sísmico se considera completo si contiene todos los sismos que han ocurrido en el área considerada. El problema es que, al remontarnos hacia atrás en el tiempo, la información relativa a terremotos pequeños o no sentidos habitualmente se pierde. En general, cuanto menor sea la intensidad o magnitud, menor será el periodo en el que el catálogo pueda considerarse completo.

El análisis de completitud consiste en identificar los periodos de tiempo para los cuales se puede considerar que el catálogo es completo para los diferentes intervalos de magnitud considerados. Concretamente, se deben identificar una serie de años de referencia que marcan el inicio del periodo de completitud, para cada zona y para cada rango de magnitudes.

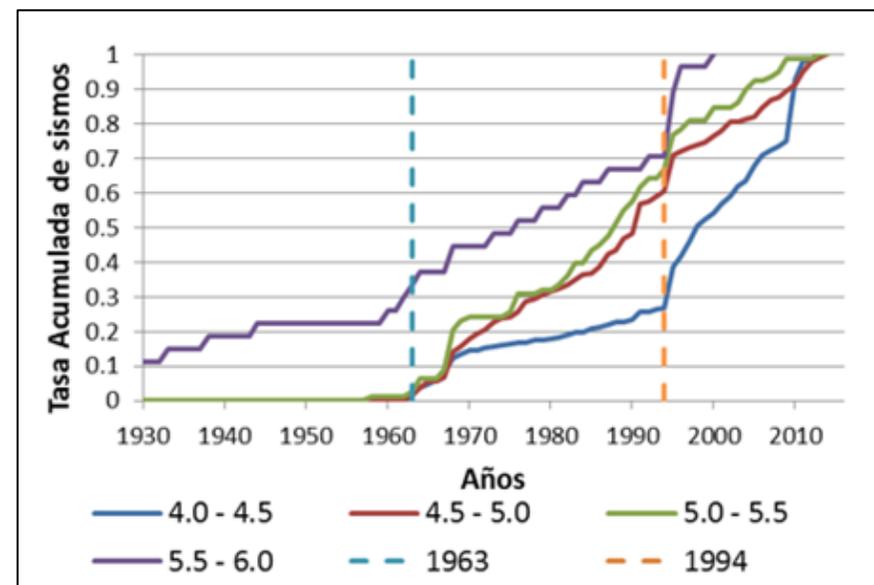
En nuestro estudio se determinaron los años de referencia para cada rango de magnitud siguiendo el método de Stepp (1972) y considerando intervalos de 0,5 unidades de magnitud. Se representan para ello el número acumulado de sismos para cada intervalo de magnitud, a partir de 1930. Se identifica entonces el año de referencia a partir del cual el número acumulado de terremotos por año se puede considerar constante. Este año corresponde al punto a partir del cual la curva representada tiene pendiente constante.

La Figura 86 muestra la tasa normalizada de sismos ocurridos por año y por rango de magnitudes y la Tabla 50 muestra los años de referencia obtenidos del estudio de completitud para cada rango de magnitudes en casos de sismos ocurridos a profundidades superficiales y bajas profundidades debido a subducción de placas.

| AÑOS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE COMPLETITUD |            |            |
|--|------------|------------|
| Rango de Mw  | Corticales | Subducción |
| [5.5 - 6.0)  | 1973       | 1956       |
| [6.0 - 6.5)  | 1957       | 1929       |
| [6.5 - 7.0)  | 1945       | 1924       |
| [7.0 - 7.5)  | 1834       | 1875       |
| [7.5 - 8.0]  | 1834       | 1875       |

Fuente: Elaboración propia

Figura 86. Tasa normalizada de sismos ocurridos por año para cada rango de magnitudes del catálogo, establecidos a partir del análisis de completitud realizado.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Años de referencia establecidos a partir del análisis de completitud realizado para el presente estudio.

| AÑOS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE COMPLETITUD |            |            |
|--|------------|------------|
| Rango de Mw  | Corticales | Subducción |
| [4.0 - 4.5)  | 1982       | 1990       |
| [4.5 - 5.0)  | 1973       | 1962       |
| [5.0 - 5.5)  | 1973       | 1957       |

Catálogo final de proyecto:

El catálogo final de proyecto, resultante de los procesos de homogenización, filtrado, depuración y corrección por falta de completitud, para una magnitud  $M_w \geq 4$ , contiene 28.685 eventos.

La Tabla 51 y la Tabla 52 muestran las características del catálogo final elaborado para el estudio de peligrosidad y riesgo sísmico en Neiva, así como los atributos contenidos en la base de datos georreferenciada elaborada como input al posterior cálculo de peligrosidad.

Tabla 51. Características del catálogo final de Colombia

|                     |  |
|---------------------|--|
| Número de eventos   | 28685 sismos   |
| Periodo             | 1566-2016  |
| Área                | Longitud: de $-67,13^\circ$ a $-88,948^\circ$ / Latitud: de $-3,572^\circ$ a $14,98^\circ$ |
| Tipo de Magnitud    | Magnitud Momento ( $M_w$ )   |
| Rango de magnitudes | 4 - 8,1  |
| Profundidad         | 0 – 700 km   |

Fuente: Elaboración propia

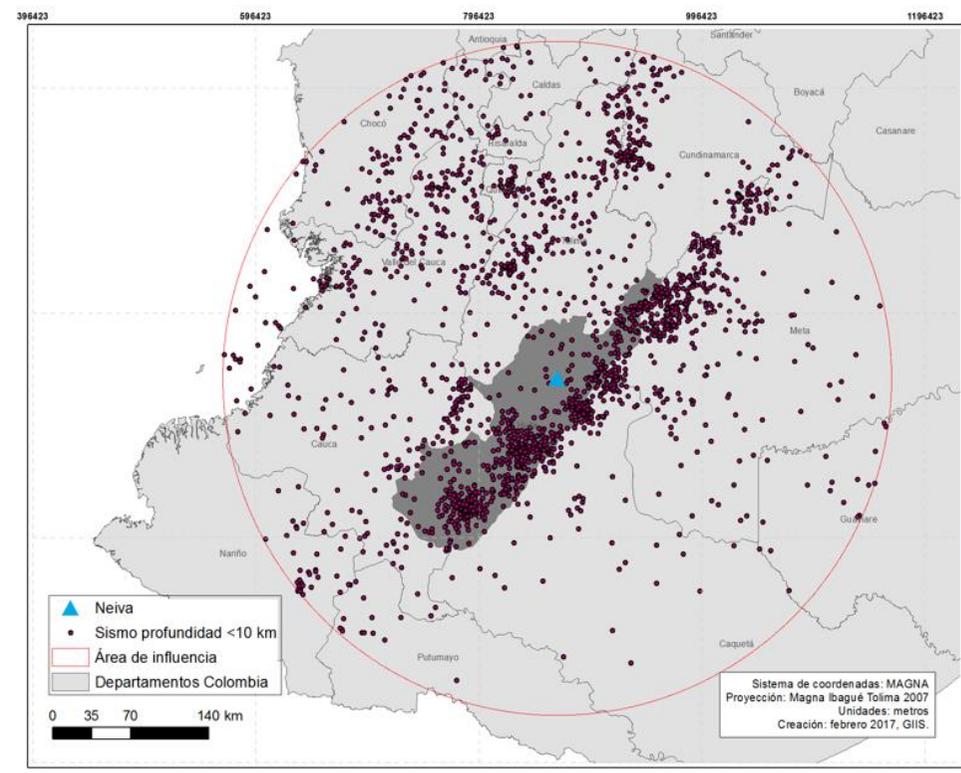
Tabla 52. Atributos contenidos en la tabla del catálogo

|             |   |
|-------------|---|
| EVID        | ID  |
| Fecha       | Fecha de ocurrencia                             |
| Hora        | Tiempo de ocurrencia                            |
| Coordenadas | Latitud y Longitud                              |
| H           | Profundidad (km)                                |
| Lugar       | Lugar de ocurrencia                             |
| $M_w$       | $M_w$ final asignada                            |
| Parámetro   | Tipo de parámetro de tamaño de magnitud inicial |

Fuente: Elaboración propia

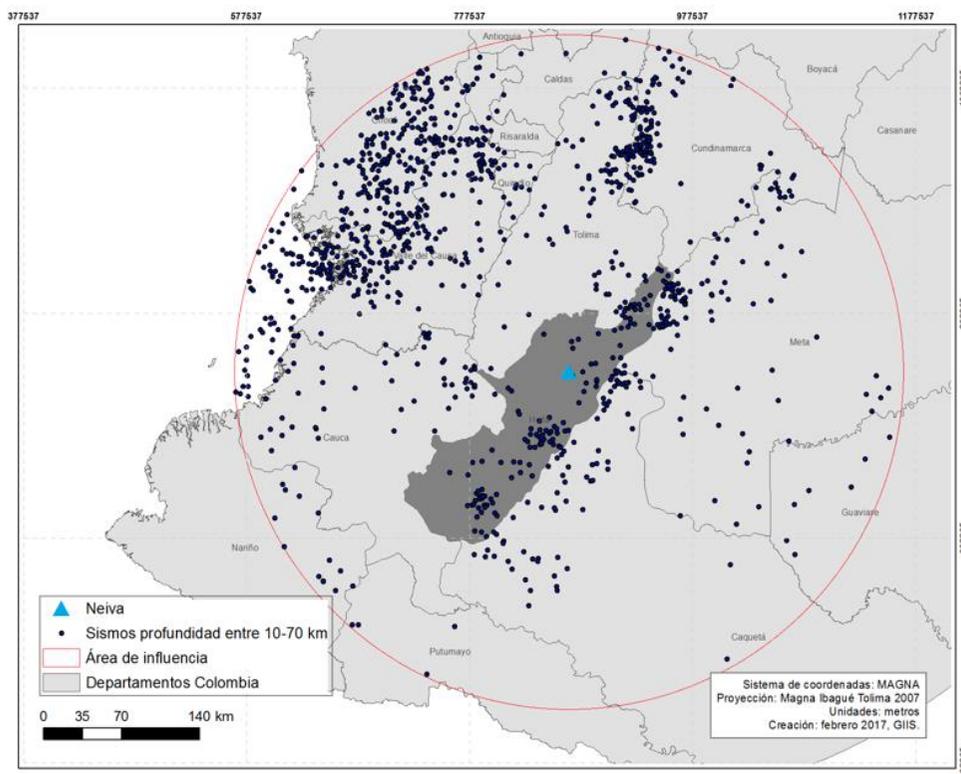
A continuación, se presentan tres mapas con la localización epicentral de los eventos contenidos en este catálogo de proyecto. En la Figura 87 se muestran aquellos sismos que han sido registrados para profundidades iguales o inferiores a 10 km. En la Figura 88 se representan los sismos registrados a profundidades entre 10 y 70 km. Por último, en la Figura 89 se incluyen los sismos registrados a profundidades superiores a 70 km.

Figura 87. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidad inferior a 10 km).



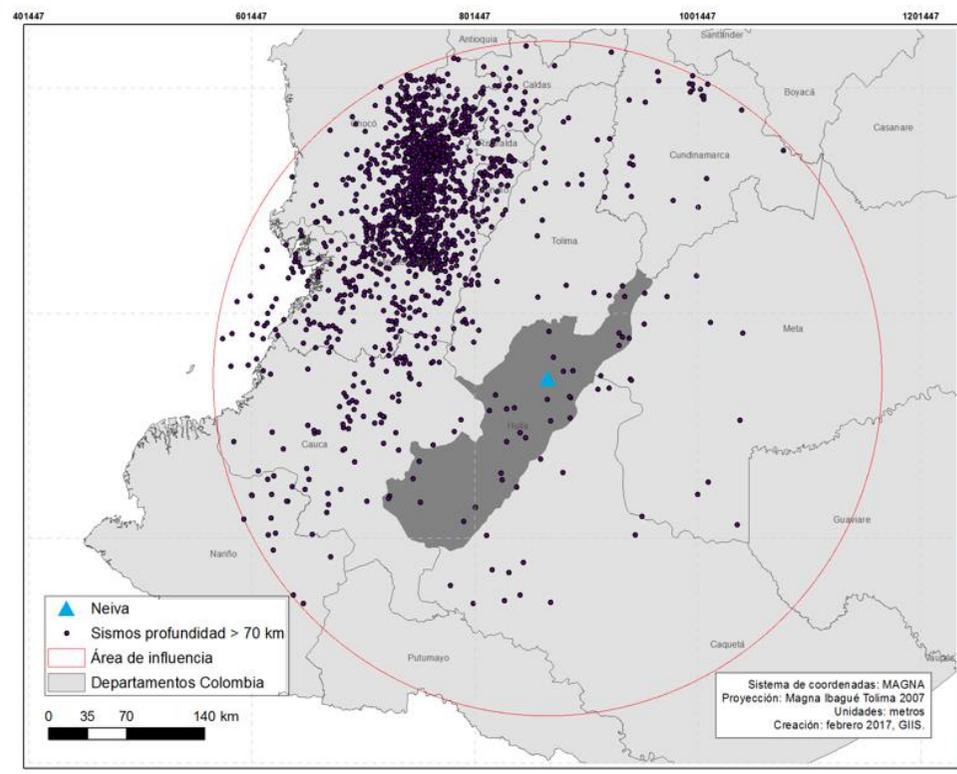
Fuente: Elaboración propia

Figura 88. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidades entre 10 y 70 km).



Fuente: Elaboración propia

Figura 89. Mapa de los sismos contenidos en el catálogo de proyecto para el estudio de amenaza sísmica de Neiva (profundidades superiores a 70 km).



Fuente: Elaboración propia

### ➤ CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS.

Para caracterizar las fuentes sísmicas que entrarán en el cálculo de peligrosidad de la región se ha empleado la metodología clásica zonificada (MCZ), la cual emplea modelos de zonas sismogénicas en representación de las fuentes sísmicas. Este método fue desarrollado por Cornell (1968) y es el que tradicionalmente se ha venido empleando en cálculos probabilistas de peligrosidad.

La asunción de un modelo zonificado supone que los terremotos tienen lugar dentro de zonas sismogénicas definidas, cuyo potencial sísmico es homogéneo. Es decir, dentro de cada zona, la sismicidad se distribuye de manera aleatoria espacial y temporalmente. La subdivisión de un territorio en zonas sismogénicas de características sismotectónicas comunes se denomina zonificación. La delimitación de zonas sísmicas requiere englobar en una misma zona aquellas fallas o estructuras geológicas que puedan generar patrones similares de sismicidad. Dicho de otra forma, los límites deben separar zonas capaces de generar terremotos cuya magnitud máxima y recurrencia sean bien diferentes. Esta medida se adopta, por lo general, como alternativa cuando las fallas existentes no se conocen con el detalle requerido como para definir modelos particulares que representen la sismicidad asociada.

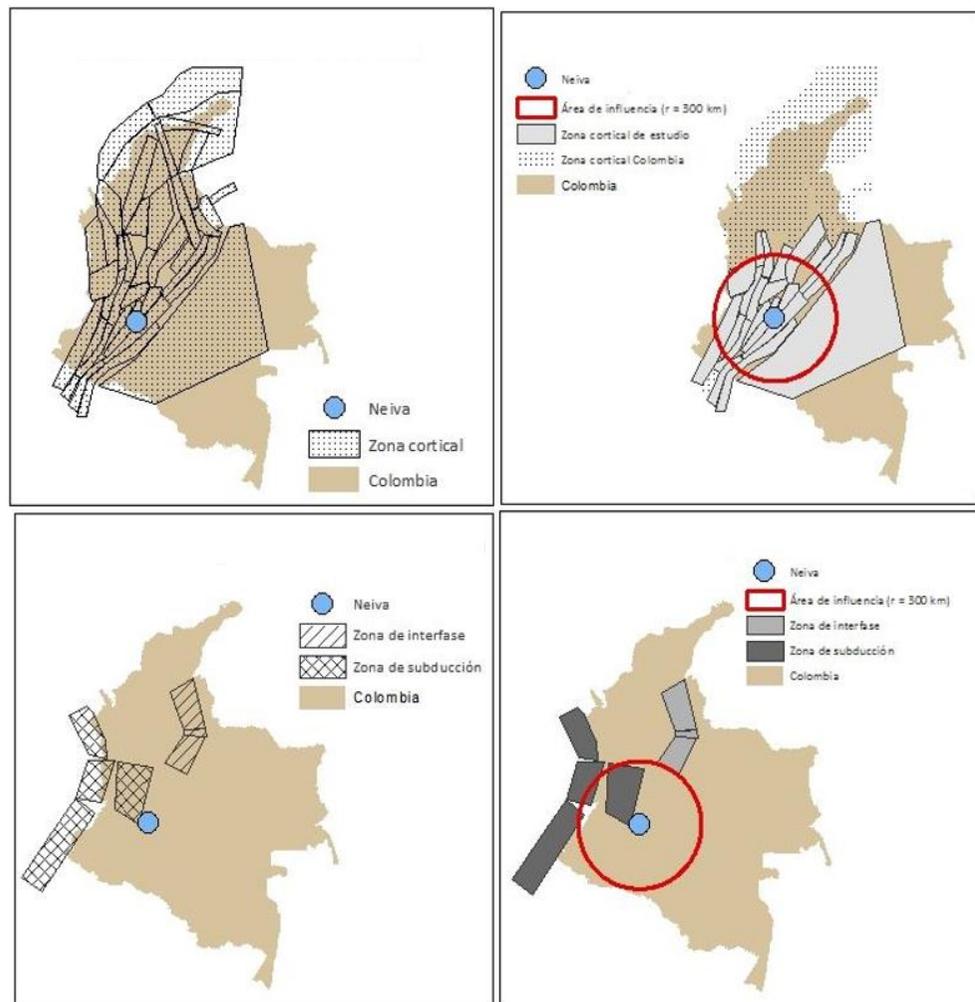
Para incluir ambos tipos de fuente en el cálculo de peligrosidad, debe caracterizarse su patrón de sismicidad o ley de recurrencia, junto con la magnitud máxima que cada fuente pueda generar. A continuación, se describe el proceso seguido para definir los parámetros de las fuentes sísmicas.

#### Zonificación sísmica

El modelo de zonas sismogénicas considerado en este estudio ha sido el definido por GEM (Global Earthquake Model), conjuntamente con el grupo de trabajo del presente estudio. Se establecen tres regímenes tectónicos para la zonificación sísmica, basada en fuentes corticales para sismos de una profundidad 0 a 10 km, fuentes de subducción interfase, para sismos en el rango de profundidades de 70 km hasta 150 km, y fuentes de subducción intraplaca para sismos ocurridos desde 150 km hasta profundidades de 250 km.

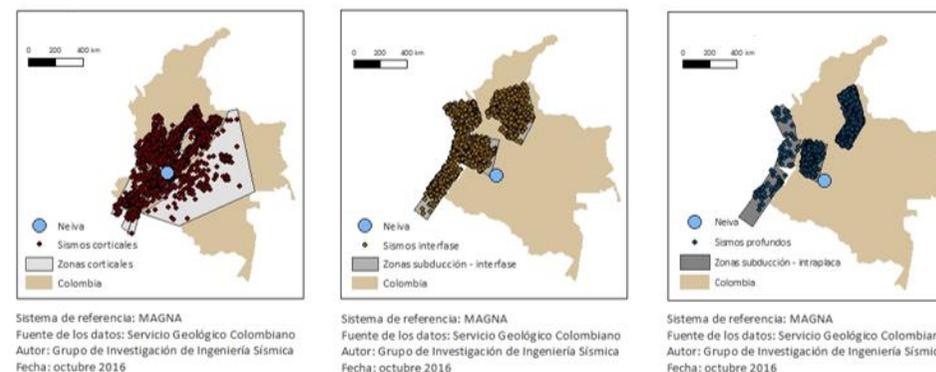
En la Figura 90 se muestra un mapa con las zonas sismogénicas consideradas para el área de estudio en Neiva junto con las fallas activas que se localizan en el área de las zonas de tipo cortical. La sismicidad asociada a las diferentes zonas se muestra en la Figura 91.

Figura 90. Izquierda) Mapas de las zonas sismogénicas empleadas en la evaluación de la amenaza sísmica de Neiva, en régimen cortical y de subducción. Derecha) Zoom de las zonas corticales (arriba) y de subducción (abajo), indicando el área de influencia sobre Neiva con el círculo rojo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 91. Sismicidad asociada a las zonas corticales (izquierda), de subducción interfase (centro) y de subducción intraplaca (derecha).



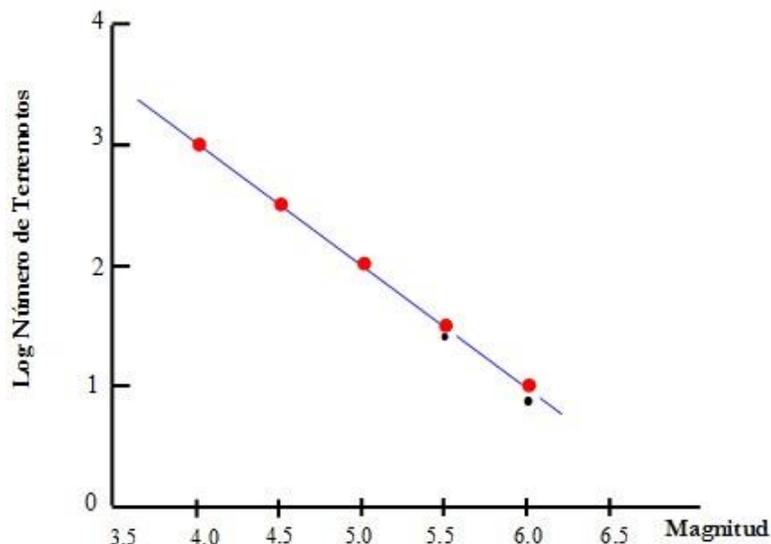
Fuente: Elaboración propia

Tras la definición de las zonas y sus límites, se requiere caracterizar su sismicidad, lo que supone deducir, para cada zona definida, la ley de recurrencia de sismos en función de su magnitud, así como la magnitud máxima creíble en la zona. Existen varios modelos que representan la recurrencia temporal de terremotos. En este trabajo se asume un modelo de Gutenberg y Richter (1942), que establece que el logaritmo del número de terremotos,  $N$ , cuya magnitud es igual o mayor a una magnitud dada,  $m$ , está relacionado linealmente con esa magnitud:

$$\log N = a + b \cdot m \quad [\text{Ec. 6}]$$

donde los coeficientes  $a$  y  $b$  son constantes que se deben determinar en el ajuste de los datos. El parámetro  $b$  es un número negativo que da una estimación de la proporción entre terremotos grandes y pequeños que ocurren en una zona. El parámetro  $a$  está relacionado con el número de terremotos que ocurren en la misma y superan una magnitud mínima. (Figura 92).

Figura 92. Modelo de Gutenberg-Richter que representa el patrón de recurrencia de sismos dentro de cada zona sismogénica.



Fuente: Elaboración propia

La tasa de ocurrencia  $\zeta(m)$  de terremotos que exceden una magnitud  $m$ , comprendida entre la magnitud umbral  $M_0$  y la magnitud máxima de la zona  $M_{max}$ , viene dada por la expresión:

$$\zeta(m) = \zeta_0 \cdot (e^{-\beta m} - e^{-\beta M_{max}}) / (e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_{max}}) \quad [\text{Ec. 7}]$$

donde  $\beta = b \cdot \ln 10$  y  $\zeta_0$  es la tasa anual de ocurrencia de sismos en la zona considerada.

Así pues, los parámetros que definen la sismicidad en cada zona, necesarios para el cálculo de la amenaza, son las magnitudes máxima y mínima,  $M_{max}$  y  $M_0$ , la tasa de ocurrencia de sismos por encima de la magnitud mínima  $M_0$ , y la pendiente de la relación de Gutenberg-Richter,  $\beta$ . Estos parámetros caracterizan el patrón de sismicidad de cada zona, y configuran su ley de recurrencia.

**Magnitudes máximas de las fuentes**

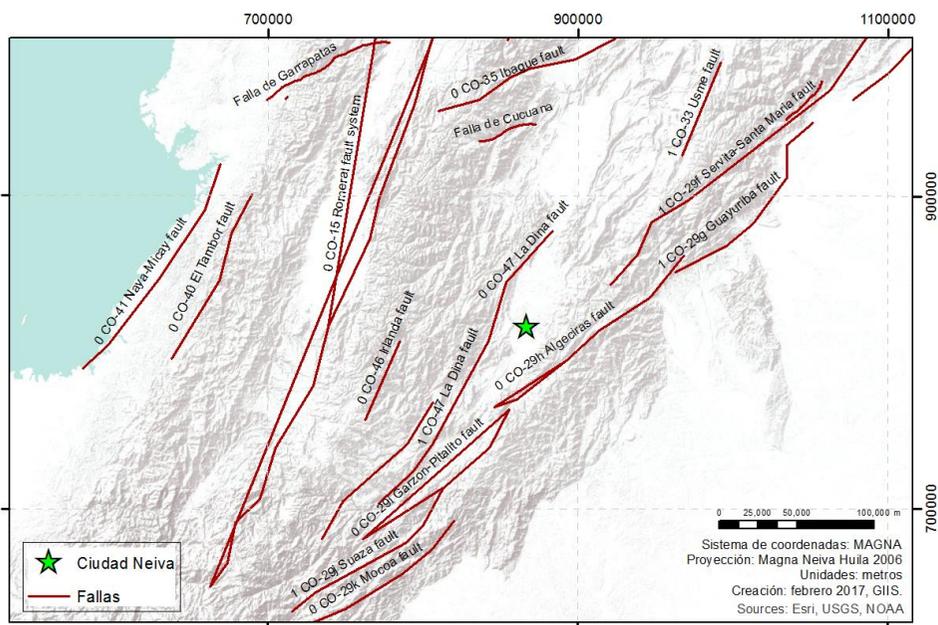
La definición de la magnitud máxima ( $M_{m\acute{a}x}$ ) de cada zona es clave en todo estudio de peligrosidad. Esta se identifica con la magnitud del máximo sismo creíble y conlleva notable incertidumbre. Del catálogo sísmico se puede deducir la magnitud máxima observada en la zona, pero esta puede ser inferior a la del sismo máximo que pueda ser generado en las fallas existentes. De hecho, el catálogo sísmico suele no cubrir ciclos completos de fallas, y por tanto la magnitud del máximo sismo potencial puede ser superior a la  $M_{m\acute{a}x}$  observada en el catálogo. Para tener en cuenta esta incertidumbre sobre la  $M_{m\acute{a}x}$  de cada zona, se ha considerado una distribución Gaussiana definida por los parámetros:

- **M1**: magnitud máxima observada en la zona (derivada del catálogo sísmico), que corresponde al umbral inferior de la distribución de  $M_{m\acute{a}x}$ .
- **M2**: magnitud máxima acorde con la tectónica de la zona, que corresponde al umbral superior de la distribución de  $M_{m\acute{a}x}$ .
- **E (m)**: magnitud máxima esperada, que corresponde a la  $M_{m\acute{a}x}$  que se considera más probable.
- $\sigma$ : desviación estándar de la distribución de  $M_{m\acute{a}x}$ .

Para establecer la magnitud máxima esperada en las fuentes que contienen las fallas activas estudiadas, se evaluaron las magnitudes máximas posibles de todas las fallas a partir de su geometría y se compararon con las magnitudes máximas esperadas en estas zonas de acuerdo a la distribución de Gauss. Se estableció como magnitud máxima esperada en cada zona el mayor valor obtenido de la comparación, y como magnitud máxima media el valor medio entre la magnitud máxima esperada y la magnitud máxima observada en el catálogo. El valor de sigma para estas magnitudes se establece como el intervalo entre las magnitudes máxima esperada y observada con respecto a la magnitud media estimada.

A continuación en la Figura 93 se muestra el mapa de fallas activas localizadas en el área de influencia de Neiva.

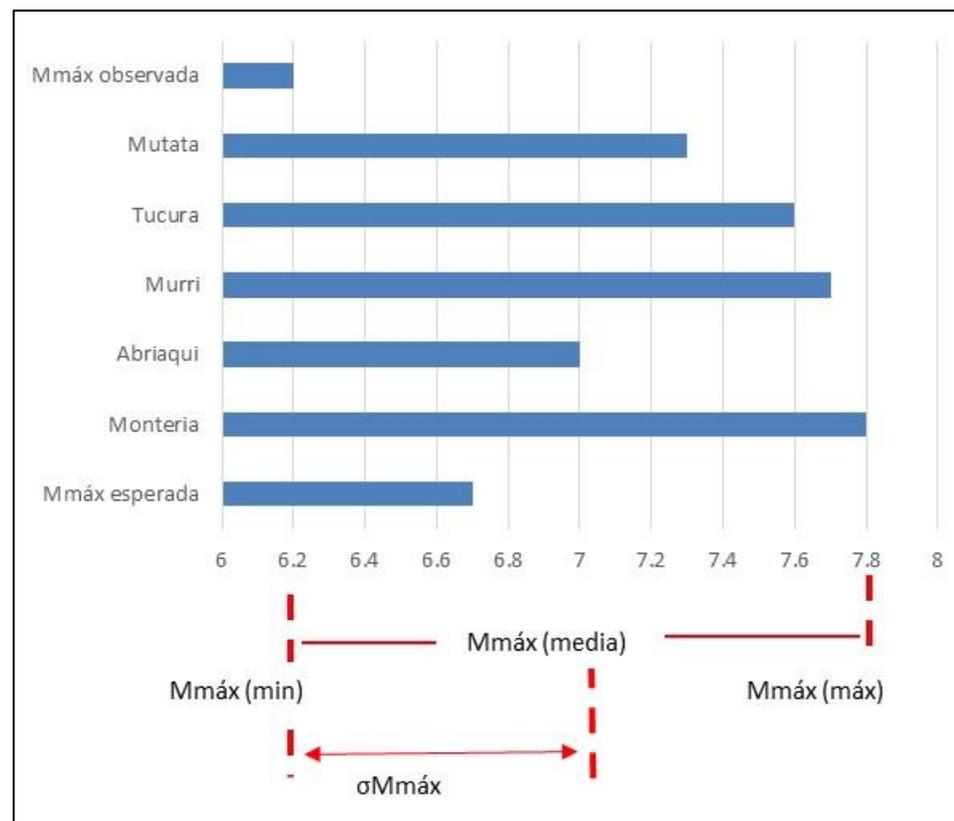
Figura 93. Mapa de fallas activas localizadas en el área de influencia de la ciudad de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 94 muestra, a modo de ejemplo, la comparación entre las magnitudes máximas de las fallas activas y las observadas en una de las zonas con fallas activas de ciudad de Neiva.

Figura 94. Distribución de magnitudes máximas de las fallas contenidas en la zona 7.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 53, mostrada a continuación, presenta los valores resultantes de Mmáx para cada zona, junto con los parámetros sísmicos que definen la recurrencia de las mismas.

