

Estudios Básicos de Amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial para el municipio de Palmira y Estudios Detallados de Riesgo por Inundación y Socavación Lateral en el Barrio Azul, Corregimiento de Amaime



**ESTUDIO 6: ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN
ÁREA URBANA Y DE EXPANSIÓN URBANA
ESCALA 1:5.000**



Alcaldía de Palmira



**Universidad
del Valle**

Convenio Interadministrativo MP968 de 2021

**UNIVERSIDAD DEL VALLE; OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y
GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO**

**ALCALDÍA DE PALMIRA; DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL
RIESGO DE DESASTRES-DGRD**

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA
Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO,
Ing. Ambiental
Director DGRD

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR,
Adm. Ambiental
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

**OBSERVATORIO SISMOLOGÍCO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE
COLOMBIANO-OSSO
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.
Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

EQUIPOS TEMÁTICOS

HISTORICIDAD

KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa
Líder Equipo

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLORES, Geól.
Líder Equipo

JULIO C. GUERRA, Geól.
Profesional de Apoyo

MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.
Profesional de Apoyo

ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRO BARONA, Ph.D.

Líder Equipo

PAOLA T. GOMEZ, Geóg.
Profesional de SIG

LINA V. LATORRE, Ing.
Profesional de SIG

JORGE A. DÍAZ, Geóg.
Profesional de SIG

FRANKLIN A. BEDOYA, Ing.
Profesional de Topografía

ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.
Apoyo Topografía

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

CARLOS RAMÍREZ C., MSc.

Líder Equipo

CESAR A. VIVAS, Ing.
Profesional Hidrología e Hidráulica
Amenaza por Inundación

RAFAEL CLEMENT, Ing.
Profesional Avenida Torrencial

AMENAZA MOVIMIENTO EN MASA Y SOCAVACIÓN LATERAL

JHONALBERTH PALACIOS SÁNCHEZ, Ing.

Líder Equipo

NOVIEMBRE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo General	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	ALCANCE.....	18
4	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	19
5	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	20
5.1	Río Amaime	21
5.1.1	Río Nima.....	22
5.2	Drenajes zona urbana	22
6	METODOLOGÍA	24
6.1	Historicidad - Zonas críticas por inundación en el área urbana del municipio de Palmira 24	
6.2	Susceptibilidad a inundación por geomorfología.....	24
6.3	Climatología	24
6.4	Morfometría.....	25
6.5	Hidrología.....	25
6.6	Hidráulica	25
6.7	Zonificación de amenaza por inundación.....	26
7	HISTORICIDAD - ZONAS CRÍTICAS POR INUNDACIÓN EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA	27
8	SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIÓN POR GEOMORFOLOGÍA ZONA URBANA Y SUBURBANA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA – ESCALA 5K.....	31
9	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA.....	39
9.1	Climatología	39
9.1.1	Red de estaciones meteorológicas	39
9.1.2	Precipitación	41
9.1.2.1	Distribución temporal de las precipitaciones.....	41
9.1.2.2	Distribución espacial de la precipitación	43
9.1.2.3	Número de Días con Lluvia	44
9.1.2.4	Polígonos de Thiessen.....	46
9.1.3	Análisis de frecuencias y periodos de retorno de la precipitación.....	48
9.1.4	Hietogramas de diseño	65
9.2	Régimen de caudales.....	91
9.2.1	Caracterización de caudales en las corrientes hídricas.....	91
9.2.1.1	Caudales río Amaime	92

9.3	Variabilidad Climática	97
10	ESTUDIO HIDROLÓGICO	100
10.1	Generalidades teóricas del modelo	100
10.1.1	Variables y parámetros de modelación.....	101
10.2	Implementación del modelo hidrológico.....	106
10.2.1	Delimitación y características morfométricas de las unidades de modelación ..	106
10.2.2	Esquematación de las cuencas	109
10.2.3	Suelos.....	109
10.2.4	Usos del suelo – Número de escurrimiento	116
10.2.5	Flujo base	120
10.2.6	Resultados de la simulación y análisis hidrológico	121
10.2.6.1	Caudales máximos de corrientes de agua que discurren por la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.....	124
11	ESTUDIO HIDRÁULICO	128
11.1	Modelación hidráulica.....	128
11.1.1	Descripción del modelo hidráulico a desarrollar mediante el software HEC-RAS 6.1 aspectos teóricos.....	128
11.1.1.1	Ecuación gobernante de lámina libre de Saint-Venant	128
11.1.1.2	Ecuaciones de cantidad de movimiento de flujo bidimensional de lámina libre de Saint-Venant.....	130
11.1.1.3	Divergencia de Gauss en las Ecuaciones de Flujo Bidimensional de Saint-Venant del Modelo HEC-RAS 2D.....	134
11.1.1.4	Condiciones de frontera del modelo hidráulico HEC-RAS 2D.....	135
11.1.1.5	Coeficiente de rugosidad del cauce.....	135
11.1.1.6	Capacidades y ventajas de la modelación de flujo en 2D con HEC-RAS.....	136
11.1.1.7	Intervalo de tiempo computacional en la modelación de flujo en 2D con HECRAS	138
11.1.2	Información de entrada al modelo hidráulico del área urbana y de expansión urbana en el municipio de Palmira.....	139
11.1.2.1	Levantamiento Topobatimétrico	139
11.1.2.2	Modelo Digital de Terreno	140
11.1.2.3	Caudales de modelación	141
11.1.2.4	Coeficiente de rugosidad.....	141
11.1.2.5	Malla computacional.....	145
11.1.2.6	Condición de Frontera	148
11.1.2.7	Calibración del modelo hidráulico	148
11.1.3	Resultados de la simulación hidráulica del área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira	149
11.1.4	Análisis de resultados hidráulicos respecto a historicidad y susceptibilidad a inundación por geomorfología	167
11.1.5	Modelaciones hidráulicas escenarios de taponamiento.....	168
12	ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN POR DESBORDAMIENTO	172

12.1	Consideraciones generales conceptuales sobre las inundaciones	172
12.1.1	Medidas para el control y el manejo de inundaciones	173
12.1.2	Medidas estructurales	174
12.1.3	Medidas no estructurales	175
12.2	Metodología adoptada.....	175
12.2.1	Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones.....	175
12.2.2	Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones	176
12.2.3	Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones	177
12.3	Mapa de amenaza por inundación por desbordamiento	179
12.3.1	Cartografía de amenaza por inundaciones por desbordamiento en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira	180
13	CONCLUSIONES	187
14	RECOMENDACIONES	190
15	REFERENCIAS.....	193

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira	20
Figura 2. Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira	21
Figura 3. Localización de subcuencas del área urbana del municipio de Palmira.	23
Figura 4. Zonas Críticas por inundación en la zona urbana del municipio de Palmira.....	29
Figura 5. Localización zonas críticas por inundación en el área urbana del municipio de Palmira	30
Figura 6. Mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.....	35
Figura 7. Distribución porcentual de la susceptibilidad por inundaciones en la zona urbana y suburbana del municipio de Palmira.....	36
Figura 8. Localización de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio del municipio de Palmira	41
Figura 9. Distribución temporal de la precipitación estaciones de referencia	43
Figura 10. Distribución espacial de la precipitación anual multianual.....	44
Figura 11. Distribución temporal de número de días con lluvia. Valores medios mensuales multianuales de días de lluvia en las estaciones de referencia.....	45
Figura 12. Área de influencia de las estaciones pluviométricas, respecto a la zona de estudio. Polígonos de Thiessen.....	46
Figura 13. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.....	49
Figura 14. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Esperanza Paradera. Periodo: 1981 – 2021.....	50
Figura 15. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.	51
Figura 16. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.	52
Figura 17. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.	53
Figura 18. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021.	54
Figura 19. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.	55

Figura 20. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.	56
Figura 21. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.	57
Figura 22. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.	58
Figura 23. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.	59
Figura 24. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021.	60
Figura 25. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.	61
Figura 26. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.	62
Figura 27. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.	63
Figura 28. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020.	64
Figura 29. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.	65
Figura 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación El Paraíso	66
Figura 31. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso.	66
Figura 32. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Esperanza Pradera	67
Figura 33. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera	68
Figura 34. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Ingenio Manuelita.....	69
Figura 35. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita.....	69
Figura 36. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Zapata.....	70

Figura 37. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata	71
Figura 38. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Palmira ICA.....	72
Figura 39. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA	72
Figura 40. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenerife.....	73
Figura 41. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife...	74
Figura 42. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji.....	75
Figura 43. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji.....	75
Figura 44. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria.....	76
Figura 45. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria.....	77
Figura 46. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Bellavista	78
Figura 47. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista.	78
Figura 48. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Chambú	79
Figura 49. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú ..	80
Figura 50. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Ceja	81
Figura 51. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja ...	81
Figura 52. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Sirena	82
Figura 53. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena.	83
Figura 54. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Soledad.....	84
Figura 55. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad	84
Figura 56. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Planta Nima	85

Figura 57. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima	86
Figura 58. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Emigdio	87
Figura 59. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio	87
Figura 60. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Nicolas.....	88
Figura 61. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas	89
Figura 62. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenjo.....	90
Figura 63. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo.....	90
Figura 64. Localización de las estaciones hidrológicas en relación con el área de estudio del municipio de Palmira.	92
Figura 65. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.	93
Figura 66. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Amaime. Estación Amaime.....	94
Periodo: 1984 - 2021.....	94
Figura 67. Curva de duración de caudales diarios en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.....	95
Figura 68. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.....	96
Figura 69. Calibración del modelo SWAT: Caudales medios mensuales medidos y simulados en el río Cauca. Estación Paso de la Torre. Periodo: 2004-2010.	98
Figura 70. Esquema de las componentes hidrológicas e hidráulicas que utiliza el modelo HEC-HMS para representar una cuenca hidrográfica.	101
Figura 71. Subcuenas hidrográficas en estudio municipio de Palmira.....	107
Figura 72. Esquema de las cuencas en estudio en el modelo HEC-HMS 4.9	109
Figura 73. Suelos de las cuencas hidrográficas en estudio	116
Figura 74. Uso y cobertura del suelo de las cuencas hidrográficas en el área de estudio.....	118

Figura 75. Valores de CN cuencas hidrográficas en estudio.....	119
Figura 76. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 2,33 años	125
Figura 77. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 25 años	126
Figura 78. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 50 años	126
Figura 79. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 100 años	127
Figura 80. Representación gráfica de las variables de lámina de flujo.....	129
Figura 81. Propiedades de las celdas en una malla computacional.....	137
Figura 82. Modelo Digital de Terreno.....	141
Figura 83. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning empleados en la modelación hidráulica área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.....	144
Figura 84. Grillas empleadas para las modelaciones hidráulicas área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira	147
Figura 85. Cobertura vegetal asociada a cultivos de caña de azúcar y plátano aledaño al río Palmira (sector denominado “Callejón Los Roa”)	150
Figura 86. Descargas del sistema de alcantarillado pluvial del municipio a los hoy drenajes urbanos	150
Figura 87. Zanjón Mirriñaio sector conocido como Guayabal	151
Figura 88. Zanjón Mirriñaio revestido en concreto barrio Mirriñaio.....	152
Figura 89. Mancha de inundación zanjón Mirriñaio.....	152
Figura 90. Mancha de inundación río Palmira a la altura de la calle	153
Figura 91. Estructura hidráulica calle 42 río Palmira.....	154
Figura 92. Infraestructura aledaña del río Palmira	154
Figura 93. Falta de mantenimiento en el río Palmira.....	154
Figura 94. Residuos de construcción y demolición aledaña al río Palmira.....	154
Figura 95. Proceso de erosión de orilla con muro fracturado en la calle 35 río Palmira	154
Figura 96. Puente peatonal antes del Bosque Municipal	155
Figura 97. Vista aguas abajo del puente peatonal antes del Bosque Municipal	155
Figura 98. Estructura derivadora en límite del Bosque Municipal.....	155
Figura 99. Desarenador, compuertas, canales	155
Figura 100. Estructura y compuerta derivadora zanjón Romero	156
Figura 101. Estructura y compuerta derivadora zanjón Romero	156
Figura 102. Puente y dique transversal	156
Figura 103. Compuerta de conexión entre lago y río Palmira	156

Figura 104. Inicio box culvert río Palmira (rejilla, bocatoma, estación de bombeo y caseta de operación)	156
Figura 105. Muro y rejilla al inicio del bosque municipal río Palmira	156
Figura 106. Mancha de inundación río Palmira y zanjón Romero antes del Bosque Municipal de Palmira.....	157
Figura 107. Zanjón Zamorano a la altura de los barrios Zamorano y Monteclaro; con edificaciones contiguas al cauce ubicadas frente a predios del Ingenio Manuelita en la diagonal 65 con carrera 35.....	158
Figura 108. Estructura hidráulica del canal Sesquicentenario barrio Chapinero Sur a la altura de la diagonal 4.....	158
Figura 109. Mancha de inundación zanjones Barrancas y Beringo y canal Sesquicentenario	159
Figura 110. Velocidades máximas (m/s) TR 2,33 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	160
Figura 111. Profundidades máximas (m) TR 2,33 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	161
Figura 112. Velocidades máximas (m/s) TR 25 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	162
Figura 114. Velocidades máximas (m/s) TR 50 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	164
Figura 115. Profundidades máximas (m) TR 50 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	165
Figura 116. Velocidades máximas (m/s) TR 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	166
Figura 117. Profundidades máximas (m) TR 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.....	167
Figura 118. Profundidades máximas (m) TR 100 años, historicidad y susceptibilidad a inundación por geomorfología. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira	168
Figura 119. Profundidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento a la altura del Bosque Municipal	169
Figura 120. Velocidades en el escenario de desbordamiento producto de taponamiento a la altura del Bosque Municipal	170
Figura 121. Profundidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento box culvert río Palmira	170

Figura 122. Velocidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento box culvert río Palmira	171
Figura 123. Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.	177
Figura 124. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 2,33 años.	182
Figura 125. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 25 años.	183
Figura 126. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 50 años.	184
Figura 127. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 100 años.	185
Figura 128. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento global para los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.	186

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de zonas de susceptibilidad a inundación por geomorfología	31
Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados	31
Tabla 3. Distribución por área y porcentaje de la zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología en la zona urbana y expansión urbana del municipio de Palmira	36
Tabla 4. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio	40
Tabla 5. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total mensual de las estaciones ubicadas en cercanías al sector en estudio.	42
Tabla 6. Número de días con lluvia en las estaciones con influencia en el sector en estudio....	44
Tabla 7. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio	46
Tabla 8. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.....	49
Tabla 9. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Esperanza Pradera. Periodo: 1981 – 2021.	50
Tabla 10. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.	51
Tabla 11. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.....	52
Tabla 12. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.....	53
Tabla 13. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021.....	54
Tabla 14. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.....	55
Tabla 15. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.....	56
Tabla 16. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.....	57
Tabla 17. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.....	58
Tabla 18. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.....	59

Tabla 19. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021.....	60
Tabla 20. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.....	61
Tabla 21. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.....	62
Tabla 22. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.....	63
Tabla 23. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020.....	64
Tabla 24. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.....	65
Tabla 25. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso	67
Tabla 26. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera	68
Tabla 27. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita.....	70
Tabla 28. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata	71
Tabla 29. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA	72
Tabla 30. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife...	74
Tabla 31. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji.....	76
Tabla 32. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria.....	77
Tabla 33. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista.	79

Tabla 34. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú ..	80
Tabla 35. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja ...	82
Tabla 36. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena.	83
Tabla 37. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad	84
Tabla 38. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima	86
Tabla 39. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio	88
Tabla 40. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas	89
Tabla 41. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo.....	91
Tabla 42. Estaciones hidrológicas con influencia en el área de estudio	91
Tabla 43. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.....	96
Tabla 44. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021).....	96
Tabla 45. Clasificación de clases de humedad antecedente (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.	104
Tabla 46. Valores de CN para varios tipos de uso del suelo	104
Tabla 47. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés.....	107
Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira	110
Tabla 49. Cobertura del suelo de la zona de estudio	116
Tabla 50. Valores de CN para las cuencas hidrográficas en estudio.....	119
Tabla 51. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio.....	120

Tabla 52. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico	121
Tabla 53. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno a ser empleados en la modelación hidráulica de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira	124
Tabla 54. Valores de la constante adimensional “D”	131
Tabla 55. Valores de rugosidad para diferentes tipos de suelos y coberturas	142
Tabla 56. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para el área de estudio, área urbana y de expansión urbana	143
Tabla 57. Análisis de diferentes mallas computacionales área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira	145
Tabla 58. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones	174
Tabla 59. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones	176
Tabla 60. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación	177
Tabla 61. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación	178
Tabla 62. Clasificación de la amenaza por inundaciones	178
Tabla 63. Áreas (ha) asociadas a nivel de amenaza por inundación de los escenarios	180
Tabla 64. Áreas (ha) asociadas a cada nivel de amenaza por inundación según el mapa consolidado para los periodos de retorno 2,33, 25, 50 y 100 años	185

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Datos crudos estaciones hidrometeorológicas
Anexo 2	Cálculos precipitación
Anexo 3	Análisis de frecuencia
Anexo 4	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia e Hietogramas de precipitación de diseño hidrológico
Anexo 5	Parámetros morfométricos de las cuencas
Anexo 6	Estudio “Levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la CVC”
Anexo 7	Modelo hidrológico
Anexo 8	Informe técnico Levantamiento Topobatimétrico Perímetro urbano
Anexo 9	Modelo hidráulico
Anexo 10	Metodologías zonificación amenaza por inundación por fenómenos de inundación

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el IDEAM, las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

Bajo los fundamentos de la normatividad aplicable vigente, como soporte de las decisiones de ordenamiento de los municipios en Colombia y para el caso del área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, se requiere, entre otros, del desarrollo de los estudios básicos de amenaza para el fenómeno de inundación indicados en el Decreto 1807 de 2014. Es así que, el estudio de amenaza por inundación para el municipio de Palmira a escala 1:5.000 está dirigido al análisis del río Palmira, zanjones Beringo, Beringuito, Mirriñao, Zamorano, Zumbaculo y Romero; acequias La Rica, San José y Barrancas y canal Sesquicentenario, soportados en los estudios hidrológicos e hidráulicos.

De esta forma, el desarrollo de los estudios de inundabilidad (hidrológicos e hidráulicos) se ven justificados porque, según sea el caso, representan los principales elementos de análisis ante la intervención antrópica del sistema hídrico en estudio. Con inspección de campo y el desarrollo de los mapas de planeación de uso del suelo, se puede predefinir el estado futuro de la cobertura vegetal, así como la intromisión del hombre sobre este elemento regulador hídrico de las cuencas, además se pueden determinar los parámetros morfométricos a partir de topologías de la cuenca y obtener caudales de diseño por métodos de simulación matemática de procesos lluvia-escorrentía.

Adicionalmente, el conjunto de estos estudios, son la base para la zonificación de amenaza por inundación y de requerirse, serán el insumo para la proyección de alternativas de prevención de las principales amenazas que puede tener una estructura hidráulica, previendo los caudales de diseño a diferentes periodos de retorno, considerando la magnitud de los eventos extremos en los cauces naturales.

Teniendo en cuenta que el sector por donde discurren los cuerpos de agua en estudio se localiza en el área de jurisdicción de la CVC, para el presente estudio se empleó entre otra, información generada por dicha autoridad ambiental, la cual produjo los mapas de datos referenciados espacialmente de forma dinámica a partir de información geográfica, que contienen temáticas asociadas. Asimismo, se empleó la información cartográfica de la zona urbana y de expansión urbana, aportada por el municipio a escala 1:5.000.

Bajo este contexto y de acuerdo con los alcances y especificaciones técnicas del convenio, lo determinado en el Decreto 1807 de 2014 y la información disponible, la evaluación de la amenaza para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira a escala 1:5000 se soporta

en información topográfica y batimétrica detallada de los tramos de los cauces analizados, así como en los estudios hidrológicos e hidráulicos empleando modelos matemáticos.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo del presente estudio incluye la localización del área y el procedimiento metodológico, que inicia con la consulta de la información existente o levantamiento de información primaria, pasando con el desarrollo de la identificación, zonificación y descripción de las condiciones climáticas del área, insumo para la definición del modelo meteorológico en el cual se determina la lluvia a aplicar, basados en la historicidad de los eventos presentados. Posteriormente, mediante la implementación de modelos hidrológicos se determinan los caudales asociados a los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años. Para realizar un adecuado cálculo de los caudales de los cuerpos de agua en estudio es necesario tener en cuenta todas las subzonas hidrográficas asociadas al río Palmira; zanjones Beringo, Beringuito, Mirriñao, Zamorano, Zumbaculo y Romero; acequias La Rica, San José y Barrancas y canal Sesquicentenario hasta el área de trabajo delimitada por el municipio, con el fin de obtener datos más acertados, específicos y representativos mediante los análisis hidrológicos. Para ello se requiere obtener datos de los parámetros morfométricos (área, longitud del cauce principal, pendiente, tiempos de concentración, tiempo de retraso) de cada subzona, así como los tipos de suelos, coberturas y precipitaciones asociadas, información requerida para un adecuado modelamiento hidrológico.

Los caudales calculados mediante la modelación hidrológica se constituyen en parte de la información de entrada para el desarrollo e implementación de los modelos hidráulicos, cuyos resultados son empleados posteriormente en la zonificación de la amenaza por inundación por desbordamiento (a ser categorizada en alta, media y baja). Esta zonificación se constituye en una herramienta fundamental para los usuarios finales en los diferentes campos de aplicación, tanto en medidas predictivas (diseño de redes y sistemas de alerta temprana e información hidrometeorológica), preventivas (ordenación del territorio, sistemas de aseguramiento, protección civil, educación en el riesgo) y correctivas (implantación de obras, implementación de sistemas de ayuda a los damnificados).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Zonificar la amenaza por inundación para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira en el departamento del Valle del Cauca.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar el estudio climatológico de la zona, empleando estaciones hidroclimatológicas operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, disponibles para el sector en estudio.
- Modelar hidrológicamente las subzonas hidrográficas del municipio de Palmira, con el fin de determinar los caudales para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años.
- Modelar hidráulicamente los cuerpos de agua que discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira
- Elaborar la zonificación de la amenaza por inundación para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca.

3 ALCANCE

En el presente estudio inicia con el cálculo de los eventos correspondientes a lluvias con periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años los caudales máximos en las corrientes de agua que discurren por el municipio de Palmira, para posteriormente realizar la modelación hidráulica de las corrientes de agua que discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira con el fin de generar los mapas de inundaciones (profundidades y velocidades máximas) para los eventos asociados a los periodos de retorno de 2.33, 25, 50 y 100 años y, finalmente, zonificar la amenaza por inundación por desbordamiento para cada uno de los periodos de retorno, incluyendo el mapa de amenaza global o consolidado.

4 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

El estudio inicia con la búsqueda, recopilación y análisis de información antecedente generada por las entidades públicas y/o privadas que tienen presencia en el territorio o que por su misión institucional generan algún tipo de información relacionada con la hidrología, la hidráulica y la problemática de las inundaciones en el municipio del Palmira. De esta forma, las series de los registros de precipitación y caudales mensuales multianuales, insumo para el desarrollo del presente análisis hidrológico, fueron tomadas de las estaciones operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, asimismo, parte de la información secundaria descriptiva se tomó del estudio de Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca del Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2000).