Tabla 53. Tabla de fallas activas contenidas en zonas corticales y sus respectivos parámetros sísmicos.

| Zona           | Nombre de Falla     | Buzamiento | Acimut      | Longitud | Slip rate (mm/año) | Mw máx |
|----------------|---------------------|------------|-------------|----------|--------------------|--------|
| <b>Zona 18</b> | Servita-Santa María | 40°W       | N42.3°E±15° | 509.8    | 1.0-5              | 7.8    |
|                | Guaicaramo Central  | 35°W       | N25.9°E±17° | 123.8    | 1.0-5              | 7.3    |
|                | Guayuriba           | 35°W       | N40.7°E±25° | 142.3    | 1.0-5              | 7.9    |
|                | Guaicaramo Norte    | 35°W       | N19.5°E±20° | 167.2    | 1.0-5              | 7.8    |
|                | Guaicaramo Sur      | 35°W       | N45.6°E±9°  | 130.6    | 1.0-5              | 7.6    |
|                | Yopal               | NE         | N26.9°E±21° | 232      | 1.0-5              | 7.7    |
| <b>Zona 21</b> | Ibague              | 90°        | N67.9°E±11° | 126.1    | 1.0-5              | 7.6    |
|                | Honda               | E          | N16.6°E±12° | 188.8    | < 1                | 7.6    |
| <b>Zona 22</b> | Palestina           | 75°W       | N17.8°E±11° | 430.6    | 0.2-1              | 7.8    |
| <b>Zona 23</b> | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
| <b>Zona 24</b> | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
|                | Urrao               | 90°        | N3.6°E±1°   | 30.5     | 0.2-1              | 6.8    |
| <b>Zona 25</b> | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
| <b>Zona 26</b> | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
| <b>Zona 27</b> | Ibague              | 90°        | N67.9°E±11° | 126.1    | 1.0-5              | 7.6    |
|                | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
| <b>Zona 28</b> | Romeral             | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
| <b>Zona 29</b> | La Dina             | 50°W       | N32.9°E±13° | 206.9    | 0.2-1              | 7.7    |
|                | Usme                | 85°E       | N22.7°E±6°  | 65.1     | 1.0-5              | 7.4    |
| <b>Zona 30</b> | Servita-Santa María | 40°W       | N42.3°E±15° | 509.8    | 1.0-5              | 7.8    |
|                | Algeciras           | 90°        | N51.6°E±12° | 159.2    | 1.0-5              | 8.0    |
|                | Suaza               | 45°E       | N50.9°E±9°  | 129.4    | 0.2-1              | 7.9    |
|                | Guayuriba           | 35°W       | N40.7°E±25° | 142.3    | 1.0-5              | 7.9    |
|                | Garzon-Pitalito     | 80°E       | N48.9°E±13° | 128.7    | 1.0-5              | 7.9    |

| Zona           | Nombre de Falla   | Buzamiento | Acimut      | Longitud | Slip rate (mm/año) | Mw máx |
|----------------|-------------------|------------|-------------|----------|--------------------|--------|
|                | La Dina           | 50°W       | N32.9°E±13° | 206.9    | 0.2-1              | 7.7    |
|                | Usme              | 85°E       | N22.7°E±6°  | 65.1     | 1.0-5              | 7.4    |
| <b>Zona 31</b> | La Plata (Chusma) | 50°W       | N39.0°E±12° | 115.1    | 0.2-1              | 7.8    |
|                | La Dina           | 50°W       | N32.9°E±13° | 206.9    | 0.2-1              | 7.7    |
| <b>Zona 32</b> | Irlanda           | 90°        | N23.9°E±4°  | 54.7     | < 0.2              | 7.4    |
| <b>Zona 33</b> | Romeral           | 65°E       | N17.6°E±16° | 1787.9   | < 0.2              | 8.1    |
|                | Guaitara          | 80°E       | N44.1°E±4°  | 36.1     | 0.2-1              | 7.2    |
| <b>Zona 35</b> | El Tambor         | 80°E       | N26.1°E±9°  | 118.7    | < 0.2              | 7.8    |
|                | Naya-Micay        | E          | N34.1°E±12° | 160.6    | 0.2-1              | 8.0    |
| <b>Zona 37</b> | Mocoa             | W          | N55.1°E±11  | 119.1    | 0.2-1              | 7.8    |
|                | Afiladores        | W          | N52.1°E±10° | 101.2    | 0.2-1              | 7.8    |

Fuente: Elaboración propia

➤ LEYES DE ATENUACIÓN O MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE.

Una vez definidas las características de la sismicidad de las zonas que rodean a la población de Neiva, se precisa conocer el movimiento esperado del terreno a causa de los sismos originados en cualquiera de esas fuentes. Esto se hace aplicando modelos del movimiento fuerte, que permiten estimar el movimiento causado en un cierto emplazamiento por el movimiento generado en la fuente, a una cierta distancia del mismo. Estos modelos proporcionan una estimación del parámetro característico del movimiento, para una magnitud y una distancia fuente-emplazamiento concreta, y reflejan la atenuación que experimenta el movimiento en su recorrido de la fuente al emplazamiento.

Los modelos del movimiento pueden ser empíricos y teóricos. Los modelos empíricos se deducen a partir de datos acelerométricos de diferentes terremotos mediante análisis de regresión y ajuste a una cierta expresión matemática. Los modelos teóricos se construyen a partir de un modelo físico de generación, propagación y amplificación local de la energía sísmica.

La mayor parte de los modelos del movimiento no considera detalles de la fuente, limitándose a incluir una medida del tamaño del sismo producido en la misma, que normalmente es la magnitud  $M$ . El efecto de propagación a través del medio se suele dividir en dos términos dependientes de la distancia fuente-emplazamiento,  $R$ . Uno de ellos da cuenta de la atenuación por la expansión geométrica del frente de ondas y es proporcional a una potencia negativa de  $R$ . El otro se refiere a la atenuación por absorción inelástica y decae exponencialmente con la distancia ( $e^{-R}$ ). Finalmente, el efecto de amplificación o atenuación de la energía sísmica debido a las características del terreno en el emplazamiento es el más difícil de precisar. Normalmente, este efecto de sitio se incluye en los modelos del movimiento a través de un coeficiente que depende del tipo de suelo en el que se encuentra el emplazamiento (suelo duro, suelo blando, suelo aluvial, roca, etc.) y del espesor del paquete sedimentario (si lo hubiere). Este efecto viene representado por un factor  $S$  en los modelos.

Así pues, el modelo del movimiento suele tomar una expresión que contiene, al menos, un término de magnitud, otros dos de distancia que reflejan los distintos tipos de atenuación, y un término característico del suelo.

Al no existir modelos desarrollados para Colombia, se efectuó un estudio de modelos publicados y se seleccionaron los más idóneos para nuestra región de estudio, deducidos para zonas con afinidad tectónica y que puedan reflejar así, de la mejor manera, la atenuación de las ondas sísmicas en el entorno de Neiva. Finalmente se seleccionaron los modelos de Campbell y Bozornia (2013), Zhao et al (2006) y Youngs et al (1997), para los diferentes regímenes tectónicos. Estos modelos se combinarán en un árbol lógico compuesto por un nodo para contemplar la incertidumbre inherente a la atenuación. A continuación se describen brevemente los modelos de atenuación utilizados.

#### CB13. Campbell y Bozornia 2013

Este modelo, es la nueva versión del modelo publicado por los mismos autores en Campbell y Bozornia 2008. Al igual que en la versión anterior, el modelo nuevo incluye parámetros referentes a la magnitud, la atenuación geométrica, el mecanismo focal, el efecto hanging-

wall y la respuesta lineal y no lineal del efecto de sitio. También se han añadido nuevos términos y variables, incluyendo un nuevo efecto de hanging-wall y las variables de profundidad hipocentro ( $Z_{hyp}$ ), buzamiento ( $dip$ ) y una regionalización de la atenuación anelástica.

Las características de la fuente sísmica vienen definidas por la magnitud ( $M_w$ ), la profundidad a la parte superior de la ruptura ( $Z_{tor}$ ), el mecanismo focal, el buzamiento ( $dip$ ) y el ancho del plano de ruptura ( $W$ ).

La distancia fuente-emplazamiento se define por medio de la distancia más cercana al plano de ruptura ( $R_{rup}$ ), la distancia  $R_{jb}$  y la distancia  $R_x$ . El efecto de sitio es incluido por medio de la  $V_{s30}$  y la profundidad del sedimento ( $Z_{2.5}$ ).

#### Modelo Zhao 2006

Para las zonas de subducción (Interfase e Intraplaca) se utilizarán los modelos de Youngs et. al (1997) y Zhao et. al (2006), por ser los modelos de atenuación más apropiados para este tipo de fuentes, y por cumplir con las condiciones de distancia y rango de magnitudes contempladas en este estudio.

#### Modelo Youngs (1997)

Modelo para zonas de subducción, obtenido a partir de datos de todo el mundo, ofrece coeficientes para PGA, PGV y SA de periodos que llegan hasta 3 segundos. Diferencia fuentes *in slab* e *interface*, asociadas a fallas inversas y normales, respectivamente. La regresión se hace con 66 y 98 registros obtenidos en campo libre para fuentes *in slab* e *interface*, respectivamente. Destaca la menor tasa de atenuación de movimientos pico obtenida en comparación con las fuentes sísmicas corticales. Tiene en cuenta la profundidad y la desviación estándar depende de la magnitud. Usa categorías de suelo para tener en cuenta el efecto local, en función del espesor de la capa sedimentaria.

La Tabla 54 y Tabla 55 muestran las características principales de los modelos antes descritos.

Tabla 54. Características de los modelos de atenuación empleados en el estudio para las zonas de sismicidad cortical.

| Ecuación                                  | Base de datos | Componente utilizada para (PGA, SA) | Tipo de fuentes | Dist. (km) | M <sub>w</sub> |
|---|---------------|-------------------------------------|-----------------|------------|----------------|
| <i>Campbell y Bozorgnia et al. (2013)</i> | Mundial       | Media geométrica                    | Cortical        | 0-300      | 3-8.5          |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Características de los modelos de atenuación utilizados para las zonas de Interplaca e Intraplaca (Subducción)

| Ecuación                    | Base de datos | Componente utilizada para (PGA, SA) | Tipo de fuentes                      | Dist. (km) | M <sub>w</sub> |
|-----------------------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------|----------------|
| <i>Youngs et al. (1997)</i> | Mundial       | Media geométrica                    | Interplaca<br>Intraplaca             | 10-500     | 5,0-8,5        |
| <i>Zhao et al. (2006)</i>   | Japón         | Media geométrica                    | Interplaca<br>Intraplaca<br>Cortical | 10-300     | 5,0-8,2        |

Fuente: Elaboración propia

➤ **CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA (CONDICIONES DE ROCA)**

Después de caracterizar las fuentes sismogénicas y seleccionar los modelos que mejor reproduzcan la atenuación, se calcula la probabilidad de que los terremotos generados en las diversas fuentes produzcan un movimiento en el emplazamiento que iguale o rebase un nivel de amplitud preestablecido. El resultado se obtiene resolviendo la integral de

peligrosidad, que se refiere a un emplazamiento dado y se define como la probabilidad de excedencia de un valor dado del parámetro del movimiento.

La peligrosidad sísmica se ha estimado en términos de los siguientes parámetros de movimiento: aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales SA referentes a 9 periodos estructurales T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, y 2.0 segundos, todas ellas expresadas en g. Los cálculos se han hecho primeramente sin considerar el efecto local, de modo que las aceleraciones que se obtienen en la primera fase representarán el movimiento esperado en emplazamientos genéricos en roca. Estas aceleraciones se estiman con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (periodo de retorno PR 475 años) y 5% en 50 años (PR 975 años).

El cálculo se efectuará en una malla de puntos compuesta por 40x34 nodos, separados en 0.005 grados de latitud y longitud, respectivamente. La malla está encuadrada en un polígono limitado por la latitud 2.87 N a 3.02N y la longitud 75.35 a 75.16W, cubriendo la ciudad de Neiva completamente.

El programa utilizado para desarrollar el cálculo probabilista de la peligrosidad es el Software libre CRISIS2012, desarrollado por Ordaz y colaboradores en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ordaz et al., 2014). Este programa resuelve la integral de peligrosidad numéricamente, discretizando las funciones de probabilidad en intervalos de magnitud y distancias finitos.

**Árbol Lógico**

Para cuantificar las incertidumbres epistemológicas inherentes a los modelos utilizados se realizó un árbol lógico para incluir las diferentes combinaciones entre los modelos de atenuación elegidos y descritos en el apartado 3.1.

El árbol consta de un nodo con cuatro ramas que corresponden a cuatro combinaciones de modelos de atenuación, combinando siempre uno para régimen cortical, otro de subducción interfase y otro de subducción intraplaca. Las cuatro ramas de modelo de atenuación han sido ponderadas equitativamente. Estas ramas son:

- CB13-Y-Z: correspondiente a la asignación del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013) para las zonas corticales, Youngs et. al (1997) para las zonas de subducción interfase y Zhao et. al (2006) para las zonas de subducción intraplaca.
- CB13-Z-Z: correspondiente a la asignación del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013) para las zonas corticales, y Zhao et. al (2006) para las zonas de subducción interfase y de subducción intraplaca.
- CB13-Y-Y: correspondiente a la asignación del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013) para las zonas corticales, Youngs et al (1997) para zonas de subducción interfase y para las zonas de subducción intraplaca.
- CB13-Z-Y. correspondiente a la asignación del modelo de Campbell y Bozorgnia (2013) para las zonas corticales, Zhao et. al (2006) para las zonas de subducción interfase y Youngs et al (1997) para las zonas de subducción intraplaca.

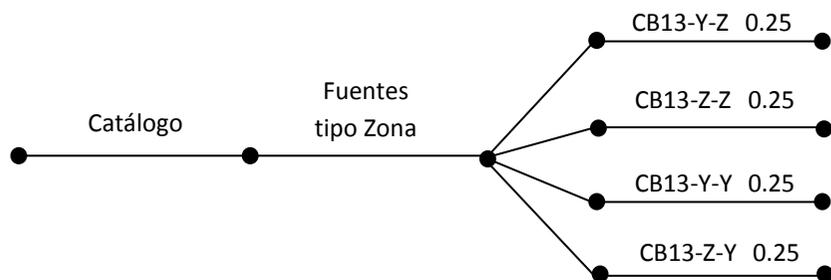
➤ **DESAGREGACIÓN DE LA AMENAZA: IDENTIFICACIÓN DE SISMOS DE CONTROL**

Los métodos probabilistas de evaluación de la peligrosidad dan como resultado una curva que representa las probabilidades de excedencia de determinados niveles de movimiento en cada punto a causa de la ocurrencia de terremotos en cualquiera de las zonas sismogénicas englobadas en la zona de influencia. Dicha curva integra la acción de todas las zonas que puedan contribuir al movimiento esperado en el emplazamiento en cuestión. Más concretamente, el cálculo de la amenaza requiere sumar las contribuciones de aquellos conjuntos de valores magnitud-distancia- que efectivamente contribuyen a la excedencia del movimiento objeto (umbral fijado). Sin embargo, la curva de peligrosidad no da información específica sobre las características del sismo (fundamentalmente tamaño y localización) que con mayor probabilidad causará la excedencia del movimiento en el emplazamiento o población de estudio, también denominado terremoto de control para el periodo espectral considerado. Determinar las características de este sismo requiere encontrar el conjunto de valores de las variables magnitud y distancia (en adelante denominado par (m, r)) que presentan mayor contribución a la peligrosidad. Este proceso de descomposición de la peligrosidad total en contribuciones parciales, debidas a los sismos caracterizados por un par (m-r) se conoce como desagregación de la peligrosidad (Bernreuter, 1992). Precisamente el par (m-r) que presente una mayor contribución representa el sismo de control (Bazzurro y Cornell, 1999).

En nuestro caso, se ha realizado la desagregación para los movimientos objeto dados por los valores de PGA y para las aceleraciones espectrales SA (1s) resultantes del análisis previo de peligrosidad, con el fin de encontrar los sismos que más contribuyen al corto y largo periodo del movimiento.

La Figura 96, Figura 97, Figura 98 y Figura 99 muestran los resultados de desagregación para los movimientos objeto dados por los valores de PGA y Sa (1s) para periodos de retorno de 475 años y 975 años. La Tabla 56 y la Tabla 57 resumen los pares (M, R) asociados a los sismos de control obtenidos y la Tabla 58 identifica los correspondientes escenarios sísmicos.

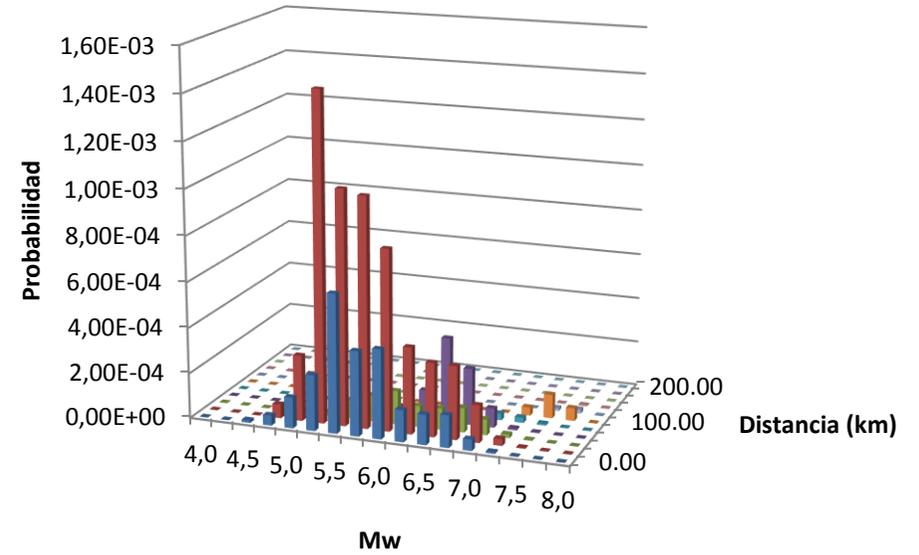
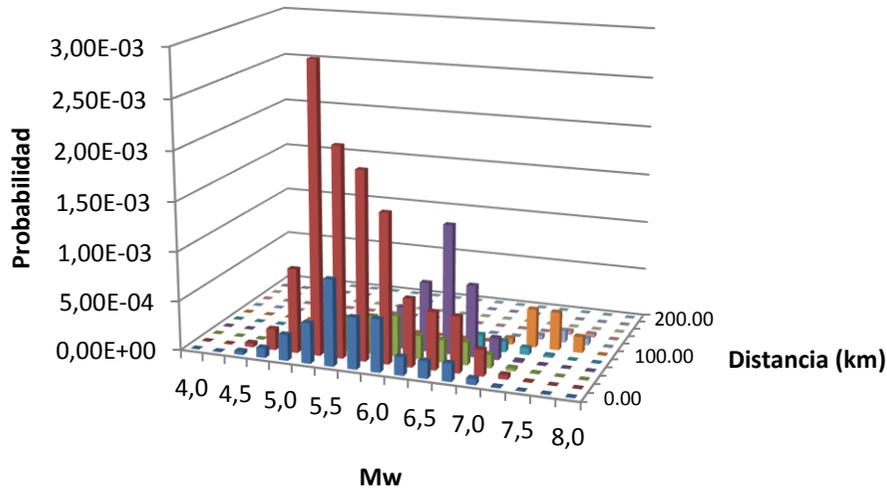
Figura 95. Árbol lógico generado para el cálculo de peligrosidad probabilista (PSHA).



Fuente: Elaboración propia

Figura 96. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 475 años.

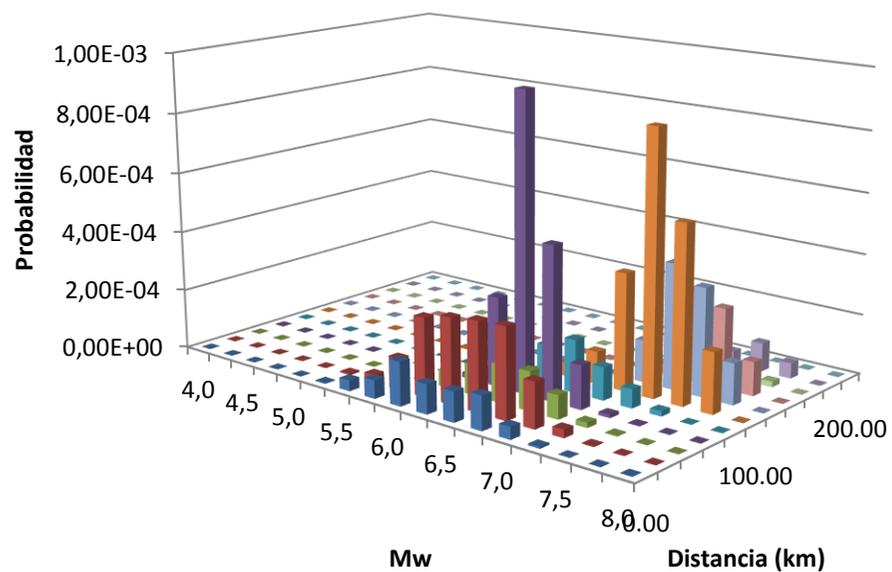
Figura 97. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 975 años.



Fuente: Elaboración propia

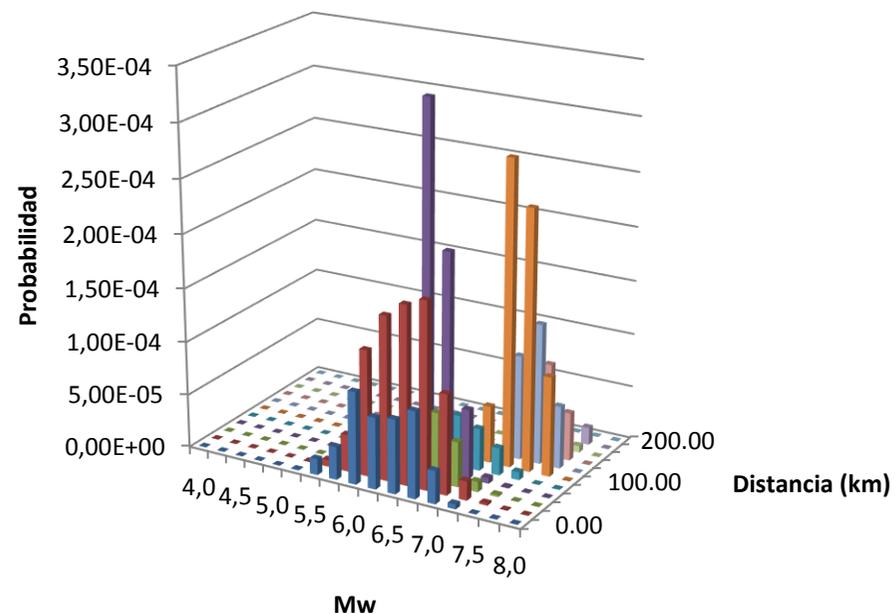
Fuente: Elaboración propia

Figura 98. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la Sa (1s) en un periodo de retorno de 475 años.



Fuente: Elaboración propia

Figura 99. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la Sa (1s) en un periodo de retorno de 975 años.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Sismos de control obtenidos por desagregación para un periodo de retorno de 475 años:

| Ordenada espectral | Magnitud (Mw) | Distancia R |
|--------------------|---------------|-------------|
| PGA                | Mw 5.3-5.6    | 0-20 km     |
| SA(1s)             | Mw 7.2-7.4    | 180-200 km  |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Sismos de control obtenidos por desagregación para un periodo de retorno de 975 años:

| Ordenada espectral | Magnitud (Mw) | Distancia R |
|--------------------|---------------|-------------|
| PGA                | Mw 7.1-7.4    | 180-200 km  |
| SA(1s)             | Mw 7.2-7.4    | 180-200 km  |

Fuente: Elaboración propia

Estos sismos de control han sido asociados a fuentes sísmicas potenciales concretas identificándose los escenarios sísmicos con doble carácter determinista-probabilista que se indican en la Tabla 58.

Tabla 58. Escenarios sísmicos identificados para los dos ismos de control resultantes

| Escenario   | PR  | Localización               | Mw  | R      |
|-------------|-----|----------------------------|-----|--------|
| Escenario 1 | 475 | Falla La Dina              | 5.5 | 20 km  |
| Escenario 2 | 975 | Zona de Subducción (src44) | 7.3 | 180 km |

Fuente: Elaboración propia

➤ **CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y EFECTO LOCAL PARA CIUDAD DE NEIVA.**

La evaluación del efecto local o de sitio requiere conocer la composición del suelo en el emplazamiento, a efectos de caracterizar su comportamiento ante la sacudida sísmica. En general, los suelos poco consolidados (terrenos aluviales, depósitos recientes poco cohesionados) tienden a amplificar mucho el movimiento, mientras que los terrenos compactos apenas lo amplifican.

Para caracterizar el efecto local del movimiento esperado, se ha partido del *Mapa de Zonificación Geotécnica de Neiva* realizado por el Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana (Inst. Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A (2000)) en su estudio de Amenaza y microzonificación sísmica, vulnerabilidad estructural y evaluación de escenarios de daño, en el año 2000, en el que se describen siete clases de suelo en la ciudad de Neiva.

Este mapa ha tenido que ser digitalizado, dado que no estaba disponible en soporte digital. Tras ello, el mapa ha sido incluido en el SIG del proyecto y se ha procedido a su análisis para establecer las clases de suelo atendiendo al comportamiento sísmico sobre las que se asienta la ciudad de Neiva.

Para ello, se ha establecido una correspondencia entre las descripciones geológicas incluidas en sus leyendas y los parámetros geotécnicos característicos de cada suelo, como el N<sub>spt</sub> (número de golpes en los ensayos de penetración estándar) y la velocidad de ondas de cizalla en los 30 primeros metros, Vs<sub>30</sub>.

Finalmente, de cara a identificar los factores de amplificación, se estableció una correspondencia entre los tipos de suelos encontrados en Neiva con los correspondientes a la clasificación del NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program, 2009). Esta diferencia cinco tipos de suelo caracterizados por su Vs<sub>30</sub>, asignando a cada uno un factor de amplificación sobre el corto y largo periodo del movimiento. Estos factores de amplificación definen el llamado efecto local o efecto de sitio, que se deberá superponer a las aceleraciones estimadas en condiciones de roca, para dar como resultado aceleraciones más realista incluyendo ya el comportamiento de cada tipo de suelo sobre el movimiento sísmico. La clasificación de NEHRP adoptada se muestra en la Tabla 59.

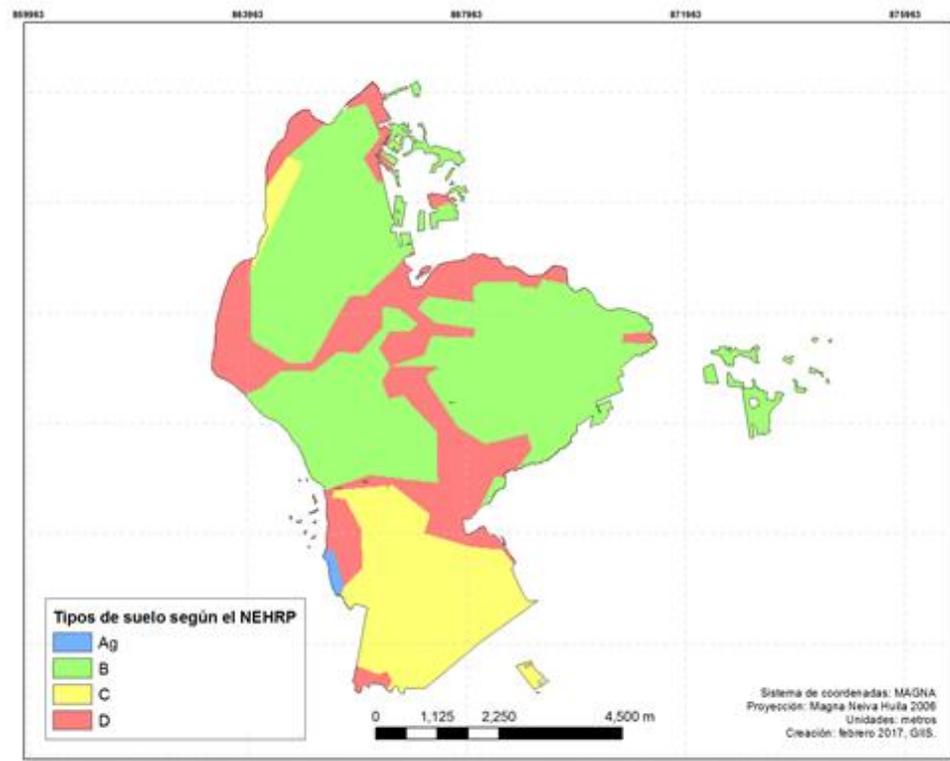
Tabla 59. Clasificación de suelo del NEHRP.

| Descripción Geotécnica                  | Valor aproximado Vs (m/s) | Clasificación (NEHRP-2009) |
|---|---------------------------|----------------------------|
| Roca dura                               | >1500                     | A                          |
| Roca                                    | 760 < Vs30 < 1500         | B                          |
| Suelo muy denso y roca suave            | 360 < Vs30 < 760          | C                          |
| Suelos no cohesivos                     | 180 < Vs30 < 360          | D                          |
| Suelo blando                            | < 180                     | E                          |
| Requiere evaluación específica en sitio | ...                       | F                          |

Fuente: Elaboración propia

El mapa de suelos de Neiva finalmente desarrollado para este estudio se muestra en la Figura 100.

Figura 100. Mapa de tipos de suelos en Neiva derivado del mapa geotécnico de la ciudad. Se adopta la clasificación de suelos del NEHRP.



Fuente: Elaboración propia

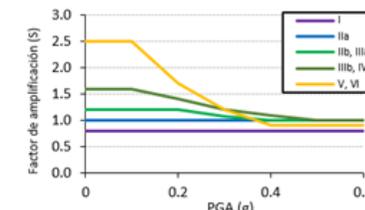
**Factores de amplificación**

Una vez definidos los tipos de suelo existentes en la región de estudio, la consideración del efecto local requiere evaluar o asignar los factores de amplificación correspondientes a cada tipo de suelo identificado en la ciudad.

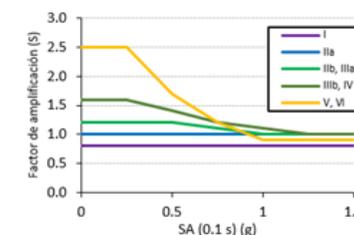
Para ello se han revisado los factores de amplificación establecidos en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Estos factores coinciden para corto y largo periodo con los factores de amplificación del NEHRP, 2009. En ambas normativas se cuantifican dichos factores tanto para la aceleración pico PGA como para aceleraciones espectrales de corto y largo periodo, SA (0.1s) y SA (1s). Los factores de amplificación asumidos dependen además del nivel de movimiento de entrada, teniendo en cuenta el carácter no lineal de la amplificación local, que suele ser mayor para los movimientos débiles que para los fuertes. Estos factores, que han sido considerados en nuestro estudio, se incluyen en la Tabla 60 y se muestran en las figuras asociadas.

Tabla 60. Factores de amplificación para diferentes tipos de suelo, periodos estructurales y valores de aceleración base.

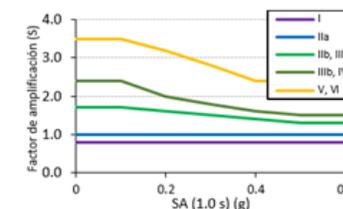
| Site Class | Mapped MCE Geometric Mean Peak Ground Acceleration, PGA |           |           |           |           |
|------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
|            | PGA ≤ 0.1   | PGA = 0.2 | PGA = 0.3 | PGA = 0.4 | PGA ≥ 0.5 |
| A          | 0.8   | 0.8       | 0.8       | 0.8       | 0.8       |
| B          | 1.0   | 1.0       | 1.0       | 1.0       | 1.0       |
| C          | 1.2   | 1.2       | 0.1       | 1.0       | 1.0       |
| D          | 1.6   | 1.4       | 1.2       | 1.1       | 1.0       |
| E          | 2.5   | 1.7       | 1.2       | 0.9       | 0.9       |
| F          | See Section 11.4.7                                      |           |           |           |           |



| Site Class | Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period |          |           |          |           |
|------------|--|----------|-----------|----------|-----------|
|            | Ss ≤ 0.25  | Ss = 0.5 | Ss = 0.75 | Ss = 1.0 | Ss ≥ 1.25 |
| A          | 0.8  | 0.8      | 0.8       | 0.8      | 0.8       |
| B          | 1.0  | 1.0      | 1.0       | 1.0      | 1.0       |
| C          | 1.2  | 1.2      | 0.1       | 1.0      | 1.0       |
| D          | 1.6  | 1.4      | 1.2       | 1.1      | 1.0       |
| E          | 2.5  | 1.7      | 1.2       | 0.9      | 0.9       |
| F          | See Section 11.4.7                                       |          |           |          |           |



| Site Class | Spectral Response Acceleration Parameter at 1-Second Period |          |          |          |          |
|------------|---|----------|----------|----------|----------|
|            | S1 ≤ 0.1  | S1 = 0.2 | S1 = 0.3 | S1 = 0.4 | S1 ≥ 0.5 |
| A          | 0.8   | 0.8      | 0.8      | 0.8      | 0.8      |
| B          | 1.0   | 1.0      | 1.0      | 1.0      | 1.0      |
| C          | 1.7   | 1.6      | 1.5      | 1.4      | 1.3      |
| D          | 2.4   | 2.0      | 1.8      | 1.6      | 1.5      |
| E          | 3.5   | 3.2      | 2.8      | 2.4      | 2.4      |
| F          | See Section 11.4.7  |          |          |          |          |



Fuente: Elaboración propia

### Caracterización del movimiento incluyendo el efecto local.

Finalmente, los movimientos obtenidos en el cálculo de la amenaza en roca, se combinan con el mapa de clasificación de suelos obtenido en el análisis geotécnico y se aplican los factores de amplificación de cada clase identificados en el apartado anterior. Resultan así los mapas de aceleración incluyendo el efecto local:

$$SA(s) = FSA(s) * SA(r) \quad [6.3]$$

Siendo SA (S) aceleración espectral en suelo

FSA Factor de amplificación sobre una cierta ordenada espectral

SA (r) (aceleración espectral en roca

LA aceleración pico PGA se identifica con la aceleración espectral SA para periodo T=0.