Por otro lado, dentro de los antecedentes se destaca la información contenida en los Estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo al Plan de Ordenamiento Territorial - POT de Palmira y cartografía de formulación, en el marco del programa POT-POD modernos, ejecutados en el año 2018 por el Municipio de Palmira y el Departamento Nacional de Planeación. En estos estudios se delimitaron y zonificaron las áreas de amenaza y en condiciones de riesgo a considerar como determinante en la revisión del contenido de dicho instrumento de ordenamiento; para ello fue necesario desarrollar los componentes de hidrología e hidráulica como insumo básico para definir los sectores bajo condición de riesgo asociados, entre otros fenómenos, al de inundación (Municipio de Palmira - Departamento Nacional de Planeación, 2018). El estudio identificó las zonas con amenaza baja que se encuentran hacia el oriente del municipio de Palmira, mientras que en amenaza media está el sector centro-occidente correspondiente a los cauces de los ríos Palmira, Bolo y Zumbaculo, afectando los cultivos permanentes intensivos y pastoreo semi-intensivo y, finalmente, la amenaza alta se concentra en la zona oriental del municipio, debido principalmente a los cauces de los ríos Cauca y Guachal, los cuales actúan como fuente de recarga de drenajes, tales como el zanjón Rozo, los ríos Palmira, Bolo, Bolito, Fraile y Paranga y la zanja Curiche.

Por otra parte, en el año 2020 la Alcaldía municipal de Palmira y la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres, en el ámbito del Diagnóstico y análisis preliminar del estudio pluviométrico del municipio de Palmira, desarrollaron el análisis y distribución espacio-temporal de la variable precipitación en el área del municipio de Palmira a partir de los datos provenientes de las estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas de entidades tales como CVC e IDEAM, a partir de lo cual se generaron productos para facilitar el entendimiento del régimen de lluvias, como insumo para la toma de decisiones para la gestión del riesgo. En dicho diagnóstico se emplearon dieciocho estaciones de la CVC, de las cuales trece coinciden con las seleccionadas para el presente estudio dada su influencia sobre el área; de igual forma, hubo coincidencia con cinco de las ocho estaciones del IDEAM empleadas (Alcaldía municipal de Palmira - la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres, 2020).

5 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región suroriental del departamento del Valle del Cauca alrededor de los $03^{\circ}31'39''$ de latitud Norte y $76^{\circ}18'01''$ de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el municipio de El Cerrito, al sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al este con el departamento del Tolima y al oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes (ver Figura 1).

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca, sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio.

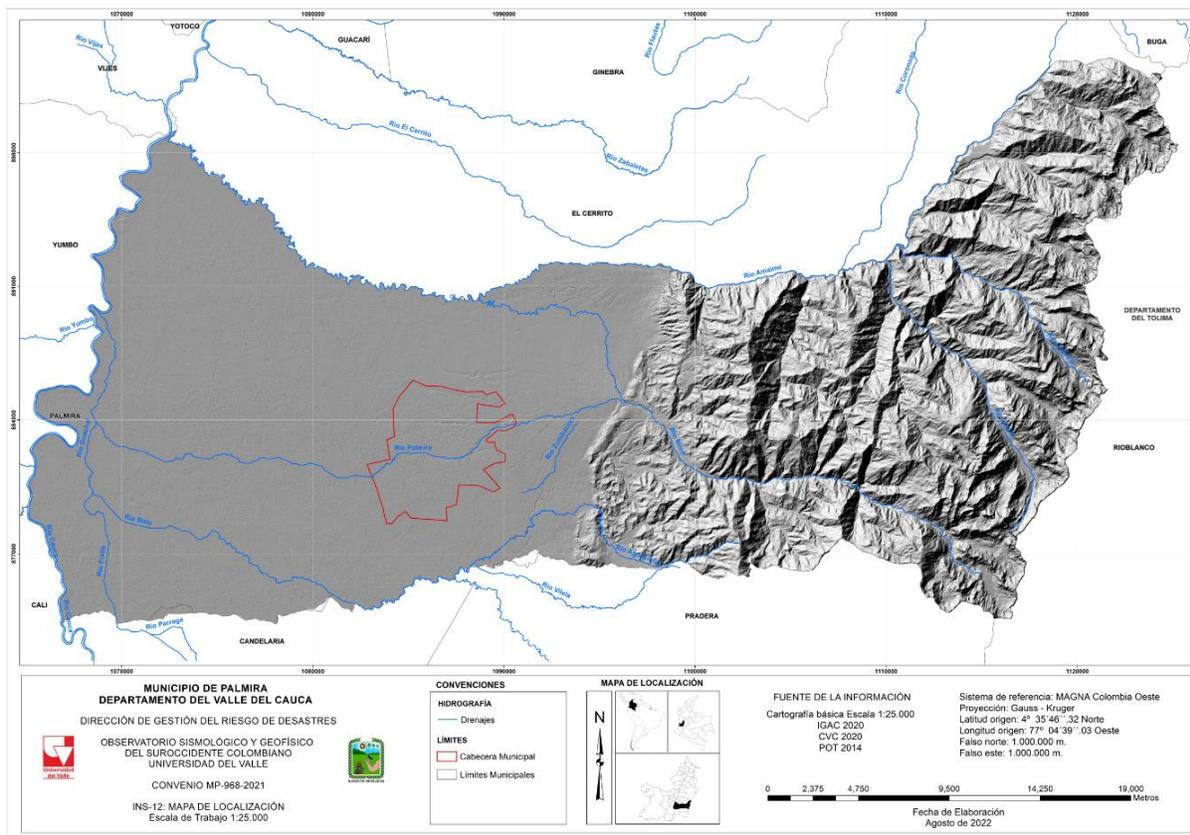


Figura 1. Localización general municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

En el presente estudio los análisis hidrológicos se desarrollan inicialmente de forma general para todos los drenajes del municipio de Palmira y sus áreas de influencia (ver Figura 2) y posteriormente, de forma particular, se extraen los valores de los caudales necesarios para definir las condiciones de frontera en las modelaciones hidráulicas de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira; todo ello con el fin de determinar las cotas, las profundidades y

las áreas máximas de inundación como insumos necesarios para la detección y zonificación de la amenaza por inundación.

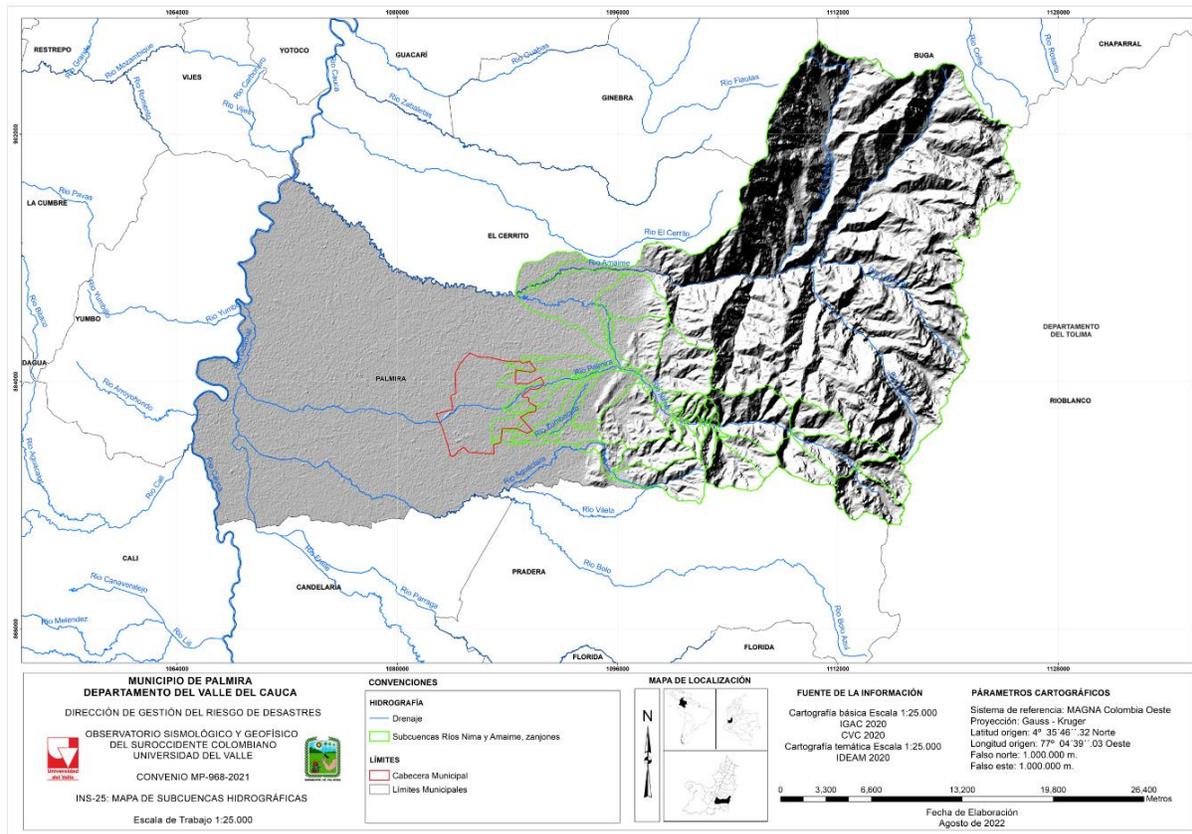


Figura 2. Localización subcuencas en estudio municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta una descripción general de los drenajes de las subzonas hidrográficas que tienen influencia sobre el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira. Bajo este contexto, se incluye lo relativo a los ríos Amaime y Nima, considerando que el río Palmira (corriente de agua que discurre por el sector en estudio) corresponde a una derivación del río Nima y este a su vez es uno de los afluentes principales del Amaime.

5.1 Río Amaime

El río Amaime desemboca sobre la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 185 + 132, aguas abajo de Salvajina. La cuenca del río Amaime está ubicada en la vertiente occidental de la cordillera Central. Geográficamente la cuenca está ubicada aproximadamente entre los 3° 29' y los 3° 47' de latitud Norte y entre los 75° 55' y los 76° 12' de longitud Oeste. La superficie de la cuenca es de 482.15 Km² hasta la estación Amaime, la longitud del cauce principal es de 44.34 Km y su caudal medio es de 7.8 m³/s hasta la estación Los Ceibos.

La cuenca presenta un amplio rango de distribución altitudinal que oscila entre la cota 1100 en la carretera Tablones-Palmira y la cota 4100 en el Páramo La Estrella, en la laguna la Negra, sitio de nacimiento del río Amaime. Su complejo relieve incluye muy pocas zonas planas, donde predominan las zonas quebradas y abruptas con pendientes superiores al 50%.

Los afluentes principales del río Amaime en su margen izquierda son las quebradas Cucuana, Teatino y La Tigra y los ríos Cabuyal, Nima y Toche. Por la margen derecha fluyen al Amaime el río Coronado y las quebradas La Italia, Fuentelapeña, Corazón, La Honda, Platanillal y Naranjales (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2000).

5.1.1 Río Nima

El río Nima nace en la laguna de Santa Teresa a 3800 msnm en el flanco occidental de la cordillera central y desemboca a los 1018 msnm en la margen izquierda del río Amaime en el sector conocido como Barrio Azul del corregimiento de Amaime. La superficie de la cuenca es de 161,48 km² hasta la desembocadura del río Amaime y la longitud del cauce principal es de 40,14 km. El río Nima es la principal fuente de abastecimiento de agua del acueducto del municipio de Palmira.

Los afluentes principales del río Nima son la quebrada Casa de teja, Santa Rita, Los Cuervos, Golondrinas, Agua Clara, Los Negros, Las Mirlas, El Cofre, Aguazul. Por su parte, dentro las más importantes derivaciones del río Nima se encuentra el río Palmira, la cual se localiza en su margen izquierda con un caudal de 2,21 m³/s que es distribuido en las demás subderivaciones de acuerdo con la reglamentación adoptada mediante la Resolución DG 185 de 2000, expedida por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

5.2 Drenajes zona urbana

Los drenajes que discurren por el área urbana del municipio de Palmira objeto de estudio corresponden a los zanjones Beringo, Beringuito, Mirriñao, Zamorano, Zumbaculo y Romero, las acequias La Rita, San José y Barrancas y el río Palmira (ver Figura 3).

El río Palmira es una derivación del río Nima localizada hacia la margen izquierda, cuya reglamentación fue adoptada mediante la Resolución DG 185 de 2000, donde indica que sus caudales son 2,21 m³/s los cuales son distribuidos en las demás subderivaciones.

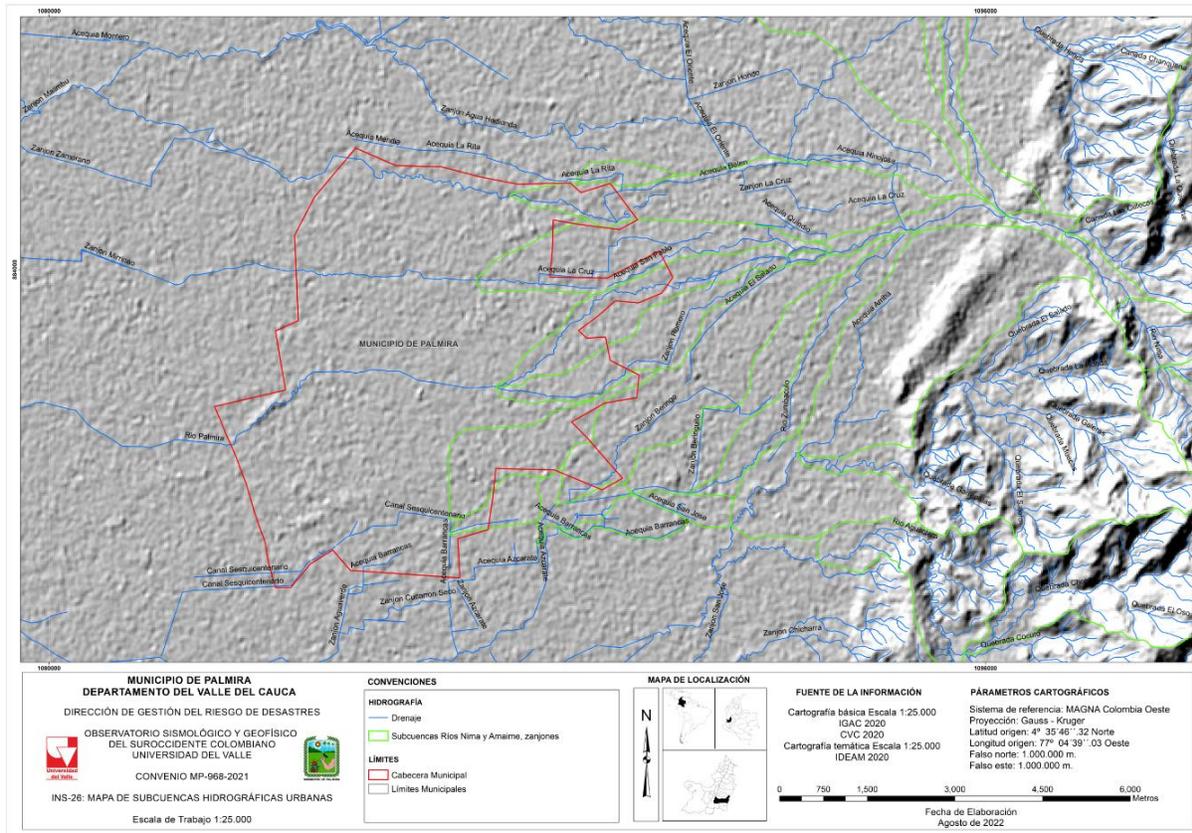


Figura 3. Localización de subcuencas del área urbana del municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia.

6 METODOLOGÍA

6.1 **Historicidad - Zonas críticas por inundación en el área urbana del municipio de Palmira**

Con la necesidad de reconstruir los espejos de agua de las inundaciones que han ocurrido por desbordamiento de los principales afluentes en la zona urbana del municipio de Palmira, se realizó un trabajo con el acompañamiento de los funcionarios de la DGRD- Palmira, permitiendo la obtención de información valiosa de los eventos de inundaciones históricas y los impactos generados en su territorio a través de los últimos años.

Después de la recolección de los eventos de inundación en las fuentes de información, se realizó un trabajo en las zonas donde han ocurrido las inundaciones por desbordamiento de los afluentes en estudio, consultando mediante encuestas a las comunidades afectadas para determinar, a través de la percepción y memoria de las personas, las principales características de las inundaciones ocurridas, tales como, la profundidad y la velocidad del agua, el olor y el color del agua y la duración del evento y, finalmente, sobre un plano se dibujaron los polígonos de los espejos de agua.

6.2 **Susceptibilidad a inundación por geomorfología**

La categorización de zonas de susceptibilidad a inundación bajo criterios de clasificación para los niveles baja, media y alta, se realiza a partir de la identificación de las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica, generadas a lo largo de un sistema fluvial como resultado de los procesos erosivos y de acumulación que varían en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos, bajo la premisa de que cada subunidad se identifica según el material del depósito, morfogénesis, pendientes, contrastes morfológicos (rugosidad, curvatura, etc.) y cronología, siendo esta última característica la que permite determinar las áreas susceptibles a inundarse según la temporalidad del proceso: reciente, subreciente o antiguo.

6.3 **Climatología**

Para generar la tormenta de diseño mediante un modelo meteorológico es necesaria la identificación, la zonificación y la descripción de las condiciones climáticas del área, la cual se realiza con base en la información de las estaciones meteorológicas existentes, aledañas a las cuencas en estudio y operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; los parámetros en evaluación son la precipitación promedio mensual total, el número de días con lluvia y la precipitación mensual máxima en 24 horas.

La determinación de la lluvia a aplicar se fundamenta en la historicidad de los eventos presentados. Para ello, se emplean las Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia - IDF de las estaciones meteorológicas con influencia en la zona en estudio para los diferentes periodos de retorno, estas curvas son obtenidas aplicando la metodología indicada en el estudio “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia” (Diaz-Granados M, 2011);. El objetivo final es generar los hietogramas de diseño empleando el método de bloque alterno de Ven Te Chow, el cual se fundamenta en la intensidad de la precipitación para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años.

6.4 Morfometría

A partir de la información cartográfica se determinan los principales parámetros morfométricos (área, longitud del cauce, cota máxima y mínima, pendiente y tiempo de concentración, entre otros) de las cuencas en estudio, como información de entrada para la modelación hidrológica.

6.5 Hidrología

Se realiza la modelación hidrológica de la cuenca aferente del drenaje en estudio para determinar los caudales asociados a los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años, empleando el modelo matemático HEC-HMS 4.9. Para dicha modelación se requiere de los parámetros morfométricos mencionados anteriormente, así como el tipo de suelo y el uso y cobertura del suelo.

6.6 Hidráulica

La modelación hidrodinámica de los cuerpos de agua que discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira en el departamento del Valle del Cauca se realiza a partir de los estudios de topografía (planimetría, altimetría y batimetría) y de los caudales calculados previamente para los diferentes periodos de retorno, empleando el programa computacional HEC-RAS 6.1. Para lo anterior se requiere contar, entre otros, con parámetros como la rugosidad del cauce, taludes y zonas aledañas, condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, hidrógrafas de entrada, malla computacional. Se elaboran los mapas de inundación de las zonas de estudio para las crecientes consideradas (periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años).

Posteriormente, con los resultados (velocidad y profundidad) de las modelaciones hidráulicas para los diferentes escenarios y con la metodología seleccionada para determinar el nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación, se realiza la zonificación de amenaza por inundación de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira y la generación de los respectivos mapas para los diferentes periodos de retorno incluido el consolidado.

6.7 Zonificación de amenaza por inundación

La metodología a desarrollar inicia con la determinación de los niveles de amenaza por fenómenos de inundación se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías presentadas en el Anexo 10 y en la experiencia del grupo de investigación de la Universidad del Valle, HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberaños, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados).

Es así que los niveles de amenaza por inundación a ser categorizados en alta, media y baja, se obtienen de los niveles de frecuencia o periodos de recurrencia de los eventos de inundaciones y de los niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones expresada en rangos de profundidades, que se basan en las combinaciones de los factores hidrodinámicos y características del terreno sobre el cual actúa el fenómeno, de esta forma, las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad o magnitud son la profundidad (H), la velocidad (V) y el producto de la profundidad por la velocidad $H*V$.

7 HISTORICIDAD - ZONAS CRÍTICAS POR INUNDACIÓN EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA

Para darle lugar a este punto, junto con el equipo técnico y supervisión del proyecto se decide trabajar sobre el corredor del río Palmira apoyados en la historicidad encontrada de los distintos eventos de inundación que éste ha generado sobre en la ciudad, teniendo como punto de partida el antes y después de la obra de entamboramiento y del Box Culvert.

Primeramente, se realiza una entrevista al Ingeniero Héctor Plaza Patiño, director del departamento de Alcantarillado de AQUAOCCIDENTE S.A E.S.P., anteriormente Acuaviva, y quien es gran conocedor de las problemáticas por inundaciones en el área urbana del municipio. Él indica que el entamboramiento inició su proceso en el año de 1962 y finalizó en 1966 construido en ladrillo desde la Carrera 16 hasta la Carrera 35, el entamboramiento se construyó por fines de salubridad y recuperación de terrenos, lo que luego causó un problema mayor, porque los habitantes empezaron la construcción de viviendas a borde del entamborado. Posteriormente, en el año de 1985 se construyó el entamborado en concreto hasta la Carrera 35, en la Carrera 16 con Calle 32^a se encuentra el embalse de regulación, el entamborado finaliza en el Parque de Las Brujas; en esta misma dirección, Carrera 35, inicia el Box Culvert que finaliza en la Carrera 41 con Calle 33^a, con capacidad para un periodo de lluvias máxima de 100 años¹ y en la Carrea 41A, el río vuelve a estar de destapado, desborda en el sector conocido como Llano Grande.

Con ayuda del ingeniero Plaza, localizamos las zonas críticas por inundaciones pluviales y fluviales, donde se ve una relación a los datos históricos levantados y mostrados en los puntos anteriores. Enfatiza en lo siguiente:

- La zona del entamborado, todo lo que es Parque Lineal, Parque del Amor, Plaza de Toros, Clínica SOS Comfandi tienen problemas de inundaciones esporádicas cada dos años, dependiendo de qué tan fuertes puede ser el periodo de lluvias, el agua del río Palmira, sube y rebosa por el sistema de alcantarillado.
- Antes del entamborado las inundaciones por el río Palmira, afectan las viviendas que están a la orilla o valle del río, como en los barrios Los Cristales, La Orlidia, San Carlos, San Jorge, El Danubio.
- Zonas críticas por inundaciones pluviales en muchos barrios es porque se rellenó y no se levantó a nivel de terreno, además algunos naturalmente son en forma de batea. Sectores que siempre han sido críticos cada vez que llueve fuerte en la ciudad por más de 3 horas: Calle 26^a con Carreras 24-25 (Las Victorias); El Papayal, Calle 27 con Carrera 14; Jardín

¹ El Ingeniero Plaza, nos informa que en este sector no se presentan inundaciones.

Infantil Calle 40 con Carrera 21 barrio San Cayetano; Los Mormones Calle 18 con Carrera 29; El Sembrado, Carrera 21 con Calle 20 y la Calle 40 con Carrera 17, en San Pedro.

- Mientras que las zonas críticas por inundaciones fluviales, diferentes al río Palmira, es la Carrea 24 con Calle 4, afectaciones por el Zanjón Barrancas en la Urbanización Acacias de La Italia y el barrio Monteclaro, que presenta inundaciones por el zanjón Monteclaro.

Correspondiente a lo informado por el señor Plaza, y con la historicidad encontrada en estudio, pudimos verificar y encontrar relación a los datos obtenidos. La Figura 4 muestra algunos de los puntos visitados por el equipo técnico con acompañamiento de la DGRD- Palmira. La imagen **a**, corresponde al Hogar Infantil Ciervitos que, según relatos del guardia y una funcionaria, cada vez que llueve les toca movilizarse hacia la Junta de Acción Comunal, han sufrido varias inundaciones donde el agua alcanza el 1mt, han perdido papelería y juguetes.

La fotografía **b**, corresponde al barrio Cristales, donde el río ha generado erosión. En este sitio no pudimos hacerle la entrevista a alguien. La fotografía **c**, corresponde al paso del río en la Calle 41 con Carrera 34, allí las viviendas de la margen izquierda del río están al mismo nivel del río, las viviendas de la margen derecha están un poco más altas, en la zona no se pudo ingresar a realizar entrevista para averiguar algunas afectaciones, por seguridad del personal, en este sitio hay problemas de manejo de residuos sólidos.

Por otro lado, la imagen **d**, corresponde al río Palmira que divide el barrio San Carlos del barrio Palmeras del Oriente. Se constató con un residente del barrio Palmeras, que las inundaciones por el río Palmira, cuando ocurrían afectaban al barrio San Carlos, y cuando llueve también tiene problemas de reflujos y de encharcamiento. Mientras que la fotografía **e**, corresponde a unas viviendas localizadas a la margen derecha del río Palmira en el barrio San Jorge (Carrera 36 con Calle 9ª) un habitante² de la zona nos indicó que el río cuando desbordaba hace 20 años llegaba hasta la Calle 9 a la Calle 10, espejos de agua que duraban 1 día, comenta que desde el 2008 no se desborda, le adjudica al hecho a que éste no carga la misma cantidad de agua que hace algunos años.

Por último, tenemos la fotografía **f**, que es la zona donde inicia el ingreso al embalse que está en el Parque Municipal. Se logró observar que alrededor del río hay mucha contaminación por residuos sólidos. Al ingresar al embalse los encargados del mantenimiento, cuentan que cuando hay temporada de lluvias, les llega demasiado residuos, animales muertos, el olor en el sitio es desagradable.

Por otro lado, la espacialización de los datos encontrados en la zona urbana del municipio de Palmira, se muestra en la Figura 5 los puntos de localización de color azul oscuro corresponden a sitios de inundación fluviales por el río Palmira y el Zanjón Barrancas; los puntos de color azul cian, corresponde a los sitios críticos por inundación pluviales; los puntos de color amarillo

² El habitante, un reconocido fundador del barrio San Pedro, nos atendió, pero estaba trabajando en la fachada de su casa, no pudimos hacer la encuesta, pero nos dio datos importantes.

corresponde a sitios donde sucede inundaciones fluviales y hay proceso de reflujó. El punto de localización de color verde corresponde a inicio del Box Culvert y el círculo fucsia indica donde termina el Box Culvert. Mientras que los polígonos achurados de color naranja, corresponden a la inundación del 26 de abril de 1997, que afectó las viviendas a la orilla de la Carrera 28 con Calle 32 y luego todo el sector del Parque Lineal. Los barrios de color naranja son corresponde a los datos obtenidos en la búsqueda histórica del presente estudio.



Figura 4. Zonas Críticas por inundación en la zona urbana del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia.

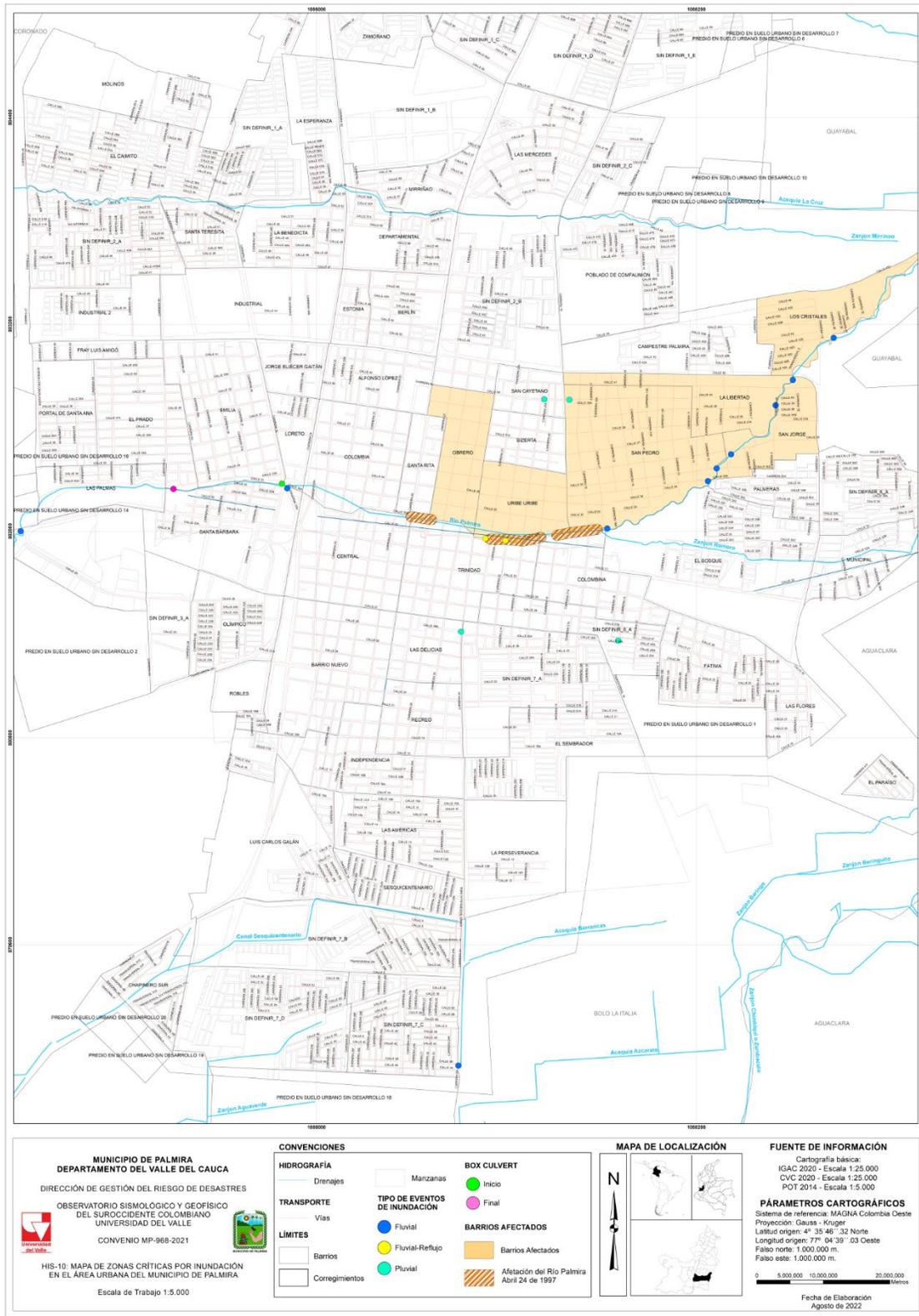


Figura 5. Localización zonas críticas por inundación en el área urbana del municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia.

8 SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIÓN POR GEOMORFOLOGÍA ZONA URBANA Y SUBURBANA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA – ESCALA 5K

El objetivo de este análisis es el de identificar los elementos geomorfológicos (EGMF), unidades geológicas superficiales y la morfodinámica, generadas a lo largo de un sistema fluvial, como resultado de los procesos erosivos y de acumulación que varían en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos. Cada elemento se identifica según el material del depósito, morfogénesis, pendientes, contrastes morfológicos (rugosidad, curvatura, etc.) y cronología (SGC, 2012) en Corcuencas (2019), siendo esta última característica la que permite determinar las áreas susceptibles a inundarse según la temporalidad del proceso: reciente, subreciente o antiguo. Para ello se hizo una categorización de zonas de susceptibilidad a inundación siguiendo los criterios de la (Tabla 1).

Tabla 1. Categorización de zonas de susceptibilidad a inundación por geomorfología

Nivel de susceptibilidad	Criterios para su clasificación
Baja	En esta categoría se localizan las geoformas antiguas (terrazas, abanicos, cerros, etc), geoformas asociadas a procesos fluviales abandonados y de origen estructural y denudacional alejados de los cuerpos de agua (distancia y altura)
Media	Aquí se ubican las geoformas subrecientes asociadas a procesos intermitentes fluviales lentos
Alta	Corresponde principalmente a geoformas asociadas a procesos activos, recientes, al canal de movilidad de los cauces activos, llanuras o planicies de inundación, aquí representan procesos naturales, fluviales (lagos, canales, barras, terrazas, etc.), antrópicos, denudacionales y estructurales cercanos a cuerpos de agua

Fuente: Modificado de Corcuencas (2019)

En las labores de campo se verificaron y caracterizaron los elementos geomorfológicos identificados en la fase de fotointerpretación; con base en esto y a la temporalidad relativa de las mismas se desarrolla una escala cualitativa de calificación de la susceptibilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados

Nombre EGMF	Acrónimo	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)
Abanico aluvial antiguo	Faaa	Baja	747,240138
Abanico aluvial antiguo	Faaa	Baja	728,13302
Abanico aluvial antiguo	Faaa	Baja	13,180374
Abanico aluvial subreciente	Faas	Baja	291,476037
Abanico aluvial subreciente	Faas	Baja	769,579642
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Baja	0,713194
Jarillón	Allj	Baja	0,161328
Jarillón	Allj	Baja	1,036127
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,214838
Lleno seleccionado	Alls	Baja	1,321464
Lleno seleccionado	Alls	Baja	2,181362
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,316647

Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados

Nombre EGMF	Acrónimo	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,064589
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,179513
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,088589
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,135076
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,414912
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,91025
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,456068
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,282762
Lleno seleccionado	Alls	Baja	0,563038
Lleno seleccionado	Alls	Baja	17,346107
Planos y campos de llenos antrópicos	Ar	Baja	1,727015
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	0,926931
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	2,632733
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	2,791848
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	0,438674
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	1,662204
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	2,061146
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	1,937696
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	6,231572
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	0,041193
Relleno de escombros o escombreras	Are	Baja	0,123497
Terraza de erosión antigua	Ftean	Baja	34,794686
Abanico aluvial antiguo	Faaa	Media	0,267876
Abanico aluvial antiguo	Faaa	Media	0,217683
Escarpe abanico aluvial antiguo	Feaaa	Media	0,657259
Escarpe abanico aluvial antiguo	Feaaa	Media	0,25998
Escarpe abanico aluvial antiguo	Feaaa	Media	2,079909
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	10,001259
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	5,202497
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,465277
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	3,872629
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,069875
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	1,149488
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,692522
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	1,582797
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,658968
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,684566
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	0,818773
Escarpe abanico aluvial subreciente	Feaas	Media	10,310298
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	1,389923
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,074758
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,02234

Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados

Nombre EGMF	Acrónimo	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,035745
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,04319
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,171953
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,230996
Escarpe de terraza de erosión	Ftee	Media	0,017902
Escarpe de terraza de erosión antigua	Fteea	Media	1,354854
Escarpe de terraza de erosión antigua	Fteea	Media	2,169574
Escarpe de terraza de erosión subreciente	Ftees	Media	0,231912
Escarpe de terraza de erosión subreciente	Ftees	Media	0,048138
Escarpe de terraza de erosión subreciente	Ftees	Media	1,895149
Escarpe de terraza de erosión subreciente	Ftees	Media	0,186766
Escarpe terraza de erosion	Ftee	Media	0,0793
Escarpe terraza de erosión	Ftee	Media	0,017781
Excavaciones	Ase	Media	0,478828
Excavaciones	Ase	Media	0,45632
Excavaciones	Ase	Media	1,849189
Excavaciones	Ase	Media	1,02301
Excavaciones	Ase	Media	0,632982
Jarillón	Allj	Media	0,078623
Jarillón	Allj	Media	0,270407
Jarillón	Allj	Media	0,644008
Jarillón	Allj	Media	0,181845
Jarillón	Allj	Media	0,238123
Jarillón	Allj	Media	0,264085
Jarillón	Allj	Media	0,242717
Jarillón	Allj	Media	0,421479
Jarillón	Allj	Media	0,209791
Lleno seleccionado	Alls	Media	0,068764
Lleno seleccionado	Alls	Media	1,115862
Lleno seleccionado	Alls	Media	1,232588
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	286,487167
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	20,816215
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	6,109425
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	164,110525
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	44,4388
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	92,593963
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	20,281136
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	8,609307
Planicie y delta lacustre	Fpla	Media	41,552177
Terraza de erosión	Fte	Media	0,045545
Terraza de erosión	Fte	Media	0,129623
Terraza de erosión	Fte	Media	0,043988

Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados

Nombre EGMF	Acrónimo	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)
Terraza de erosión	Fte	Media	0,544503
Terraza de erosión	Fte	Media	0,249254
Terraza de erosión	Fte	Media	0,502012
Terraza de erosión	Fte	Media	0,10039
Terraza de erosión	Fte	Media	0,016129
Terraza de erosión	Fte	Media	0,03402
Terraza de erosión	Fte	Media	0,04077
Terraza de erosión	Fte	Media	0,250722
Terraza de erosión	Fte	Media	0,207927
Terraza de erosión	Fte	Media	0,015529
Terraza de erosión	Fte	Media	0,521155
Terraza de erosión subreciente	Ftes	Media	0,322179
Terraza de erosión subreciente	Ftes	Media	0,426851
Terraza de erosión subreciente	Ftes	Media	5,84971
Terraza de erosión subreciente	Ftes	Media	0,05297
Canal artificial	Aca	Alta	1,864212
Canal artificial	Aca	Alta	3,581071
Canal artificial	Aca	Alta	0,100926
Canal artificial	Aca	Alta	0,113682
Canal artificial	Aca	Alta	0,206387
Lago antrópico	Al	Alta	0,316486
Lago antrópico	Al	Alta	0,161209
Lago antrópico	Al	Alta	1,865881
Planicie de inundación	Fpi	Alta	1,68621
Planicie de inundación	Fpi	Alta	8,485226
Planicie de inundación	Fpi	Alta	5,060219
Planicie de inundación	Fpi	Alta	2,60115
Planicie de inundación	Fpi	Alta	13,170743
Planicie de inundación	Fpi	Alta	20,744867
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,040199
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,060669
Planicie de inundación	Fpi	Alta	5,206861
Planicie de inundación	Fpi	Alta	20,328943
Planicie de inundación	Fpi	Alta	15,306471
Planicie de inundación	Fpi	Alta	5,539648
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,835489
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,926294
Planicie de inundación	Fpi	Alta	3,928019
Planicie de inundación	Fpi	Alta	3,014626
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,607695
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,661415
Planicie de inundación	Fpi	Alta	0,33411

Tabla 2. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en los elementos geomorfológicos identificados

Nombre EGMF	Acrónimo	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)
Planicie de inundación	Fpi	Alta	8,66379
Planicie de inundación	Fpi	Alta	6,78076

Fuente: elaboración propia

Con el análisis obtenido de la tabla anterior (Tabla 2) se obtiene el mapa de Zonificación de Susceptibilidad a Inundaciones a escala 1:5 000 zona urbana y suburbana del municipio de Palmira (Figura 6). Para la elaboración del mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología, se realizó un filtro para redefinir la clasificación de la susceptibilidad, teniendo en cuenta la edad relativa de la geoforma, la distribución espacial y la distancia de las unidades geomorfológicas respecto a los cauces y otros criterios obtenidos en campo.

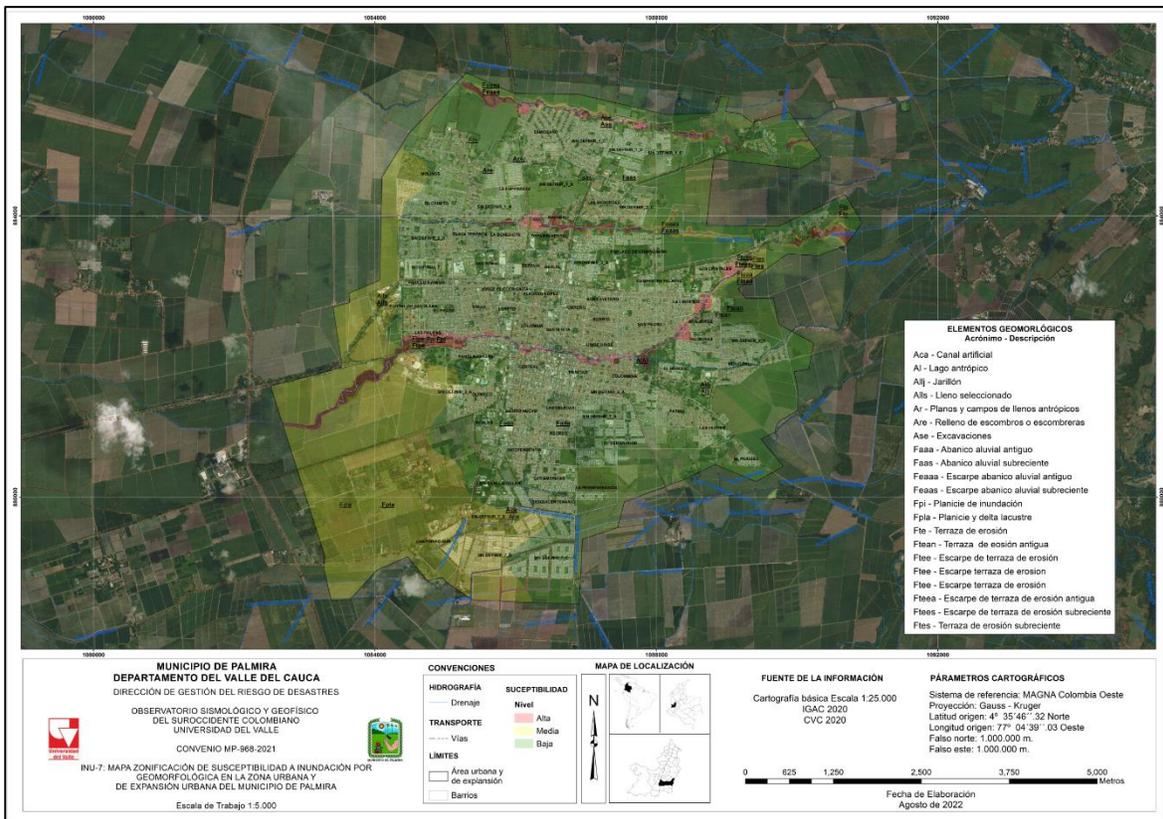


Figura 6. Mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

El área total de estudio corresponde a 3.514,280 Has, de los cuales 132,193 Has presentan una susceptibilidad alta, 750,723 Has susceptibilidad media y 2.631,364 Has susceptibilidad baja (Tabla 3) (Figura 7).

Tabla 3. Distribución por área y porcentaje de la zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología en la zona urbana y expansión urbana del municipio de Palmira

SUSCEPTIBILIDAD	AREA_SUSCE (Ha)	AREA_SUSCE (%)
ALTA	132,193	3,76
MEDIA	750,723	21,36
BAJA	2.631,364	74,88
TOTAL	3.514,280	100

Fuente: elaboración propia

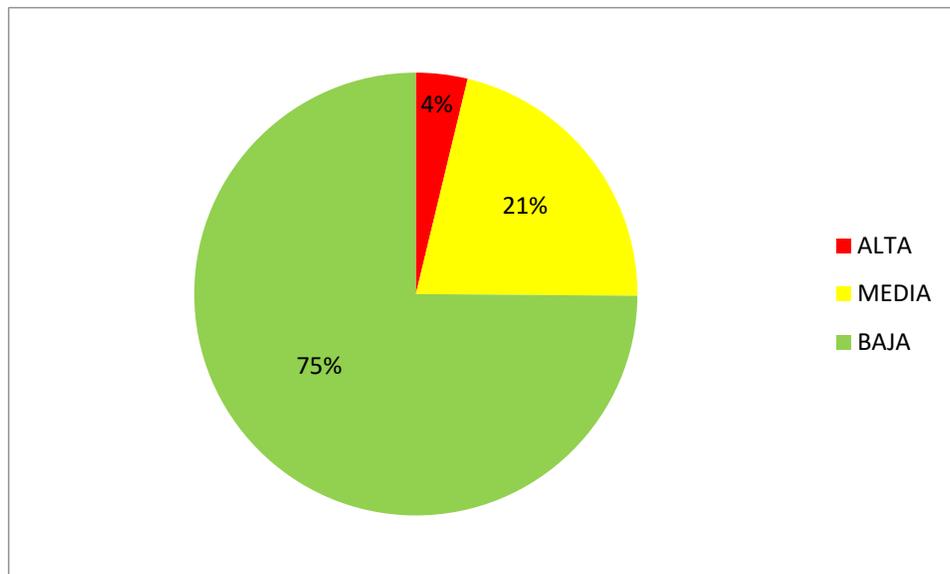


Figura 7. Distribución porcentual de la susceptibilidad por inundaciones en la zona urbana y suburbana del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

Debido a la localización geoespacial de la zona urbana y suburbana del municipio de Palmira, la cual se encuentra asentada en el valle aluvial del río Cauca; dentro de la caracterización de la susceptibilidad a inundación por geomorfología, solo se identifican geoformas relacionadas con el ambiente fluvial (F) y al ambiente antropogénico (A) como consecuencia de la intervención del hombre.

Susceptibilidad alta

Las zonas de susceptibilidad alta están representadas en color rojo ocupando un 3,76 % del área total de estudio, relacionada principalmente con los diferentes cuerpos de agua lagos, ríos y zanjonés. Dentro de la zonificación de susceptibilidad se identificó geoformas del ambiente morfogenético fluvial (F).

Las geoformas relacionadas con el ambiente fluvial (F) corresponden al plano o llanura de inundación (Fpi); destacándose la del río Palmira, el cual recorre el municipio de con una tendencia general de NEE – SWW y las de los zanjonés Mirriñao y Zamorano, los cuales se encuentran localizados al norte del río Palmira y presentan unas direcciones predominantes de E-W y SEE-NWW respectivamente.

Al sur del río Palmira se localizan una serie de zanjones como son el Romero, Sesquicentenario, Zumbaculo; cuya susceptibilidad está relacionada a sus cauces principalmente.

La categoría de susceptibilidad alta corresponde en gran parte a unidades geológicas superficiales de suelos transportados de llanura de inundación (Stpi); los cuales son depósitos de origen aluvial localizados en las llanuras de inundación de los drenajes, su mayor extensión se encuentra en la llanura aluvial del río Palmira y los zanjones Mirriñao y Zamorano, cuyos suelos están conformados por intercalaciones de arenas cuarzosas con óxidos de hierro y laminación plana, arcillas.

Susceptibilidad media

Las zonas con susceptibilidad media están representadas con color amarillo y cubren el 21,36 % del total de la zona urbana y suburbana del municipio de Palmira. Dentro de la zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología media se encuentran geoformas de los ambientes morfogenéticos: antrópico (A) y fluvial (F).