#### 6.2.4 Resultados

Los resultados de cálculo de la amenaza, permiten caracterizar el movimiento esperado por sismos futuros con una cierta probabilidad de excedencia., en función del periodo de retorno asumido. Con el fin de caracterizar de forma completa el movimiento derivado el análisis de amenaza, se presentan los siguientes resultados, tanto para emplazamientos genéricos en roca como incluyendo el efecto local del suelo:

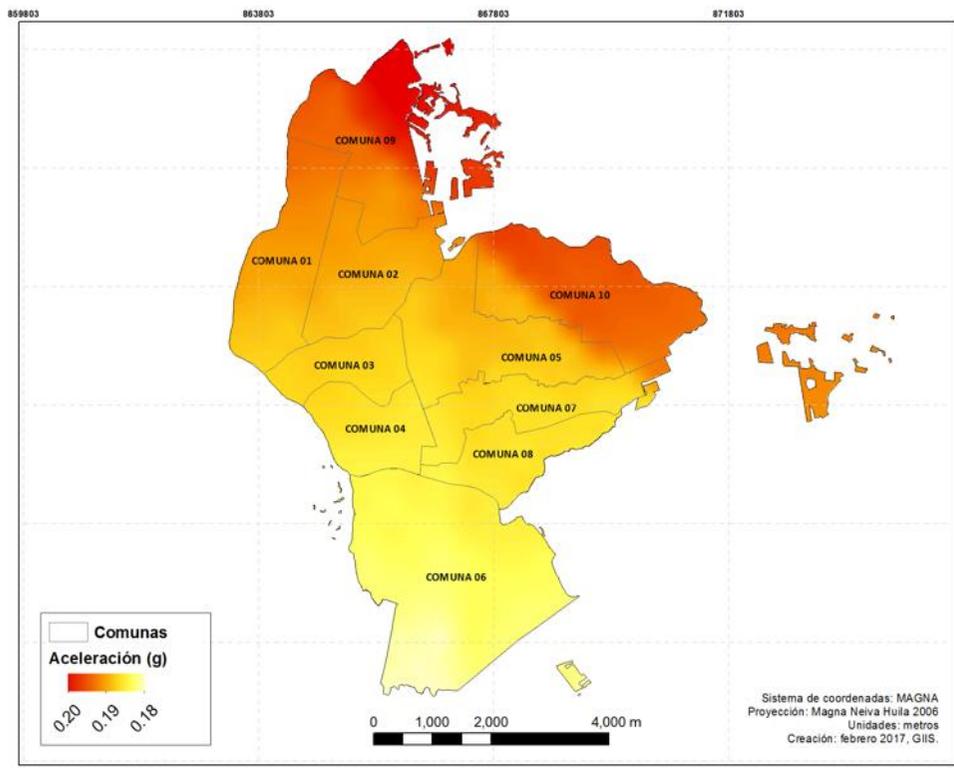
- Mapas del movimiento esperado con probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años (PR de 475 años), en términos de aceleraciones pico, PGA y espectrales de corto periodo Sa (0.1 s) y largo periodo SA (1 s).
- Mapas del movimiento esperado con probabilidad de excedencia de 5 % en 50 años (PR de 975 años), en términos de aceleraciones pico, PGA y espectrales de corto periodo Sa (0.1 s) y largo periodo Sa (1 s).
- Espectros de amenaza uniforme UHS en diferentes puntos de la ciudad de Neiva, para periodos de retorno de 475 y 975 años.

### ➤ MAPAS DE ACELERACIÓN EN ROCA

Los mapas resultantes reflejan el movimiento esperado para los periodos de retorno de 475 años y 975 años estimado en roca en cada punto del territorio de ciudad de Neiva, obtenidos en términos de PGA y para las ordenadas espectrales de 0.1 y 1.0s.

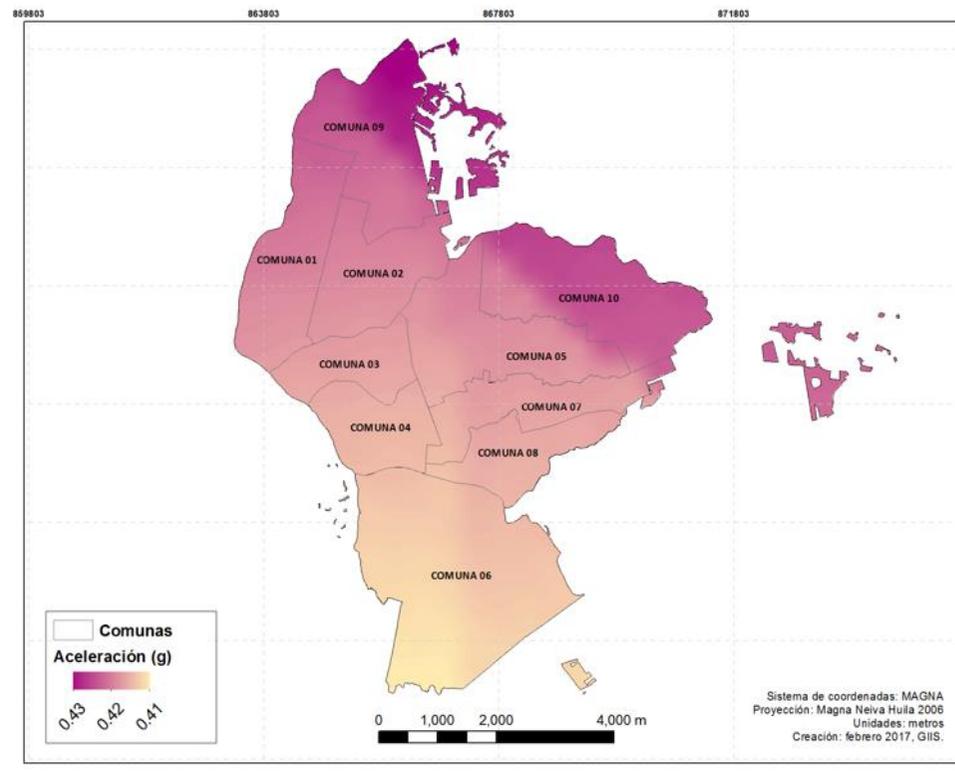
La Figura 101, Figura 102 y Figura 103 muestran las aceleraciones pico (PGA) y espectrales SA(0.1s) y SA(1 s) obtenidas para el periodo de retorno de 475 años y la Figura 104, Figura 105 y Figura 106, para el periodo de retorno de 975 años.

Figura 101. Mapa de PGA en roca para PR 475 años



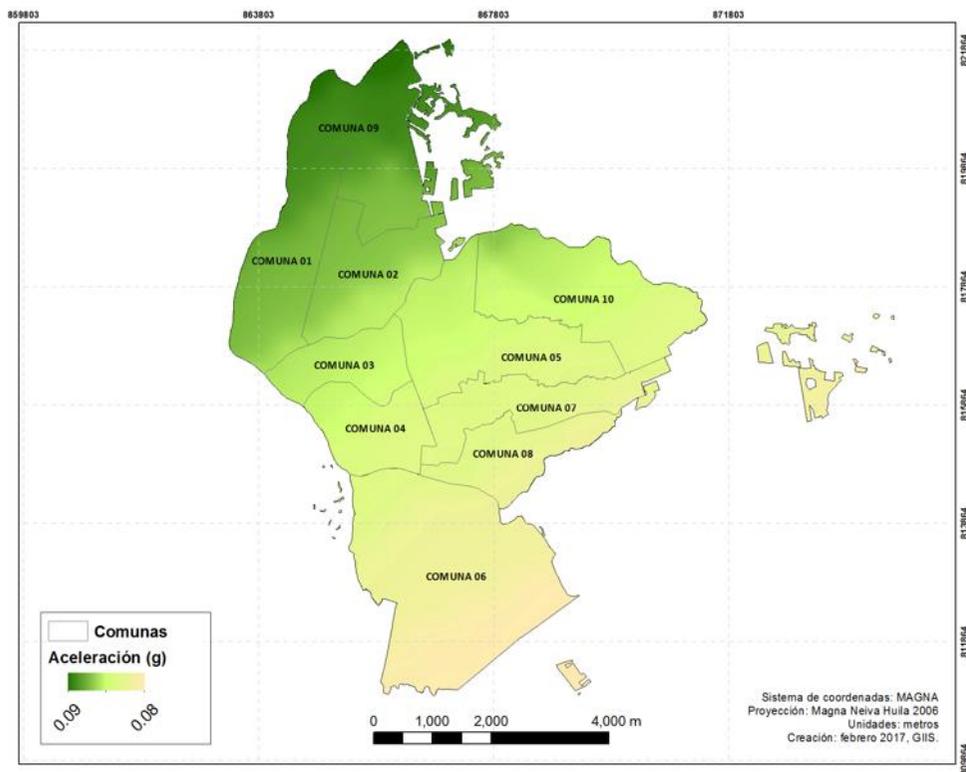
Fuente: Elaboración propia

Figura 102. Mapa de aceleraciones Sa (0.1s) en roca para PR 475 años



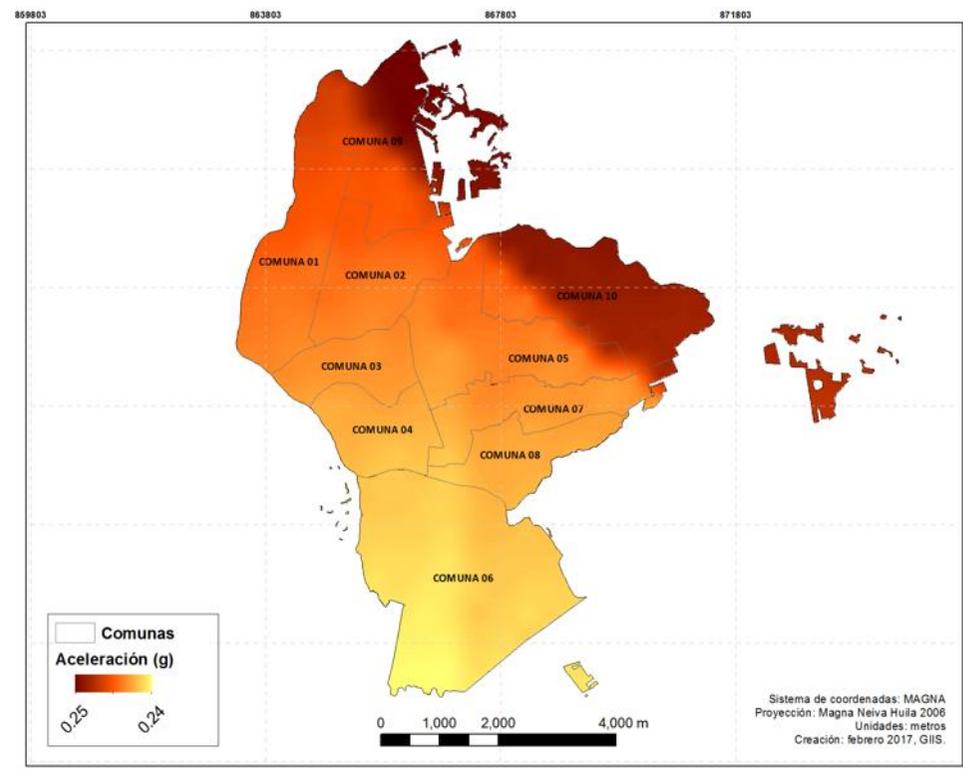
Fuente: Elaboración propia

Figura 103. Mapa de aceleraciones Sa (1s) en roca para PR 475 años



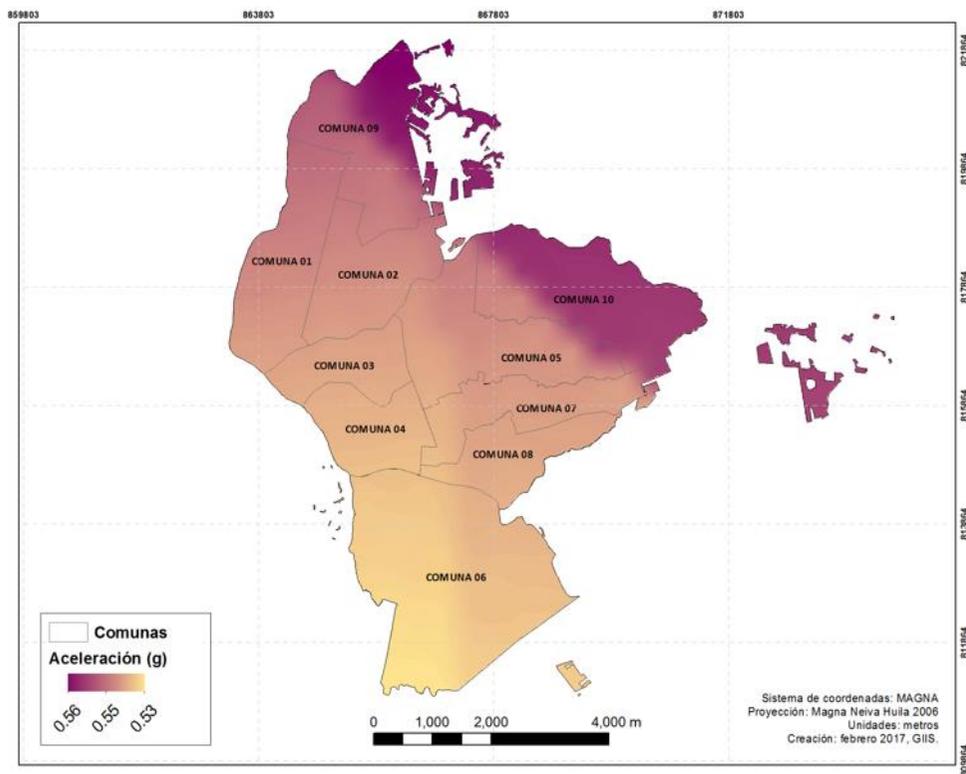
Fuente: Elaboración propia

Figura 104. Mapa de aceleraciones PGA en roca para PR 975 años



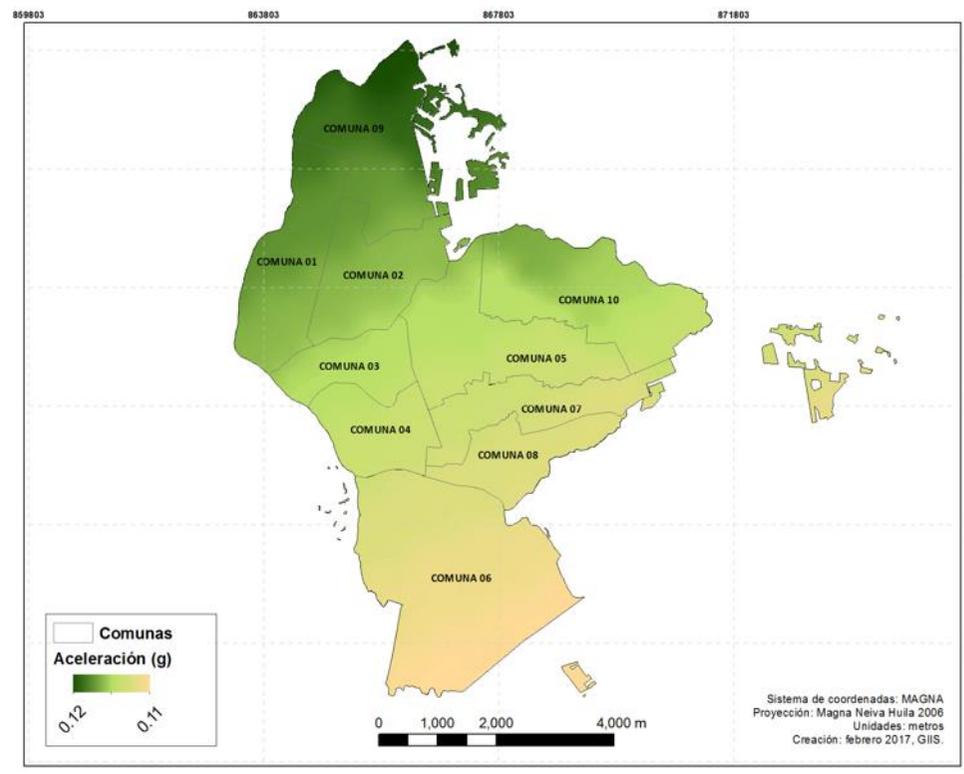
Fuente: Elaboración propia

Figura 105. Mapa de aceleraciones  $S_a(0.1s)$  en roca para PR 975 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 106. Mapa de aceleraciones  $S_a(1s)$  en roca para PR 975 años

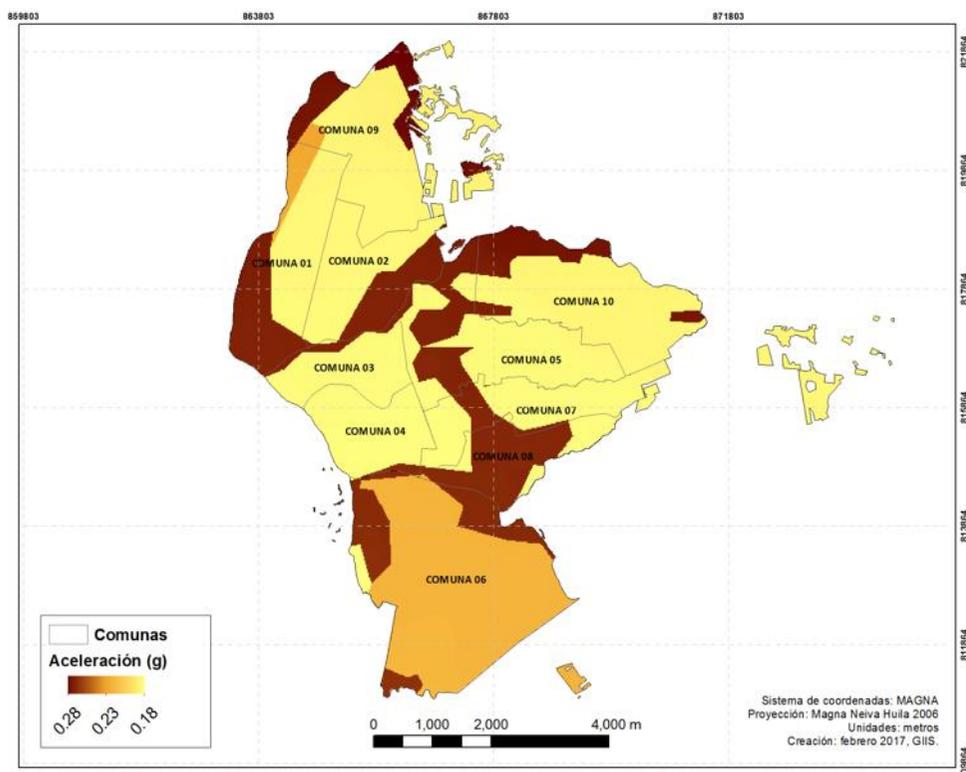


Fuente: Elaboración propia

➤ MAPAS DE ACELERACIÓN EN SUELO

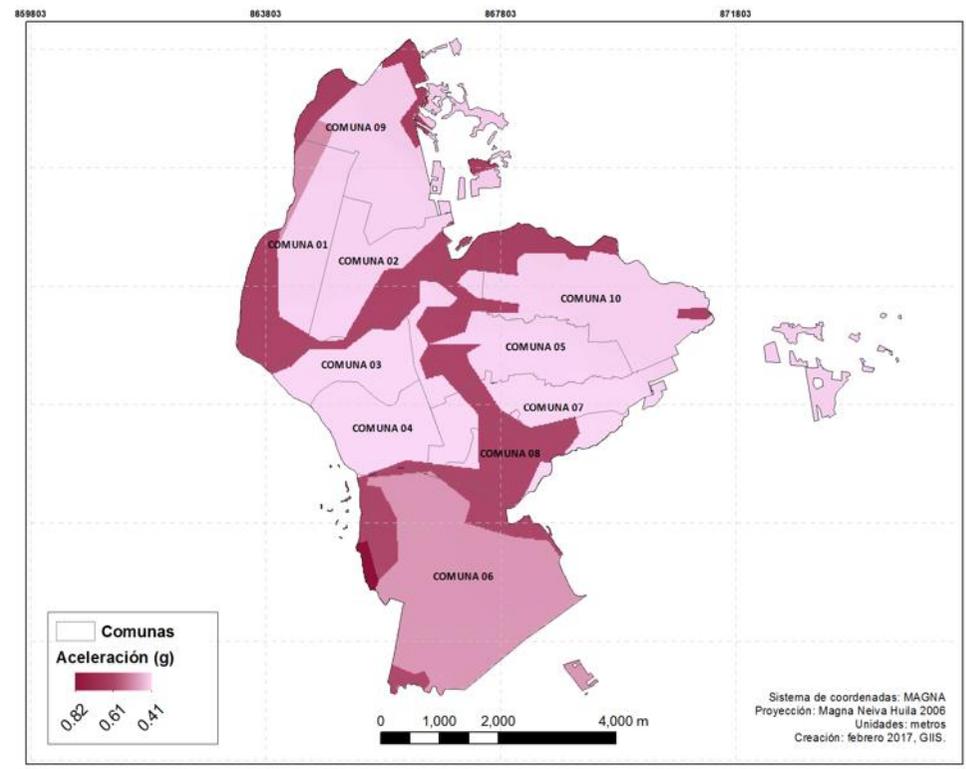
Integrando el efecto local, los mapas resultantes reflejan el movimiento esperado para los periodos de retorno de 475 años y 975 años considerando el tipo de suelo en cada punto del territorio. Se presentan también estos mapas para PGA, SA (0.1s) y SA (1s) y periodo de retorno 475 años (Figura 107, Figura 108 y Figura 109). Los mismos mapas para periodo de retorno 975 años se muestran en la Figura 110, Figura 111 y Figura 112.

Figura 107. Mapa de aceleraciones PGA en suelo para PR 475 años



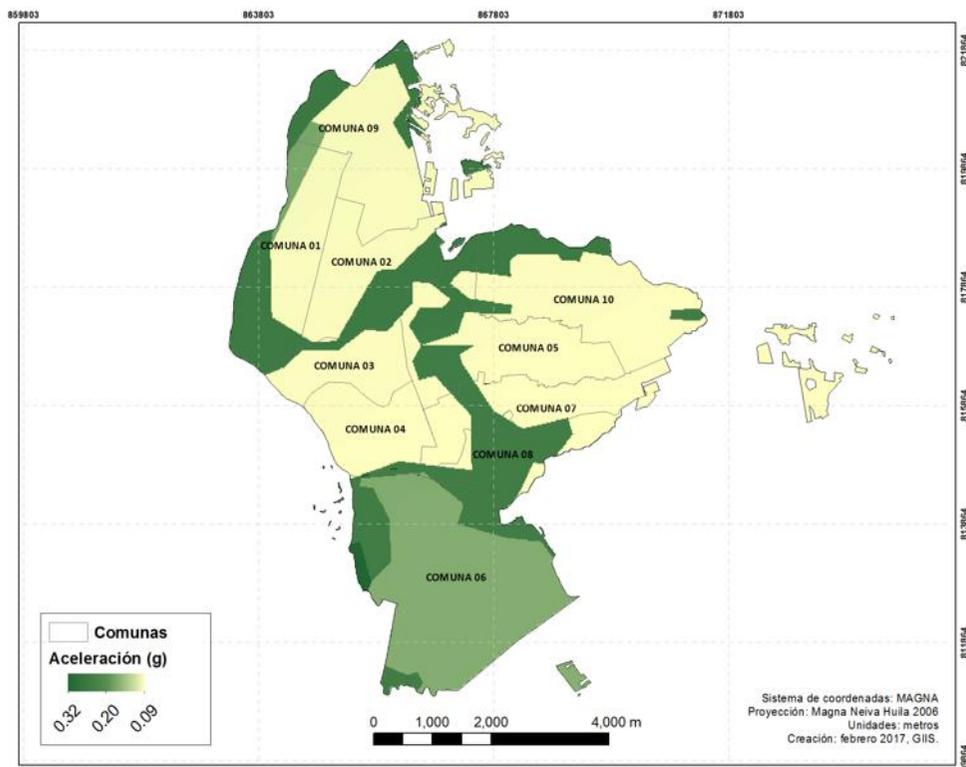
Fuente: Elaboración propia

Figura 108. Mapa de aceleraciones Sa (0.1 s) en suelo para PR 475 años



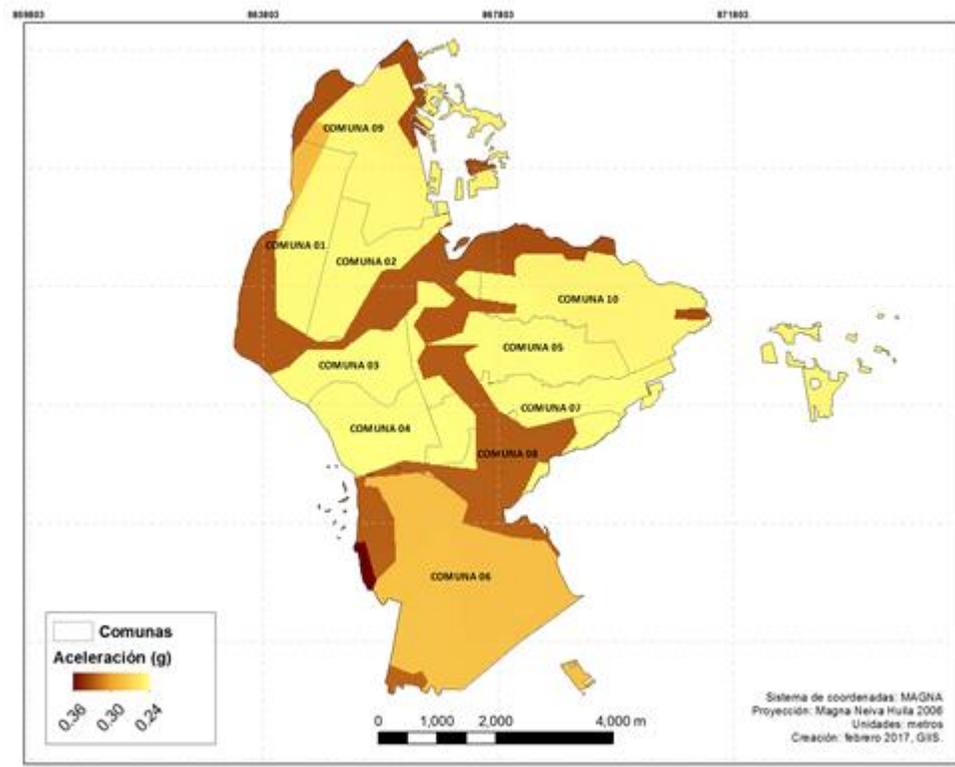
Fuente: Elaboración propia

Figura 109. Mapa de aceleraciones Sa (1s) en suelo para PR 475 años



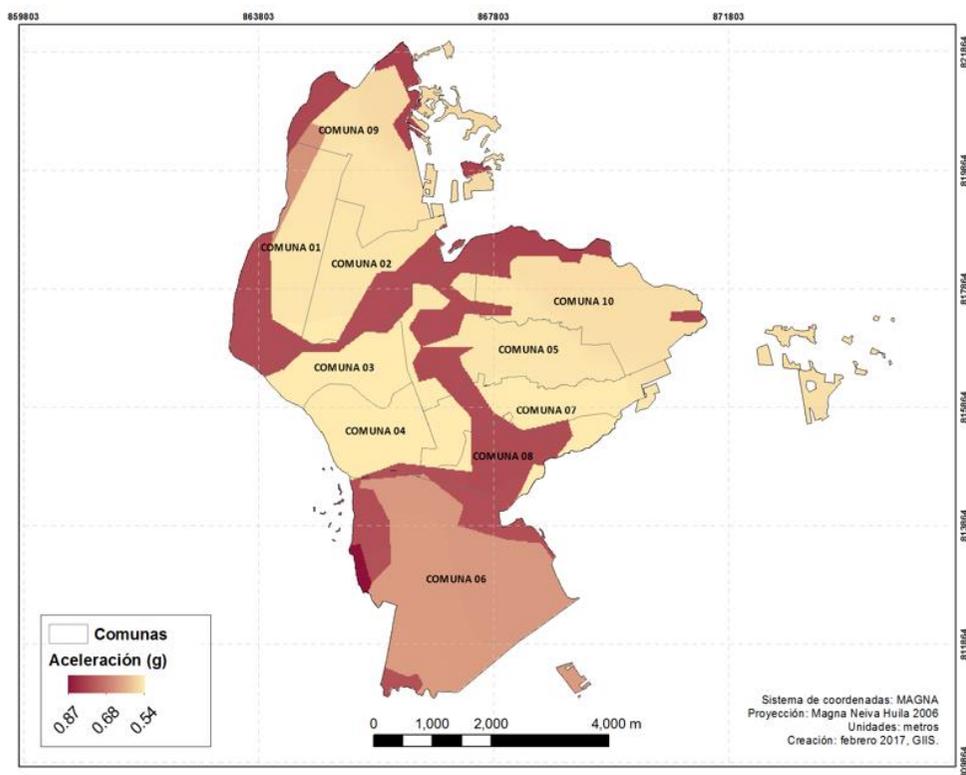
Fuente: Elaboración propia

Figura 110. Mapa de aceleraciones PGA en suelo para PR 975 años



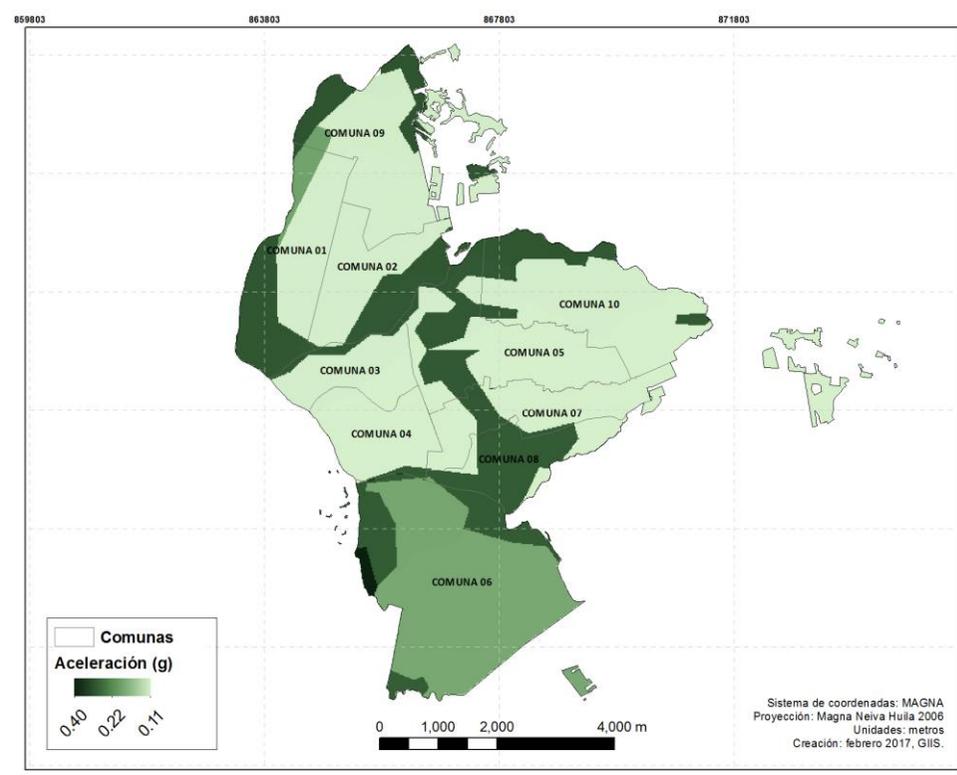
Fuente: Elaboración propia

Figura 111. Mapa de aceleraciones Sa (0.1 s) en suelo para PR 975 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 112. Mapa de aceleraciones Sa (1s) en suelo para PR 975 años



Fuente: Elaboración propia

➤ **ESPECTROS RESULTANTES**

**Espectros según la Norma Colombiana de diseño sismo resistente (NSR-10)**

La norma colombiana de diseño sismorresistente NSR (2010) establece las especificaciones para la caracterización de la demanda sísmica en un sitio mediante un espectro de

respuesta de aceleraciones. Este se define partiendo de un mapa de amenaza del que se deducen los valores de aceleración en roca, que se combinan con una forma espectral y con los factores de amplificación indicados dependiendo del tipo de suelo. Además, se utiliza un factor de importancia según el tipo de estructura cuyo valor implica la adopción de diferente periodo de retorno según la importancia de la estructura.