Para el ambiente antrópico (A) se relaciona los jarillones (Allj); que corresponden a las geoformas diseñadas por el hombre mediante la acumulación de material seleccionado (arena, arcilla, grava y bloques), dispuesto de manera paralela al cauce del río principales: Palmira. Esta geoforma dispuesta sobre las llanuras de inundación, pueden ser prácticamente cubiertas por el agua y en ocasionalmente ser desbordadas, dependiendo de la intensidad de las lluvias y de las crecientes de las corrientes hídricas.

Igualmente, dentro de las geoformas del ambiente antropogénico se encuentran algunos llenos seleccionados (Alls), que corresponden a estructuras sobre los cauces del río Palmira y los zanjones Mirriñao y Zamorano, los cuales ocasionalmente pueden llegar a ser inundados. Y finalmente se presentan las geoformas identificadas como excavaciones (Ase) las cuales corresponden a la extracción de material relacionada con antiguas explotaciones de arcilla, localizadas principalmente hacia las márgenes del río Palmira y el zanjón Zamorano.

Para el ambiente fluvial (F) se identificaron todas las geoformas relacionadas con el abanico aluvial antiguo (Faaa) y el escarpe de abanico aluvial antiguo (Feaaa). Las terrazas de erosión: Fte, Ftes y los escarpes de terrazas de erosión: Ftee, Ftees, Fteea; por corresponder a geoformas planas a levemente inclinadas, íntimamente relacionadas con los procesos de divagación de los cauces que las cortan y próximas al plano o llanura de inundación (Fpi) de las corrientes principales.

Finalmente, dentro del ambiente fluvial (F) se destaca la planicie y delta lacustre (Fpla) como una de las zonas más extensas dentro de la zonificación de susceptibilidad media. Corresponde a una superficie localizada al occidente del abanico aluvial antiguo (Faaa); presenta una inclinación de ladera plana (0°- 5°); con formas de la ladera irregulares, favoreciendo la conformación de superficies levemente más altas (cóncavas) y otras más bajas (convexas) facilitando la

generación de zonas pantanosas por la acumulación de aguas lluvias o donde se represa el agua que se desborda de las corrientes hídricas próximas.

Las zonas con categoría de susceptibilidad media están conformadas por unidades geológicas de superficie (UGS) representadas por intercalaciones de material de tamaño de grano arcilla a limo, interestratificado con capas de arena que varían en su tamaño de grano desde fino a grava muy fina, de baja compactación y con presencia de basalto, esquisto, cuarcitas, gabros, migmatitas y cuarzdioritas que hacen parte del suelo transportado de abanico aluvial (Staa), de suelo transportado de las terrazas de erosión (Stte) y suelo transportado de planicie y delta lacustre (Stpla).

Susceptibilidad baja

Las zonas con susceptibilidad baja están representadas con color verde y cubren el 74,88 % del total de la zona urbana y suburbana del municipio de Palmira. Dentro de la zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología media se encuentran geoformas relacionadas con los ambientes antrópico (A) y fluvial (F).

Para el ambiente antrópico (A), se identifica los llenos seleccionados (Alls) y los rellenos de escombros y escombreras (Are).

En el ambiente fluvial (F), se encuentran Los abanicos aluviales antiguo (Faaa) y subreciente (Faas), los cuales corresponden a geoformas que son disectadas por las corrientes hídricas pero que al alejarse de las zonas de influencia del plano o llanura de inundación (Fpi) presentan una morfología de tipo colina, de laderas de longitudes largas, de formas cóncavas y pendientes variables entre 0 % y 10%. Asociados a estos abanicos se encuentran los escarpes de abanico aluvial subreciente (Feaas) y el escarpe de terraza de erosión antigua (Ftean), los cuales presentan corresponden a planos inclinados a fuertemente inclinados de longitudes cortas muy cortas relacionados con geoformas temporalmente más antiguas y espacialmente a cotas más altas.

Las zonas con categoría de susceptibilidad baja están conformadas por unidades geológicas de superficie (UGS) representadas por suelos transportados de terraza de erosión antigua (Sttean) y los suelos transportados de los abanicos aluviales antiguos (Staaa) y subreciente (Staas).

9 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL MUNICIPIO DE PALMIRA

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo, durante un periodo de tiempo y en un lugar o región dada, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático.

Debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera (uno de los componentes del sistema), éste se describe a partir de variables atmosféricas como la precipitación; sin embargo, se podría identificar también con las variables de otros de los componentes del sistema climático.

El clima de Colombia es muy variado, tanto a lo largo y ancho de su territorio como a través del tiempo. Esta diversidad climática está determinada en gran medida por la ubicación geográfica y por las características fisiográficas del territorio colombiano. La diversidad climática colombiana es un recurso importante del país, y las variaciones del clima juegan un papel importante en las diferentes formas de actividad humana en él.

A partir de la información de las estaciones hidrometeorológicas existentes en sectores próximos a la zona objeto del estudio, en este capítulo se identifican, zonifican y describen las condiciones climáticas del área del municipio de Palmira; de igual manera, se analizan las fuentes hídricas más cercanas y sus zonas de influencia, identificando los regímenes hidrológicos y los caudales característicos de las principales corrientes, para posteriormente, extraer de forma particular la información de caudales para la zona urbana y de expansión urbana, como entrada a los modelos hidráulicos.

9.1 Climatología

9.1.1 Red de estaciones meteorológicas

Para el análisis del clima, como factor de gran incidencia en los procesos que se presentan en el medio natural, se realizó inicialmente una selección de las en las estaciones que conforman la red de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y que se localizan en el área de influencia del municipio de Palmira (Anexo 1); es así que se identificaron catorce (14) pluviométricas, tres (3) pluviográfica, dos (2) agrometeorológica, cuatro (4) climatológicas ordinarias y tres (3) evaporimétrica. La información general de las estaciones se presenta en la Tabla 4 y se muestra su ubicación respecto a la zona de estudio en la Figura 8.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio

ESTACIÓN	ENTIDAD	CÓDIGO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	CATEGORIA	AÑO INICIO
CAJONES	IDEAM	26060200	Miranda	1104113.69153	848577.90752	2472	PM	1975
FLORIDA	IDEAM	26070760	Florida	1093173.82024	859777.87653	1059	PM	1954
CENICANA	IDEAM	26075080	Florida	1086437.48250	863381.84102	128	AG	1981
CALI SEDE IDEAM	IDEAM	26080310	Cali	1061612.61193	876143.45288	983	PG	1997
PALMIRA ICA	IDEAM	26075010	Palmira	1084738.36090	880306.62881	1018	AG	1973
LA ZAPATA	IDEAM	26070110	Palmira	1096299.90598	881834.26024	1119	PM	1975
ESPERANZA PRADERA	IDEAM	26070170	Palmira	1091923.31056	874377.74314	1055	PM	1981
INGENIO MANUELITA	IDEAM	26075050	Palmira	1088853.35324	887009.93997	1059	CO	1973
EL PARAISO	IDEAM	26090460	El Cerrito	1097521.61019	895385.95864	1305	PM	1973
TENERIFE	IDEAM	26095080	El Cerrito	1111394.21329	904275.77401	2628	CO	1973
AEROPUERTO PALMASECA	IDEAM	26075040	Palmira	1076763.55486	882867.88126	970	PM	1973
AUJI	CVC	2612800104	El Cerrito	1107755.93500	892328.45400	1555	PM	1971
AUSTRIA	CVC	2612810112	Palmira	1100499.35800	887540.60100	1750	PM	1969
BELLAVISTA	CVC	2612800103	Palmira	1120098.70000	893281.90000	2875	PM	1970
CHAMBÚ	CVC	2612720301	Palmira	1096593.36700	876762.47100	1350	EV	1973
LA CEJA	CVC	2612800106	El cerrito	1118650.54100	903532.38600	3052	PM	1971
LA DIANA	CVC	2612710301	Florida	1099758.61300	860081.71000	1960	EV	1971
LA SIRENA	CVC	2612810203	Palmira	1107148.32300	880364.48000	2605	CO	1988
LA SOLEDAD	CVC	2612710105	Florida	1109013.84400	867463.57000	2160	PM	1971
LOS MINCHOS	CVC	2612720105	Pradera	1099442.70100	870099.85900	1370	PG	1994
PLANTA NIMA 1	CVC	2612810122	Palmira	1095534.06700	884090.28300	1170	PM	1970
PLANTA RIO CAUCA	CVC	2620000103	Cali	1064958.79100	872964.48500	956	PG	1960
SAN EMIGDIO	CVC	2612810201	Palmira	1097392.12800	884203.01500	1272	CO	1964
SAN NICOLAS	CVC	2612810109	Palmira	1101590.00000	882202.10000	2100	PM	1970
TENJO	CVC	2612810108	Palmira	1100743.62700	881112.62400	1500	PM	1969
VIJES	CVC	2622900301	Vijes	1071963.00000	900761.00000	990	EV	1955

PG (Pluviográfica), PM (Pluviométrica), EV (Evaporimétrica), CO (Climatológica Ordinaria) AG (Agrometeorológica)

Fuente: elaboración propia

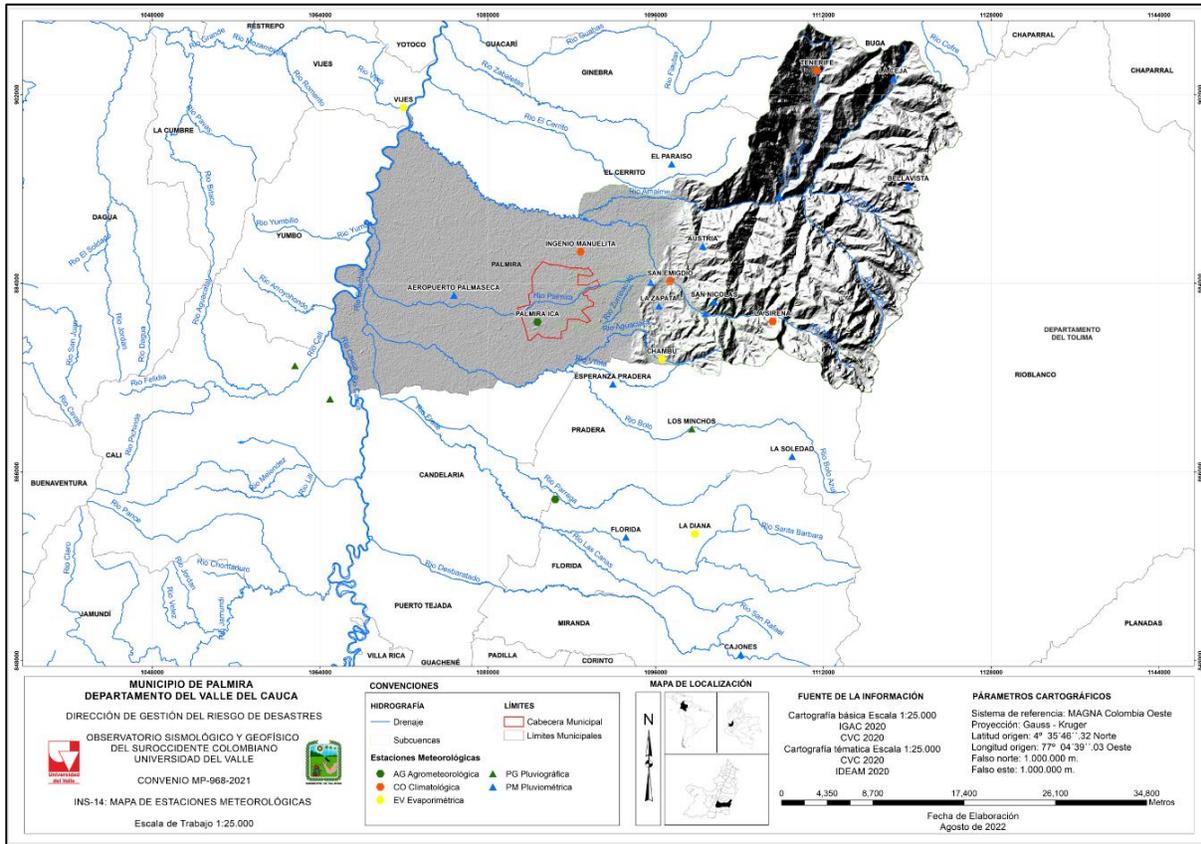


Figura 8. Localización de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza un análisis de la precipitación de las estaciones con información pluviométrica, para lo cual se emplearon los registros mensuales multianuales.

9.1.2 Precipitación

Para la determinación de la precipitación en el municipio de Palmira se construyó una base de datos con la información de la precipitación mensual de 26 estaciones con registros de lluvia operadas por la CVC y el IDEAM, localizadas en la zona de influencia del sector en estudio.

9.1.2.1 Distribución temporal de las precipitaciones

De acuerdo con los datos de precipitación media mensual multianual obtenidos de las estaciones de mayor influencia del sector evaluado, se observa que la distribución temporal de la lluvia para todos los casos presenta dos periodos de alta pluviosidad y dos de baja pluviosidad, con tendencia a un régimen de tipo bimodal; las mayores lluvias se presentan en los periodos marzo-mayo y octubre-noviembre, mientras que los periodos de menor pluviosidad se presentan en los meses de enero a febrero incluyendo diciembre y de junio a septiembre (Anexo 2). En la 0 se

relaciona el resumen promedio de la precipitación total mensual multianual de las estaciones de referencia.

Tabla 5. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total mensual de las estaciones ubicadas en cercanías al sector en estudio.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
AEROPUERTO PALMASECA	48,2	56,1	92,2	130,8	100,0	53,4	32,5	36,7	64,7	105,7	98,5	66,4	857,8
CAJONES	125,1	114,5	146,8	144,3	119,0	67,5	58,8	50,0	69,1	178,1	218,3	146,2	1372,1
CENICAÑA	82,1	87,3	125,3	159,2	109,4	53,8	26,5	33,5	90,3	142,1	142,3	87,1	1066,0
EL PARAISO	109,2	127,0	187,5	187,9	131,2	61,5	36,2	47,1	113,6	227,9	234,4	163,3	1593,9
ESPERANZA PRADERA	95,6	101,2	136,9	172,8	101,9	48,8	28,4	35,6	73,3	143,9	151,7	100,7	1100,8
FLORIDA	103,3	115,3	150,2	203,9	142,5	58,1	43,5	40,0	105,7	205,6	204,6	132,5	1492,7
INGENIO	65,0	72,9	116,4	149,8	110,2	71,3	46,8	45,4	80,3	129,2	126,8	90,2	1036,8
LA ZAPATA	101,0	128,5	166,7	211,8	134,8	69,1	45,5	48,5	113,8	201,3	205,8	144,9	1412,7
PALMIRA ICA	59,9	76,9	110,6	153,4	119,9	57,9	36,7	41,4	75,8	123,9	130,5	90,2	1049,3
SEDE IDEAM CALI	77,2	71,4	108,6	179,1	144,1	81,7	51,1	40,9	80,4	116,8	123,8	105,4	1180,4
TENERIFE	87,1	90,6	122,9	132,4	107,7	55,8	36,2	44,9	73,1	160,2	163,5	127,1	1064,9
AUJI	72,8	78,1	91,0	108,7	81,1	38,8	25,8	25,3	52,3	125,8	127,0	86,0	902,8
AUSTRIA	145,6	156,3	208,0	232,2	175,4	81,8	46,9	71,8	133,3	282,2	271,9	181,1	1908,3
BELLAVISTA	116,7	116,4	163,6	157,4	129,1	67,1	60,2	55,6	70,4	171,6	182,6	134,3	1398,5
CHAMBÚ	114,8	138,5	188,2	202,3	124,1	61,3	42,4	46,0	107,1	210,4	223,0	155,0	1579,7
LA CEJA	83,2	87,2	122,4	122,1	101,2	59,2	52,0	51,6	70,9	139,1	158,0	110,4	1102,0
LA DIANA	123,9	113,4	149,2	167,5	112,1	41,3	29,9	31,8	81,5	194,8	213,7	138,3	1388,3
LA SIRENA	106,8	107,8	123,2	123,9	105,2	78,2	63,1	45,0	64,7	177,6	199,4	130,6	1293,4
LA SOLEDAD	173,4	168,2	219,9	194,1	156,3	73,9	53,4	41,1	98,2	266,6	302,8	208,9	1902,7
LOS MINCHOS	108,3	112,0	143,3	140,1	111,7	55,3	27,4	29,7	58,4	178,8	196,4	118,2	1268,6
PLANTA NIMA 1	92,8	117,2	166,2	211,4	151,8	66,9	49,0	57,3	109,6	213,6	190,9	128,0	1506,2
PLANTA RIO CAUCA	59,2	72,1	107,4	149,3	123,7	69,5	40,4	47,7	65,4	115,4	101,7	86,9	992,0
SAN EMIGDIO	97,7	130,2	166,6	211,8	149,2	71,8	42,2	61,4	119,9	232,8	213,5	143,7	1586,8
SAN NICOLAS	162,3	178,3	209,3	207,4	161,3	67,6	52,8	56,0	112,5	276,2	290,2	200,7	1865,7
TENJO	153,5	171,2	210,4	225,4	160,2	58,1	40,4	43,8	123,5	271,4	279,6	183,2	1872,6
VIJES	42,9	57,2	92,9	129,5	94,8	59,1	38,3	38,8	71,7	124,7	98,3	63,9	891,1

Fuente: elaboración propia

En la zona de influencia del sector en estudio se destacan julio y agosto como los meses más secos registrados en todas las estaciones, siendo el valor más bajo el de la estación Auji con 25,3 en el mes de agosto. Por su parte, los meses más lluviosos para la mayoría de las estaciones corresponde a octubre y noviembre, siendo el registro más alto el tomado por la estación La Soledad con 302,8 mm en el mes de noviembre. En la Figura 9 se observa la distribución temporal de la precipitación en el área de estudio.

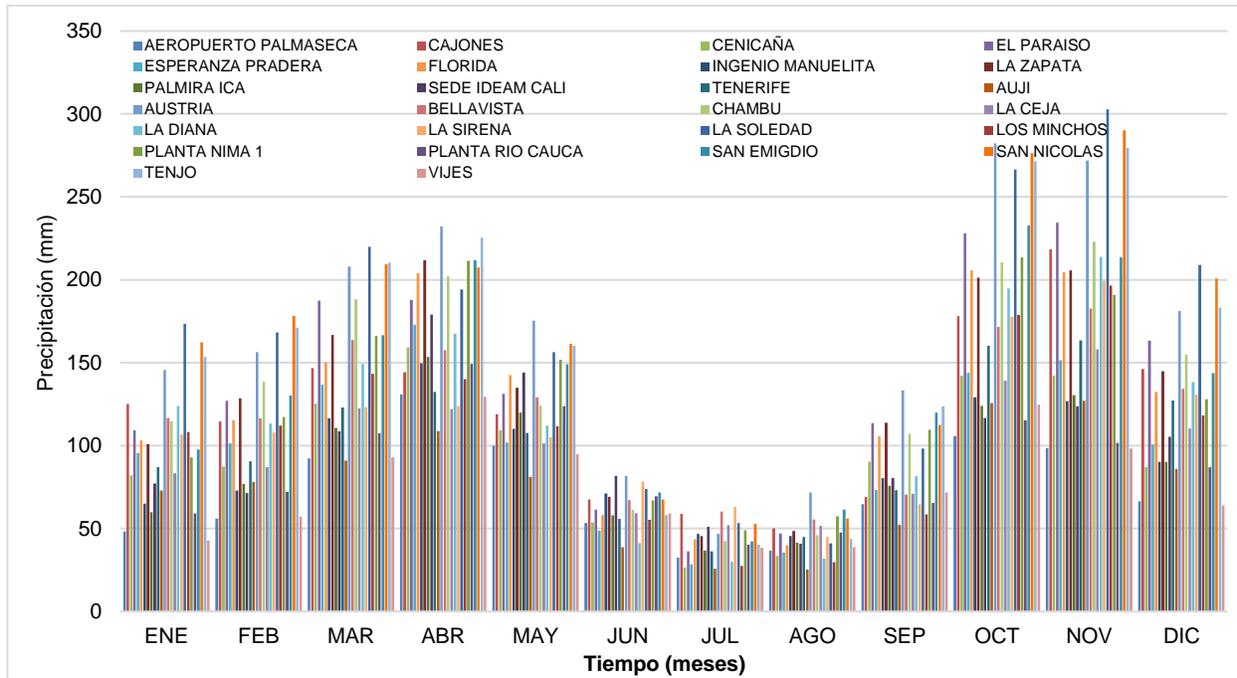


Figura 9. Distribución temporal de la precipitación estaciones de referencia
Fuente: elaboración propia

9.1.2.2 Distribución espacial de la precipitación

Para conocer la distribución espacial de las precipitaciones de las unidades hidrográficas asociadas al área de estudio en el municipio de Palmira Valle del Cauca se empleó el método de curvas isoyetas, que consiste en trazar curvas de igual precipitación para un periodo elegido.

Las isolíneas de igual precipitación calculadas mediante la herramienta del programa QGIS de interpolación de superficie ráster IDW (distancia inversa ponderada) muestran que el promedio de lluvias anual sobre la zona de estudio oscila entre 1163 mm a 1850 mm (ver Figura 10). Así mismo, es posible evidenciar cómo la distribución presenta las mayores precipitaciones en el flanco occidental de la cordillera Central y las menores hacia los sectores próximos al río Cauca.