El mapa de zonificación sísmica de la NSR-10 divide al territorio nacional en tres zonas, de amenaza sísmica baja, intermedia y alta. Las aceleraciones pico efectivas son menores o iguales a 0.10 g, entre 0.10 y 0.20 g y mayores de 0.20g, respectivamente. (Figura 113).

Figura 113. Mapa de zonas de amenaza sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de  $A_a$  y  $A_v$ .

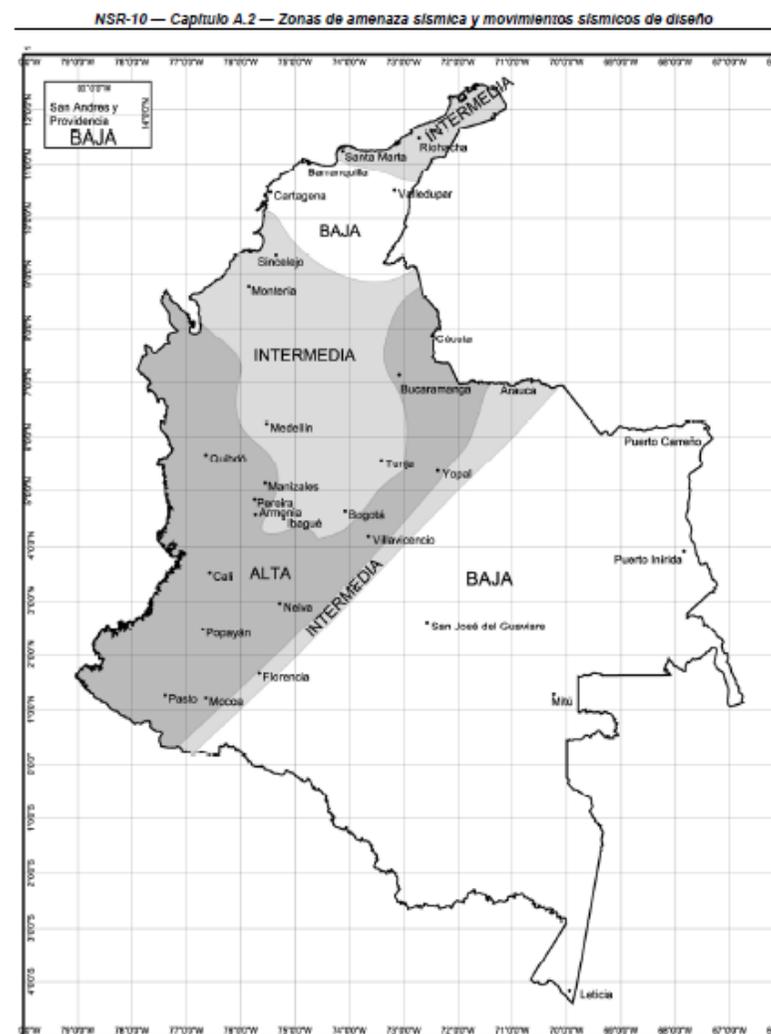


Figura A.2.3-1 — Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de  $A_a$  y  $A_v$

Fuente: NSR-10

Las características geotécnicas deben tenerse en cuenta asignando al suelo bajo la cimentación una determinada clase, en función de la velocidad de ondas de cizalla en los 30 primeros m de espesor ( $V_{s30}$ ). La norma establece una clasificación en 6 tipos, del A al F, el último de los cuales requiere una evaluación de la respuesta dinámica.

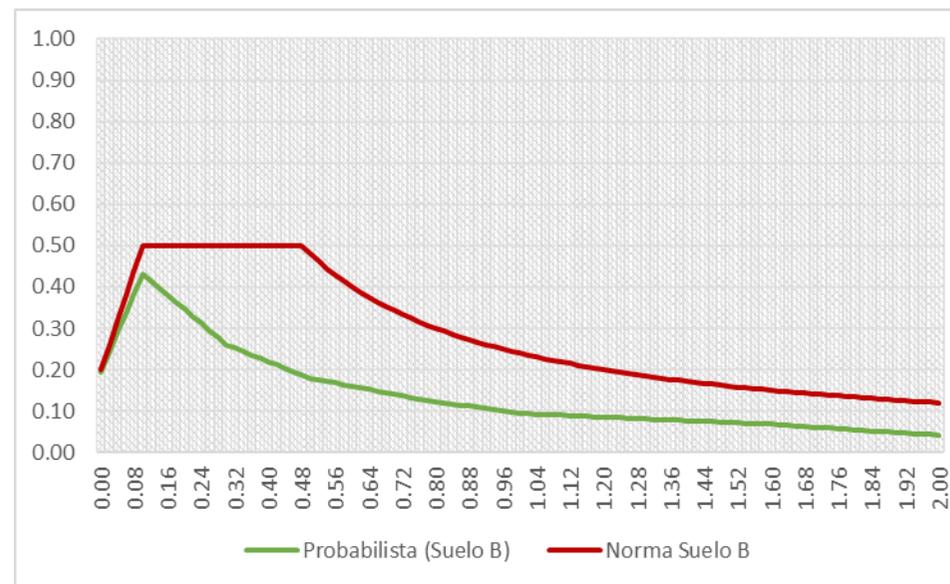
Los espectros de respuesta de cada sitio se establecen, por tanto, en función de la zona sísmica donde se ubique el emplazamiento y la clase de suelo que se asigne.

En el caso que nos ocupa, la zona sísmica en la que está ubicada Neiva es la zona de amenaza intermedia, cuya aceleración pico efectiva es 0.20 g. Las clases de suelo dominantes en la ciudad son las correspondientes a suelos tipo B, C y D. Los correspondientes espectros se muestran en la Figura 114, Figura 115 y Figura 116, comparados con los derivados en este estudio., todos ellos para periodo de retorno de 475 años.

**Comparación de espectros UHS obtenidos en el estudio con los espectros de la (NSR-10)**

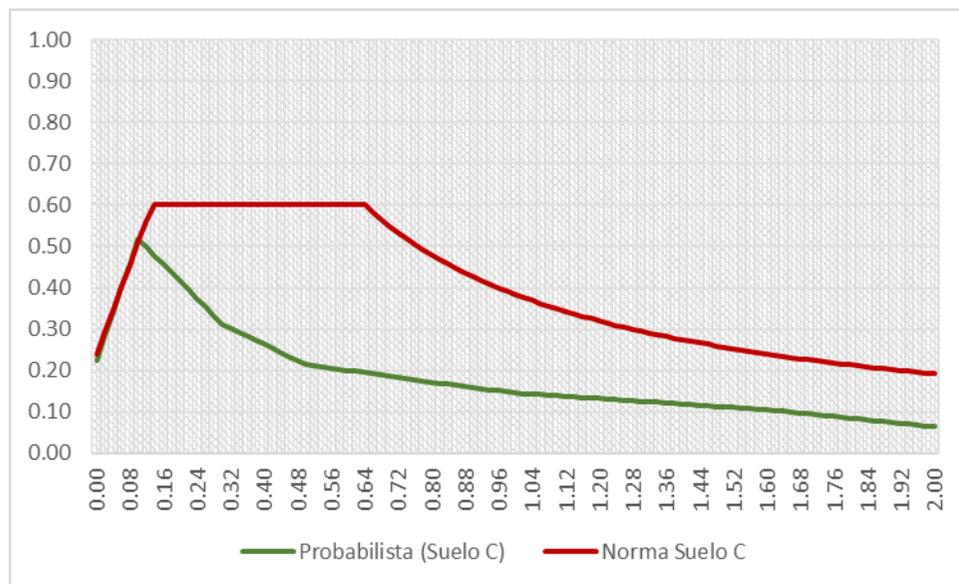
A continuación, se muestran los espectros de respuesta más críticos obtenidos para cada tipo de suelo de la ciudad de Neiva (Figura 114, Figura 115 y Figura 116), como resultado del estudio probabilista asociado al periodo de retorno de 475 años y su comparación con el correspondiente espectro de la NSR-10, calculado según los parámetros de la misma para el mismo periodo de retorno y para cada tipo de suelo.

Figura 114. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.



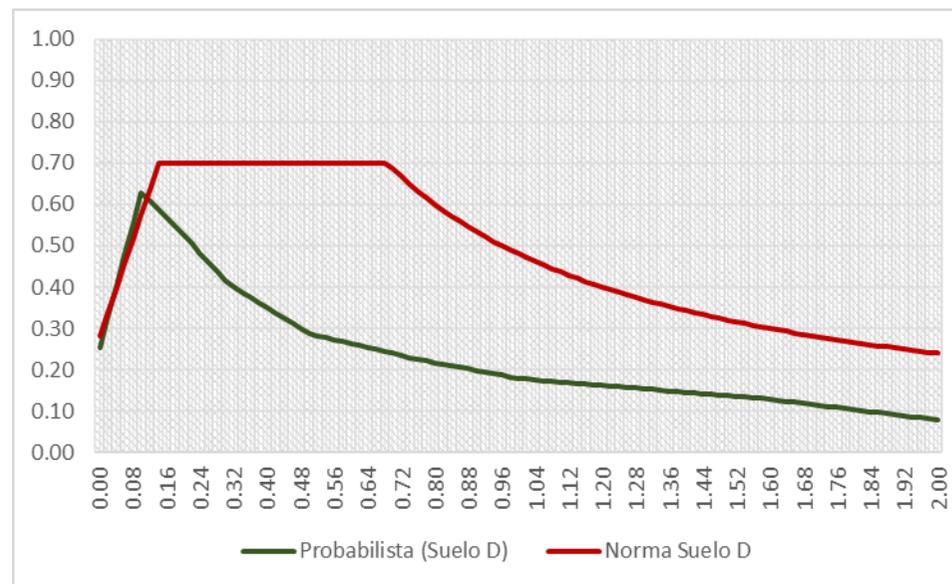
Fuente: Elaboración propia

Figura 115. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 116. Espectro UHS crítico para tipo de suelo B y su comparación con el espectro de diseño de la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente.



Fuente: Elaboración propia

### 6.3 EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

#### 6.3.1 Introducción

La exposición de un emplazamiento ante una amenaza se refiere al número de personas e inmuebles expuestos al peligro. En los estudios de riesgo sísmico se debe crear una base de datos con la localización y características relevantes de los edificios, así como el número de personas que los ocupan (población).

La asignación y distribución de la vulnerabilidad, teniendo en cuenta la exposición en Neiva, es el objeto de la siguiente fase del estudio. Se presenta en este capítulo el marco teórico,

exponiendo las fases a seguir, la información necesaria, los datos recopilados y la distribución de vulnerabilidad establecida.

### 6.3.2 Elaboración de la base de datos de exposición

#### ➤ CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA (SIG)

Para la realización de un estudio en el que se analizan e interactúan diferentes variables espaciales, como es el caso que nos ocupa, es imprescindible dar a todas ellas una correcta ubicación geográfica, complementada con las características que las identifican. Por este motivo, el SIG utilizado en este estudio se considera como la herramienta óptima para la elaboración, análisis y presentación de resultados.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una integración organizada de herramientas, datos geográficos y recursos humanos, diseñado para almacenar, editar y analizar información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión.

El *software* utilizado para la elaboración del SIG es *ArcGIS* de ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Este conjunto de programas permite realizar todos los procesos del sistema de información geográfica en un mismo entorno, desde la captura y edición de datos hasta el análisis de las variables y la producción cartográfica.

#### ➤ EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES

La base de datos de edificios expuestos debe contener información lo más detallada posible relativa a las diferentes estructuras: materiales, número de plantas, uso, superficie construida, etc. Además, deben considerarse sus características geométricas como, por ejemplo, la altura, configuración en planta y elevación, edad, tipo de sistema resistente de cargas horizontales y verticales, tipo de cimientos y cubierta, etc. No obstante, en la práctica no siempre es posible recopilar tantos datos. Se tiende entonces a reducir los parámetros para la asignación de vulnerabilidad a los tres datos más determinantes del comportamiento del edificio ante un movimiento sísmico, que son: 1) los materiales de

construcción de la estructura y los cerramientos, 2) el año de construcción y 3) el número de pisos.

Como datos de partida del estudio, se cuenta con una base de datos de polígonos de usos del suelo urbano, que proporciona información de utilidad para cada polígono: equipamiento recreativo, residencial primario, servicio empresarial e industrial, etc

Para el estudio se ha contado, además, de una capa vectorial con la localización espacial de 562 Clases de Análisis (CA), que son áreas de la ciudad homogéneas en cuanto a tipo de vivienda y estrato social. Estas se corresponden con 28 niveles de estratos socioeconómicos. Las CA contienen información referente al número de viviendas y población de cada una de ellas, correspondiente al censo del año 2015.

Además, la creación de la base de datos que soporta el SIG requiere disponer la localización de los edificios y de una serie de atributos. A continuación se exponen las tres fases del procedimiento seguido para crear esta base de datos:

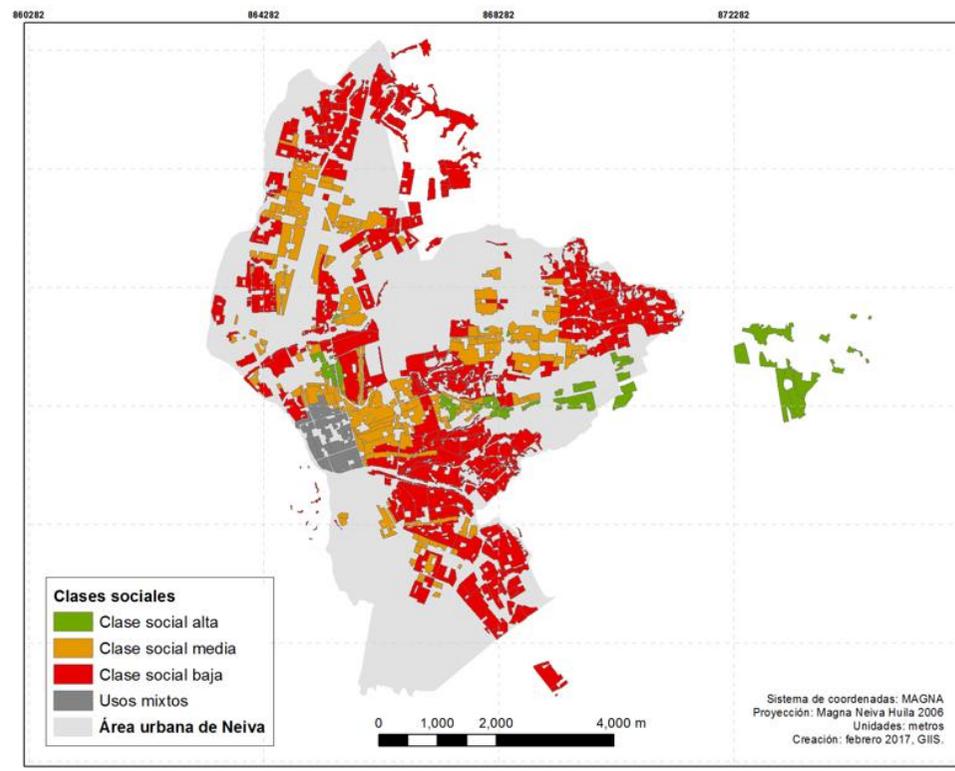
- Definición de la unidad mínima de trabajo: se ha decidido tomar como unidades mínimas de trabajo las Clases de Análisis, por dos razones: 1) en ellas se dispone de la información necesaria para la asignación de vulnerabilidad y 2) proporcionan un nivel de detalle adecuado para un estudio a escala local. En este estudio se cuenta con 562 unidades mínimas de trabajo, que en adelante son denominadas geounidades.
- Localización, número de viviendas y altura de las edificaciones: se ha partido del dato de densidad de viviendas asociado a las CA. De las 562 geounidades originales, 14 no cuentan con un número de edificaciones o viviendas asociado, por lo que finalmente se cuenta con un total de 548 unidades de trabajo.
- Obtención de los atributos: los atributos que conforman la base de datos de exposición en un estudio de riesgo sísmico son aquellos que más influyen en su comportamiento ante la sacudida sísmica. A continuación, se detallan los procedimientos realizados para obtener los atributos de los edificios de cada geounidad:
  - El año de construcción se ha obtenido para todos los edificios de la ciudad, a partir de la huella temporal de crecimiento de Neiva. Por intersección espacial

de las huellas temporales con las geounidades, se han podido datar éstas, y por tanto, sus edificaciones.

- Para determinar la información relativa a los materiales de construcción se realizó un análisis descriptivo de los diferentes tipos de edificación que pueden encontrarse en la ciudad de Neiva, con apoyo de la herramienta Google Street View. Se asume que la distribución de vulnerabilidades dependiendo de las clases socioeconómicas es similar a la de Villavicencio, donde se llegó a hacer una asociación en un estudio previo realizado para el *Proyecto de Cambio Climático y Desarrollo urbano para la ciudad de Villavicencio, Colombia*. En ese estudio se establecieron porcentajes de distribución de tipologías constructivas de acuerdo al estrato social y nivel socioeconómico. Dichos porcentajes son ahora aplicados a Neiva.

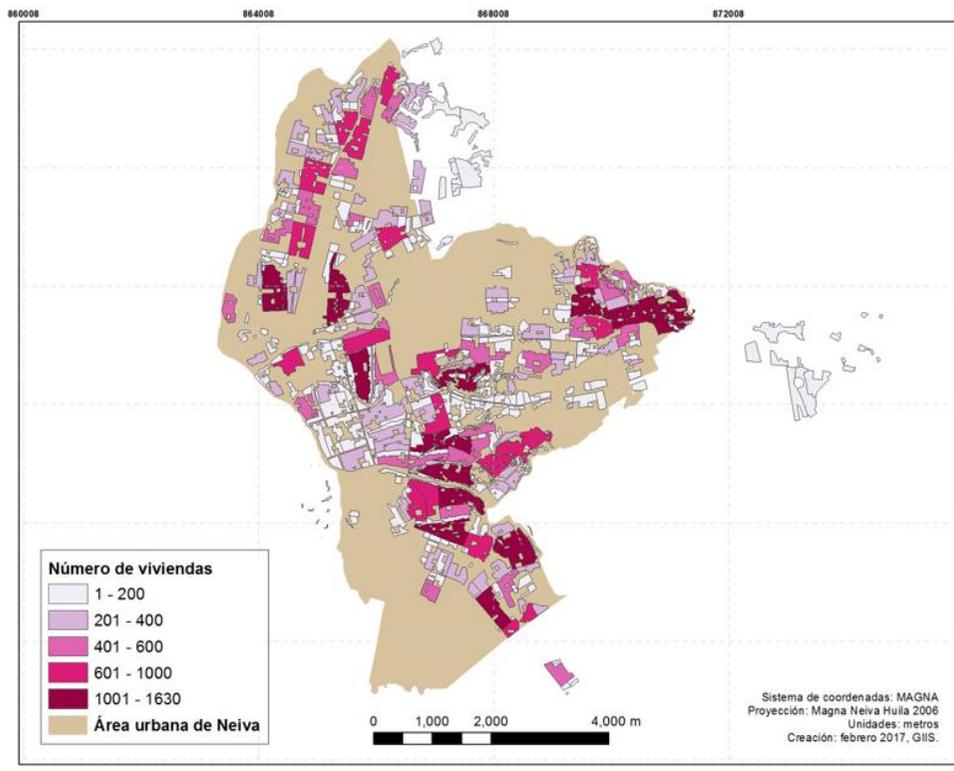
La Figura 117, Figura 118 y Figura 119 muestran mapas con la distribución de las clases de análisis socioeconómicas presentes en la ciudad de Neiva, el número de viviendas contenido en las diferentes clases de análisis y a la distribución de viviendas de mampostería y hormigón en cada comuna, respectivamente.

Figura 117. Mapa de distribución de clases de análisis geoeconómicas de Neiva.



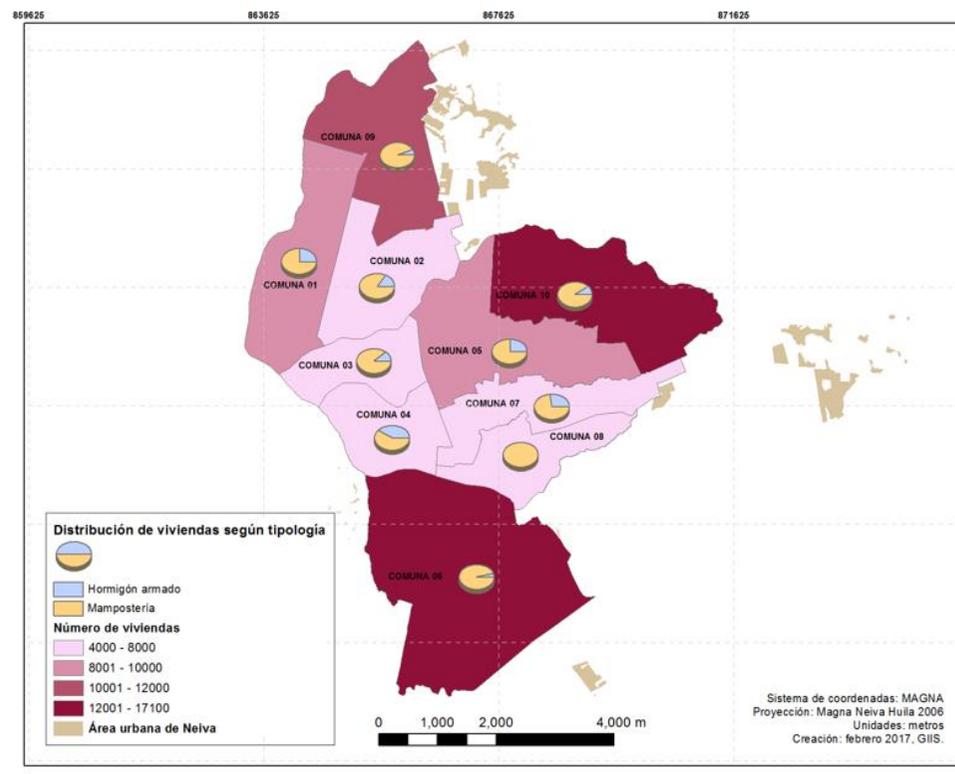
Fuente: Elaboración propia

Figura 118. Número de viviendas en las diferentes clases de análisis geoeconómicas de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

Figura 119. Mapa de número de viviendas total en las diferentes comunas de ciudad de Neiva y su distribución entre edificaciones con estructura principal de mampostería y de hormigón armado.



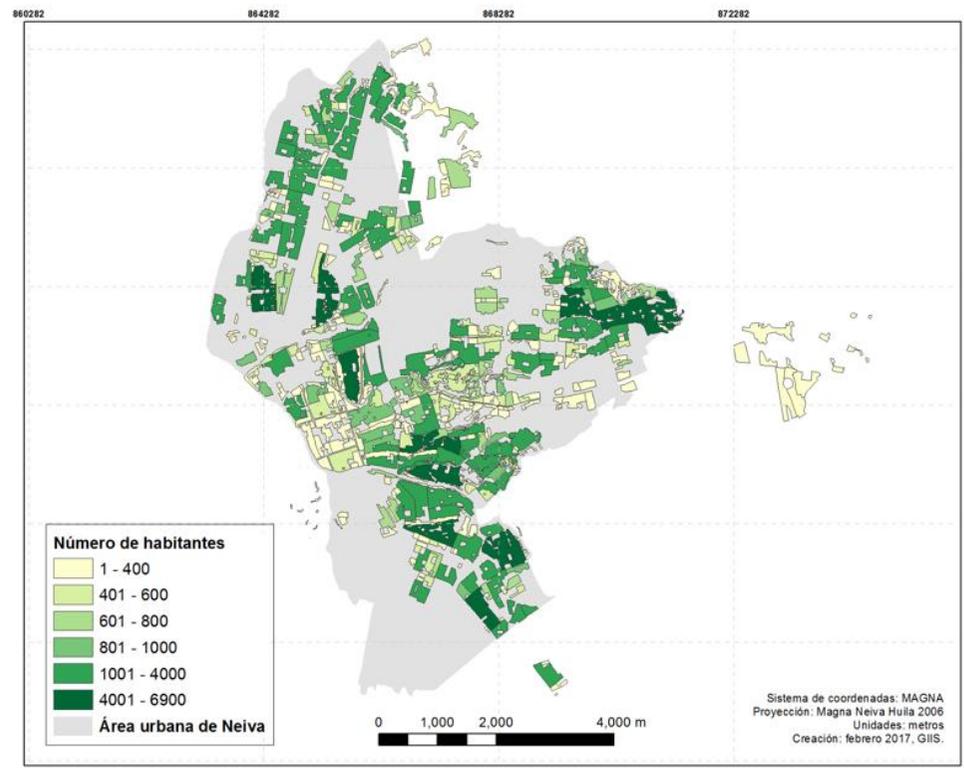
Fuente: Elaboración propia

➤ **POBLACIÓN**

El número de habitantes que ocupan las viviendas estudiadas es un dato necesario para estimar las víctimas mortales y heridos asociados a los escenarios de riesgo sísmico.

En cifras totales, en 2016 la ciudad de Neiva tiene 558.805 habitantes, según el estudio de Proyecciones municipales por área del Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia. (Proyección DANE 2016). La distribución de la población por clase de análisis se muestra en la Figura 120.

Figura 120. Distribución de la población de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

**6.3.3 Estimación de vulnerabilidad**

La vulnerabilidad se define como la probabilidad de un elemento expuesto a una amenaza de sufrir daños. En este caso, la amenaza viene expresada como el movimiento del suelo debido a la ocurrencia de un determinado evento sísmico, probable o extremo, como ya se expuso en el apartado 6.2.

Para estimar el daño debido al movimiento sísmico sobre un conjunto de edificaciones que conforman un núcleo urbano, se requiere una clasificación de las tipologías constructivas, atendiendo a su comportamiento ante sismos, con la consiguiente asignación de la vulnerabilidad a cada tipología.

### ➤ EVOLUCIÓN DE LAS NORMAS DE DISEÑO SISMO-RESISTENTE DE LAS EDIFICACIONES

La evolución de las normas sismorresistentes de un país, proporciona información de utilidad para la asignación de clases de vulnerabilidad en función del año de construcción, ya que la aparición de nuevas normas marca, por lo general, el comienzo del desarrollo de clases menos vulnerables. Por otra parte, la escala de vulnerabilidad que utilizamos en este trabajo diferencia niveles de diseño sismorresistente en clases *pre*, *low*, *moderate* y *high code*, que pueden definirse en función de la normativa de construcción del momento. Por ello es importante conocer la evolución de las normativas del país, a la hora de asignar las clases de vulnerabilidad.

El primer paso hacia una normativa sísmica nacional en Colombia lo dio la AIS en el año 1976 con la traducción y divulgación entre los profesionales colombianos de los Requisitos de la Structural Engineers Association of California SEAOC-74 Recommended Lateral Force Requirements and Commentary. A finales del año 1978 se difundió y estudió el documento Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ATC-3-06 del Applied Technology Council (ATC, 1978).

Como consecuencia de los sismos de Caldas y de Tumaco, ocurridos ese mismo año 1979, se adaptó el ATC-3 al medio colombiano y se elaboró la Norma AIS 100-81, *Requisitos Sísmicos para Edificios*.

Tras el sismo de Popayán en 1983, la AIS elaboró ese mismo año la Norma AIS 100-83, la cual sirvió como base para el Código colombiano de construcciones sismorresistente, que se adoptó en 1984 con aplicación obligatoria en todo el país mediante el Decreto 1400/84. Se trató de subsanar con esta nueva norma aquellos aspectos que los sismos de Caldas y Tumaco en 1979 y Popayán en 1983 habían demostrado que eran deficientes dentro de la

práctica de la construcción nacional. En 1992 la AIS comenzó a trabajar en la actualización de la norma sismo resistente de acuerdo a las nuevas tendencias que se discutían internacionalmente y su adaptación a las condiciones del país. En 1997 la Norma AIS 100-97 se sometió a discusión pública y sirvió como base para las Normas Colombianas de diseño y construcción sismo resistente de 1998 (NSR-98), aprobadas por medio del Decreto 33 de 1998. Posteriormente se expidieron tres decretos adicionales comprendidos dentro del Reglamento NSR-98, a saber: Decreto 34 de 1999, Decreto 2809 de 2000 y Decreto 52 de 2002. Finalmente se emite por medio del Decreto 926 de 2010, el Reglamento colombiano de construcción sismo resistente 2010.

Según las fechas de aplicación de las distintas Normativas de Diseño sismo resistente, se ha clasificado la edificación en distintos niveles de diseño sísmico, pre-code, low-code, moderate-code y high-code, en función del año de construcción (Tabla 61).

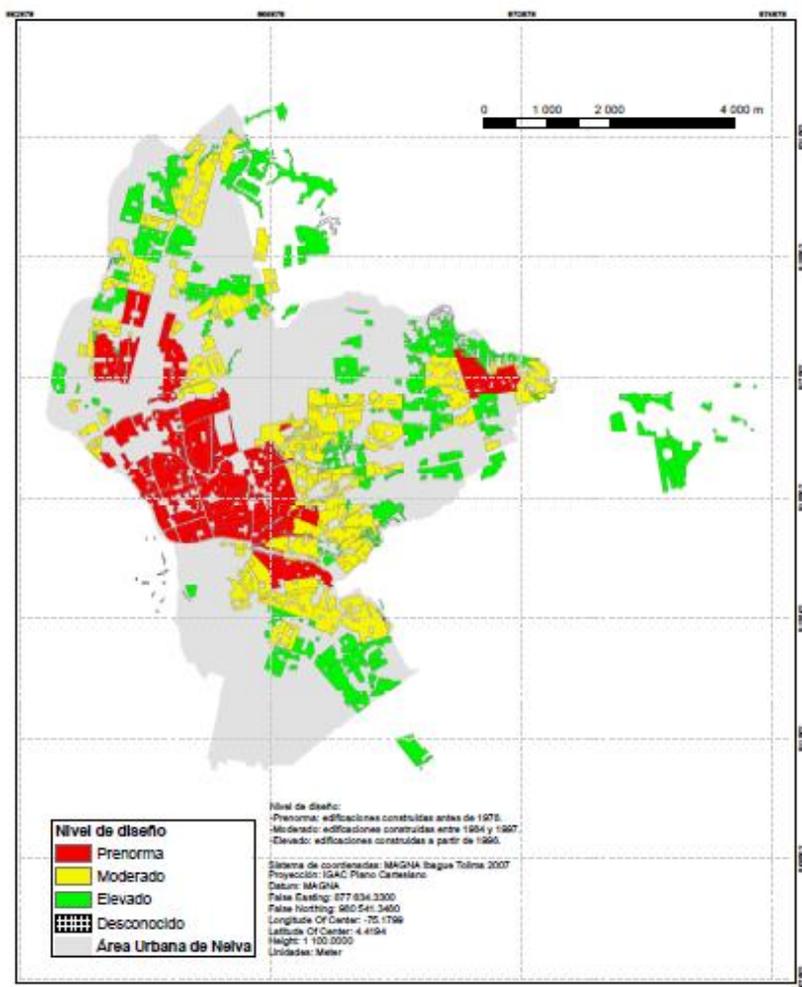
Tabla 61. Normas de diseño sismo resistente de Colombia y Nivel de diseño sísmico.

| NORMA                | AÑO CONSTRUCCIÓN | NIVEL DE DISEÑO |
|----------------------|------------------|-----------------|
| ATC, 1978            | < 1978           | PRE - CODE      |
| AIS 100-83           | 1979 -1983       | LOW - CODE      |
| AIS 100-97           | 1984 -1997       | MODERATE - CODE |
| NSR – 98<br>NSR – 10 | > 1998           | HIGH – CODE     |

Fuente: Elaboración propia

El mapa con la distribución de viviendas según el nivel de diseño sismo resistente se muestra en la Figura 121.