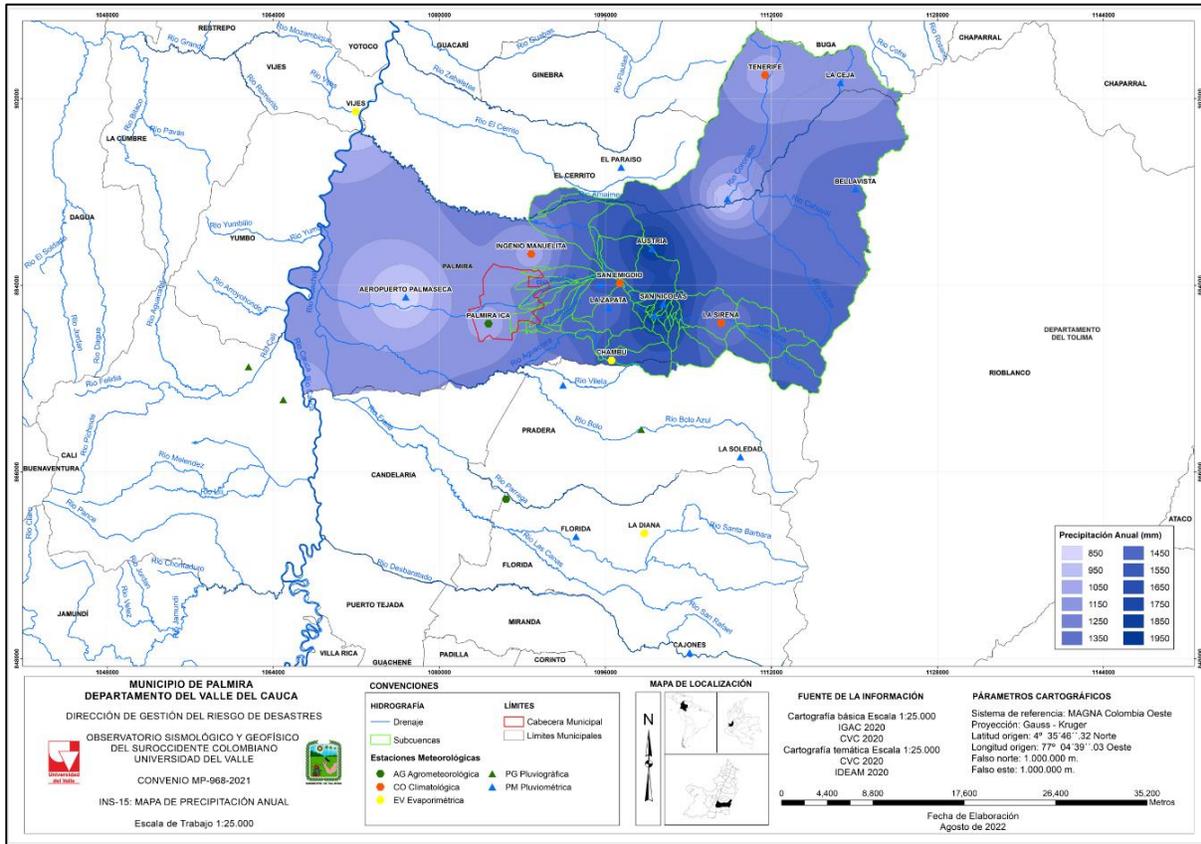


Figura 10. Distribución espacial de la precipitación anual multianual.
 Fuente: elaboración propia

9.1.2.3 Número de Días con Lluvia

El número de días con lluvia es un parámetro climatológico de gran importancia para la planificación de proyectos pues de este dependen los diseños de los sistemas de drenaje relacionados directamente con las frecuencias, tiempos, periodos o meses de adecuación y construcción de los mismos, principalmente cuando se trata de obras con intervención de fuentes hídricas para asociarse con los periodos de niveles mínimos de flujo y días sin lluvia anuales. En la Tabla 6 y en la Figura 11 se presenta el número de días con lluvia en las estaciones de referencia.

Tabla 6. Número de días con lluvia en las estaciones con influencia en el sector en estudio

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
AEROPUERTO PALMASECA	10	10	13	16	16	11	9	8	11	17	15	12	142
CAJONES	11	11	14	16	17	15	15	12	11	18	18	14	164
CENICAÑA	10	10	14	16	14	10	7	7	11	16	16	11	131
EL PARAISO	8	9	11	12	10	6	4	5	7	13	13	11	107
ESPERANZA PRADERA	6	5	8	9	7	4	3	4	5	9	8	6	65
FLORIDA	9	9	11	13	12	8	6	6	9	14	14	11	121
INGENIO MANUELITA	9	10	13	16	15	11	9	9	11	17	16	12	139
LA ZAPATA	7	8	10	12	10	7	5	5	8	12	12	9	91
PALMIRA ICA	9	10	14	16	16	11	8	8	11	16	16	12	143
SEDE IDEAM CALI	10	11	15	17	15	11	8	8	11	16	16	12	152

Tabla 6. Número de días con lluvia en las estaciones con influencia en el sector en estudio

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TENERIFE	13	14	18	20	19	15	14	12	14	20	22	18	175
AUJI	7	8	10	11	10	7	5	5	7	13	14	10	103
AUSTRIA	10	10	12	14	14	9	7	7	10	15	16	12	129
BELLAVISTA	11	11	14	15	15	11	10	9	9	16	17	14	148
CHAMBÚ	9	10	13	15	14	9	7	8	10	16	16	12	135
LA CEJA	10	11	15	15	16	14	12	11	11	16	19	14	154
LA DIANA	10	10	12	14	13	8	7	7	9	15	16	12	132
LA SIRENA	12	12	16	17	17	16	15	13	11	17	19	15	176
LA SOLEDAD	11	12	15	17	17	13	10	9	11	19	20	15	165
LOS MINCHOS	10	10	14	15	14	11	8	7	10	16	17	12	141
PLANTA NIMA 1	8	9	11	13	12	7	6	6	8	13	13	10	112
PLANTA RIO CAUCA	8	8	10	14	12	8	6	6	8	13	11	9	107
SAN EMIGDIO	9	10	12	15	13	9	7	7	10	15	15	12	128
SAN NICOLAS	10	11	13	15	15	10	8	7	11	17	17	13	138
TENJO	9	9	12	13	12	7	6	6	9	14	14	11	118
VIJES	6	6	9	12	11	7	5	5	7	13	12	8	99

Fuente: elaboración propia

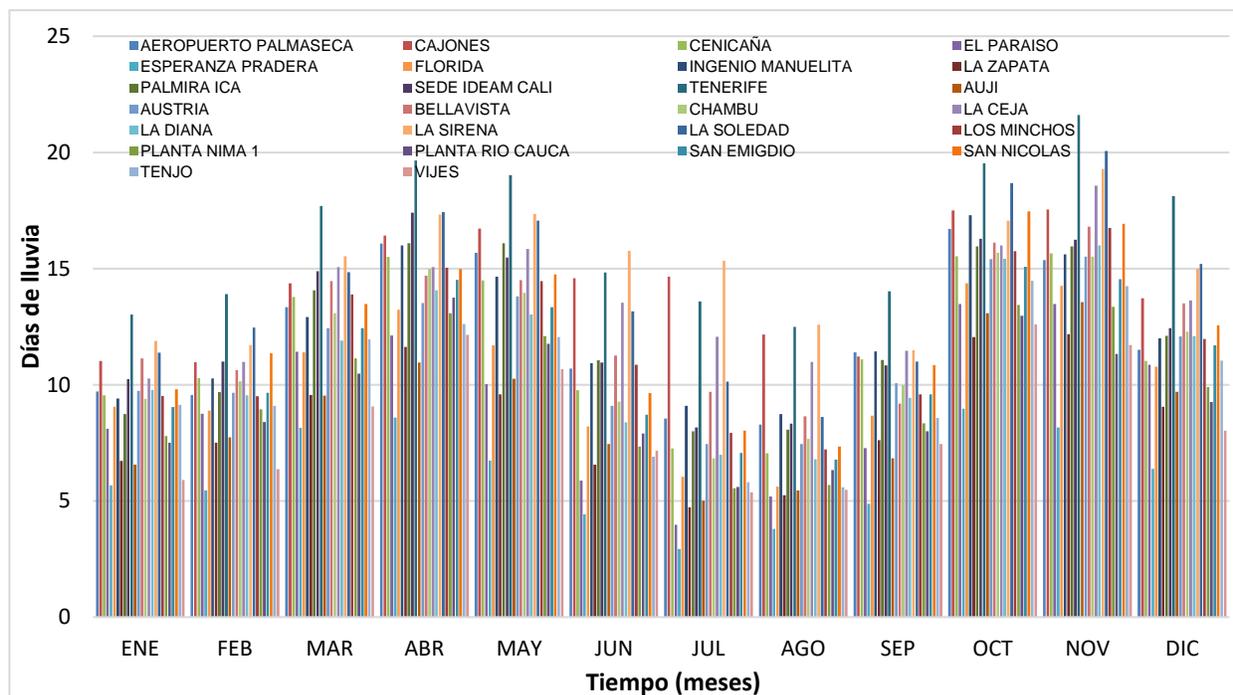


Figura 11. Distribución temporal de número de días con lluvia. Valores medios mensuales multianuales de días de lluvia en las estaciones de referencia.

Fuente: elaboración propia

Las estaciones aledañas al tramo de estudio presentan valores promedio mensual de número de días con lluvia que varían entre 8 y 15, donde los mayores valores se observan en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, mientras los registros más bajos se encuentran en los periodos enero-febrero, julio-agosto para la mayoría de las estaciones. La estación Esperanza Pradera presenta el menor valor de días con lluvia (3 días para julio), mientras que la estación Tenerife exhibe el valor más alto, siendo noviembre el mes con mayor número de días (22) con lluvia.

9.1.2.4 Polígonos de Thiessen

La metodología de los polígonos de Thiessen es empleada, en este caso, para conocer el área de influencia y peso que tiene cada una de las estaciones identificadas (ver Figura 12 y Tabla 7) sobre la zona de estudio.

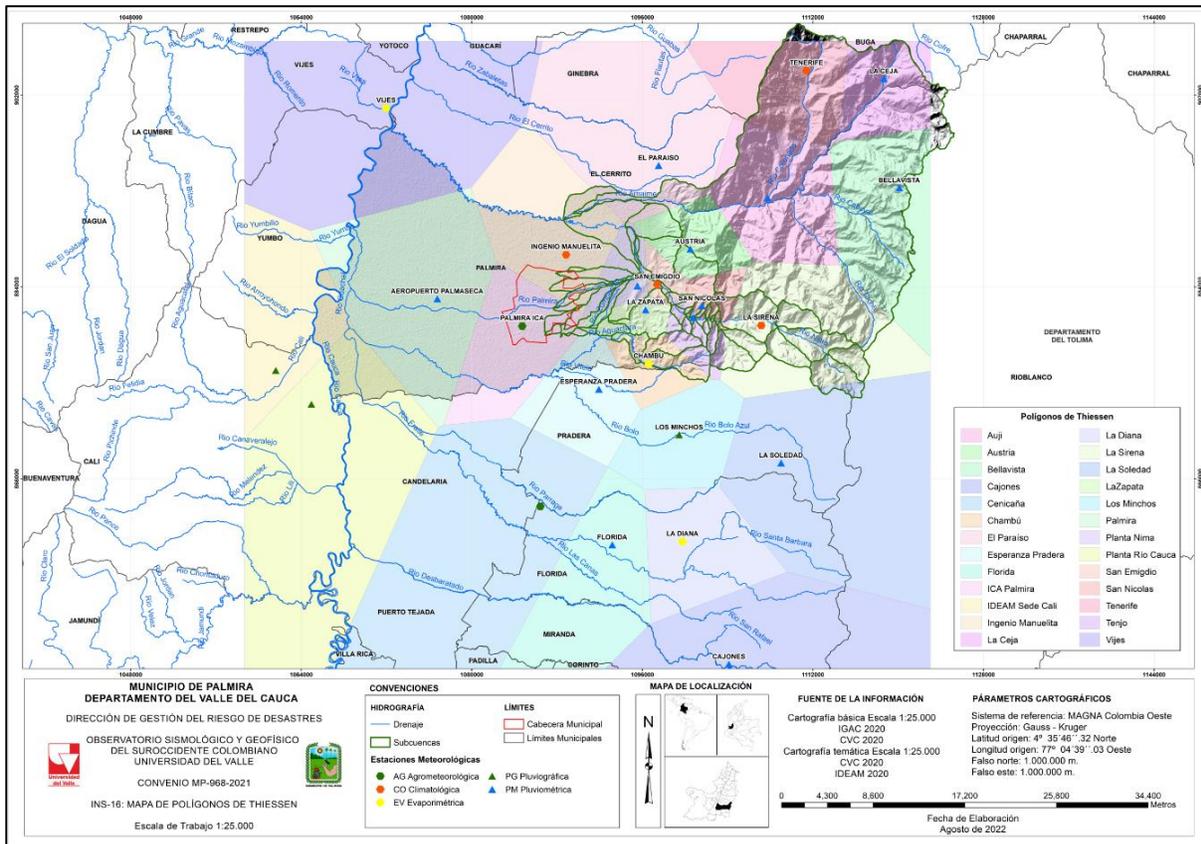


Figura 12. Área de influencia de las estaciones pluviométricas, respecto a la zona de estudio. Polígonos de Thiessen

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
A01	Auji	11750,95	25,3
	Austria	3035,48	6,5
	Bellavista	10794,73	23,2
	El Paraíso	1166,56	2,5
	Ingenio Manuelita	145,42	0,3
	La Ceja	6289,13	13,5
	La Sirena	5904,71	12,7
	San Nicolas	603,17	1,3
A02	Tenerife	6824,83	14,7
	El Paraíso	141,57	23,7
N01	Ingenio Manuelita	455,09	76,3
	La Sirena	675,87	99,9
N02	La Soledad	0,81	0,1
	La Sirena	920,25	72,9
	La Soledad	341,43	27,1

Tabla 7. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
N03	La Sirena	1235,77	100,0
N04	La Sirena	802,66	100,0
N05	La Sirena	805,74	100,0
N06	La Sirena	1508,39	78,2
	San Nicolas	421,10	21,8
N07	San Nicolas	54,57	100,0
N08	San Nicolas	15,14	6,6
	Tenjo	214,17	93,4
N09	San Nicolas	17,74	100,0
N10	San Nicolas	92,66	100,0
N11	San Nicolas	10,70	32,4
	Tenjo	22,29	67,6
N12	Tenjo	61,41	100,0
N13	San Nicolas	56,27	98,8
	Tenjo	0,67	1,2
N14	San Nicolas	9,62	13,2
	Tenjo	63,11	86,8
N15	Tenjo	194,43	100,0
N16	San Nicolas	75,99	80,5
	Tenjo	18,40	19,5
N17	Tenjo	30,83	100,0
N18	San Nicolas	113,72	76,5
	Tenjo	34,88	23,5
N19	Tenjo	105,08	100,0
N20	Tenjo	25,17	100,0
N21	San Nicolas	1,14	3,6
	Tenjo	30,17	96,4
N22	San Nicolas	88,79	61,4
	Tenjo	55,78	38,6
N23	Tenjo	151,43	100,0
N24	San Emigdio	96,11	55,6
	San Nicolas	40,04	23,2
	Tenjo	36,66	21,2
N25	San Emigdio	68,81	100,0
N26	Austria	797,47	47,7
	San Emigdio	356,49	21,3
	San Nicolas	516,39	30,9
N27	Planta Nima	0,37	1,0
	San Emigdio	35,59	99,0
N28	Planta Nima	134,81	83,0
	San Emigdio	27,62	17,0
N29	Austria	508,04	42,6
	Planta Nima	172,35	14,5
	San Emigdio	510,93	42,9
N30	Planta Nima	117,27	100,0
N31	Austria	806,82	67,6
	El Paraíso	313,68	26,3
	Planta Nima	73,16	6,1
N32	El Paraíso	466,25	22,2
	Ingenio Manuelita	1234,46	58,7
	Planta Nima	401,87	19,1
QAC1	La Sirena	648,28	68,1
	San Nicolas	1,03	0,1
	Tenjo	302,97	31,8
QAC2	La Sirena	565,55	97,8
	San Nicolas	10,60	1,8
	Tenjo	2,15	0,4
QAC3	La Sirena	1,76	4,4
	San Nicolas	33,50	84,2
	Tenjo	4,53	11,4
QH1	Chambú	15,30	1,0
	La Zapata	1192,34	76,9
	San Emigdio	162,82	10,5
	Tenjo	180,09	11,6
QH2	La Zapata	328,15	35,2

Tabla 7. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
	Planta Nima	497,88	53,4
	San Emigdio	105,86	11,4
QH3	La Zapata	331,19	100,0
RAC1	Chambú	869,77	67,5
	Tenjo	419,16	32,5
RAC2	Chambú	418,40	50,5
	La Zapata	16,09	1,9
RAC3	Tenjo	393,88	47,5
	Chambú	319,22	69,5
	La Zapata	140,36	30,5
RP1	ICA Palmira	39,83	9,3
	Ingenio Manuelita	221,97	52,0
	Planta Nima	164,58	38,5
	San Emigdio	0,82	0,2
ZN1	Ingenio Manuelita	50,91	100,0
ZN2	Ingenio Manuelita	277,17	48,0
	Planta Nima	300,78	52,0
ZN3	Ingenio Manuelita	361,11	88,6
	Planta Nima	46,44	11,4
ZS1	ICA Palmira	68,82	25,1
	Ingenio Manuelita	176,29	64,4
	Planta Nima	28,56	10,4
ZS2	ICA Palmira	173,45	29,9
	Ingenio Manuelita	42,86	7,4
	La Zapata	6,59	1,1
ZS3	Planta Nima	356,41	61,5
	ICA Palmira	85,05	100,0
ZS4	ICA Palmira	46,42	15,6
	La Zapata	109,73	36,8
	Planta Nima	142,09	47,6
ZS5	La Zapata	132,57	44,8
	Planta Nima	163,32	55,2
ZS6	Esperanza Pradera	20,83	33,5
	ICA Palmira	10,42	16,7
	La Zapata	30,99	49,8
ZS7	ICA Palmira	257,80	94,6
	Ingenio Manuelita	14,84	5,4
ZS8	ICA Palmira	86,75	100,0
ZS9	Esperanza Pradera	25,33	30,8
	ICA Palmira	56,87	69,2

Fuente: elaboración propia

9.1.3 Análisis de frecuencias y periodos de retorno de la precipitación

Se realizó un análisis de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de las precipitaciones máximas con su frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Anexo 3). Con base en las series de precipitaciones máximas anuales se calcularon las precipitaciones máximas para periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años, aplicando un análisis de frecuencia, empleando como factor las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson y Log Normal para cada una de las estaciones (ver desde la Figura 13 hasta la Figura 29).

Como verificación de ajuste de las distribuciones de probabilidad al conjunto de las series históricas de las 17 estaciones con registros de lluvia operadas por la CVC y el IDEAM con influencia en el área de estudio y que fueron seleccionadas mediante los polígonos de Thiessen, (ver desde la Tabla 8 hasta la Tabla 24) se empleó la prueba de bondad de Chi cuadrado.

En la Figura 13 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación El Paraíso. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 8).

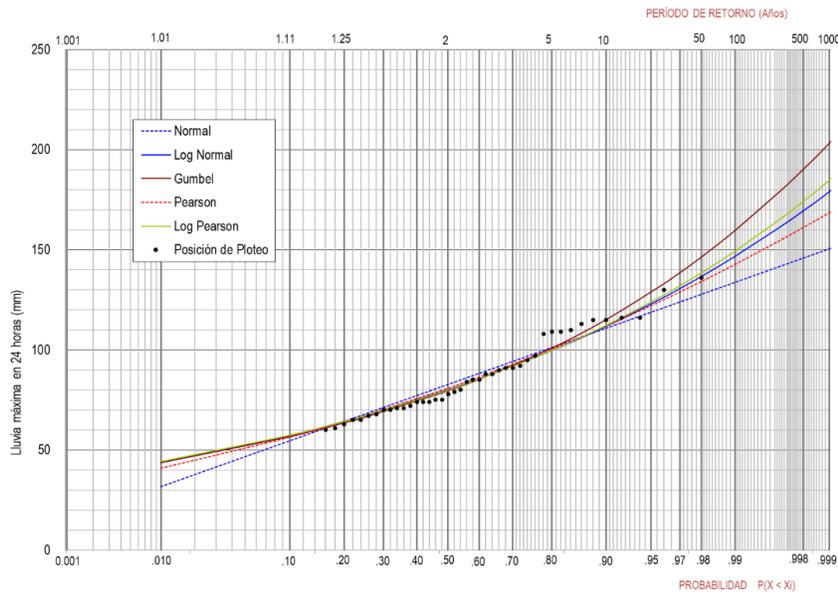


Figura 13. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación El Paraíso.
Periodo: 1973 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno.
Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2,33	86,7	83,4	84,7	83,6	83,8
5	101,2	100,8	100,4	99,7	99,6
10	110,9	115,0	111,8	112,2	111,7
25	121,2	132,9	125,0	127,4	126,2
50	127,8	146,2	134,1	138,4	136,6
100	133,8	159,4	142,6	149,3	146,6
300	142,2	180,2	155,3	166,2	162,1
500	145,9	189,9	161,0	174,1	169,2
chi 2	11,77	4,70	5,32	5,02	5,26

Fuente: elaboración propia

En la Figura 14 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Esperanza Pradera. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 9).

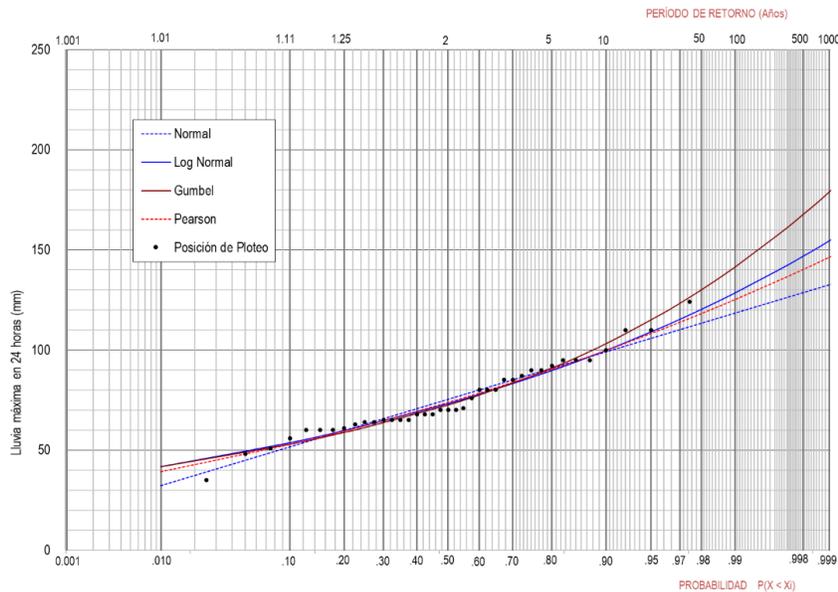


Figura 14. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Esperanza Paradera. Periodo: 1981 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Esperanza Pradera. Periodo: 1981 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	78,7	76,0	77,2	76,5
5	91,0	90,9	90,3	89,8
10	99,1	103,1	99,9	99,8
25	107,8	118,5	110,8	111,8
50	113,4	129,9	118,2	120,3
100	118,4	141,3	125,2	128,5
300	125,6	159,2	135,6	141,1
500	128,6	167,5	140,2	146,8
chi 2	7,64	5,56	5,84	5,90

Fuente: elaboración propia

En la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Ingenio Manuelita. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 10).

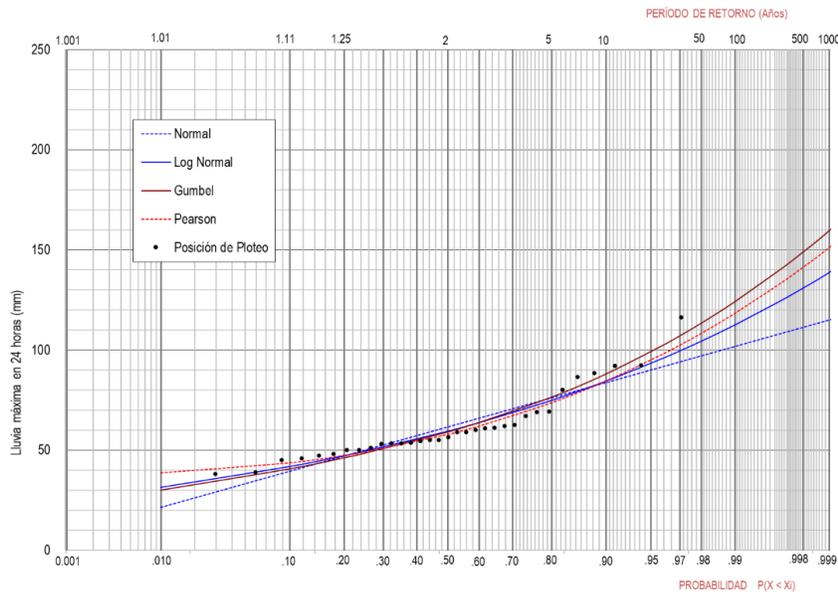


Figura 15. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	64,7	62,3	60,7	62,4
5	76,2	76,4	73,7	74,8
10	83,8	87,9	84,5	84,4
25	91,8	102,5	98,2	96,0
50	97,1	113,3	108,3	104,3
100	101,8	124,0	118,2	112,4
300	108,4	140,9	133,9	125,0
500	111,3	148,8	141,2	130,8
chi 2	19,69	7,85	5,96	8,84

Fuente: elaboración propia

En la Figura 16 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Zapata. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Normal (ver resultados en la Tabla 11).