Figura 121. Nivel de diseño sismorresistente de los edificios de la ciudad de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

**Asignación de la vulnerabilidad**

La siguiente tarea a desarrollar para la asignación de vulnerabilidad es la identificación de las tipologías dominantes en Neiva, de acuerdo a la clasificación de HAZUS.

La Tabla 62 muestra las tipologías constructivas identificadas en la ciudad.

Una vez elaborada la base de datos de exposición y descritas las tipologías constructivas de Neiva, se procederá a asignar la vulnerabilidad a cada edificio. Para ello se utilizarán los datos de materiales, año de construcción y altura, contenidos en la base de datos.

Tabla 62. Descripción de tipologías constructivas identificadas en la ciudad de Neiva.

| T.C. *          | CÓDIGO | DESCRIPCIÓN CÓDIGO                                       | DESCRIPCIÓN  | IMAGEN |
|-----------------|--------|--|--|--------|
| CONCRETO ARMADO | PCAP   | Pórticos<br>Concreto Armado<br>con Paredes de<br>bloques | Son construcciones con estructuras de pórticos de concreto armado y paredes de bloques de arcilla o de concreto. |        |
|                 | MCA2D  | Muros de<br>Concreto Armado<br>en 2 Direcciones          | Construcciones de muros de concreto armado en dos direcciones horizontales                                       |        |

| T.C.<br>*   | CÓDIGO | DESCRIPCIÓN<br>CÓDIGO             | DESCRIPCIÓN  | IMAGEN   |
|-------------|--------|-----------------------------------|--|--|
| MAMPOSTERÍA | MMC    | Muros de Mampostería Confinada    | Sistemas estructurales cuyos elementos portantes sean muros de mampostería confinada. En Colombia estos muros se apoyan, normalmente, sobre vigas de cimientos ciclópeos.  |  |
|             | MMNC   | Muros de Mampostería No confinada | Sistemas estructurales cuyos elementos portantes sean muros de mampostería no confinada. Son de aquellas construcciones típicas de los barrios de crecimiento espontáneo en Colombia, que han sido construidas sin diseño de ingeniería formal y sin seguimiento de normas técnicas. |  |

| T.C.<br>*                                     | CÓDIGO | DESCRIPCIÓN<br>CÓDIGO                                   | DESCRIPCIÓN   | IMAGEN  |
|---|--------|---|---|---|
| SISTEMAS MIXTOS CONCRETO ARMADO Y MAMPOSTERÍA | PMBCB  | Pórticos de Mampostería de Baja Calidad de Construcción | Sistemas estructurales mixtos de pórticos y de mampostería de baja calidad de construcción. Construcciones típicas de los barrios de crecimiento espontáneo en Colombia. Materiales constructivos variados según la disponibilidad para adquirirlos que tenga el propietario. Normalmente sin diseño de ingeniería formal y sin seguimiento de normas técnicas. |  |
|   |        |   | ESTRUCTURA PRECARIA   | VCP   |

Fuente: Elaboración propia

\*T.C. = tipología constructiva

NOTA: fuente de la imagen Google Earth.

#### 6.3.4 Asignación de funciones de capacidad y fragilidad

Partiendo de la clasificación de vulnerabilidad anterior, el cálculo del riesgo requiere estimar la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere cada uno de los grados de daño definidos según la escala adoptada ante la acción sísmica representativa de cada escenario sísmico definido. Casi todas las escalas diferencian 4 o 5 grados, que oscilan entre daño ligero y daño completo. Las escalas utilizadas en este estudio diferencian 5 grados: *Daño leve*, *Daño moderado*, *Daño extenso*, *Daño completo* y *Daño nulo*.

Entre las metodologías actuales más conocidas para el análisis de la vulnerabilidad sísmica y estimación del daño se encuentra la metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 2009), basada en la ATC-38 (ATC-2000), con datos de daño obtenidos de terremotos importantes ocurridos en Estados Unidos en el pasado, y los métodos analíticos desarrollados en la ATC-55 (ATC-2005). También destacan los métodos desarrollados en el proyecto europeo de evaluación de riesgo RISK-UE, para escenarios de riesgo de diferentes ciudades europeas. Dichos métodos son descritos en su capítulo de Vulnerabilidad de las edificaciones (Risk-UE, 2003; Milutinovic & Trendafiloski, 2003).

Los métodos analíticos para la asignación de vulnerabilidad y evaluación de daños son la mejor forma de estimación del daño cuando el movimiento del suelo se da en términos de aceleraciones espectrales  $S_a$  y desplazamientos espectrales  $S_d$ . En estos métodos, el comportamiento de cada edificio está representado por una curva de capacidad que se refiere a su desplazamiento lateral con diferentes aceleraciones de base. Para una tipología constructiva dada, las curvas de capacidad están vinculadas a las curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de que el edificio sufra diferentes grados de daño. Estas curvas de fragilidad se modelan con una distribución logarítmica normal probabilística.

Este procedimiento para la estimación del daño físico utiliza fórmulas derivadas mecánicamente para describir la capacidad de desplazamiento de las edificaciones para tres estados límites diferentes. Estas fórmulas se expresan en función de las propiedades geométricas y de los materiales, incluyendo la altura media de los edificios en cada clase. Tras sustituir la altura usando una fórmula que la relaciona con el periodo correspondiente al estado límite, se pueden establecer funciones de capacidad del desplazamiento en términos del periodo. La principal ventaja es que, de esta forma, se puede establecer una

comparación directa para cualquier periodo entre la capacidad de desplazamiento de una edificación y la demanda en desplazamiento predicha a partir de un espectro de respuesta.

Con el fin de que el parque inmobiliario de la comunidad donde se ha llevado a cabo el estudio quedara lo mejor caracterizado posible, se estableció una correspondencia entre la clasificación realizada para la base de datos del estudio, con las clases definidas en tres metodologías: Hazus, método LM2 de Risk-UE y I Lagomarsino & Giovinazzi (2006), en adelante L&G.

No obstante, la comparación entre las curvas proporcionadas por las tres metodologías no es directa, dadas las diferencias que presentan en la clasificación de las tipologías.

En las tres metodologías, los edificios de mampostería y hormigón se clasifican según su altura en low, medium y high. Todas establecen la mampostería de 1-2 pisos como low, de 3-5 como medium y más de 6 pisos como high. En cuanto a los edificios de hormigón, Hazus y L&G establecen como *low* los de 1-3 plantas, *medium* de 4-7 plantas y *high* los de más de 8 plantas, pero Risk-UE mantiene el mismo número de pisos que en el caso de la mampostería.

Otra diferencia importante es que Hazus agrupa todos los tipos de mampostería sin reforzar en un solo modelo (URM), y presenta otros dos modelos para la mampostería reforzada (RM1 y RM2), mientras que Risk-UE y L&G dividen la mampostería de acuerdo al material utilizado o a los elementos estructurales que presentan los edificios (piedra, ladrillo, mampostería sin reforzar con forjados de madera, forjados de hormigón, etc.). Proponen un solo modelo para la mampostería reforzada y confinada (M4 y M7 respectivamente).

Las curvas finalmente seleccionadas para las estructuras de Mampostería, por representar mejor el comportamiento de las mismas, fueron las de: 1) L&G, para estructuras de hormigón, 2) Hazus para acero y 3) Cattari y Gencturk para las viviendas precarias. El número de plantas de las subdivisiones por altura de las tipologías se incluye en la Tabla 63 y la correspondencia de la nomenclatura utilizada en el proyecto con la nomenclatura de las demás metodologías se muestra en Tabla 64.

Tabla 63. Número de plantas establecido en las metodologías de Hazus y L&G para edificios de baja, mediana y elevada altura.

|                      | Número de alturas       |             |
|----------------------|-------------------------|-------------|
|                      | Hormigón Armado y Acero | Mampostería |
| Edificios bajos (L)  | 1-3                     | 1-2         |
| Edificios medios (M) | 4-7                     | 3-5         |
| Edificios Altos (H)  | 8 ó mas                 | 6 ó más     |

Fuente: Elaboración propia

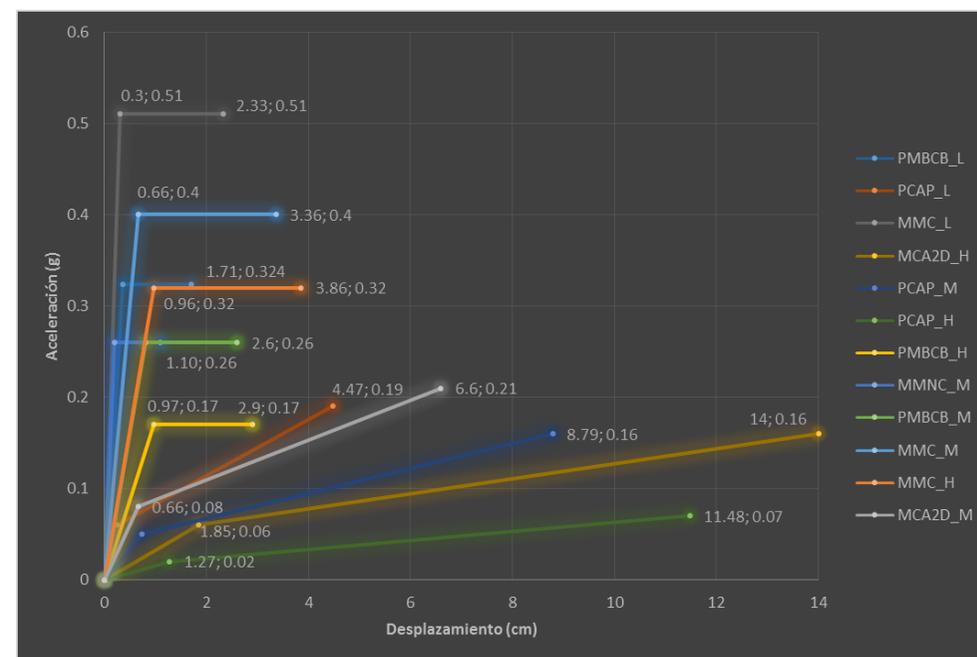
Tabla 64. Correspondencia de nomenclatura de las curvas de capacidad y fragilidad seleccionadas con respecto a las tipologías constructivas de la ciudad de Neiva.

| TIPO   | NOM. PROYECTO | DESCRIPCIÓN  | CORRESPONDENCIA | REFERENCIA |
|--------|---------------|--|-----------------|------------|
| Tipo 1 | PCAP          | Pórticos de concreto armado rellenos con paredes de bloques de arcilla o de concreto | C3              | Hazus      |
| Tipo 2 | MCA2D         | Muros de concreto armado en dos direcciones horizontales                             | C2              | Hazus      |
| Tipo 3 | MMC           | Sistemas cuyos elementos portantes sean muros de mampostería confinada               | M7              | L&G        |
| Tipo 4 | MMNC          | Sistemas cuyos elementos portantes sean muros de mampostería no confinada            | M5              | L&G        |
| Tipo 5 | PMBCB         | Sistemas mixtos de pórticos y de mampostería de baja calidad de construcción         | M34             | L&G        |

La Figura 122 muestra las curvas de capacidad seleccionadas para caracterizar el comportamiento de las tipologías constructivas.

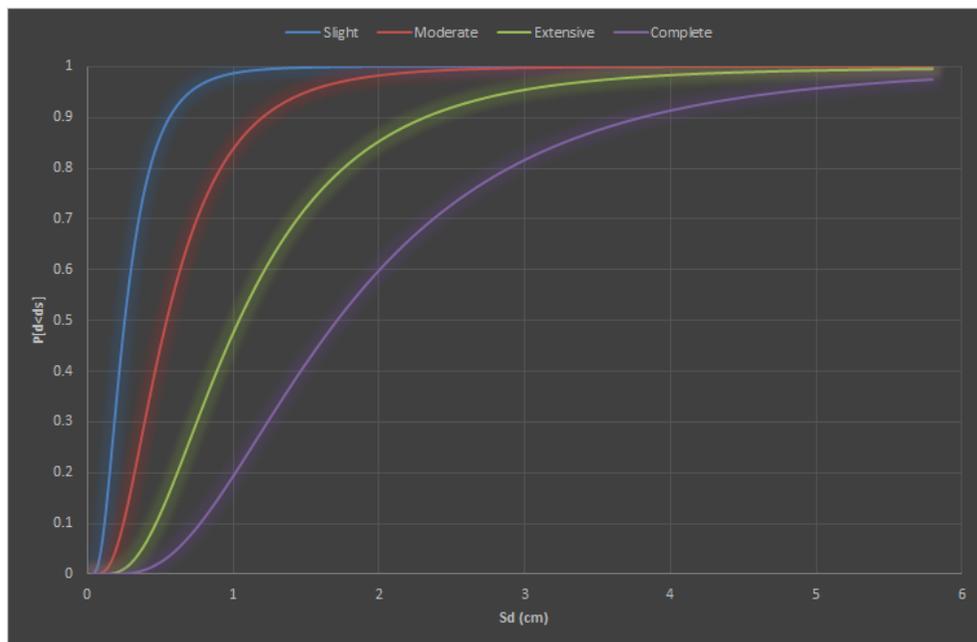
Un ejemplo de curva de fragilidad desarrollada para una de las tipologías constructivas del estudio se muestra en la Figura 123.

Figura 122. Espectros de capacidad seleccionados para algunas tipologías constructivas de la ciudad de Neiva.



Fuente: Elaboración propia

Figura 123. Representación de curvas de fragilidad generadas para la tipología constructiva de sistemas mixtos de pórticos y mampostería.



Fuente: Elaboración propia

## 6.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

### 6.4.1 Introducción

Tras la estimación de la peligrosidad sísmica, la asignación de clases de vulnerabilidad para el parque inmobiliario y la identificación de curvas de capacidad y fragilidad, se procede al cálculo del riesgo, que se cuantificará por medio de parámetros de daño y parámetros de pérdidas humanas y materiales.

Para estimar los daños debidos al movimiento sísmico sobre un conjunto de edificaciones que conforma un núcleo urbano se requieren, esencialmente, tres inputs de cálculo:

1. La correcta especificación de la amenaza sísmica, incluyendo posibles efectos de amplificación local del movimiento, dependiendo del tipo de suelo, tal y como se ha expuesto en el *Capítulo 6.2*.
2. Una clasificación de las tipologías constructivas, atendiendo a su comportamiento ante un cierto movimiento sísmico, con la consiguiente asignación de la vulnerabilidad a cada tipología (*Capítulo 6.3*)
3. Una función capacidad, que representa la respuesta de cada tipología y una función de fragilidad, que representa la relación entre el movimiento de entrada, la tipología constructiva y el grado de daño esperado (*Capítulo 6.3*).

Para estimar pérdidas humanas, se requiere el número de habitantes o densidad poblacional en cada unidad de trabajo, que en este caso se identifica con la clase de análisis socioeconómica. Para la estimación de costes se requiere el valor de construcción de las edificaciones.

En este capítulo se expone el procedimiento de cálculo de daños en edificios y pérdidas humanas y materiales.

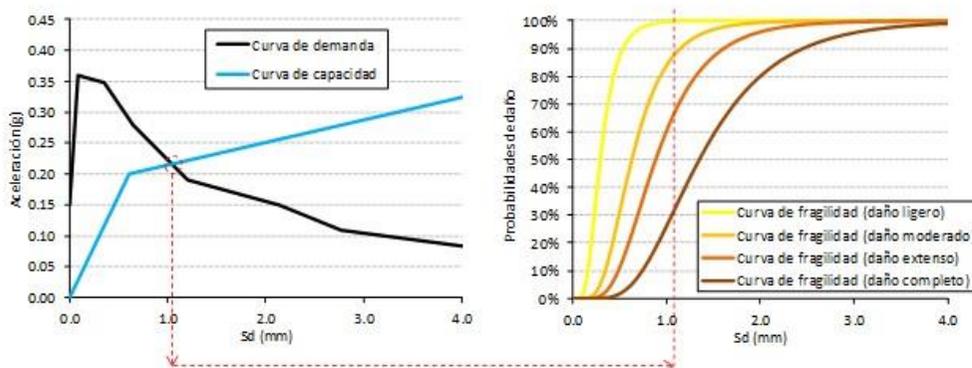
### 6.4.2 Cálculo del daño esperado

Partiendo de la clasificación de vulnerabilidad descrita en el capítulo anterior, el posterior cálculo del riesgo requiere estimar la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere cada uno de los grados de daño predefinidos ante la acción sísmica representativa del escenario de peligrosidad definido. Para ello se aplicará el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (IDCM) propuesto en el reporte FEMA 440 (2005), que estima, a partir de las curvas de capacidad, el desplazamiento máximo que sufriría un edificio debido a un movimiento sísmico en su base. Dicho movimiento se expresa en

términos de aceleraciones y desplazamientos espectrales. El procedimiento a seguir se describe brevemente a continuación.

Partiendo de la clasificación de los edificios por tipología estructural, se calcula la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere diferentes grados de daño a partir del movimiento máximo esperado en esa localización. Para caracterizar la respuesta de las estructuras, se utiliza el **método de capacidad-demanda**, en el cual la demanda se identifica con la acción sísmica (mediante el espectro de respuesta) y la capacidad viene dada por la curva que refleja el comportamiento de la estructura (desde el régimen lineal hasta el punto de ruptura). Se determina entonces el punto de desempeño, que corresponde al desplazamiento espectral que se espera que sufra cada tipo de estructura a causa del movimiento sísmico de entrada (demanda). Se emplean después curvas de fragilidad que proporcionan la probabilidad de alcanzar o exceder cada grado de daño en función del desplazamiento espectral para el punto de desempeño. (Figura 124).

Figura 124. Esquema de las curvas de capacidad – demanda y fragilidad para estimar el daño en edificaciones



Fuente: Elaboración propia

Método I-DCM

**Curvas de Capacidad – Demanda. Punto de desempeño**

Las curvas de capacidad relacionan la fuerza cortante aplicada en la base de un edificio con el desplazamiento que ésta produce en el techo del mismo. Representan la capacidad de una estructura a resistir una demanda sísmica.

Para calcular el punto de desempeño se emplea el método del coeficiente de desplazamiento mejorado, I-DCM (FEMA-273 y FEMA-440) que consiste en modificar la demanda de desplazamiento del sistema lineal de un grado de libertad (SDOF) equivalente a la estructura multiplicándolo por una serie de coeficientes para estimar el desplazamiento máximo del oscilador no lineal. Este proceso se divide en las siguientes fases:

Calcular el periodo efectivo de la estructura ( $T_c$ ) a partir del punto de fluencia ( $A_y$ ,  $D_y$ ) dado en su curva de capacidad:

$$T_c = 2 \pi (D_y/A_y)^{1/2} \tag{4.1}$$

Calcular la demanda de aceleración espectral del sistema lineal equivalente de un grado de libertad ( $S_a^{cl}$ ) a partir del espectro de respuesta específico (que representa la aceleración,  $S_a$ , en función del periodo,  $T$ )

Calcular la demanda máxima de desplazamiento espectral ( $S_d^{cl}$ ) del SDOF:

$$(S_d^{cl}) = (T_c)^2 / 4\pi^2 (S_a^{cl}) \tag{4.2}$$

Calcular el desplazamiento objetivo,  $\delta_1$ , mediante la relación:

$$\delta_1 = C_1 C_2 (S_d^{cl}) \tag{4.3}$$

donde

$C_1$  = Factor de modificación para relacionar el desplazamiento máximo esperado de un oscilador no lineal con propiedades histéricas elásticas-perfectamente-plásticas (EPP) con la demanda de desplazamiento máximo del oscilador lineal.

C2 = Factor de modificación para representar el comportamiento histerético, con degradación debido a fallas cortantes y su degradación de rigidez en la respuesta de desplazamiento máximo.

Estos coeficientes pueden calcularse con las relaciones de aproximación siguientes:

$$C_1 = 1 + (R-1)/a (T_c)^2 \tag{4.4}$$

$$C_2 = 1 + 1/800 (R-1/T_c)^2 \tag{4.5}$$

Donde:

R = es la tasa de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia calculada:

$$R = (S_a)^{cl}/A_y \tag{4.6}$$

a = es la constante de la ecuación y es igual a 130, 90 y 60 para los tipos de suelo B, C y D del NEHRP, respectivamente.

La demanda máxima de desplazamiento espectral obtenido para el oscilador no lineal,  $\delta_1$ , se aplica a las funciones de fragilidad y se obtienen las probabilidades de sufrir o exceder los distintos grados de daño para cada tipología estructural.

### Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad pueden definirse como “la representación gráfica de la función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural ante una determinada acción sísmica” (Bonnet Díaz, 2003).

Éstas se obtienen utilizando una función lognormal definida por el valor medio del desplazamiento espectral correspondiente al umbral de daño asociado a un estado DS de daño ( DS Sd ) y por una desviación estándar  $\beta_{DS}$ .

$$P[D_s|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{S_d}{\bar{S}_{d, D_s}} \right) \right] \tag{4.7}$$

donde:

P[ $D_s|S_d$ ] es la probabilidad de que la estructura alcance o exceda el estado de daño  $D_s$  debido al desplazamiento  $S_d$ .

$\Phi$  es la función de distribución normal estándar acumulativa.

$\beta$  es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño  $D_s$ . Este valor se ha definido como función de la ductilidad ( $\mu$ ) de la curva de capacidad, con el fin de obtener una dispersión en la distribución del daño equivalente a la resultante del daño observado (Braga et al. 1982)

$$\beta = 0,4 \ln \mu \tag{4.8}$$

$\bar{S}_{d, D_s}$  es el valor medio del desplazamiento espectral al que la estructura alcanza el umbral del estado de daño  $D_s$ .

### ➤ Clasificación y estimación de grados de daño

La clasificación de grados de daño según esta metodología se realiza dependiendo de los daños estructurales y no estructurales que se observen en edificios ordinarios (de importancia normal) y viviendas convencionales. Los diferentes grados de daño considerados son: **leve**, **moderado**, **extensivo** y **completo**, además del daño **nulo**. La descripción de cada uno de ellos, dada para cada tipología estructural, puede consultarse en Milutinovic y Trendafiloski (2003) (RISK-UE, W04). (Tabla 65).

Tabla 65. Grados de daño, según RISK-UE (Milutinovic&Trendafiloski, 2003).

| GRADO DE DAÑO | DESCRIPCIÓN CUALITATIVA | DAÑO ESTRUCTURAL        | DAÑO NO ESTRUCTURAL |
|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1             | Nulo                    | Sin Daños               | Sin daños           |
| 2             | Leve                    | Insignificante a Ligero | Ligero              |
| 3             | Moderado                | Ligero                  | Moderado            |
| 4             | Extenso                 | Moderado                | Severo              |

| GRADO DE DAÑO | DESCRIPCIÓN CUALITATIVA | DAÑO ESTRUCTURAL     | DAÑO NO ESTRUCTURAL  |
|---------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 5             | Completo                | Muy Severo a Colapso | Muy Severo a Colapso |

Fuente: Elaboración propia

Aplicando las probabilidades de daño que ofrecen las curvas de fragilidad (en combinación con las de capacidad y demanda) y teniendo en cuenta el número de edificios de la unidad de trabajo definida (clase social) se puede estimar el número de edificios que experimentarán (previsiblemente) cada tipo de daño aplicando la siguiente expresión:

$$N^{Ti}_{dsj} = P^{Ti}_{dsj} \cdot N^{Ti} \quad [4.9]$$

donde:

**PTidsj** es la probabilidad de que las estructuras tipo  $T_i$  sufran o superen el grado  $dsj$  de daño.

**NTi** es el número de edificios tipo  $T_i$  que hay en la referencia catastral.

**NTidsj** es el número de edificios de la tipología  $T_i$  que se estima que han sufrido el grado  $dsj$  de daño.

### 6.4.3 Otros parámetros de riesgo

#### ➤ PÉRDIDAS HUMANAS

La estimación de pérdidas humanas se realiza siguiendo el método empírico de Coburn and Spence (2002), en función del número de edificios cuyo estado de daño resulte completo (sólo los que se estiman que colapsarían), la densidad de población y la intensidad del movimiento esperado. Estos autores, establecieron una correlación entre las variables en juego, cuya forma funcional se incluye en la ecuación 4.10. Las correlaciones incluyen una serie de coeficientes (M1 a M5) que se calibraron empíricamente a partir de observaciones de terremotos reales. La correlación y los coeficientes incluidos se describen a continuación.

$$K_i = C \cdot M1 \cdot M2 \cdot M3 \cdot (M4 + M5 \cdot (1 - M4)) \quad [4.10]$$

Donde:

**Ki** = número de víctimas por tipología constructiva.

**C** = número total de edificios colapsados de tipología  $i$ .

**M1.** Tasa de ocupación. Número medio de personas por vivienda.

**M2.** % de personas que se encuentran en su vivienda en la hora de ocurrencia del terremoto. En este caso, al tratarse de un estudio probabilista se considerará una media de los diferentes porcentajes de ocupación.

**M3.** % de personas atrapadas por colapso. Este factor refleja el hecho de que no todas las personas que se encuentran en su vivienda cuando el edificio colapsa quedan atrapadas, debido a que el edificio puede no colapsar completamente o inmediatamente, o a que las personas puedan salir por sus propios medios o con ayuda de otras cercanas que hayan quedado ilesas. La Tabla 66 muestra estos porcentajes estimados en función del tipo de edificio y de la intensidad macrosísmica. En este estudio, se supondrá que la peligrosidad sísmica está dominada por sismos próximos.

Tabla 66. Porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, dependiendo de la intensidad del movimiento.

| TIPO DE EDIFICIO                    | INTENSIDAD MACROSÍSMICA |      |    |    |
|-------------------------------------|-------------------------|------|----|----|
|                                     | VII                     | VIII | IX | X  |
| Edif. Mampostería (hasta 3 plantas) |                         |      |    |    |
| No sismorresistentes                | 5                       | 30   | 60 | 70 |
| Sismorresistentes                   | -                       | 10   | 30 | 60 |

| TIPO DE EDIFICIO               | INTENSIDAD MACROSÍSMICA |      |    |    |   |
|--------------------------------|-------------------------|------|----|----|---|
|                                | VII                     | VIII |    | IX | X |
| Estructuras de hormigón armado |                         |      |    |    |   |
| Sismo próximo – corto periodo  |                         |      | 70 |    |   |
| Sismo lejano – largo periodo   |                         |      | 30 |    |   |

Fuente: Elaboración propia

**M4.** % de víctimas por colapso. Un porcentaje de las personas que quedan atrapadas en un edificio que alcanza el grado de daño completo muere y el resto sufren heridas de diferente gravedad, desde daños leves hasta muy graves. Esta distribución se muestra en la Tabla 67 y entra en el modelo de estimación de víctimas por medio del término M4.

Tabla 67. Porcentaje de víctimas por colapso en diferentes tipologías con distinto tipo de daño físico.

| Categoría por tipo de heridos         | Mampostería no reforzada | Mampostería | Hormigón armado |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------|-----------------|
| Muertos o insalvables                 | 10                       | 20          | 40              |
| En estado de urgencia                 | 20                       | 30          | 10              |
| Heridos que requieren hospitalización | 30                       | 30          | 40              |
| Heridos leves                         | 40                       | 20          | 10              |

Fuente: Elaboración propia

**M5.** % de víctimas post-evento. Las personas atrapadas entre los escombros de los edificios colapsados pueden ser rescatadas y atendidas, evitando así peores consecuencias, algo que depende de la efectividad de la acción post-evento. En la Tabla

68 se muestra el porcentaje de personas atrapadas en edificios colapsados que se estima morirán a posteriori en función de la capacidad de acción tras el terremoto. En este estudio, se partirá de una buena respuesta postevento (tipo 4).

Tabla 68. Porcentaje de personas atrapadas entre los escombros que mueren en función de la respuesta post-evento.

| Tipo | Situación   | Mampostería | Hormigón armado |
|------|---|-------------|-----------------|
| 1    | Comunidad incapacitada  | 95          | -               |
| 2    | Comunidad capaz de organizar actividades de rescate             | 60          | 90              |
| 3    | Comunidad con escuadrones de emergencia después de 12 horas     | 50          | 80              |
| 4    | Comunidad con escuadrones de emergencia SAR después de 36 horas | 45          | 70              |

Fuente: Elaboración propia

### Edificios colapsados

Para estimar el número de edificios que alcanzarían el colapso, según la metodología utilizada, se parte del número de edificios con daño completo.

En el caso de los edificios de mampostería, se seguirá la expresión propuesta por Lagomarsino & Giovinazzi (2006) (autores de las curvas utilizadas):

$$P_{S4} = P_5 + P_4 \quad [4.11]$$

donde PS4 representa el porcentaje de edificios con grado de daño completo, P4 el porcentaje de edificios que sufrirán daño fuerte y P5 el porcentaje de edificios colapsados.

El porcentaje de edificios que colapsarán, se calcula mediante la ecuación:

$$P_5 = 0.09 \sinh(0.6\mu_{DS})P_{S4} \quad [4.12]$$

Donde:  $\mu_{DS} = \sum_{k=1}^4 kP_{Sk}$

En el caso de edificios de Hormigón armado, el número de edificios colapsados se estimó siguiendo la metodología propuesta por Hazus (autores de las curvas utilizadas). Siendo este igual al 15% de los edificios con daño completo.

➤ **PÉRDIDAS ECONÓMICAS**

Finalmente se estiman las pérdidas económicas. En este estudio se consideran solo pérdidas económicas directas, es decir, costes de reconstrucción y reparación de las estructuras dañadas (sin tener en cuenta el valor de los contenidos).

Para llevar a cabo este cálculo es necesario conocer previamente el valor catastral medio, para lo que se acude a la información disponible en el departamento de estudios económicos y técnicos de la Cámara Colombiana de la Construcción (Indicadores de la Actividad edificadora, 2011). Esta define el valor catastral como el valor de la construcción completa: suelo, materiales, mano de obra, promoción. El valor catastral medio en cada clase social se muestra en la Tabla 69.

Tabla 69. Valores de construcción por clase social

| Estrato | Precio unitario [pesos/m2] |
|---------|----------------------------|
| 1       | *1.040.757                 |
| 2       | 1.224.420                  |
| 3       | 1.238.602                  |
| 4       | 1.639.963                  |
| 5       | 5.340.688                  |
| 6       | *6.000.000                 |

Fuente: Elaboración propia

\*Los valores de la tabla pertenecientes a los estratos 1 y 6 no estaban definidos y se les otorgó un valor próximo a su tipología más cercana.

Con el valor catastral y la superficie media de una vivienda en el municipio, se obtiene el precio de construir el metro cuadrado:

$$\text{Precio unitario [€/m}^2\text{]} = \text{Valor catastral} / \text{superficie promedio de una vivienda}$$

Para la estimación de la superficie de las viviendas, se utilizó Google Earth, y se extrajo el área promedio de las viviendas dependiendo del estrato social, como se muestra en la Tabla 70.

Tabla 70. Superficie promedio de las viviendas en Neiva, por estrato social.

| Estrato | Superficie promedio de una vivienda [m <sup>2</sup> ] |
|---------|---|
| 1       | 39  |
| 1-2     | 65  |
| 2       | 74  |
| 3-4     | 88.2  |
| 4       | 103   |
| 5       | 238   |
| 5-6     | 347.5   |

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la siguiente expresión se calculan los costes de reparación de cada tipología:

$$CR = ST \cdot PC \cdot PU \quad [4.13]$$

Donde:

- CR** es el coste de reconstrucción.
- ST** es la superficie total construida.
- PC** es la probabilidad de daño completo.
- PU** es el precio unitario.

Los costes de reparación de los daños extensos, moderados y leves se calculan como porcentaje del coste de reconstrucción (Vacareanu et al, 2004) (RISK-UE, W07, p24):

- Coste de reparación del daño leve: el 2% del CR
- Coste de reparación del daño moderado: el 10% del CR
- Coste de reparación del daño extenso: el 50% del CR

#### 6.4.4 Resultados del estudio de riesgo sísmico

El resultado de un estudio como el propuesto comprende un gran conjunto de variables que dan una visión global del riesgo en el municipio de estudio. Estos resultados están destinados a la interpretación y toma de decisiones de personal no especializado en la materia, como gestores económicos, políticos y técnicos de protección civil, cuyo objetivo final, en este caso, es diseñar planes de ordenamiento territorial. Por este motivo, la transmisión concisa y clara de los resultados se considera un apartado de especial importancia dentro del estudio.

Teniendo en cuenta la naturaleza de las variables resultantes y la necesidad de transmitir las de un modo intuitivo y de fácil interpretación, estas serán mostradas por medio de una colección de mapas y tablas donde se expondrán los resultados parciales y finales del estudio, dedicando una especial atención a aquellas variables que pueden ser reducidas por los destinatarios de las mismas, como por ejemplo la vulnerabilidad de las viviendas. Si éstas son reforzadas previamente al evento, su vulnerabilidad se reducirá, y con ello también el daño esperado, lo que obviamente supone una medida de mitigación del riesgo.

Los mapas se expondrán identificando el grado de daño de los edificios residenciales. También se realizarán agrupaciones de los mismos en unidades de trabajo para identificar en qué zonas se espera mayor daño y poder evaluar las infraestructuras de emergencia con las que debe prepararse el municipio estudiado, en este caso Neiva. Estas infraestructuras y otros equipamientos de interés, también serán identificados en un mapa de recursos para la gestión de la emergencia.

A partir de los resultados han extraído recomendaciones para el ordenamiento territorial con vistas al crecimiento de la ciudad de Neiva, y se proponen algunas medidas concretas

para mitigar el riesgo sísmico en la misma, tratando de disminuir el grado de pérdidas por sismos futuros.

#### ➤ ESCENARIOS DE PELIGROSIDAD

En estudios de riesgo a escala urbana la acción sísmica se debe asociar a un escenario sísmico concreto, y no solo a una estimación probabilista en la que la contribución a la peligrosidad de varias fuentes impide identificar de forma directa el terremoto específico que causa el riesgo calculado.

Para la caracterización de movimiento por sismos futuros se establecieron en primer lugar dos escenarios sísmicos derivados del estudio de amenaza descrito en el *Capítulo 2*, con carácter híbrido probabilista-determinista.

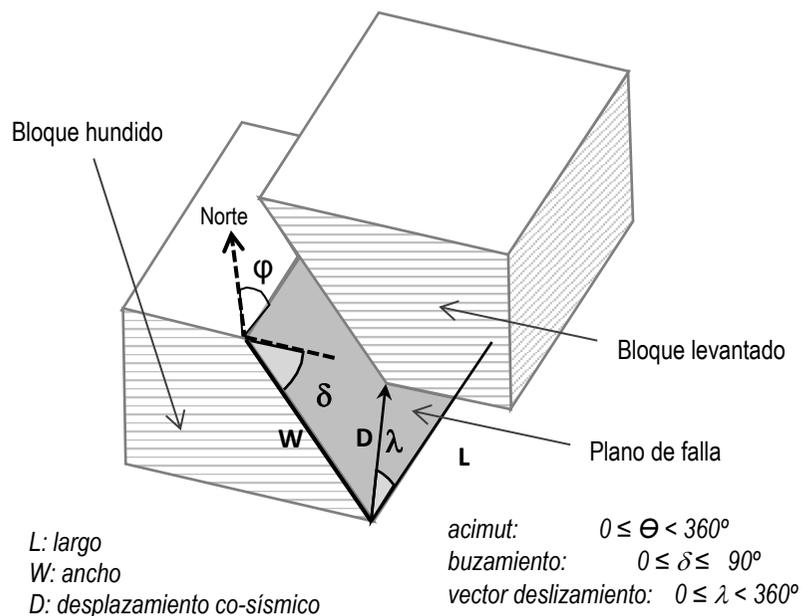
#### Escenario 1 (Falla La Dina, Mw 5.5):

El primer escenario se plantea como el escenario más crítico posible de acuerdo al estudio de amenaza previo. Este escenario ha sido situado en la falla activa conocida más cercana al emplazamiento. La falla más cercana es **la Dina**. Se ha realizado una simulación de terremoto de Mw 5.5, a una distancia hipocentral de 20km y profundidad de 1km. El plano de ruptura fue calculado de acuerdo a los parámetros de la falla descritos en la base de datos de fallas activas cuaternarias realizado por la USGS.

Para la simulación se ha considerado el plano de ruptura de acuerdo a los parámetros de la falla de La Dina, descritos en el estudio. También se ha considerado el mecanismo focal de falla lateral dextral, propuesto en el mismo estudio.

En primer lugar, se modeliza el plano de falla en el que se asume que se produce la ruptura, asumiendo por simplicidad un plano rectangular. Para ello, se utilizan los parámetros geométricos de la falla que se muestran en la Figura 125. Con la traza de la falla, el buzamiento y la profundidad, se pueden obtener como mínimo cuatro puntos que delimitan dicho plano.

Figura 125. Geometría y parámetros de la falla.



Fuente: Elaboración propia

|  |            |
|--|------------|
| Rake                                     | 33°        |
| L  | 5088.47    |
| W  | 4012.48    |
| Coordenada X del punto medio de la traza | 847054.436 |
| Coordenada Y del punto medio de la traza | 822249.418 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la geometría y parámetros de la falla se genera el posible plano de ruptura para la simulación del sismo. La Figura 126 muestra el proceso de cálculo de la posición relativa del plano de ruptura con respecto al punto de cálculo, en base a las coordenadas del punto medio de la traza y los ángulos de la falla, y la Tabla 72 muestra las coordenadas finales del plano generado.

Tabla 72. Coordenadas X e Y del plano de ruptura generado.

| ID | Coordenada X | Coordenada Y | Profundidad (km) |
|----|--------------|--------------|------------------|
| 1N | 848440       | 824383       | -1000            |
| 1S | 845669       | 820116       | -1000            |
| 2S | 847832       | 818711       | -4074            |
| 2N | 850603       | 822978       | -4074            |

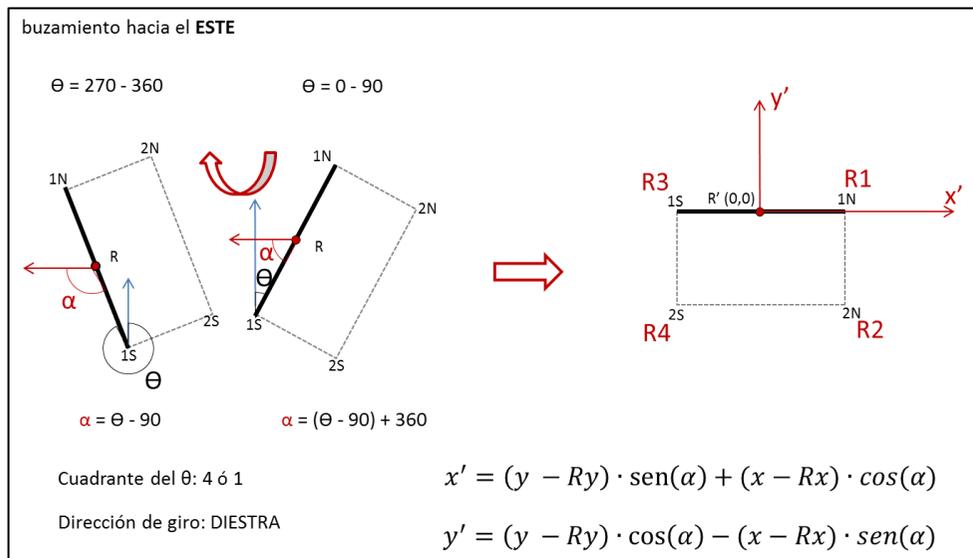
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 71 muestra los parámetros de la falla y el plano de ruptura considerado para el escenario sísmico establecido.

Tabla 71. Parámetros de la falla La Dina utilizados para la simulación del escenario 1.

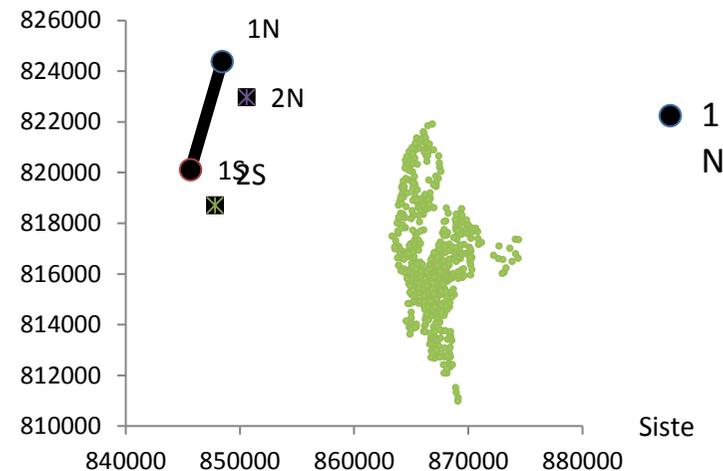
|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| Mw                | 5.5             |
| Mecanismo         | Lateral Dextral |
| Acimut $\Theta$   | 32.9°           |
| Buz (dip) $\beta$ | 50°             |

Figura 126. Cálculo de la posición relativa del plano de ruptura de la falla con respecto al punto medio de la traza establecido y los parámetros geométricos de la falla



Fuente: Elaboración propia

Figura 127. Plano de ruptura

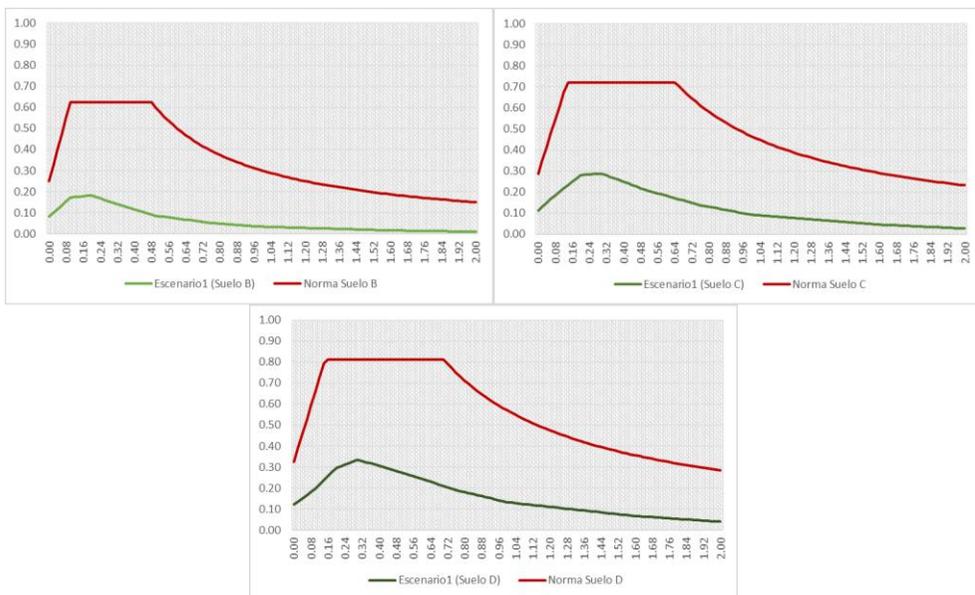


Fuente: Elaboración propia

El modelo de atenuación utilizado para la caracterización de movimiento incluyendo el efecto local ha sido el de Campbell y Bozorgnia (2013). Este modelo se elige por dos razones: es uno de los empleados para ismos corticales en el cálculo de la amenaza y 2) resulta el más idóneo para la modelización del plano de ruptura.

Los espectros de respuesta específicos que resultan para este escenario en distintos tipos de suelo se muestran en la Figura 128, comparados con los que propone la NRS-10 para el mismo suelo.

Figura 128. Espectros específicos para el sismo de Mw 5.5 asociado al escenario 1, y su comparación con la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente: Suelo B (arriba izquierda); Suelo C(arriba derecha) y Suelo D (abajo).



Fuente: Elaboración propia

**Escenario 2 (Subducción, Mw 7.2):**

El segundo escenario más crítico de acuerdo a los estudios de geología y tectónica ha sido asociado a la zona de subducción con una magnitud de Mw7.2, localizada a una profundidad de 150 km y distancia al plano de ruptura de 180km.

Los espectros específicos para este escenario se han calculado aplicando los modelos de predicción del movimiento de Zhao et al (2006), para régimen de subducción que han sido los empleados para representar la atenuación en el cálculo de la peligrosidad. Estos son modelos espectrales, definidos para la predicción de la PGA y de SA(T) para periodos T hasta

de 5s. Incluyen además un término para contemplar el efecto local, permitiendo obtener directamente los espectros dependiendo del tipo de suelo.

El modelo de Zhao et al (2006) considera cinco posibles tipos de suelo, que se corresponden con las clases definidas en NEHRP según se indica en la Tabla 73.

Tabla 73. Descripción de suelos utilizados en el estudio de atenuación de Zhao et. Al 2006 y su correspondencia con la clasificación de suelos del NEHRP.

| Site Class Definitions Used in the Present Study and the Approximately Corresponding NEHRP Site Classes |              |                |                                 |                    |
|---|--------------|----------------|---------------------------------|--------------------|
| Site Class  | Descriptions | Natural Period | V30 Calculated from Site Period | NEHRP Site Classes |
| Hard rock   |              |                | V30>1100                        | A                  |
| SC I  | Rock         | T<0.2 sec.     | V30>600                         | A+B                |
| SC II   | Hard soil    | 0.2=T<0.4 sec. | 300<V30=600                     | C                  |
| SC III  | Medium soil  | 0.4=T<0.6 sec. | 200<V30=300                     | D                  |
| SC IV   | Soft soil    | T=0.6 sec.     | V30=200                         | E+F                |

Fuente: Elaboración propia

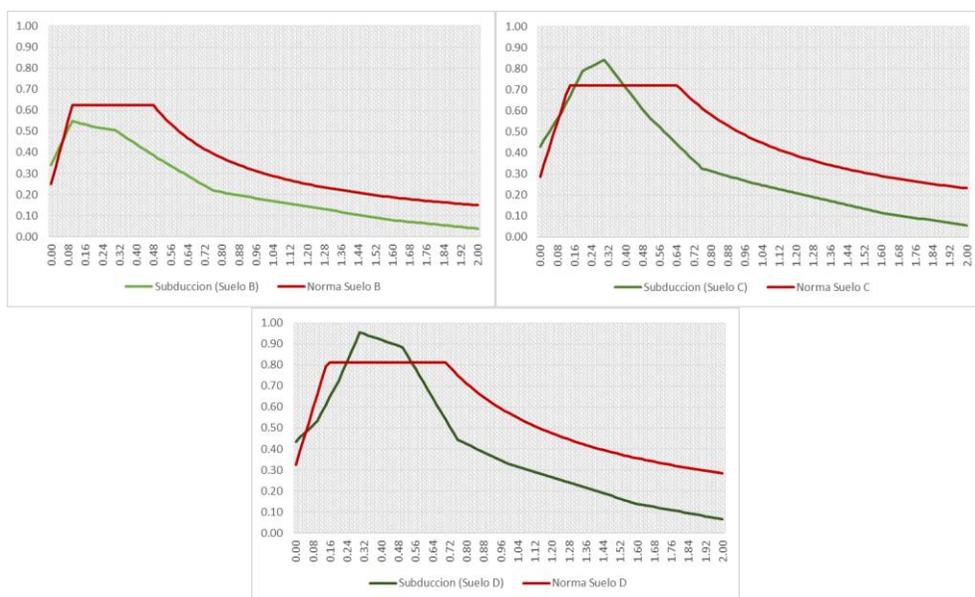
Tabla 74. Parámetros del sismo asociado a la zona de subducción

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| Mw                         | 7.0          |
| Distancia hipocentral      | 180 km       |
| Distancia epicentral       | 100 km       |
| Profundidad                | 150 km       |
| Coordenada X del epicentro | 785092.832 m |
| Coordenada Y del epicentro | 982182.164 m |

Fuente: Elaboración propia

Los espectros de respuesta específicos estimados para la ciudad de Neiva, a causa del sismo asociado a la zona de subducción, en los tres suelos dominantes de la ciudad se muestran en la Figura 129, junto con los espectros propuestos por la NSR-10 para los mismos tipos de suelo.

Figura 129. Espectros específicos para el sismo de Mw 7.0 asociado al escenario 2 y su comparación con la NSR-10 para el tipo de suelo correspondiente: Suelo B (arriba izquierda); Suelo C (arriba derecha) y Suelo D (abajo).



Fuente: Elaboración propia

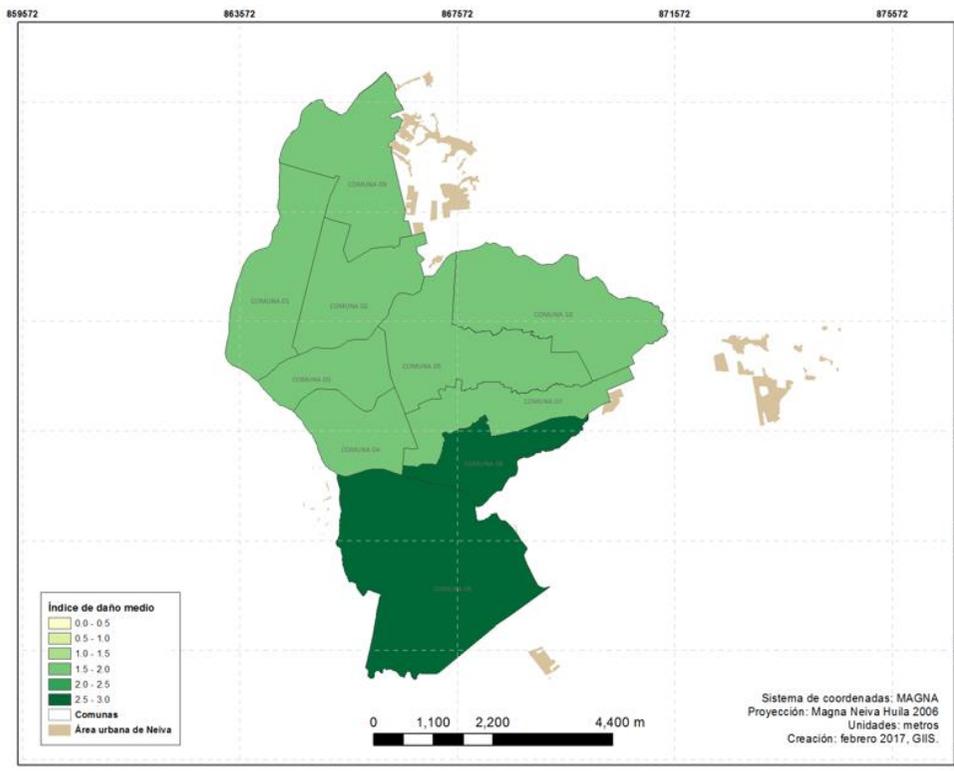
➤ **Mapas de resultados de riesgo**

Se incluyen en este sub apartado los mapas que representan los resultados del cálculo de riesgo, expresado en términos de los diferentes parámetros que han sido estimados para cada uno de los escenarios de amenaza definidos.

**Escenario 1 (Falla La Dina, Mw 5.5):**

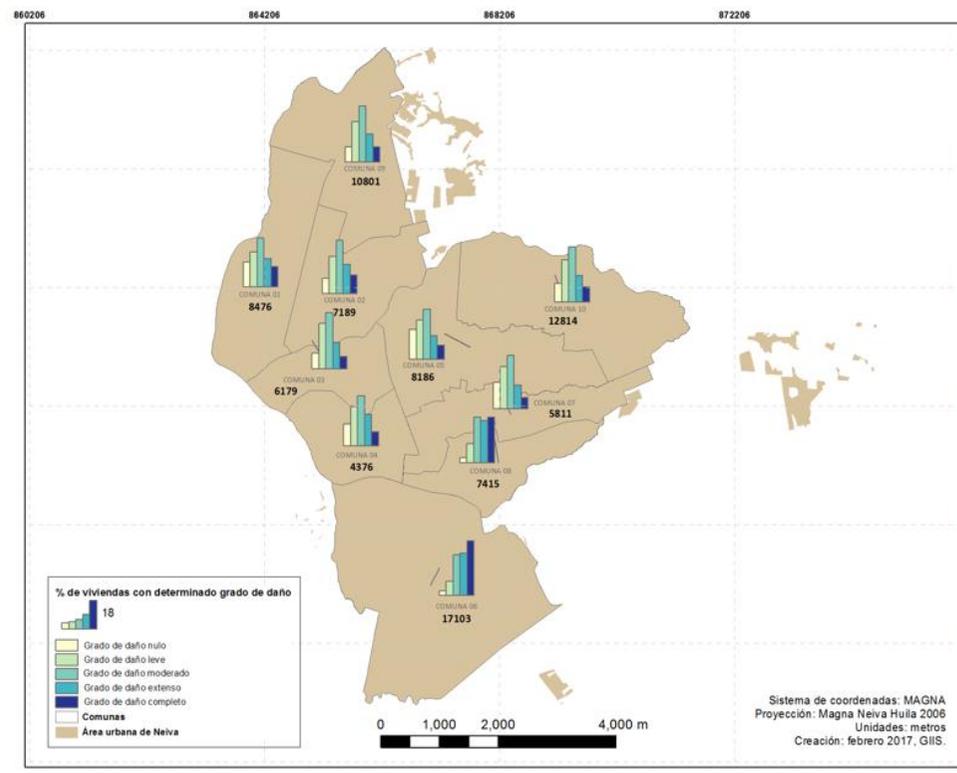
La Figura 130 y Figura 131 muestran los mapas de viviendas con diferentes grados de daño resultantes del sismo Mw 5.5.

Figura 130. Mapa de índice de daño medio para la ciudad de Neiva a causa del sismo de Mw7.0.



Fuente: Elaboración propia

Figura 131. Mapa de porcentaje de viviendas con grado de daño nulo para el sismo de Mw7.0.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 75, Tabla 76 y la Tabla 77 sintetizan los resultados de riesgo obtenidos para el escenario 1 (Falla Ibagué, Mw 5.5). Dichas tablas muestran las distribuciones de daño en viviendas, víctimas y costes, respectivamente, desglosados por comunas.

Tabla 75. Resultados de daño en viviendas para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva.

| Comuna | Nº viviendas total | Nº viviendas con daño nulo | Nº viviendas con daño leve | Nº viviendas con daño moderado | Nº viviendas con daño extenso | Nº viviendas con daño completo | IDM |
|--------|--------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----|
| 1      | 8476               | 5511                       | 2193                       | 662                            | 97                            | 13                             | 0.5 |
| 2      | 7189               | 4878                       | 1785                       | 466                            | 53                            | 7                              | 0.4 |
| 3      | 6179               | 4461                       | 1399                       | 282                            | 35                            | 3                              | 0.3 |
| 4      | 4376               | 3397                       | 773                        | 182                            | 23                            | 1                              | 0.3 |
| 5      | 8186               | 6496                       | 1372                       | 289                            | 27                            | 3                              | 0.2 |
| 6      | 17103              | 9422                       | 6104                       | 1401                           | 160                           | 17                             | 0.6 |
| 7      | 5811               | 4799                       | 846                        | 152                            | 12                            | 1                              | 0.2 |
| 8      | 7415               | 3899                       | 2662                       | 762                            | 83                            | 9                              | 0.6 |
| 9      | 10801              | 7287                       | 2822                       | 628                            | 57                            | 6                              | 0.4 |
| 10     | 12814              | 10440                      | 2035                       | 315                            | 22                            | 2                              | 0.2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 76. Resultados de costes para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva.

| Comuna | Costes de reconstrucción (peso colombiano) | Costes de reparación extensa (peso colombiano) | Costes de reparación moderada (peso colombiano) | Costes de reparación ligera (peso colombiano) |
|--------|--|--|---|---|
| 1      | 1023.93                                    | 20.48  | 102.39  | 511.96  |
| 2      | 559.5                                      | 11.19  | 55.95   | 279.75  |
| 3      | 147.9                                      | 2.96   | 14.79   | 73.95   |
| 4      | 57.9                                       | 1.16   | 5.79  | 28.95   |
| 5      | 115.8                                      | 2.32   | 11.58   | 57.9  |
| 6      | 678.04                                     | 13.56  | 67.8  | 339.02  |
| 7      | 0.00                                       | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
| 8      | 337.25                                     | 6.75   | 33.73   | 168.63  |
| 9      | 110.72                                     | 2.21   | 11.07   | 55.36   |

| Comuna | Costes de reconstrucción (peso colombiano) | Costes de reparación extensa (peso colombiano) | Costes de reparación moderada (peso colombiano) | Costes de reparación ligera (peso colombiano) |
|--------|--|--|---|---|
| 10     | 26.41                                      | 0.53   | 2.64  | 13.21   |

\*Los costes se muestran en millones de pesos colombianos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 77. Resultados de víctimas para el escenario 1 (cortical, Mw 5.5) de Neiva

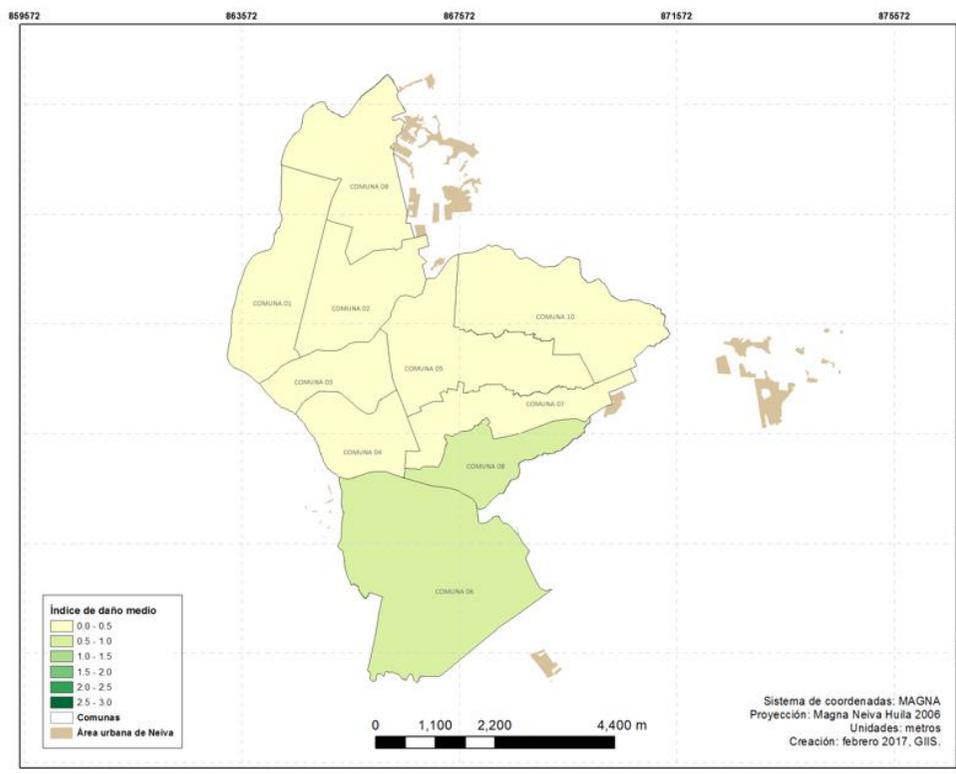
| Comuna | Muertos | Urgencia | Atención médica | Con heridas | Sin daños |
|--------|---------|----------|-----------------|-------------|-----------|
| 1      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 2      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 3      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 4      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 5      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 6      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 7      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 8      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 9      | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |
| 10     | 0       | 0        | 0               | 0           | 0         |

Fuente: Elaboración propia

**Escenario 2: (Sismo de subducción, Mw 7.2)**

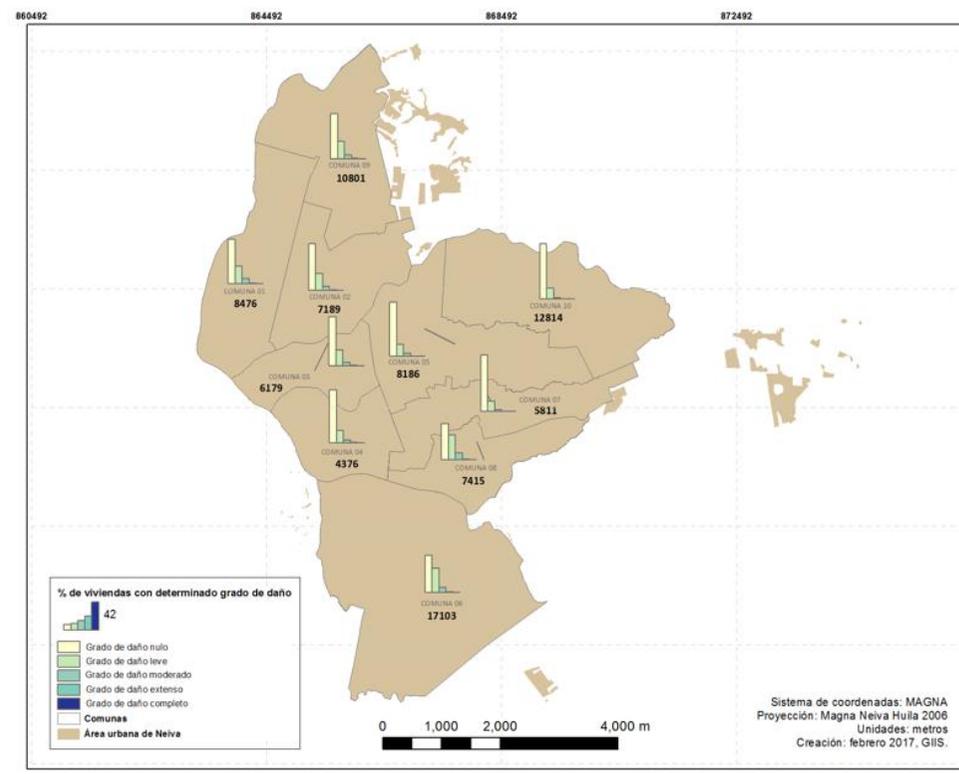
La Figura 132 y Figura 133 muestran los mapas de viviendas con diferentes grados de daño resultantes del escenario sísmico 2.

Figura 132. Mapa de índice de daño medio para la ciudad de Neiva a causa del sismo de Mw5.5.



Fuente: Elaboración propia

Figura 133. Mapa de número de viviendas con los diferentes grados de daño: leve, extenso, moderado, completo y nulo para el sismo de Mw5.5.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 78, Tabla 79 y Tabla 80 sintetizan los resultados del cálculo del riesgo asociado al escenario 2 (Subducción, Mw 7.2). Dichas tablas muestran las distribuciones de daño en viviendas, víctimas y costes, respectivamente, desglosados por comunas.