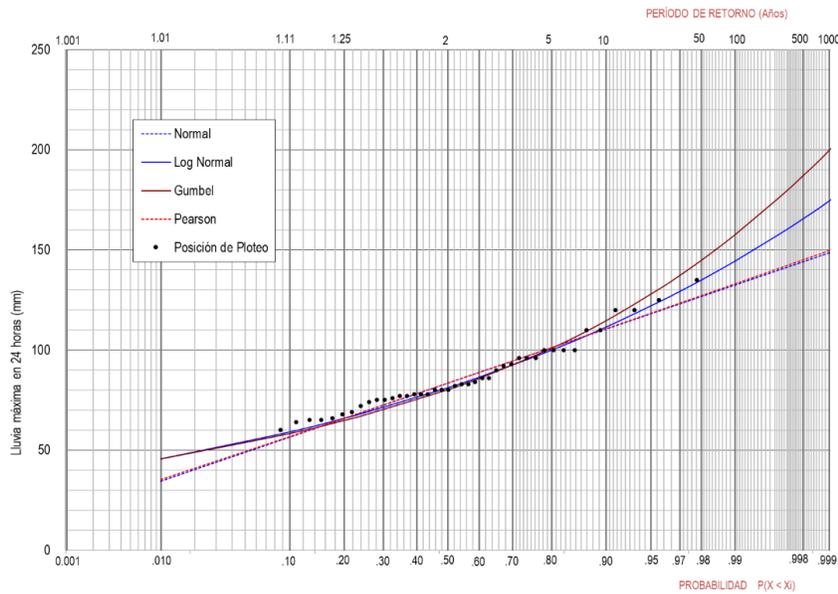


Figura 16. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.

Fuente: elaboración propia

Tabla 11. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	87,3	84,2	87,2	84,7
5	101,3	101,0	101,2	99,8
10	110,5	114,7	110,6	111,3
25	120,4	132,0	120,6	125,0
50	126,7	144,8	127,2	134,8
100	132,5	157,5	133,1	144,2
300	140,6	177,7	141,4	158,7
500	144,1	187,0	145,0	165,3
chi 2	12,46	19,25	12,56	17,36

Fuente: elaboración propia

En la Figura 17 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Palmira ICA. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 12).

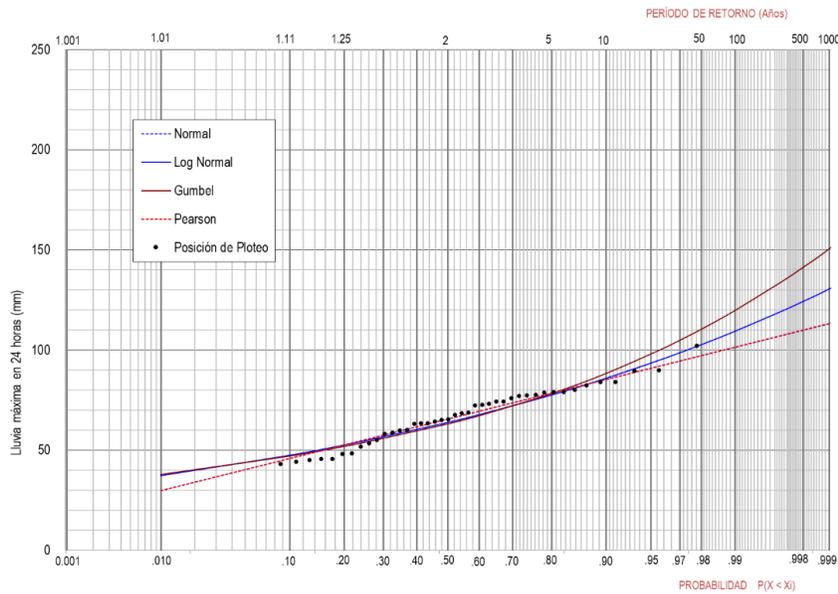


Figura 17. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	68,3	66,0	68,3	66,5
5	78,5	78,3	78,5	77,6
10	85,3	88,3	85,3	85,9
25	92,5	101,0	92,5	95,7
50	97,1	110,3	97,2	102,7
100	101,3	119,7	101,4	109,3
300	107,3	134,4	107,4	119,6
500	109,8	141,2	109,9	124,2
chi 2	4,22	9,21	4,22	6,99

Fuente: elaboración propia

En la Figura 18 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Tenerife. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 13).

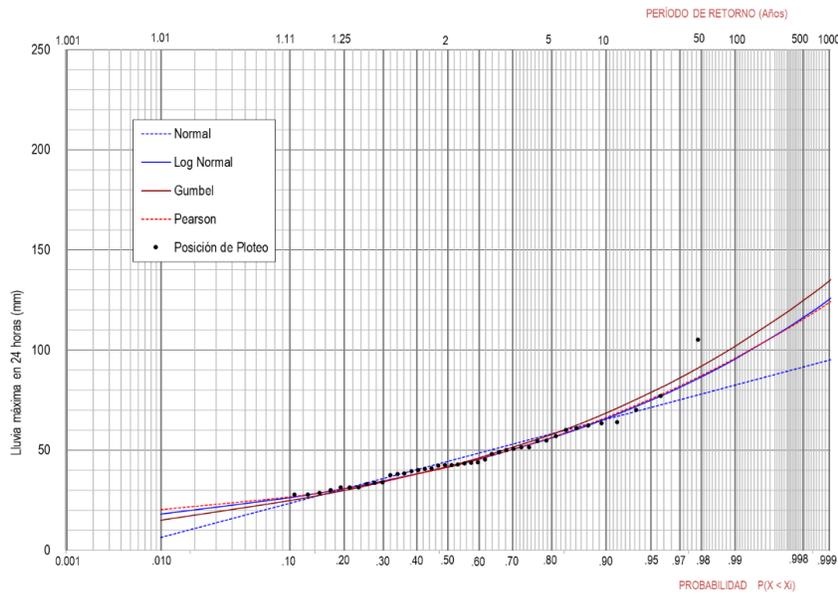


Figura 18. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenerife.
Periodo: 1973 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 13. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno.
Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	47,3	44,9	44,1	44,4
5	58,2	57,9	56,4	56,3
10	65,4	68,5	66,2	65,8
25	73,0	82,0	78,3	77,8
50	78,0	91,9	87,2	86,6
100	82,4	101,8	95,8	95,5
300	88,7	117,4	109,1	109,6
500	91,4	124,7	115,3	116,2
chi 2	18,65	8,73	11,02	9,82

Fuente: elaboración propia

En la Figura 19 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Auji. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 14).

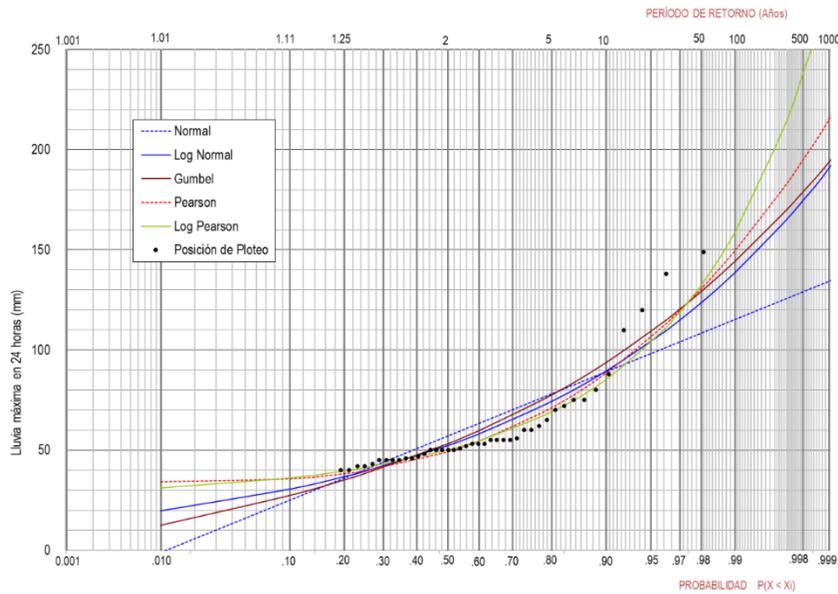


Figura 19. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	61,5	57,7	52,7	53,1	56,3
5	78,1	77,5	71,2	69,1	74,3
10	89,1	93,6	88,5	85,2	89,4
25	100,8	114,0	112,1	110,1	108,8
50	108,4	129,1	130,6	132,4	123,5
100	115,2	144,1	149,4	158,5	138,5
300	124,8	167,8	180,2	209,4	162,8
500	129,0	178,8	194,9	237,8	174,5
chi 2	237,71	77,05	23,08	20,60	46,11

Fuente: elaboración propia

En la Figura 20 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Austria. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 15).

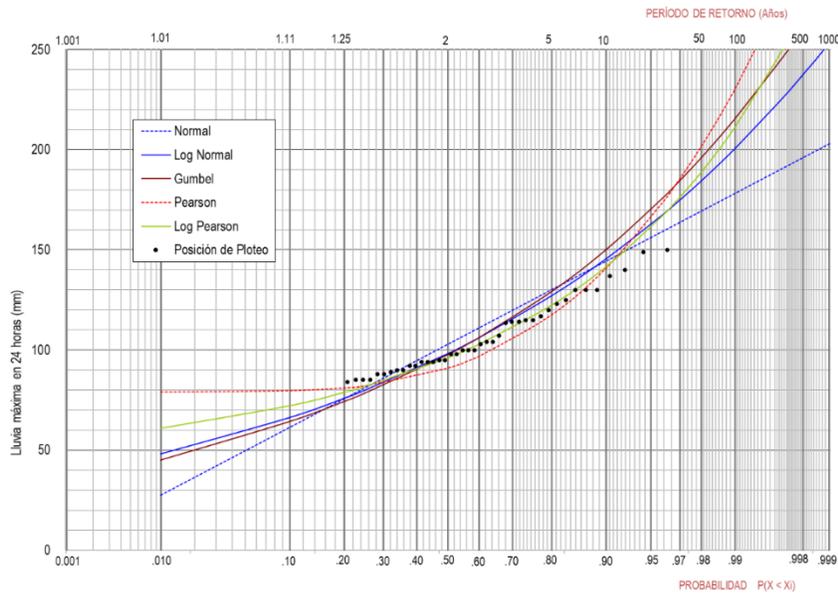


Figura 20. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 15. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	108,7	103,7	94,9	100,8	103,7
5	130,1	129,3	117,5	122,4	127,1
10	144,4	150,2	140,8	141,5	145,5
25	159,5	176,5	174,3	167,6	168,0
50	169,3	196,1	201,5	188,7	184,4
100	178,1	215,5	229,9	211,0	200,5
300	190,6	246,1	277,4	249,9	225,7
500	196,0	260,3	300,4	269,6	237,4
chi 2	102,58	57,50	58,94	43,28	55,87

Fuente: elaboración propia

En la Figura 21 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Bellavista. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 16).

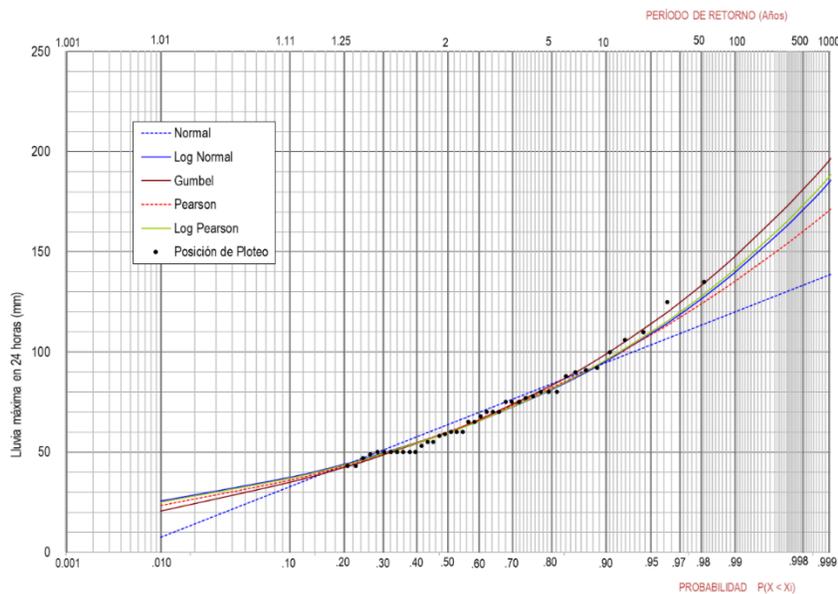


Figura 21. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	2,33	68,1	64,4	64,5	63,7
5	5	84,1	83,5	82,2	81,5
10	10	94,7	99,0	96,0	96,0
25	25	106,0	118,7	112,4	114,2
50	50	113,3	133,3	124,1	127,8
100	100	119,9	147,7	135,3	141,4
300	300	129,2	170,6	152,5	163,1
500	500	133,2	181,2	160,2	173,3
chi 2	chi 2	32,88	3,18	4,76	4,06

Fuente: elaboración propia

En la Figura 22 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Chambú. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 17).

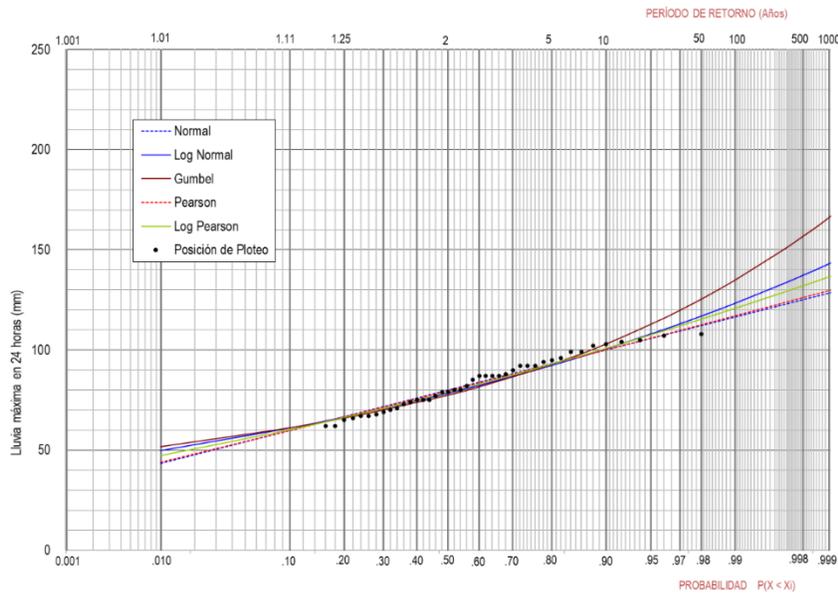


Figura 22. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Chambú.
Periodo: 1973 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 17. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno.
Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	82,6	80,2	82,5	81,8	81,1
5	93,0	92,7	93,0	92,9	92,3
10	100,0	102,9	100,1	100,8	100,5
25	107,3	115,7	107,7	109,5	110,2
50	112,1	125,3	112,6	115,4	116,9
100	116,4	134,7	117,1	120,8	123,2
300	122,4	149,7	123,5	128,6	132,9
500	125,0	156,6	126,2	132,0	137,2
chi 2	2,90	6,86	2,81	2,76	4,08

Fuente: elaboración propia

En la Figura 23 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Ceja. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 18).

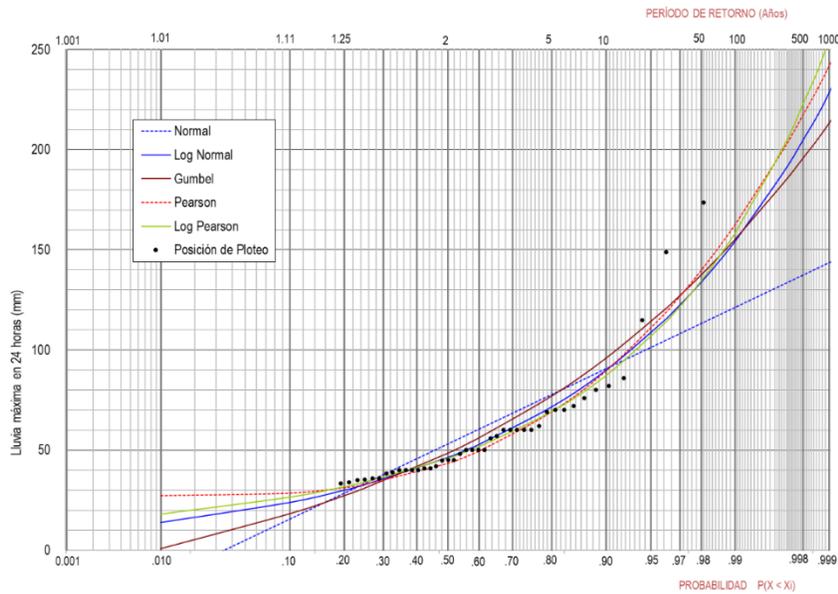


Figura 23. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	58,3	53,8	47,7	50,1	51,0
5	77,7	77,0	69,1	69,4	71,7
10	90,6	95,9	89,6	87,3	89,9
25	104,3	119,8	117,7	113,0	114,5
50	113,2	137,5	139,7	134,5	133,9
100	121,1	155,0	162,4	158,1	154,0
300	132,4	182,8	199,5	200,5	188,0
500	137,3	195,6	217,2	222,6	204,6
chi 2	383,11	112,29	32,42	29,15	35,43

Fuente: elaboración propia

En la Figura 24 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Sirena. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 19).

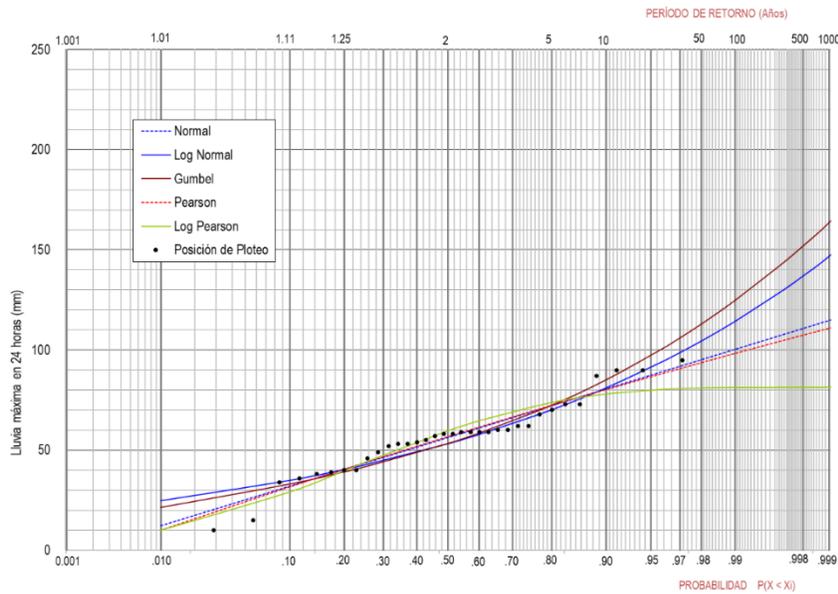


Figura 24. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Sirena. Período: 1988 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación La Sirena. Período: 1988 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	59,6	56,9	60,1	63,3	56,5
5	72,2	72,4	72,3	73,8	70,3
10	80,6	85,1	80,2	78,0	81,2
25	89,4	101,0	88,4	80,4	94,7
50	95,2	112,9	93,6	81,1	104,5
100	100,4	124,6	98,2	81,3	114,3
300	107,7	143,2	104,7	81,3	129,8
500	110,8	151,8	107,4	81,4	137,0
chi 2	16,93	27,47	15,89	22,02	28,83

Fuente: elaboración propia

En la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Soledad. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal (ver resultados en la Tabla 20).

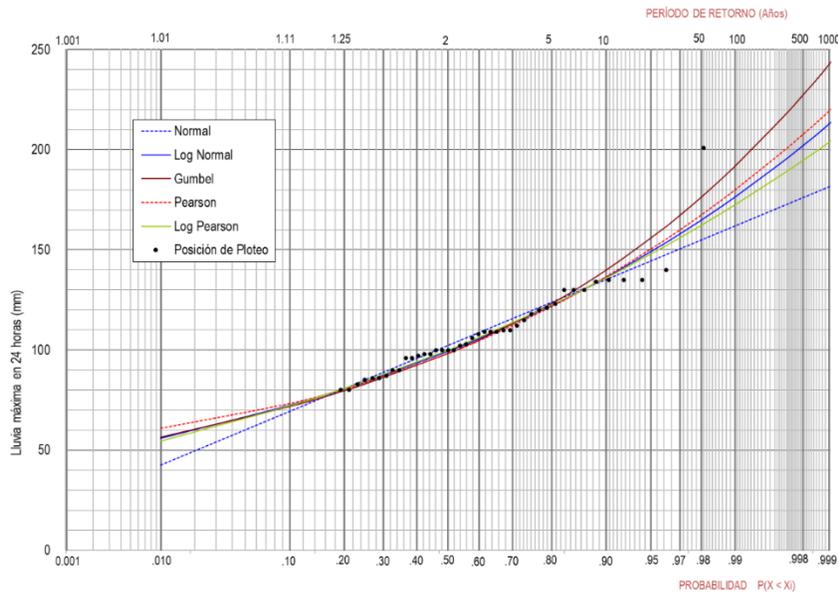


Figura 25. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	106,9	103,0	102,7	104,4	103,8
5	123,9	123,3	121,7	122,5	122,2
10	135,2	139,9	136,6	135,9	136,2
25	147,3	160,8	154,6	151,4	152,9
50	155,0	176,3	167,4	162,2	164,8
100	162,0	191,7	179,8	172,4	176,3
300	171,9	216,0	198,9	187,7	193,9
500	176,2	227,3	207,6	194,6	201,9
chi 2	18,26	13,62	15,34	13,90	13,57

Fuente: elaboración propia

En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Planta Nima. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 21).