Tabla 78. Resultados de daño en viviendas para el escenario 2 (subducción, Mw 7.2) de Neiva.

| Comuna | Nº viviendas | Nº viviendas con daño nulo | Nº viviendas con daño leve | Nº viviendas con daño moderado | Nº viviendas con daño extenso | Nº viviendas con daño completo | IDM |
|--------|--------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----|
| 1      | 8476         | 1330                       | 1892                       | 2636                           | 1514                          | 1103                           | 1.9 |
| 2      | 7189         | 713                        | 1731                       | 2479                           | 1370                          | 896                            | 2   |
| 3      | 6179         | 588                        | 1771                       | 2225                           | 1071                          | 525                            | 1.9 |
| 4      | 4376         | 623                        | 1089                       | 1397                           | 856                           | 410                            | 1.8 |
| 5      | 8186         | 1552                       | 2028                       | 2622                           | 1236                          | 748                            | 1.7 |
| 6      | 17103        | 433                        | 1527                       | 4429                           | 4667                          | 6047                           | 2.8 |
| 7      | 5811         | 1009                       | 1578                       | 1978                           | 864                           | 382                            | 1.7 |
| 8      | 7415         | 204                        | 865                        | 2174                           | 2022                          | 2151                           | 2.7 |
| 9      | 10801        | 1115                       | 2854                       | 3839                           | 1896                          | 1098                           | 1.9 |
| 10     | 12814        | 1518                       | 3431                       | 4444                           | 2180                          | 1241                           | 1.9 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 79. Resultados de costes para el escenario 2 (subducción, Mw 7.3) de Neiva.

| Comuna | Costes de reconstrucción (peso colombiano) | Costes de reparación extensa (peso colombiano) | Costes de reparación moderada (peso colombiano) | Costes de reparación ligera (peso colombiano) |
|--------|--|--|---|---|
| 1      | 88.48                                      | 1.77   | 8.85  | 44.24   |
| 2      | 73.023                                     | 1.46   | 7.30  | 36.51   |
| 3      | 46.07                                      | 0.92   | 4.61  | 23.04   |
| 4      | 44.99                                      | 0.89   | 4.49  | 22.45   |
| 5      | 50.45                                      | 1.01   | 5.04  | 25.23   |
| 6      | 356.66                                     | 7.13   | 35.67   | 178.33  |
| 7      | 43.72                                      | 0.87   | 4.37  | 21.86   |
| 8      | 82.39                                      | 1.65   | 8.24  | 41.19   |
| 9      | 54.25                                      | 1.08   | 5.42  | 27.12   |
| 10     | 54.02                                      | 1.09   | 5.40  | 27.01   |

\*Los costes se muestran en miles de millones de pesos colombianos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 80. Resultados de víctimas para el escenario 2 (subducción, Mw 7.2) de Neiva.

| Comuna | Muertos | Urgencia | Atención médica | Con heridas | Sin daños |
|--------|---------|----------|-----------------|-------------|-----------|
| 1      | 69      | 73       | 79              | 83          | 194       |
| 2      | 59      | 61       | 66              | 69          | 129       |
| 3      | 33      | 34       | 36              | 37          | 45        |
| 4      | 28      | 28       | 30              | 30          | 10        |
| 5      | 38      | 41       | 44              | 46          | 116       |
| 6      | 453     | 491      | 532             | 570         | 1990      |
| 7      | 24      | 24       | 26              | 27          | 17        |
| 8      | 144     | 157      | 170             | 183         | 687       |
| 9      | 64      | 69       | 75              | 80          | 266       |
| 10     | 65      | 70       | 76              | 81          | 264       |

Fuente: Elaboración propia

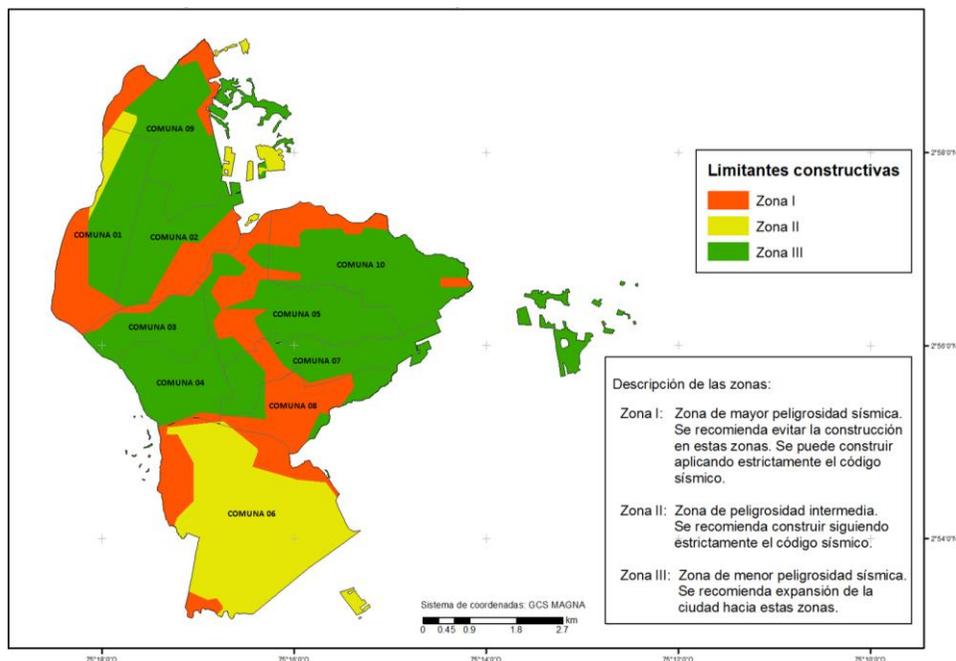
## 6.5 MAPA DE LIMITANTES CONSTRUCTIVAS

Finalmente, se ha construido un mapa de limitantes constructivas que sintetiza el conjunto de resultados obtenidos y que pretende servir de base para la planificación de la expansión de la ciudad, considerando al mismo tiempo una posible mitigación del riesgo sísmico existente. (Figura 134).

Conviene destacar que, aunque en cualquier zona de la ciudad se podría construir siguiendo estrictamente el código sísmico, se recomienda evitar las zonas de mayor amenaza, marcadas en rojo en el mapa. Estas zonas ocupan pequeñas extensiones del municipio, y se localizan en bandas de orientación NS y EW, como puede verse en la figura 6-52. Afectan esencialmente a las comunas 2, 5 y 8, aunque no al total de las mismas. Las zonas de menor amenaza, destacadas en verde, serían las zonas más idóneas para expansión de la ciudad. Estas zonas se localizan principalmente en las partes Centro-Oeste, Este y Norte. Las zonas de amenaza intermedia, marcadas en amarillo, se localizan esencialmente en la Comuna 6, al sur de la ciudad. También hay pequeñas extensiones en la parte Noroeste y Noreste. Estas zonas también serían factibles para la expansión de la ciudad, si bien el nivel de diseño

debería ser más estricto que en las zonas de amenaza más baja, lo que tendría también cierta repercusión económica.

Figura 134. Mapa de limitantes constructivas recomendado para la ciudad de Neiva, en base a los resultados de amenaza sísmica.



Fuente: Elaboración propia

## 6.6 RESUMEN, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

A continuación se presenta un resumen del estudio de riesgo sísmico realizado, que ha conllevado el desarrollo de sucesivas fases destinadas al cálculo de la amenaza sísmica, estimación de la exposición, caracterización de la vulnerabilidad y finalmente cálculo del daño esperado en edificaciones, así como estimación de pérdidas humanas y materiales. Se

presenta a continuación una síntesis del estudio desarrollado, destacando los principales resultados y conclusiones de las fases planteadas y las recomendaciones hacia la mitigación del riesgo y la expansión de la ciudad.

Se ha efectuado, en primer lugar, un estudio de amenaza sísmica que ha llevado a obtener los movimientos esperados por sismos futuros asociados a dos probabilidades de excedencia: 10 % y 5 % en un tiempo de exposición de 50 años. Estas probabilidades corresponden, respectivamente, a periodos de retorno PR de 475 y 975 años, que son los usados en normativas para viviendas convencionales y de especial importancia. Como información de base para este estudio se han tenido en cuenta los resultados de estudios previos desarrollados en la ciudad o en regiones incluyendo la misma, que han aportado información relevante (ver apartado 6.2.1). Esos estudios fueron desarrollados en los años 2000 y 2009, y en el periodo transcurrido desde entonces han ocurrido nuevos eventos y se han desarrollado también avances metodológicos para el mejor conocimiento de la amenaza. Por ello, el nuevo estudio realizado se ha planteado como una actualización de los anteriores, incorporando mejoras metodológicas y partiendo de una base de datos con información actualizada del catálogo sísmico, datos sismotectónicos, modelos de atenuación, geotecnia, etc. En este estudio, además de actualizar esos datos, se han llegado a caracterizar los escenarios sísmicos dominantes, tanto para el sismo probable, asociado a PR 475 años, como para el sismo extremo de PR 975 años. Los espectros resultantes tienen carácter híbrido determinista-probabilista y constituyen después las curvas de demanda a incluir en el cálculo del riesgo sísmico. Esto supone un paso más respecto a los estudios previos desarrollados, acorde al estado del arte. No obstante, conviene resaltar que toda la información recabada de los estudios mencionados es de gran importancia y ha sido también incluida en nuestra base de datos de partida.

1. Los cálculos se han efectuado en una malla de puntos cubriendo la ciudad de Neiva, en emplazamientos genéricos en roca y expresando el movimiento en términos de aceleración pico, PGA y aceleraciones espectrales, SA (0.1 s) y SA (1s). Los mapas correspondientes a PR 475 años se muestran en las figuras 2-20, 2-21 y 2-22. La mayor amenaza resulta en la parte norte de la ciudad, con valores de PGA en torno a 0.2 g, que van disminuyendo ligeramente hacia el sur, donde

se alcanzan valores de unos 0.18 g. Las variaciones de amenaza en roca son muy pequeñas a lo largo de la ciudad.

2. Se ha analizado además el efecto local que pueden presentar los diferentes tipos de suelo existentes en la ciudad sobre el movimiento sísmico en roca. Para ello, se ha partido del mapa del *Mapa de Zonificación Geotécnica de Neiva* realizado por el Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A (2000). Este mapa ha sido digitalizado y georreferenciado especialmente para el estudio, dado que no ha sido posible obtenerlo en soporte digital. Se ha establecido una correspondencia entre las descripciones geológicas y parámetros geotécnicos de ese mapa con las clases definidas en la clasificación del NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program, 2009). Esta ha sido la clasificación finalmente adoptada, dado que en ella se proponen factores de amplificación sobre el corto y largo periodo del movimiento. El mapa final resultante con las clases de suelo diferenciadas en Neiva se muestra en la Figura 100.
3. Superponiendo los mapas previos de amenaza en roca con el mapa de suelos descrito en el punto anterior, y adoptando los factores de amplificación propuestos en NEHR(2009), se han obtenido los correspondientes mapas de amenaza incluyendo el efecto local (mapas en suelo). Dichos mapas se muestran en la Figura 107, Figura 108 y Figura 109 para PR 475 años y Figura 110, Figura 111 y Figura 112 para PR 975 años. La distribución de valores de aceleración que aparece en estos mapas es mucho más heterogénea que en los mapas previos en roca, poniendo de manifiesto la variabilidad de suelos y su efecto en el movimiento sísmico. En algunas zonas de la ciudad se llega a valores de PGA de 0.36 g para PR 475 años.
4. Además de los mapas, se han obtenido espectros de respuesta de peligrosidad uniforme UHS para PR 475 años en los 3 tipos de suelo existentes en la ciudad (B, C y D según clasificación de NEHRP, 2009). Estos espectros se han comparado con los que propone la Norma Colombiana, NRS-10, pudiendo observarse que estos últimos exceden notablemente a los UHS en los largos periodos estructurales y se ajustan muy bien a los deducidos para los cortos periodos,  $T < 0.2s$ .

5. Del estudio de amenaza, se derivan además dos escenarios sísmicos dominantes:

*Escenario 1.* Asociado al sismo de control que resulta con mayor contribución a la amenaza para PR 475 años, es decir con el sismo probable. Se identifica con un sismo local de magnitud Mw 5.5 localizado en la falla de La Dina a una distancia de la ciudad R de 20 km.

*Escenario 2.* Asociado al sismo de control que resulta con mayor contribución a la amenaza para PR 975 años, es decir con el sismo extremo. Se identifica con un sismo de magnitud 7.2, que ocurriría en la zona de subducción a profundidad de unos 150 km y distancia al plano de ruptura de 180 km

Los espectros de respuesta de esos dos sismos en diferentes partes de la ciudad se muestran en la Figura 128 y Figura 129 para el sismo probable y extremo, respectivamente. Estos deberían ser considerados a la hora de definir espectros de diseño de nuevas edificaciones.

6. Comparando los espectros específicos para los dos escenarios definidos, con los propuestos por la NRS-10 se observa que estos últimos cubren en todo el rango de periodos a los espectros específicos para el sismo cortical de Mw 5.5 en la falla de La Dina (escenario 1), a 20 km de distancia. Sin embargo, en el caso del sismo de subducción con Mw 7.2 (escenario 2) los espectros de la normativa son ligeramente excedidos en periodos intermedios (0.2-0.6 s) para los suelos más blandos, C y D.
7. En el estudio de vulnerabilidad, se han identificado 6 tipologías diferentes; dos de ellas con estructura de concreto armado, dos de mampostería, una con sistema estructural mixto con sistema de pórticos y de mampostería y otra de materiales débiles como caña, madera y chapa, aunque ésta última se observa en áreas exteriores de la ciudad, para las que no se cuenta con estudios previos de microzonificación. La Tabla 62 recoge las tipologías dominantes, a las que se han

asignado las clases de vulnerabilidad especificadas en la Tabla 63. Dentro de cada clase se contemplan subclases atendiendo al nivel de diseño sísmico y a su altura. De las cinco clases, las que resultan dominantes son las conocidas como PCAP y PMBCB. Las primeras son construcciones con estructuras de pórticos de concreto armado y paredes de bloques de arcilla o concreto, y las segundas son sistemas estructurales mixtos de pórticos y de mampostería de baja calidad.

8. En lo referente a la exposición, tanto las viviendas como la población se encuentran distribuidas de forma bastante heterogénea por la ciudad, existiendo núcleos de mayor densidad localizados al Este, Sureste y Noroeste. Globalmente la mitad Oeste concentra mayor densidad de población (Figura 118, Figura 119 y Figura 120).
9. Combinando la amenaza, con la vulnerabilidad y exposición, se ha estimado el riesgo sísmico, correspondiente a los dos escenarios antes definidos. En cada caso se ha estimado el daño esperado por la acción sísmica correspondiente a los dos escenarios, desglosando 5 grados de daño: nulo, leve, moderado, extenso y colapso. Como estimadores de riesgo se han obtenido los porcentajes y números de viviendas que resultan para cada grado de daño definido. Los correspondientes mapas se muestran en la Figura 130 y Figura 131 para el primer escenario y Figura 132 y Figura 133 para el segundo.

El resumen del número de viviendas que resulta con cada grado de daño se incluye en la Tabla 81.

Tabla 81 Número de viviendas en función del grado de daño

| Escenarios sísmicos  | Viviendas | Daño Ligero | Daño moderado | Daño extenso | Daño completo | Sin daños |
|----------------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------------|-----------|
| Escenario 1 (Mw 5.5) | 88350     | 21991       | 5139          | 569          | 62            | 60590     |
| Escenario 2 (Mw 7.2) | 88350     | 18766       | 28223         | 17676        | 14601         | 9085      |

Fuente: Elaboración propia

Para el primer escenario, se alcanza un índice de daño medio de 0.4, lo que indica que la mayor parte de las edificaciones y viviendas no sufrirían daños. En el caso del sismo de Mw7.2 asociado al segundo escenario, se alcanzaría un índice de daño medio de 2, lo que indica que la mayoría de las edificaciones presentarían grado de daño moderado. No obstante, en este caso, un 16% de las viviendas podría alcanzar un grado de daño completo, debido a las condiciones de terreno donde se encuentran ubicadas y a las tipologías constructivas de la zona. La mayor parte de estos daños se observan en las zonas de la ciudad donde estudios previos de microzonificación sísmica muestran la existencia de suelos blandos, que tienden a amplificar el movimiento.

Los mayores daños se esperan en las tipologías denominadas MMNC\_M y PMBCB, correspondientes a edificaciones con pórticos de mampostería no reforzada en el primer caso y a sistemas mixtos de pórticos y mampostería de baja calidad de construcción, en el segundo caso. Estas tipologías deberían ser reforzadas con soluciones prácticas constructivas, a fin de reducir su vulnerabilidad.

10. Además del daño físico, se han estimado otros indicadores de riesgo para los dos escenarios sísmicos –frecuente y extremo- , como son: daño medio, número de personas que quedarían sin hogar, costes de reconstrucción, costes de reparación y coste total.

La Tabla 75, Tabla 76 y Tabla 77 muestran los resultados de todos los parámetros de riesgo desglosados por comunas para la ciudad de Neiva para el sismo asociado al escenario 1 (Falla de Dina, Mw 5.5) y la Tabla 78, Tabla 79 y Tabla 80 muestran los resultados para el escenario 2 (subducción, Mw. 7.2).

El resumen del número total de víctimas y costes estimados se incluye en la Tabla 82.

Tabla 82 Número total de víctimas y costes estimados para los escenarios 1 (Mw 5.5) y 2 (Mw 7.2)

| Escenarios sísmicos  | IDM | Víctimas mortales | Costes de reconstrucción (*) | Costes de reparación (*) |
|----------------------|-----|-------------------|------------------------------|--------------------------|
| Escenario 1 (Mw 5.5) | 0.4 | 0                 | 0.30                         | 1.90                     |
| Escenario 2 (Mw 7.2) | 2   | 977               | 894.05                       | 554.31                   |

\*Los costes se muestran en miles de millones de pesos colombianos.

Fuente: Elaboración propia

11. Finalmente, se construyó un mapa de limitantes constructivas que sintetiza el conjunto de resultados obtenidos, que pretende servir de base para la planificación de la expansión de la ciudad considerando al mismo tiempo una posible mitigación del riesgo sísmico existente (Figura 134). Conviene destacar que, aunque en cualquier zona de la ciudad se podría construir siguiendo estrictamente el código sísmico, se recomienda evitar las zonas de mayor amenaza, marcadas en rojo en el mapa. Las zonas de menor amenaza, destacadas en verde, serían las zonas más idóneas para expansión de la ciudad.

## 7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Las medidas de mitigación propuestas se dividen en medidas estructurales y no estructurales o de gestión. Las primeras conllevan obra civil con el objeto de eliminar un problema ya producido y tienen un efecto inmediato sobre él. Las actuaciones no estructurales son aquellas que necesitan una planificación previa, una visión de largo plazo y la coordinación de diferentes organismos públicos para que éstas sean factibles.

Dentro de las medidas estructurales se plantean:

- 1- Inundación: Ampliación del encauzamiento de la Quebrada La Toma
- 2- Inundación y remoción en masa: Topografía 1:500 y estudio geotécnico zona Centro de Salud 7 de Agosto
- 3- Inundación : Reubicación de la población en la zona no canalizada de los ríos del Oro y Las Ceibas
- 4- Inundación: Dique de protección Río Las Ceibas
- 5- Sismo: Mejora integral barrial

Dentro de las no estructurales

- 1- Estrategias de compromiso y difusión

### 7.1 MEDIDAS ESTRUCTURALES

#### 7.1.1 Quebrada La Toma

La Toma presenta dos tramos claramente diferenciados: la parte encauzada, correspondiente aproximadamente a los últimos 3 kilómetros antes de su desembocadura, y la parte no encauzada, aguas arriba del encauzamiento.

Referente a la parte no encauzada la escala de este estudio (1:5000) no representa el cauce correctamente, por lo que de acuerdo al Decreto 1077 de 2015 se precisaría de una escala 1:2000 para el estudio detallado del mismo.

En la Figura 135 se muestra uno de los tramos de la Quebrada previos al encauzamiento

Figura 135. Tramo no encauzado de la Quebrada La Toma



Fuente: IDOM

Además, resulta preciso destacar la problemática ambiental que presenta la Quebrada de La Toma. La localización de asentamientos precarios en zonas inundables en la parte alta, así como el arrojo de basuras y otros residuos son responsables del deterioro que presenta este cauce., por ello es necesario reducir el número de asentamientos en riesgo, así como disminuir la contaminación que estos generan.

A continuación, en los apartados 7.1.2 y 7.1.3 se desarrollarán dos de las medidas de mitigación propuestas en la cuenca de esta quebrada, siendo estas las siguientes:

- Ampliación del encauzamiento en 200 metros de la Quebrada La Toma
- Topografía de la Quebrada frente a Centro de Salud 7 de Agosto

En la Figura 136, se muestra un esquema explicativo de la Quebrada de La Toma y la ubicación de las medidas de mitigación propuestas.

Figura 136. Cuenca de la Quebrada La Toma



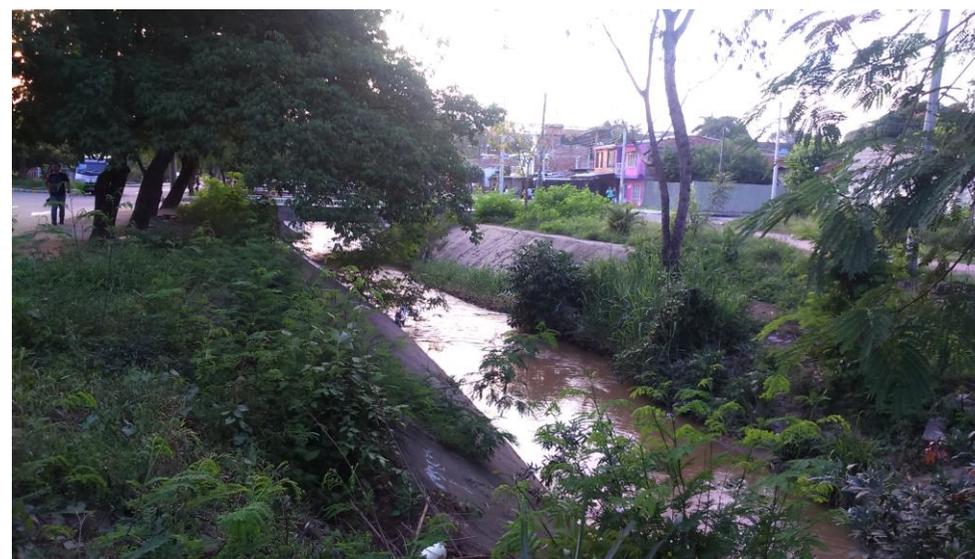
Fuente: Elaboración propia

➤ **AMPLIACIÓN DEL ENCAUZAMIENTO DE LA QUEBRADA LA TOMA**

En la actualidad, La Toma se encuentra canalizada en aproximadamente la mitad de su longitud, tal y como se muestra en la Figura 136. De acuerdo a los modelos hidráulicos desarrollados para el análisis de esta quebrada, no aparecen afecciones por inundación en el encauzamiento para ninguno de los periodos de retorno estudiados.

En la Figura 137 se muestra la situación actual del comienzo del encauzamiento de la Quebrada La Toma.

Figura 137. Transición en el comienzo del encauzamiento de la Quebrada La Toma

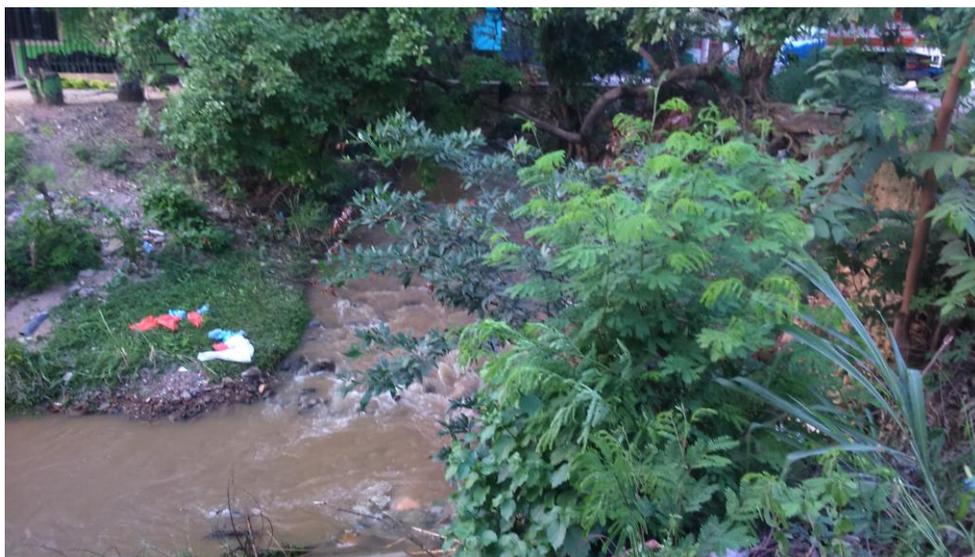


Fuente: IDOM

En base a las reuniones mantenidas con las autoridades competentes, se propone un aumento del encauzamiento 200 metros aguas arriba del actual, coincidiendo el inicio del mismo con la unión de la Quebrada El Acueducto, en la margen derecha de La Toma.

En la Figura 138 se muestra el tramo no canalizado previo al actual encauzamiento.

Figura 138. Tramo no canalizado en La Toma en la unión con el encauzamiento



Fuente: IDOM

Para el estudio de la rentabilidad de esta solución, a continuación se desarrollará un análisis coste-beneficio, para lo cual se ha calculado previamente, y en base a los modelos hidráulicos realizados, la pérdida anual esperada de las edificaciones afectadas por la inundación de la quebrada en el tramo donde se propone la canalización así como el coste de inversión de la construcción del encauzamiento.

### Cálculo Coste-Beneficio

A continuación en este apartado se realizará un análisis coste-beneficio para valorar la inversión necesaria de la ampliación del encauzamiento de la Quebrada La Toma 200 metros aguas arriba.

De esta forma se expondrán cuáles han sido los beneficios y coste de inversión considerados y los resultados obtenidos para valorar la rentabilidad de la inversión.

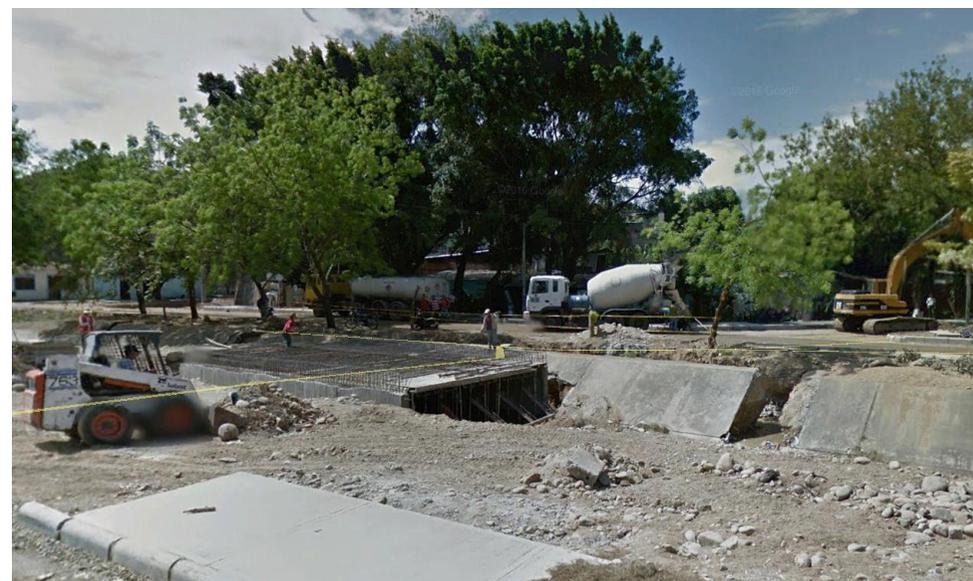
### *Beneficios:*

La suma de la Pérdida Anual Esperada (PAE) en esa zona asciende a US\$ 172.577

### *Coste de la inversión:*

Para determinar el coste aproximado de la ejecución de la obra, se ha considerado como sección transversal tipo, la existente en el punto del inicio del actual encauzamiento aguas arriba.

Figura 139. Ejecución de las obras de la actual canalización de la Quebrada La Toma



Fuente: Google Earth

Se ha establecido una longitud total de encauzamiento de unos 320 metros, coincidentes con la unión de la Quebrada El Acueducto, además de un espesor de recubrimiento del canal de unos 30 cm. Así, se ha estimado un coste aproximado para la ejecución de la obra de unos US\$ 230.925.

**Rentabilidad de la inversión:**

Para comprobar la rentabilidad de la inversión y el tiempo necesario para recuperarla se han actualizado los ingresos que suponen las pérdidas evitadas cada año con una tasa de descuento del 12%, usualmente utilizada por el Banco Interamericano de Desarrollo en proyectos de similares características, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 83.

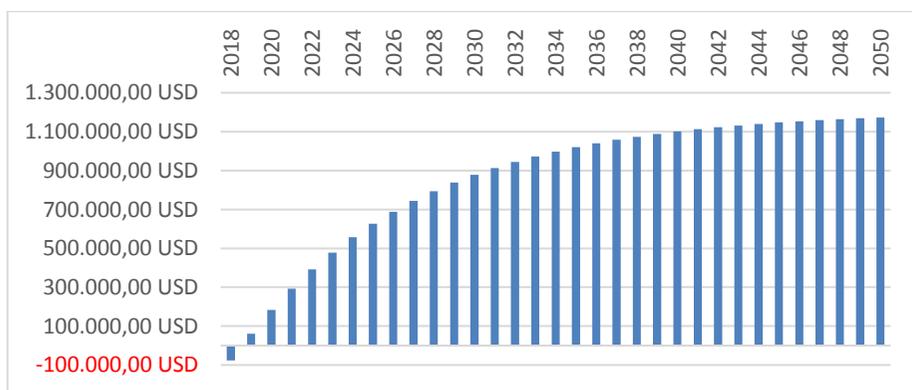
Tabla 83 Resultado inversión ampliación del encauzamiento de la Quebrada La Toma

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| Inversión (\$USD)       | 230,925   |
| Beneficio anual (\$USD) | 172,577   |
| Tasa de descuento (%)   | 12%       |
| VAN (\$USD)             | 1,176,714 |
| TIR (%)                 | 74.7%     |

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 140 se muestra el resultado actualizado al año 0 para una tasa del 12%, aquí se aprecia cómo se recupera la inversión antes del comienzo del año 2 después de la inversión.

Figura 140. Resultado actualizado de la inversión con una tasa de descuento del 12%



Fuente: Elaboración propia

La rentabilidad de esta inversión se debe a que las pérdidas por la amenaza de inundación se producen ya para un periodo de retorno de 3 años, así como al hecho de que la obra solo se proyecta para un tramo de la quebrada, en este caso unos 300 metros, reduciéndose los costes.

➤ **TOPOGRAFÍA DE LA QUEBRADA FRENTE A CENTRO DE SALUD 7 DE AGOSTO**

El Centro de Salud 7 de Agosto está localizado al sureste de la Comuna 5, ubicado frente a una de las quebradas afluentes de La Toma.

Encuestas realizadas a la población de la zona, indican que esta quebrada inunda la zona anualmente, con la importancia de que se ve afectado uno de los principales centros médicos de la ciudad, reportando entre otros problemas el acceso y salida de vehículos sanitarios al edificio.

En la Figura 141 se muestra uno de los accesos del Centro de Salud 7 de Agosto que podrían verse afectados por la inundación de la quebrada.

Figura 141. Centro de Salud 7 de Agosto

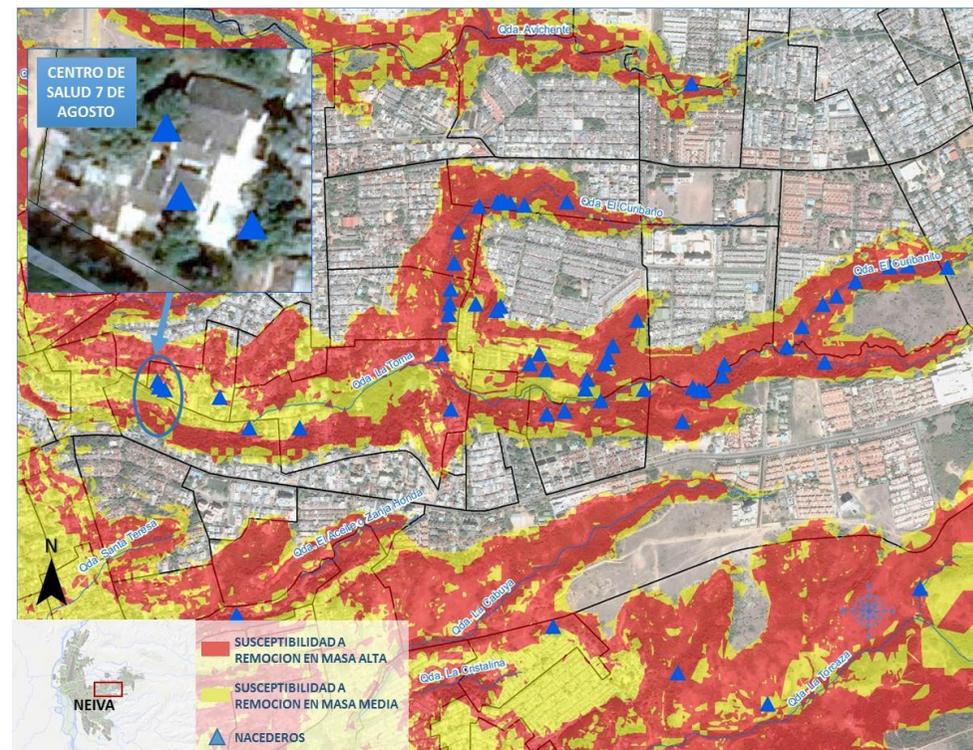


Fuente: IDOM

Además, estudios tales como “Valoración Ambiental del Oriente Urbano de la Ciudad de Neiva” y “AVR Microcuencas de la Ciudad de Neiva” señalan la presencia de manantiales y nacederos en toda la parte alta de la cuenca de la Quebrada de La Toma debido al alto nivel freático existente en esa zona.

Así, en la Figura 142, se representan los afloramientos de agua, así como la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, representando en rojo y amarillo los niveles de susceptibilidad alta y media, respectivamente.

Figura 142. Susceptibilidad a remoción en masa y afloramientos de agua en la Quebrada La Toma



Fuente: Elaboración propia

Tal y como se indica, el Centro de Salud 7 de Agosto se localiza en una zona de susceptibilidad a remoción en masa media y con 3 afloramientos de agua.

En base a todo esto resulta fundamental para el estudio de esta zona, debido a las dimensiones del cauce, un estudio con topografía in situ a escala 1:500. Además, debido al elevado nivel freático de la zona, es preciso un estudio geotécnico con el objetivo de estudiar la interacción de los afloramientos de agua con los fenómenos de remoción en masa, y con ello poder realizar el diseño del drenaje de la zona.

Figura 143. Estado de la quebrada a la altura del centro de salud 7 de Agosto



Fuente: IDOM

### 7.1.2 Reubicación de la población (del Río del Oro y los asentamientos precarios del Río Las Ceibas)

El Río del Oro se encuentra canalizado en más de la mitad de su recorrido a su paso por el perímetro urbano de la ciudad de Neiva.

Es la zona correspondiente a la parte alta del río, en la que no va encauzado donde se localizan en mayor número las afecciones a viviendas correspondientes a edificaciones de clase baja clasificadas como se *Barrios de vivienda unifamiliar-Estrato 1* y a asentamientos informales de tipo *precario*, disponiéndose fundamentalmente en la margen izquierda ocupando áreas inundables. La población localizada en esta zona se ve afectada por crecidas de frecuencia alta, sufriendo afección para periodos de retorno de 3 años.

Por ello, la solución propuesta, teniendo en cuenta criterios de tipo medioambiental y urbanísticos, es la de reubicar a la población afectada localizada en esta zona.

Análogamente, en el Río Las Ceibas, aguas arriba del encauzamiento proyectado, aparecen una serie de asentamientos correspondientes a desarrollos exteriores de vivienda precaria, localizados dentro de la mancha de inundación resultado del estudio realizado por la CAM. Además las viviendas aquí localizadas ocupan la zona que resultaría necesaria para la construcción de un dique de protección en la transición del río con el comienzo del encauzamiento, por lo que se propone la reubicación de la población correspondiente a estos asentamientos.

Figura 144 Desarrollos exteriores de vivienda precaria en la ribera del Río Las Ceibas



Fuente: Elaboración propia

En ambos casos, la reubicación de la población ha de considerar problemas integrales que eliminen completamente los riesgos, que consoliden la relación de la comunidad con su territorio y su ambiente, y que manejen el impacto del desarraigo, del alejamiento y del desconcierto.

Además, una vez reubicada la población, resulta fundamental dismantlar los activos incompatibles con la inundación, especialmente las viviendas, con el objetivo de evitar que se vuelvan a ocupar.

En consonancia con el Módulo 3, las áreas inundables donde actualmente se localizan estos asentamientos, se incluyen como parte de áreas verdes, resultando el Parque del Sureste

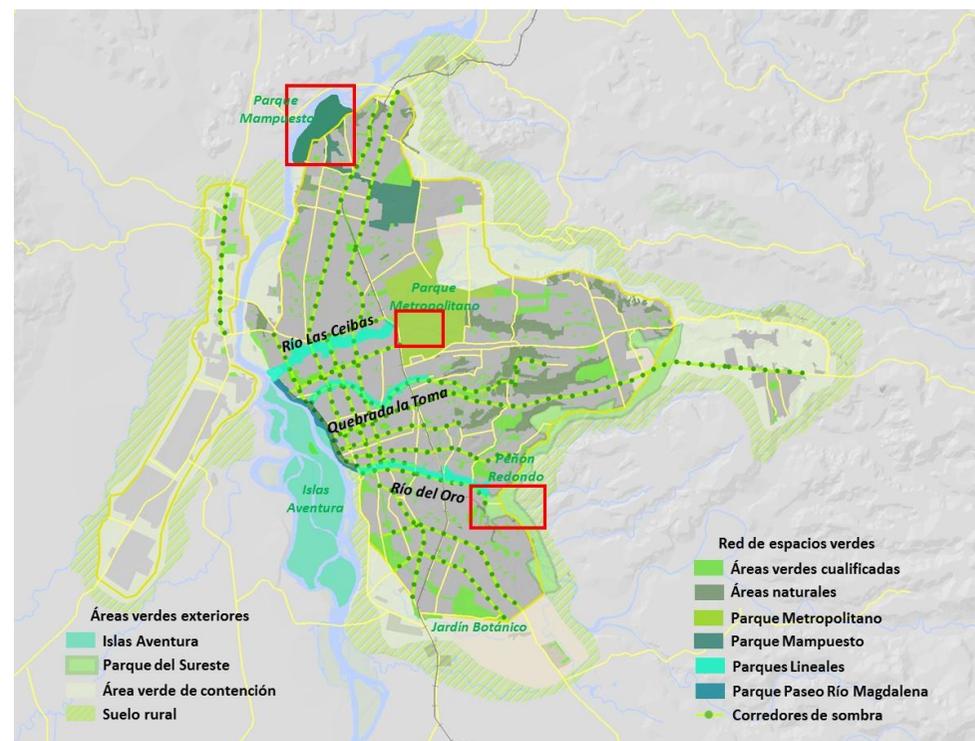
en el caso del Río del Oro, y el Parque Metropolitano para el Río Las Ceibas, tal y como se desarrolla en el siguiente apartado.

### 7.1.3 Áreas verdes (para sismo, inundación y remoción en masa)

Con la propuesta de nuevas áreas verdes, además de contribuir a aumentar el *pulmón* del entorno urbano y ofrecer espacios para el uso recreativo de la población, se consigue que, en el caso de la zona de estudio, zonas expuestas a la amenaza de inundación, con riesgo sísmico alto, o que presentan susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa no sean lugar de desarrollo de viviendas o de asentamientos informales.

Este es el caso del Parque Mampuesto, a orillas del Río Magdalena; del Parque Metropolitano, junto al Río Las Ceibas; y del Parque del Sureste, en la cuenca alta del Río del Oro, tal y como se muestran en la Figura 145.

Figura 145. Áreas verdes en el escenario óptimo en la ciudad de Neiva



Fuente: Elaboración propia

En el caso del Río del Oro, se ha propuesto como área verde exterior el *Parque del Sureste*, el cual incluye la mayor parte de la zona inundable aguas arriba del encauzamiento, en la cuenca alta del Río del Oro. Además comprende la zona con susceptibilidad alta a fenómenos de remoción en masa, en la margen derecha del río; y con riesgo sísmico alto, en la margen izquierda del río, en la Comuna 6.

En la parte canalizada, aparece la propuesta de parque lineal *Parque Paseo Río del Oro*, de forma que zonifica como áreas verdes las márgenes a cada lado del río. Este parque incluye a ambos lados del río zonas de riesgo sísmico alto correspondiente a las Comunas 4, 6, 7 y

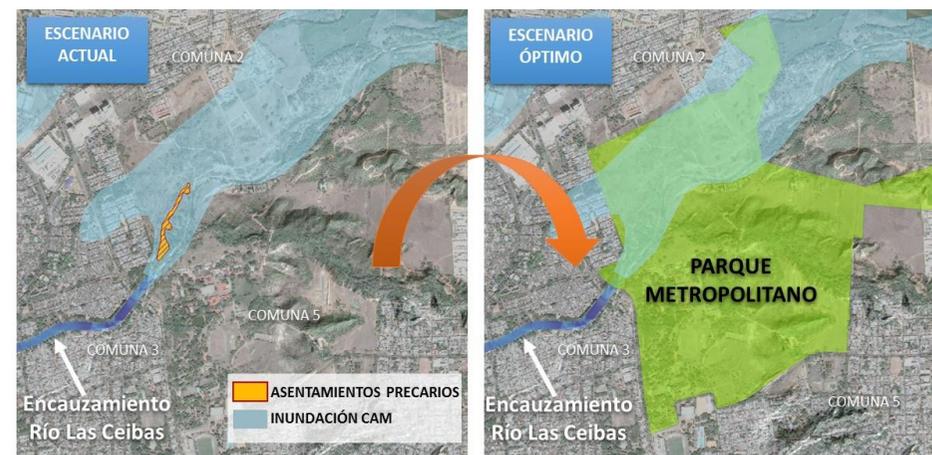
8. Además, en la margen derecha del río a su paso por la Comuna 8, contiene una zona con susceptibilidad a remoción en masa alta.

Respecto al Río Las Ceibas, análogamente al caso del Río del Oro, cuenta entre sus propuestas con la de un parque lineal a ambos lados del río, a su paso por la zona urbana en las Comunas 1, 2 y 3, coincidiendo con la zona clasificada como de riesgo sísmico alto. Referente a la amenaza de inundación, este tramo del Río Las Ceibas corresponde a la canalización proyectada, habiéndose comprobado que el encauzamiento cumple para lluvias de 100 años de periodo de retorno.

Aguas arriba del encauzamiento proyectado, aparece el área verde denominada como *Parque Metropolitano*. Este parque incluye las zonas inundables de acuerdo a los estudios de la CAM, así como las zonas con riesgo sísmico alto a ambos lados del río de las Comunas 2 y 5. Además incluye las áreas a ambos lados de la Quebrada Avichente (afluente del Río Las Ceibas), con susceptibilidad alta y media a fenómenos de remoción en masa.

A continuación en la Figura 146 muestra de manera esquemática el uso de la zona inundable del Río Las Ceibas aguas arriba del encauzamiento proyectado en el escenario actual y en el escenario óptimo.

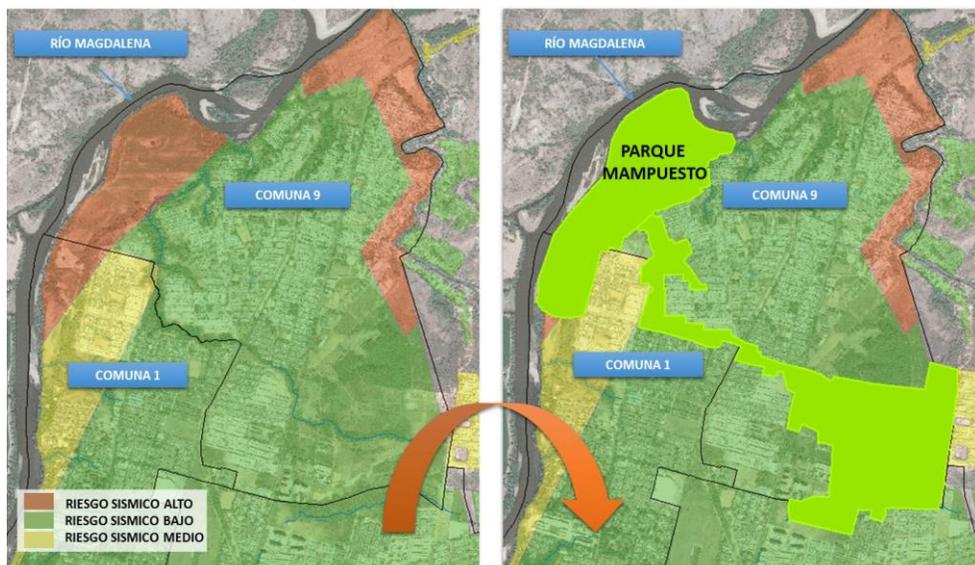
Figura 146. Uso proyectado para la zona inundable del Río Las Ceibas



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al norte de la ciudad, se propone como área verde el Parque Mampuesto, tal y como se muestra en la Figura 146. Esta zona se dispone ocupando la superficie que ha sido determinada como de riesgo sísmico alto en las Comunas 1 y 9. En la actualidad esta zona no presenta ningún uso, por lo que con esta propuesta se impiden posibles desarrollos o asentamientos que expongan a la población.

Figura 147. Uso proyectado para la zona de riesgo sísmico alto junto al Río Magdalena.



Fuente: Elaboración propia

### 7.1.4 Dique de protección Río Las Ceibas (inundación)

De acuerdo al documento *Estudios y diseños de obras de control y mitigación del cauce del Río Las Ceibas, sector comprendido entre el límite del perímetro urbano de la ciudad de Neiva y la desembocadura al Río Magdalena*, a su paso por el casco urbano de Neiva, el Río Las Ceibas, presenta problemas de erosión e inundación debido a la acción de la corriente especialmente durante los sucesos de avenidas torrenciales.

Es por ello, que con el objetivo de mitigar las afecciones que produce, se han diseñado diferentes obras de encauzamiento, habiéndose determinado como solución la canalización del río en unos 5 kilómetros de longitud aproximadamente, a su paso por el área urbana Neiva.

En base a este proyecto, se propone la realización de un dique de protección en la transición entre el comienzo del canal y la zona no canalizada aguas arriba, con el objetivo de controlar la deposición de sólidos y dirigir las aguas hacia la canalización, tal y como se muestra en la Figura 148.

Figura 148. Localización dique de protección en el Río Las Ceibas



Fuente: Elaboración propia

Como principales consideraciones de diseño para el dique de protección, al igual que en el caso del canal, hay que lograr que la construcción sea lo más recta y paralela posible a la dirección natural del flujo, empleando radios de curvatura lo más grandes posibles cuando no sea posible evitar curvas. Además, en su dimensionamiento habrá que tener en cuenta los caudales y calados máximos alcanzados en ese tramo, de forma que se asegure su estabilidad y funcionalidad frente a los fenómenos de erosión.

Tal y como se ha expuesto en el apartado 7.1.2 para la construcción del dique sería preciso la reubicación de las viviendas correspondientes a asentamientos precarios en la zona inundable.

### 7.1.5 Mejora barrial Comuna 8 (sismo)

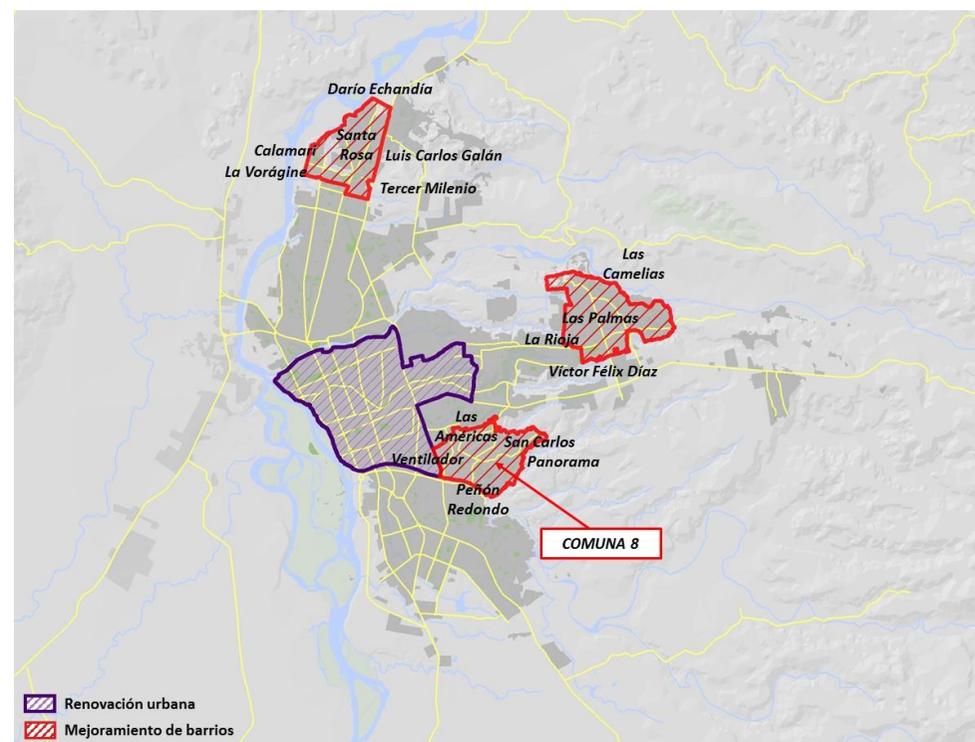
En base a los resultados de zonificación sísmica desarrollados en el apartado 6 y en coordinación con el Módulo 3, se propone como medida de mitigación frente a esta amenaza una mejora integral de los barrios pertenecientes a la Comuna 8.

Esta propuesta está basada en impedir la densificación de estas zonas, de forma que no aumente el número de construcciones en zona con riesgo sísmico alto. Para ello además, esta solución va complementada con el aumento de zonas verdes.

Las zonas donde se propone impedir la densificación son las áreas detectadas con riesgo sísmico alto en los alrededores del Río del Oro, Río Las Ceibas, así como en la Comuna 8.

En este último caso, la propuesta de mejora barrial de la Comuna 8 queda incluida entre las propuestas de regeneración urbana tal y como se muestra en la Figura 149, de acuerdo al análisis desarrollado en el estudio Módulo 3.

Figura 149. Mapa regeneración urbana en el escenario de crecimiento óptimo



Fuente: Elaboración propia

### 7.1.6 Planificación, Normativa y Obras para reducción y mitigación de fenómenos de remoción en masa

Tal y como se expuso en el apartado 3.6, en la zona de estudio se generan problemas de remoción en masa tanto en la zona urbana como en zonas más naturales. En ambos ambientes el principal problema es la invasión urbana en zonas que presentan taludes de pendientes medias a altas.

En estas zonas resulta fundamental un fuerte control de las administraciones con el fin de gestionar correctamente las actuaciones, así como definir algunas de las que se plantean a continuación:

- Zonas de resguardo en cabecera y pie de los taludes en forma de bandas de protección de no menos de 5 m donde se evite la colocación de viviendas, redes de abastecimiento o elementos que puedan producir filtraciones de agua en el terreno.
- Evitar la realización de cortes de taludes sin muros o elementos de protección.
- Evitar la generación de terraplenes a media ladera que no estén íntegramente cimentados en su totalidad en el interior de la ladera.
- Planificación de redes de abastecimiento y de residuos con el fin de evitar pérdidas de las mismas.
- Prohibición de ejecución fosas sépticas y lanzamientos de aguas residuales, en zonas de susceptibilidad alta o media.
- Dotar a las zonas superiores de los taludes de cunetas de guarda que eviten la erosión de los mismos.
- Evitar descalces en el pie de las laderas o taludes que presentan rasgos de inestabilidad
- Realizar estudios de estabilidad global de la ladera ante cortes de taludes o laderas inestables que sean inevitables.

Entre las medidas de mitigación propuestas se diferencian tres grupos:

**Medidas normativas:** Dada la clara tendencia de ocupación de zonas de elevadas pendientes sería bueno definir un *Manual de buenas prácticas constructivas* para dichas zonas en las que se defina calidad de los materiales de construcción, la tipología y cimentación de los palafitos, empotramientos mínimos en roca sana, distancias mínimas al borde de talud y sistemas de lanzamiento de aguas residuales y pluviales con el fin de minimizar al máximo la erosión del talud. Dicho manual debiera ser de obligado cumplimiento.

**Medidas referidas a la planificación:** Excluir zonas de edificación y limitar la tipología constructiva de las construcciones en zonas donde la susceptibilidad pueda ser mayor.

**Medidas ingenieriles:** Muros y redes de cables que sostienen la ladera, ejecutados directamente en la zona afectada o en la zona propensa a sufrir este tipo de procesos. Este tipo de estructuras deben de tener un mínimo de garantías tanto técnicas como de materiales, suelen implicar costos elevados.

## 7.2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

### 7.2.1 Implementación de estrategias de compromiso y difusión.

Con el objetivo de maximizar sus posibilidades de éxito, el diseño y puesta en marcha de las estrategias de compromiso y difusión social que faciliten la implementación de las medidas de mitigación propuestas por este estudio (tanto estructurales como no estructurales) debe tener en cuenta estos dos principales criterios metodológicos básicos:

- Es importante tener en cuenta que el proceso de comunicación en la prevención de riesgos de desastres no sólo debe limitarse a informar a la población, sino también a formarla. Este proceso es dinámico, intersectorial, interinstitucional, interdisciplinario y requiere de una estrecha interrelación y coordinación entre todos los actores que son parte del proceso para lograr una estrategia efectiva de comunicación para la reducción de los riesgos a todo nivel. Por ello la importancia de que esta sea apropiado (asumido por todos como propio) y logre la involucración temprana de actores aparentemente tan dispares como los profesores, alumnos y padres y madres de las escuelas, los líderes comunitarios, los medios de comunicación social, los bomberos y la policía o los grupos de voluntarios locales en materia de protección civil.
- La percepción y la tolerancia con respecto al riesgo puede ser diferente entre diferentes personas y grupos sociales. Es frecuente que determinados colectivos, sobre todo los más vulnerables, se habitúen a convivir cotidianamente a su pesar con fuertes y frecuentes. Por ello las actividades a realizar en materia de difusión con los grupos más vulnerables en relación a las propuestas de **reubicación de la población**, deberán tratar de comprender y no ahondar en los temores de la población (expulsión de residentes en precario, ilegalización de construcciones en zonas de riesgo,...) sino en las posibles soluciones y pasos concretos a seguir para prevenir los riesgos futuros.

Es importante clarificar que cualquier actuación que se plantee realizar en materia de reubicaciones cumplirá estrictamente con lo establecido en la normativa colombiana al respecto (entre otros el Decreto 564 de 2006 que establece las zonas susceptibles a ser legalizadas y cuales no).

Partiendo de estos dos criterios metodológicos básicos y teniendo en cuenta los actores ya contactados por este estudio), las estrategias de compromiso y difusión social deberán considerar los siguientes grupos de participación:

- **Grupo Promotor (o Central).** Conformado por entidades con capacidad política para la toma de decisiones así como colectivos con una especial *expertise* técnica: Alcaldía, Oficina de Gestión del Riesgo Departamental, la CAM, Defensa Civil, Cruz Roja y Bomberos. El coordinador general del grupo sería la Alcaldía. Este grupo será el encargado de definir e implementar con un mayor nivel de detalle las actividades a realizar para llevar a buen término las actuaciones propuestas no estructurales (zonificación legal del cauce, inventario de árboles, medidas de alerta temprana de avenidas así como las propias estrategias de compromiso y difusión) y estructurales (realojos).
- **Grupo Comunitario (o Externo).** Conformado por grupos de la sociedad civil (líderes comunitarios,...), empresas privadas principales, la Universidad, medios de comunicación social u otros que se consideren de especial importancia para el buen fin del proyecto. Este grupo se reunirá bajo la coordinación y previa convocatoria de la Alcaldía siguiendo las directrices (y contando con el apoyo) de los miembros Grupo Promotor. Este grupo será el encargado de servir de interlocutor principal entre las comunidades locales y el ámbito de decisión política y técnica del Grupo Promotor. Aportando su punto de vista, trabajando principalmente en actividades de comunicación, educación y pedagogía social en el ámbito comunitario así como haciendo seguimiento a la implementación de las actuaciones programadas para la implementación de las actuaciones tanto no estructurales como las estructurales. En el caso de que la cuestión de los realojos acabe ganando en complejidad (por ejemplo, si se opta por realojar a 3,200 personas y no a 100), este

grupo externo podría generar un grupo a parte dedicado de manera monográfica a este tema.

Sobre la base del plan de acción de las actuaciones estructurales y no estructurales a implementar, el Grupo Promotor será el encargado de promover (siempre en coordinación y, en la medida de posible, con el visto bueno del Grupo Comunitario), una estrategia detallada de compromiso y difusión a nivel ciudadano que consiga:

- Identificar las necesidades de información existentes en las comunidades ubicadas en zonas de riesgo y orientar los mensajes hacia fines preventivos.
- Promover en las comunidades la apropiación de la información y generar un proceso mediante el cual sus miembros identifiquen su vulnerabilidad y las opciones para hacer gestión preventiva.
- Aprovechar los recursos existentes para distribuir mensajes preventivos.

Para conseguirlo el Grupo Promotor deberá contar con un equipo de comunicación institucional integrado por técnicos y diversos voceros claves pero ser liderado por una o un comunicador social. La estrategia de comunicación debe estar enfocada a varios tipos de público: interno, líderes, población afectada y especialmente medios masivos. Segmentar las audiencias puede coadyuvar a incrementar la efectividad y la eficiencia de la estrategia.

Los objetivos de la estrategia detallada de compromiso y difusión a nivel ciudadano finalmente planteada deberán alcanzar las siguientes características básicas:

- Ser **medibles**: cuantificables
- Ser **alcanzables**: deben tomar en cuenta las condiciones de la organización y las dificultades que pudieran presentarse para la implementación de la estrategia.
- Ser **dirigidos**: Se deben referir de manera específica a una determinada audiencia.
- Ser **razonables**: antes de definir un objetivo, investigar y priorizar los problemas específicos que puedan afectar a la audiencia.
- Ser **específicos**: tiempo máximo en el que se espera lograr el objetivo propuesto.

El enfoque estratégico de la estrategia de compromiso y difusión a nivel ciudadano debe considerar:

- **Incidencia:** Acciones y esfuerzos planificados con la intención de influenciar a través de formas de persuasión y comunicación a distintas audiencias, para que se unan a una iniciativa específica difundiendo los mensajes de comunicación. Se puede lograr mediante reuniones de trabajo, alianzas, convenios, foros etc.
- **Comunicación comunitaria:** Utilización de medios de comunicación que recuperan los espacios y modos comunitarios locales. Permite que los mensajes se adapten a un público específico y puede reproducirse y difundirse localmente. Se realizan empleando el enfoque de edu-entretenimiento. Algunas actividades que se pueden desarrollar en este sentido son: Ferias, concursos, obras teatrales y pasacalles entre otros.
- **Opinión pública:** Desarrollo de la oferta informativa para promover un clima favorable en los medios de comunicación. Entre las actividades que se pueden desarrollar en este sentido están la difusión de notas de prensa, conferencias de prensa, capacitación a comunicadores sociales, etc.
- **Comunicación interpersonal:** Comunicación directa cara a cara con el público meta. Permite desarrollar y construir interacciones positivas entre la organización y la audiencia. Este tipo de actividades es muy bien desarrollado con el apoyo de brigadistas de defensa civil.

**Comunicación masiva:** Utilización de mensajes visuales y/o auditivos que coadyuvan a recordar permanentemente el objetivo propuesto. Pueden ser spots y microprogramas radiales y televisivos, afiches, panfletos, dípticos, etc. que permitan reforzar los mensajes difundidos a través de otros medios.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

BID “Guía metodológica. Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles. Primera edición. 2012

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 5.

Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; 2015 Gobierno de Colombia

ITC Multi-hazard risk assessment guide book: United Nations University – ITC School on Disaster Geoinformation Management, 2011

Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays (1994), Applied Hydrology

Ven Te Chow (1994), Open-channel hydraulics

Juan P. Martín Vide, Politext Área de Ingeniería; Ingeniería fluvial

Leonardo S. Nanía, Manuel Gómez Valentín; Ingeniería Hidrológica

MOPU; Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.

Ministerio de Medio Ambiente de España, Secretaría para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático (2004). Guía para la elaboración de estudios del medio físico (2004).

Alfaro, A.; Díaz, A.; Escobar, P. y Martínez, L. Aportes para la Microzonificación sísmica de Neiva. Red sismológica regional Eje Cafetero, Viejo Caladas y Tolima. Manizales-Colombia, v.6, n.1, p.32-37, 2001.

Applied Technology Council (1978). “Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings,” Publication ATC-3-06.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Proyecciones Municipales 2006-2020. Colombia. Marzo de 2008.

Departamento de estudios económicos y técnicos (Cámara colombiana de la construcción). Indicadores de la actividad edificadora Enero 2011. Colombia, Bogotá. Marzo 2011.

Federal Emergency Management Agency (2003). HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.

Egbue, O., and Kellogg, J., 2010, Pleistocene to Present North Andean “escape”: Tectonophysics, v. 489, p. 248–257, doi: 10.1016/j.tecto.2010.04.021

Gardner, J.K. and Knopoff, L. (1974). “Is the sequence of earthquakes in Southern California with aftershocks removed, Poissonian?” Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 64, pp. 1363–1367.

- Gutenberg B. and Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America. 34: 185-188.
- Hazus-MH (2003), "Multi-hazard Loss Estimation Methodology". Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Washington DC, USA*. pp. 712.
- Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V. and Meletti C. (2013). CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters*, 84-3: 495-504.
- Norma AIS 100-81. (1981) Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 58 p. Bogotá Colombia.
- Norma NSR-10. (2010) REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Bogotá D.C., Colombia.
- Romero, M y Alfaro, A., 2009. Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Neiva debido a la escasez de datos. *Revista Épsilon* N° 13: 241-253 / julio - diciembre de 2009.
- Scordilis, E.M. (2006). Empirical Global Relations converting Ms and mb to Moment Magnitude. *Journal of Seismology*. April 2006, Volume 2, Issue 2, pp 225-236.
- Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordoñez, M., Jiménez, N. and Sosson, M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape. *Tectonics* 25: doi: 10.1029/2004TC001723. issn: 0278-7407.
- Ingeominas Levantamiento geológico de la plancha 323 Neiva. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. 2002.
- Ingeominas Levantamiento geológico de la plancha 322 Santa María . Escala 1:100.000. Memoria explicativa. 2003.
- Estudio de Amenazas del departamento de Huila. Convenio 193-1998 CAM Universidad Nacional
- Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado, Empresas Públicas de Neiva E.S.P.
- Evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de las microcuencas El Venado, Avichente, La Toma, Zanja Honda, La Torcaza, Río de Oro, Ribera del Río Magdalena en el casco urbano del Municipio de Neiva (Huila). CAM.
- Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por fenómenos de origen geomorfológico y/o hidrológico en los centros poblados de Vegalarga y Anacleto García de los Municipios de Neiva y Tello respectivamente. CAM.
- Estudios y diseños de obras de control y mitigación del cauce del río Las Ceibas, sector comprendido entre el límite del perímetro urbano de la ciudad de Neiva y la desembocadura al río Magdalena, Municipio de Neiva.
- Evaluación de las amenazas potenciales de origen geológico (actividad sísmica y volcánica), geomorfológico (remociones en masa y erosión) e hidrometeorológico (dinámica fluvial, inundaciones y sequías), y caracterización geotécnica preliminar de las cabeceras municipales del departamento del Huila". CAM
- Valoración ambiental-Geotécnica del Oriente Urbano de la Comuna 10 de la Ciudad de Neiva.

Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Las Ceibas. CAM

Valoración ambiental del Oriente Urbano de la Ciudad de Neiva. CAM

## 9 EQUIPO DE TRABAJO

Se incluye a continuación la relación de personas que han colaborado en la redacción del presente informe:

### 9.1 EQUIPO IDOM

- Jorge Bernabeu. Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Experto en hidrología.
- Óscar Bermúdez Gracia. Ingeniero meteorólogo, Magister en Ciencias Meteorológicas y Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas (Ph.D).
- Pablo Caffarena de la Fuente. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnico en hidrología, ingeniería fluvial e hidráulica.
- María Dolores Izquierdo Guillén. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnico en hidrología e hidráulica.
- Ignacio Olague. Geólogo. Técnico experto en cartografía de procesos de deslizamiento.
- María Belén Benito Oterino. Doctora/Licenciada Ciencias Físicas. Catedrática Universidad Politécnica de Madrid.
- Gloria León Aristizabal. Meteoróloga. Maestría en Cambio Climático y Desarrollo Sostenible.
- Belén Rodríguez Pérez. Licenciada en Ciencias Ambientales y especializada en Sistemas de Información Geográficos y Teledetección.
- Alfonso Carretero. Licenciado en Ciencias Ambientales. Técnico experto en manejo SIG.

### 9.2 EQUIPO FINDETER

- Ana María Palau. Abogada y Politóloga; con especialización en Políticas Públicas y Desarrollo, Master en Desarrollo. Gerencia de Sostenibilidad y Nuevos Negocios.
- Gisela Labrador. Economista, Master en Comercio Internacional y Planeación urbana y Regional. Directora de ciudades.
- Robinsson Rodríguez. Ingeniero Químico. Doctor en Ingeniería. Líder Ambiental.

- Luis Elkin Guzmán. Ingeniero Ambiental, Master en Ingeniería - Ingeniería Ambiental. Profesional Dimensión Ambiental.
- María Elvira Villareal. Arquitecto, Master en Vivienda Colectiva. Líder de Plan de Acción Programa Ciudades Sostenibles y Competitivas.