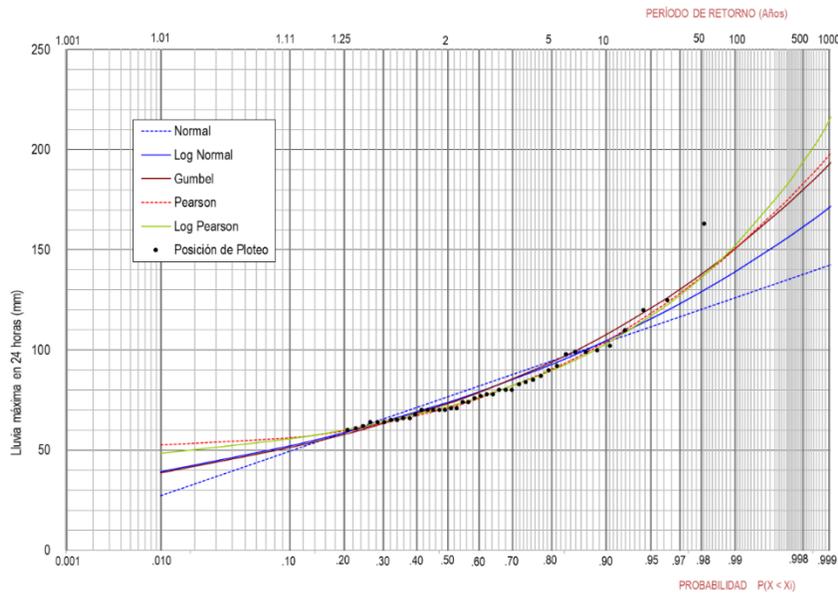


Figura 26. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	80,4	77,1	74,3	75,0	77,5
5	94,5	93,9	90,3	89,8	92,8
10	103,8	107,6	104,3	103,1	104,6
25	113,8	124,9	122,6	121,4	118,8
50	120,2	137,7	136,4	136,2	129,0
100	126,0	150,5	150,3	152,0	139,0
300	134,2	170,5	172,6	179,7	154,4
500	137,7	179,9	183,0	193,9	161,4
chi 2	42,09	12,37	6,83	6,21	15,20

Fuente: elaboración propia

En la Figura 27 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación San Emigdio. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 22).

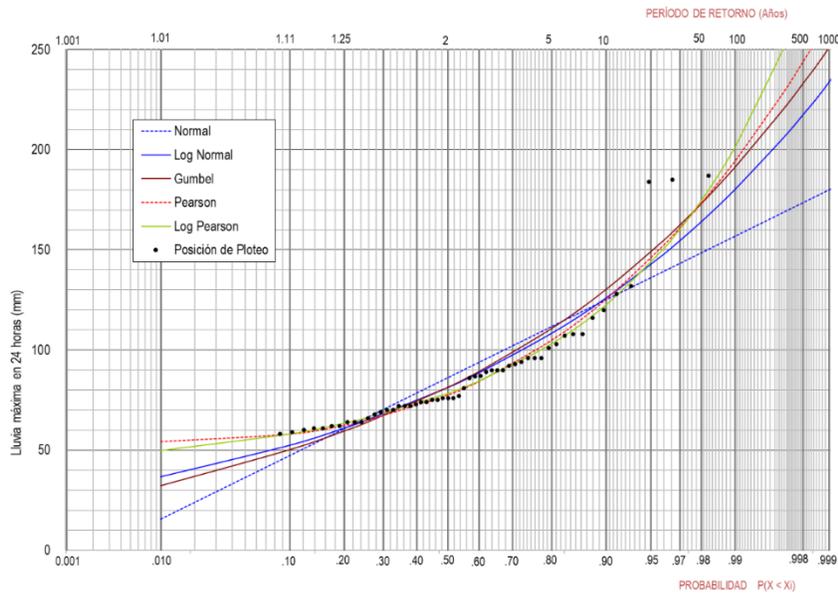


Figura 27. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	91,6	86,8	82,2	82,7	86,4
5	111,7	110,7	104,9	103,2	108,3
10	125,0	130,2	125,3	122,6	125,9
25	139,3	154,7	152,4	150,7	147,8
50	148,4	173,0	173,1	174,5	164,0
100	156,7	191,1	194,0	201,0	180,0
300	168,4	219,6	227,8	249,6	205,5
500	173,5	232,9	243,7	275,3	217,4
chi 2	134,64	47,86	21,11	20,39	40,77

Fuente: elaboración propia

En la Figura 28 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación San Nicolás. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal (ver resultados en la Tabla 23).

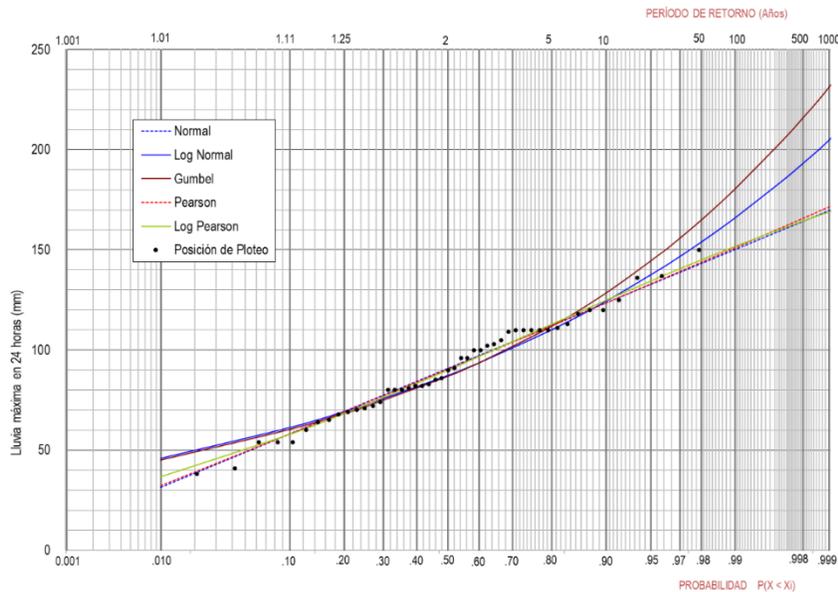


Figura 28. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Nicolas.
Periodo: 1970 – 2020.

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno.
Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	95,3	91,4	95,1	94,8	91,8
5	112,2	111,8	112,1	112,9	110,2
10	123,4	128,3	123,6	124,9	124,4
25	135,4	149,2	135,8	137,3	141,6
50	143,1	164,8	143,8	145,1	153,9
100	150,1	180,2	151,1	151,8	165,9
300	159,9	204,5	161,4	160,8	184,6
500	164,1	215,8	165,8	164,5	193,2
chi 2	4,57	15,42	4,63	4,73	14,16

Fuente: elaboración propia

En la Figura 29 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Tenjo. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 24).

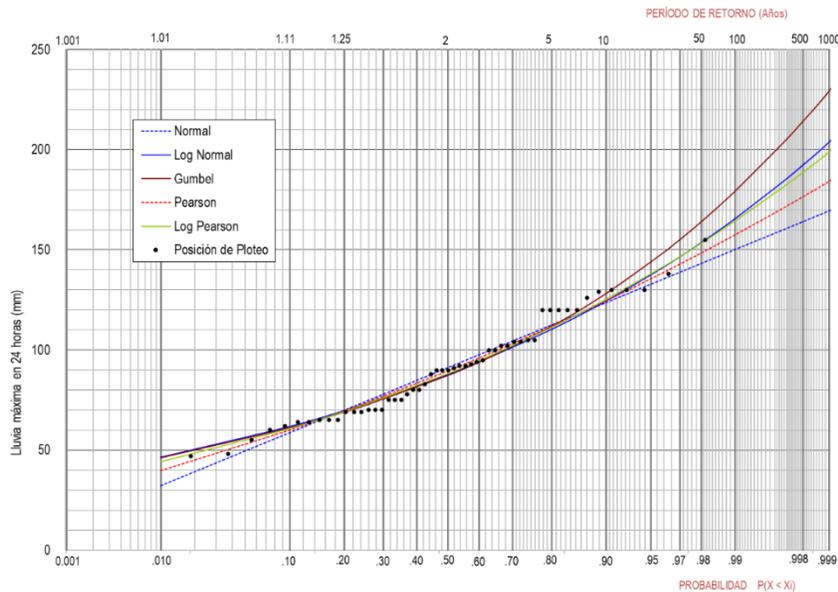


Figura 29. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes periodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	95,7	91,8	94,0	92,8	92,2
5	112,5	111,8	111,8	111,4	110,5
10	123,6	128,1	124,5	125,4	124,6
25	135,5	148,7	138,8	141,8	141,6
50	143,2	164,0	148,4	153,4	153,7
100	150,1	179,2	157,4	164,4	165,6
300	159,8	203,1	170,7	181,2	184,0
500	164,0	214,2	176,5	188,8	192,4
chi 2	12,18	8,64	7,25	6,78	8,43

Fuente: elaboración propia

9.1.4 Hietogramas de diseño

Para definir la lluvia de diseño se recurre a las Curvas IDF de las estaciones El Paraíso, Esperanza Pradera, Ingenio Manuelita, La Zapata, ICA Palmira, Tenerife, Auji, Austria, Bellavista, Chambú, La Ceja, La Sirena, La Soledad, Planta Nima, San Emigdio, San Nicolas y Tenjo con influencia en el área de estudio (Anexo 4).

Dichas curvas IDF fueron obtenidas mediante la metodología de “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia” (Díaz-Granados, 2011), esto con el objetivo de determinar o generar los hietogramas de diseño, empleando el método de bloque alterno (Chow, 1994), la cual se basa en la intensidad de la precipitación para diferentes tiempos de duración. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones, para el caso de estudio se supone una lluvia de 180 minutos

de duración, de acuerdo con lo indicado en el manual de drenajes para carreteras (Ministerio de Transporte- Instituto Nacional de Vías, 2009), a una intensidad asociada a tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200 300, 400 y 500 años (ver desde la Figura 30 hasta la Figura 63 y desde Tabla 25 hasta la Tabla 41).

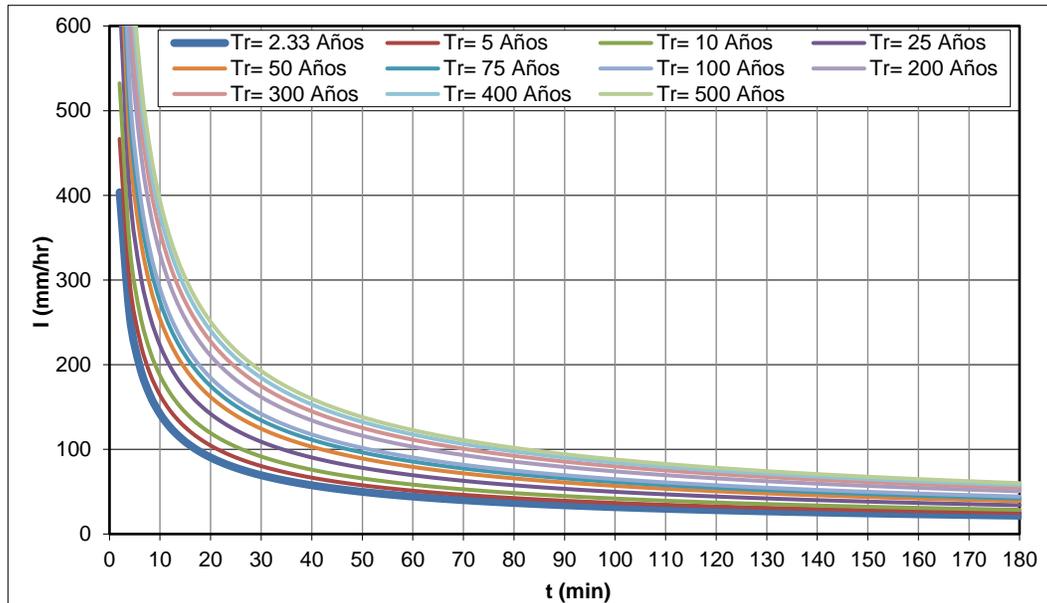


Figura 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación El Paraíso
Fuente: elaboración propia

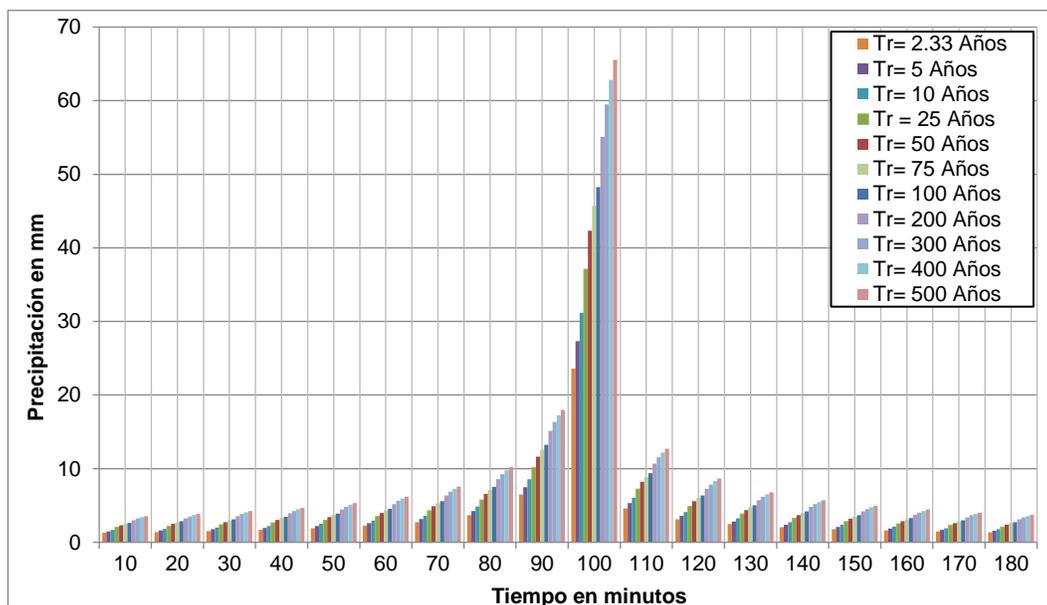


Figura 31. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 25. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,6
20	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
30	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,6	3,8	4,1	4,2
40	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
50	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
60	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,6	5,2	5,6	5,9	6,2
70	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
80	3,7	4,3	4,8	5,8	6,6	7,1	7,5	8,6	9,3	9,8	10,2
90	6,5	7,5	8,6	10,2	11,6	12,5	13,3	15,1	16,3	17,2	18,0
100	23,6	27,3	31,2	37,1	42,3	45,7	48,3	55,1	59,5	62,8	65,5
110	4,6	5,3	6,1	7,2	8,2	8,9	9,4	10,7	11,6	12,2	12,7
120	3,1	3,6	4,1	4,9	5,6	6,0	6,4	7,3	7,8	8,3	8,6
130	2,5	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
140	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
150	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
160	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,3	4,4
170	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
180	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,6	3,7

Fuente: elaboración propia

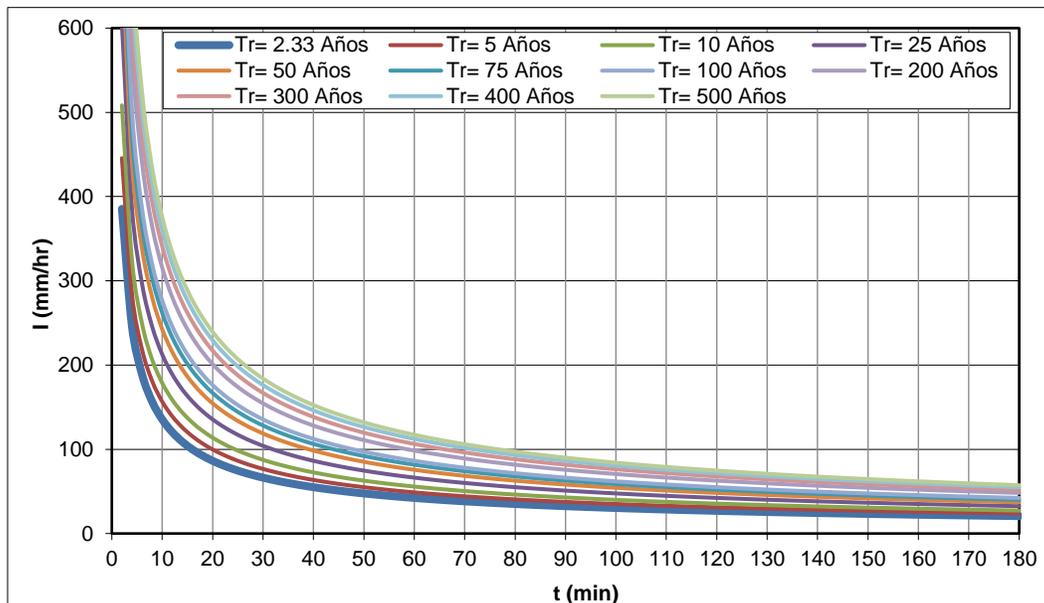


Figura 32. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Esperanza Pradera

Fuente: elaboración propia

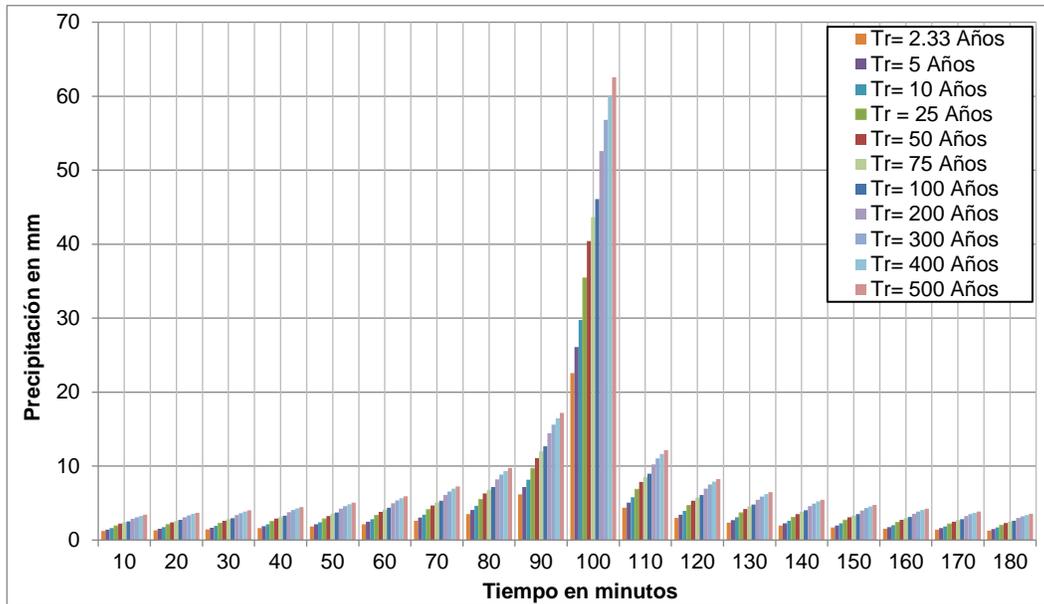


Figura 33. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera
Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
20	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
30	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
40	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
50	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,3	4,6	4,9	5,1
60	2,1	2,5	2,8	3,3	3,8	4,1	4,4	5,0	5,4	5,7	5,9
70	2,6	3,0	3,4	4,1	4,7	5,1	5,3	6,1	6,6	6,9	7,2
80	3,5	4,1	4,6	5,5	6,3	6,8	7,2	8,2	8,8	9,3	9,7
90	6,2	7,2	8,2	9,7	11,1	12,0	12,7	14,4	15,6	16,5	17,2
100	22,6	26,1	29,8	35,4	40,4	43,6	46,1	52,6	56,8	60,0	62,6
110	4,4	5,1	5,8	6,9	7,9	8,5	9,0	10,2	11,0	11,7	12,2
120	3,0	3,4	3,9	4,7	5,3	5,8	6,1	6,9	7,5	7,9	8,3
130	2,3	2,7	3,1	3,7	4,2	4,5	4,8	5,5	5,9	6,2	6,5
140	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,5
150	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
160	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	3,0	3,1	3,6	3,9	4,1	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
180	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5

Fuente: elaboración propia

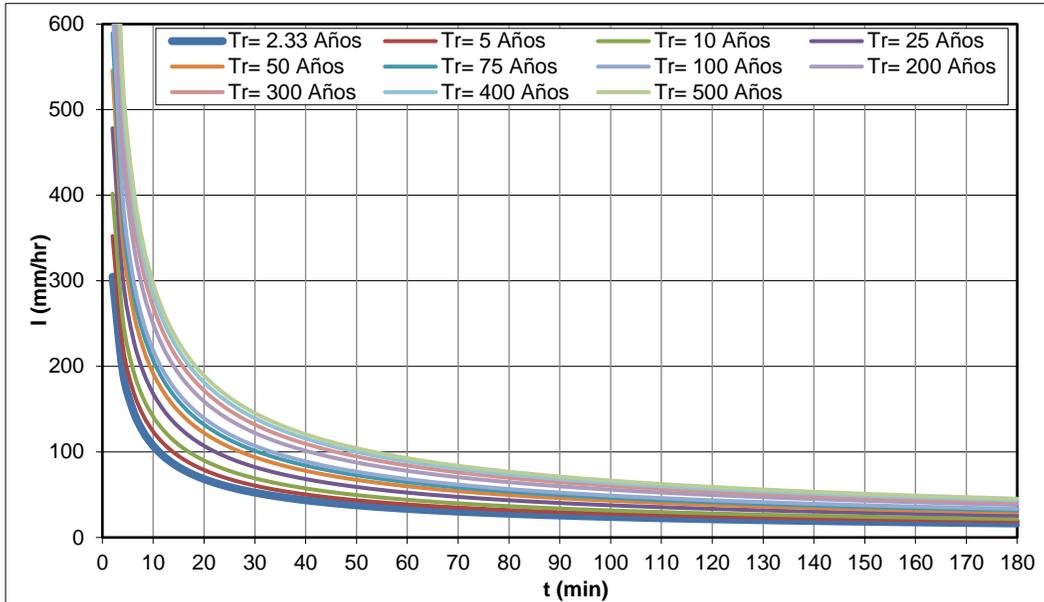


Figura 34. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Ingenio Manuelita
Fuente: elaboración propia

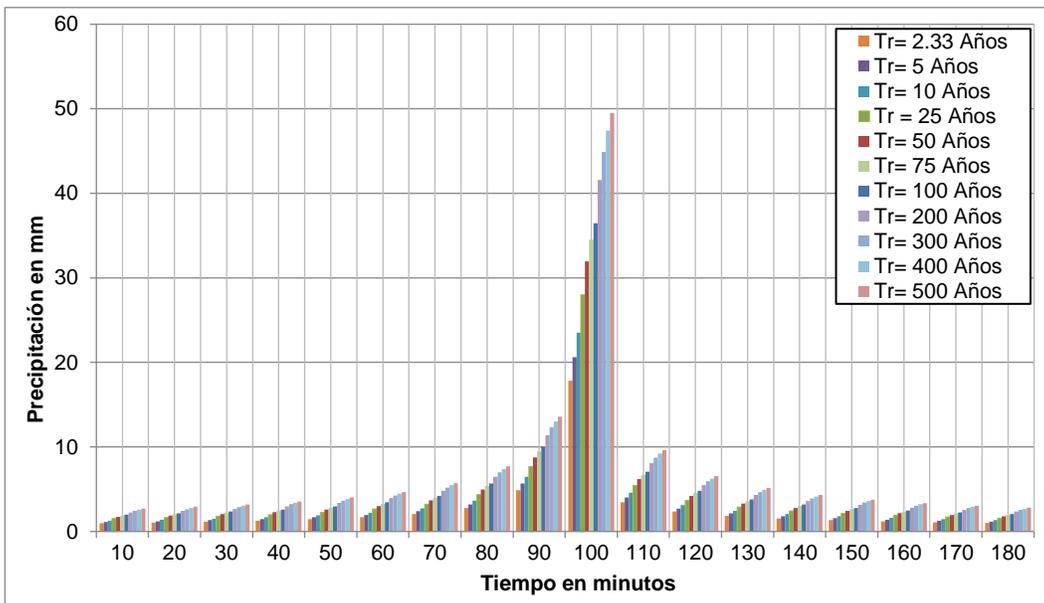


Figura 35. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita
Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,3	2,4	2,6	2,7
20	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,1	2,5	2,6	2,8	2,9
30	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
40	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
50	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,6	3,8	4,0
60	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
70	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
80	2,8	3,2	3,7	4,4	5,0	5,4	5,7	6,5	7,0	7,4	7,7
90	4,9	5,7	6,5	7,7	8,8	9,5	10,0	11,4	12,3	13,0	13,6
100	17,8	20,6	23,5	28,0	32,0	34,5	36,4	41,6	44,9	47,4	49,5
110	3,5	4,0	4,6	5,4	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
120	2,4	2,7	3,1	3,7	4,2	4,6	4,8	5,5	5,9	6,3	6,5
130	1,9	2,1	2,4	2,9	3,3	3,6	3,8	4,3	4,7	4,9	5,1
140	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
150	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
160	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,4
170	1,1	1,3	1,4	1,7	2,0	2,1	2,2	2,6	2,8	2,9	3,0
180	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,8

Fuente: elaboración propia

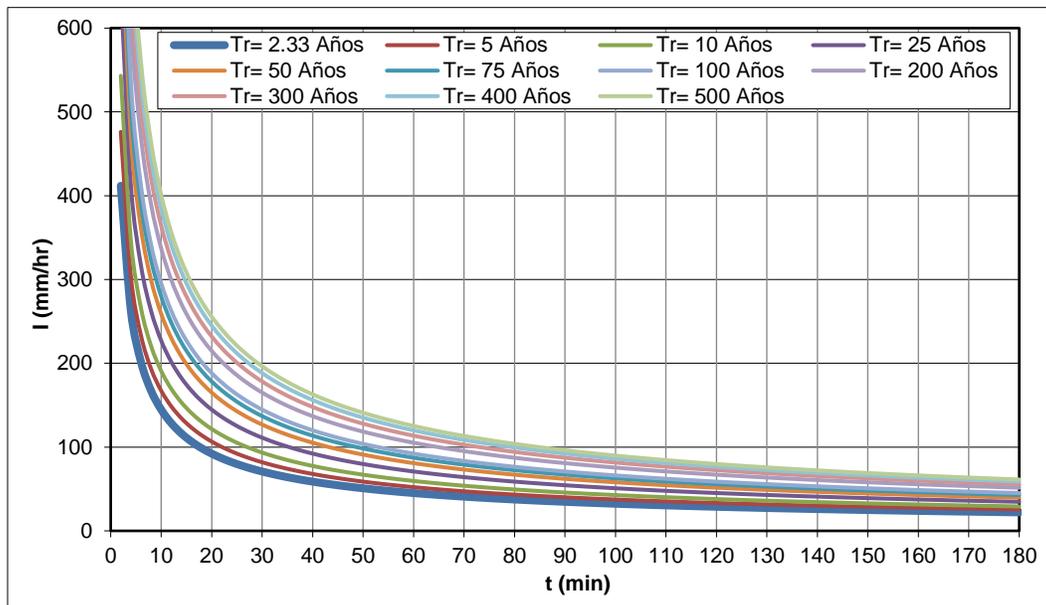


Figura 36. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Zapata

Fuente: elaboración propia

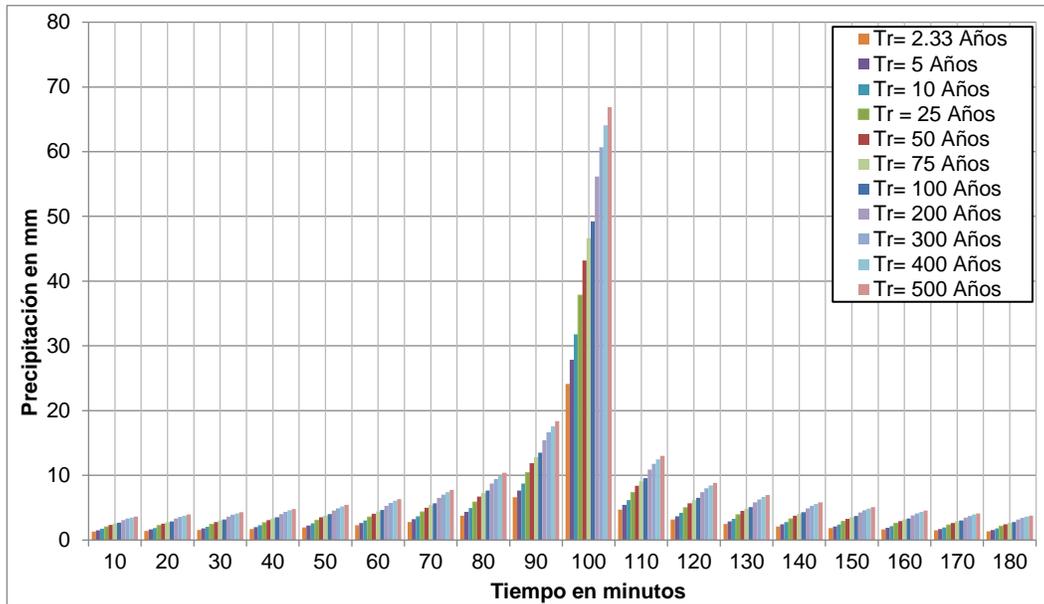


Figura 37. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata

Fuente: elaboración propia

Tabla 28. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
20	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
30	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
40	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
50	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,4
60	2,3	2,6	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,7	6,1	6,3
70	2,8	3,2	3,7	4,4	5,0	5,4	5,7	6,5	7,0	7,4	7,7
80	3,8	4,3	4,9	5,9	6,7	7,3	7,7	8,7	9,4	10,0	10,4
90	6,6	7,7	8,7	10,4	11,9	12,8	13,5	15,4	16,7	17,6	18,4
100	24,1	27,9	31,8	37,8	43,2	46,6	49,3	56,2	60,7	64,1	66,9
110	4,7	5,4	6,2	7,4	8,4	9,1	9,6	10,9	11,8	12,5	13,0
120	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,2	6,5	7,4	8,0	8,5	8,8
130	2,5	2,9	3,3	3,9	4,5	4,8	5,1	5,8	6,3	6,7	6,9
140	2,1	2,4	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
150	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,3	4,6	4,9	5,1
160	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
170	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,7	3,9	4,1
180	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8

Fuente: elaboración propia

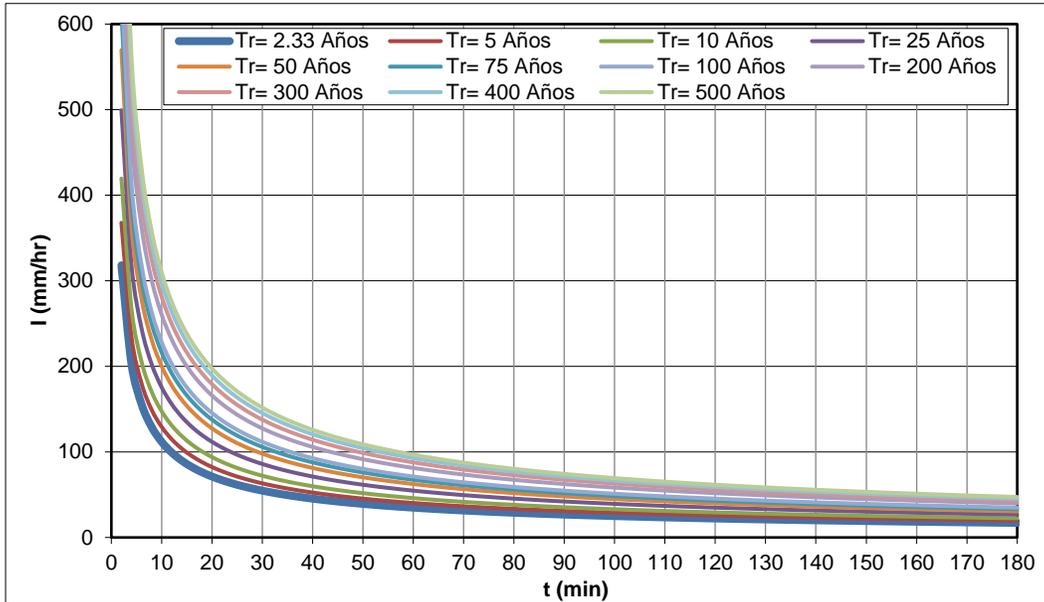


Figura 38. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Palmira ICA
Fuente: elaboración propia

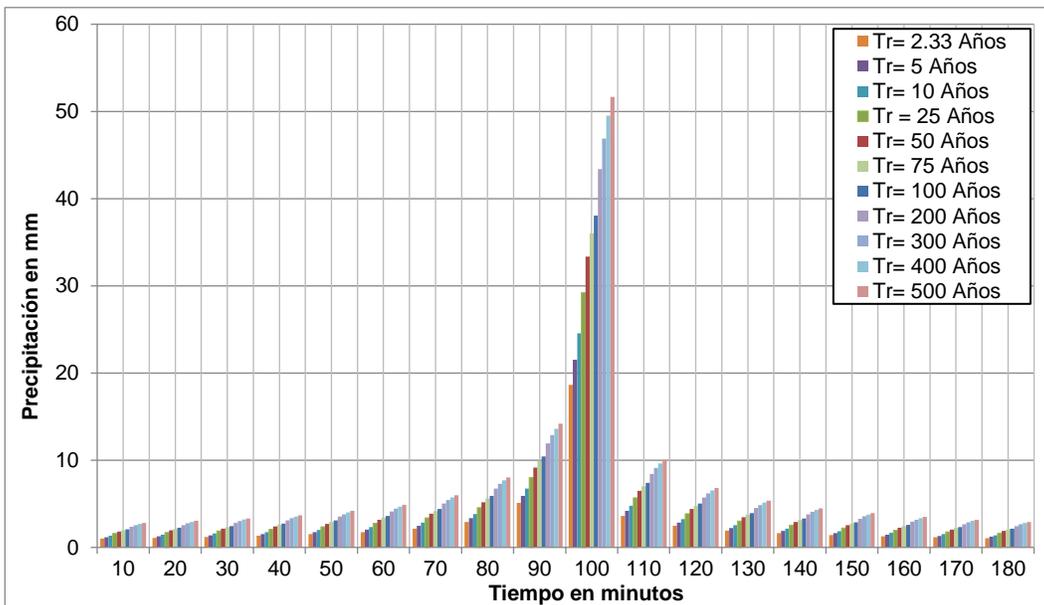


Figura 39. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA
Fuente: elaboración propia

Tabla 29. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
20	1,1	1,3	1,4	1,7	2,0	2,1	2,2	2,6	2,8	2,9	3,0
30	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3
40	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,5	3,7
50	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2

Tabla 29. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
60	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
70	2,2	2,5	2,8	3,4	3,9	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
80	2,9	3,4	3,8	4,5	5,2	5,6	5,9	6,8	7,3	7,7	8,0
90	5,1	5,9	6,7	8,0	9,2	9,9	10,4	11,9	12,9	13,6	14,2
100	18,6	21,5	24,6	29,2	33,3	36,0	38,0	43,4	46,9	49,5	51,6
110	3,6	4,2	4,8	5,7	6,5	7,0	7,4	8,4	9,1	9,6	10,0
120	2,5	2,8	3,2	3,9	4,4	4,8	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
130	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	3,7	3,9	4,5	4,9	5,1	5,4
140	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
150	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
160	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5
170	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,2	2,3	2,7	2,9	3,0	3,2
180	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9

Fuente: elaboración propia

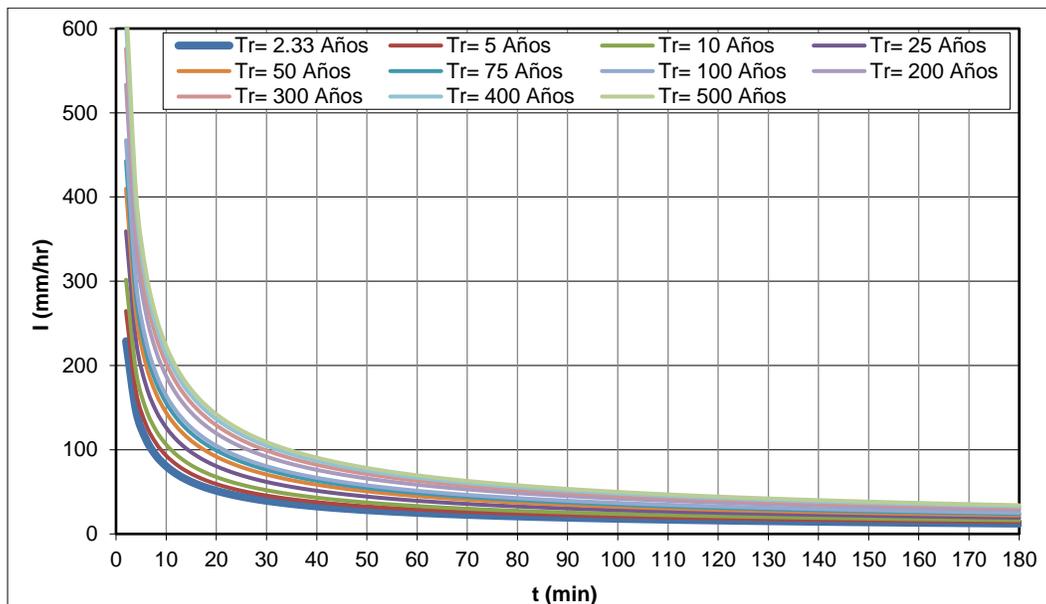


Figura 40. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenerife

Fuente: elaboración propia

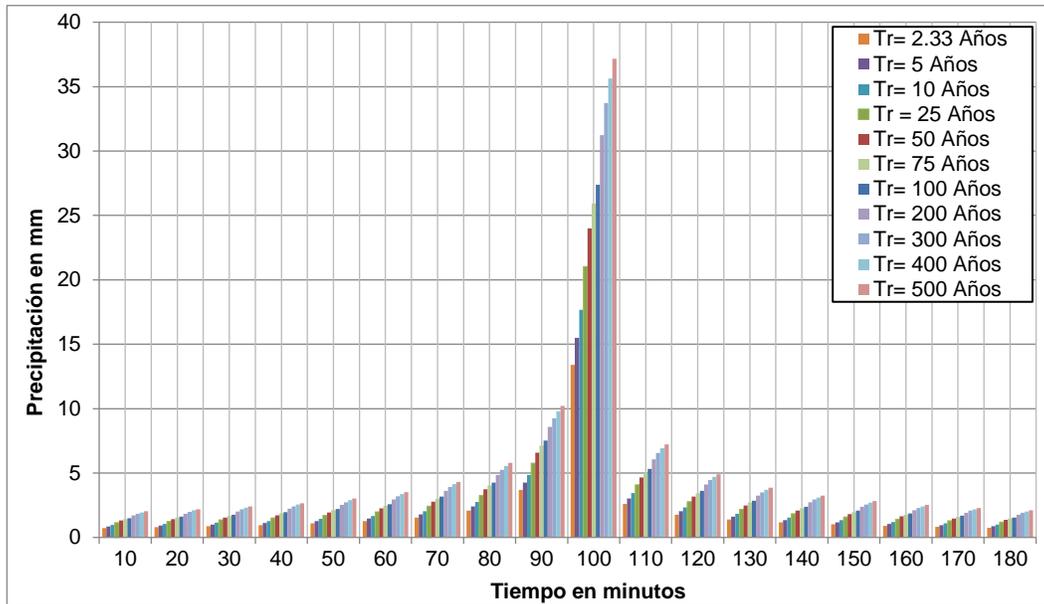


Figura 41. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife

Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0
20	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2
30	0,9	1,0	1,1	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4
40	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7
50	1,1	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0
60	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
70	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
80	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,3	4,9	5,2	5,5	5,8
90	3,7	4,3	4,9	5,8	6,6	7,1	7,5	8,6	9,3	9,8	10,2
100	13,4	15,5	17,7	21,0	24,0	25,9	27,4	31,2	33,7	35,6	37,2
110	2,6	3,0	3,4	4,1	4,7	5,0	5,3	6,1	6,6	6,9	7,2
120	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,5	4,7	4,9
130	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
140	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
150	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
160	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5
170	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3
180	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,5	1,8	1,9	2,0	2,1

Fuente: elaboración propia

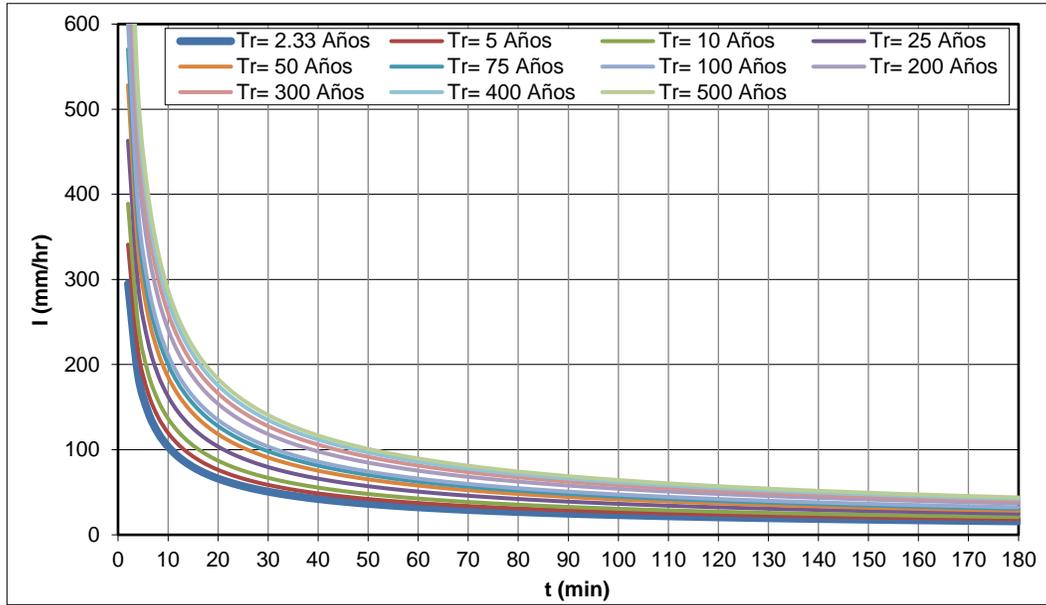


Figura 42. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji
Fuente: elaboración propia

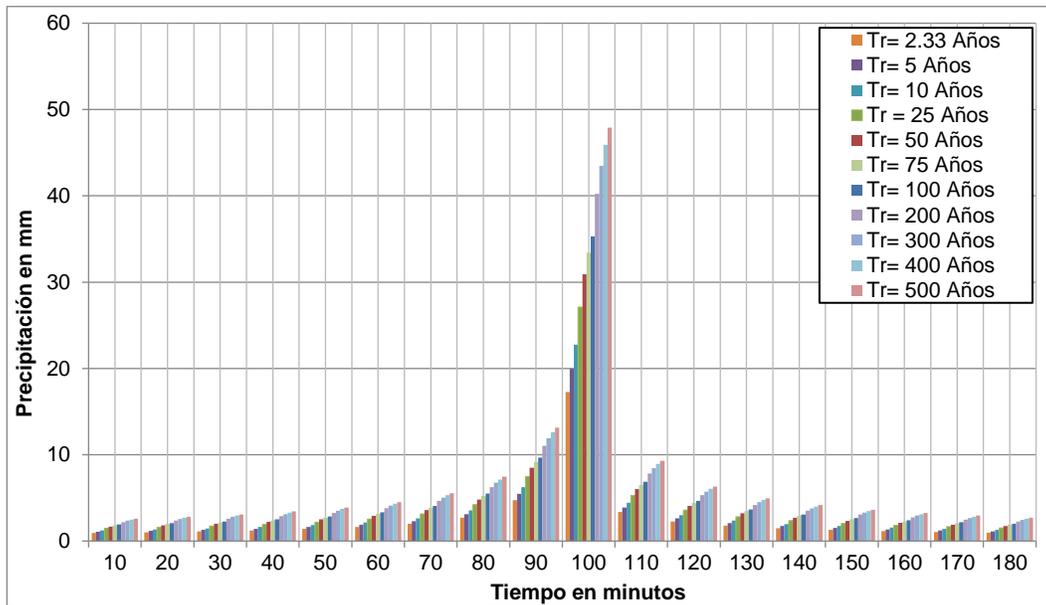


Figura 43. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji
Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	2,2	2,4	2,5	2,6
20	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
30	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
40	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
50	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	3,7	3,9
60	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
70	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
80	2,7	3,1	3,5	4,2	4,8	5,2	5,5	6,3	6,8	7,1	7,5
90	4,7	5,5	6,3	7,4	8,5	9,2	9,7	11,0	11,9	12,6	13,2
100	17,3	20,0	22,8	27,1	30,9	33,4	35,3	40,2	43,5	45,9	47,9
110	3,4	3,9	4,4	5,3	6,0	6,5	6,9	7,8	8,4	8,9	9,3
120	2,3	2,6	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,7	6,1	6,3
130	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
140	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
150	1,3	1,5	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
160	1,2	1,4	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
170	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9
180	1,0	1,1	1,3	1,5	1,8	1,9	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7

Fuente: elaboración propia

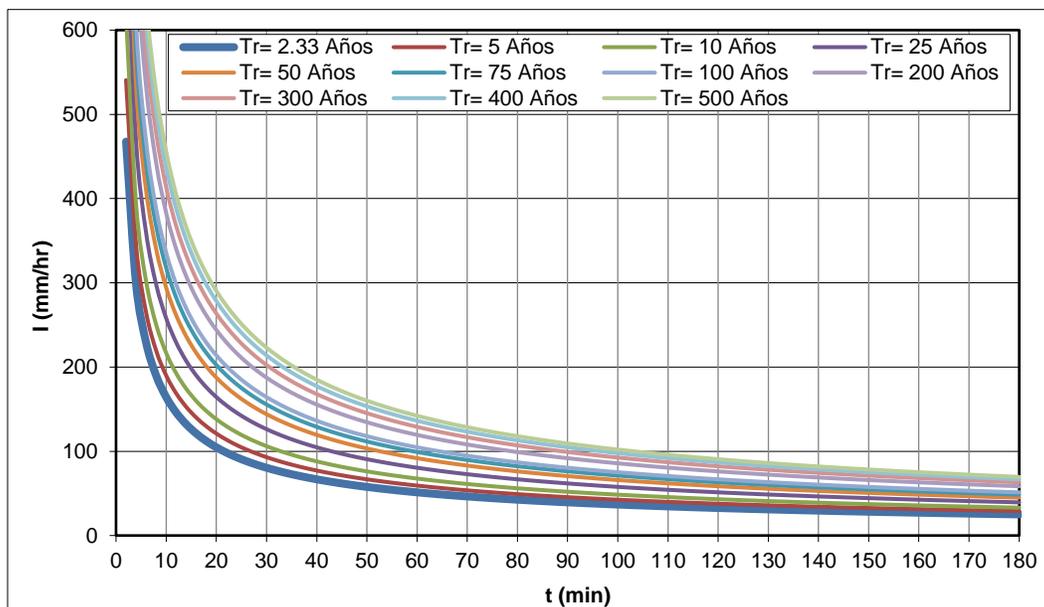


Figura 44. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria

Fuente: elaboración propia

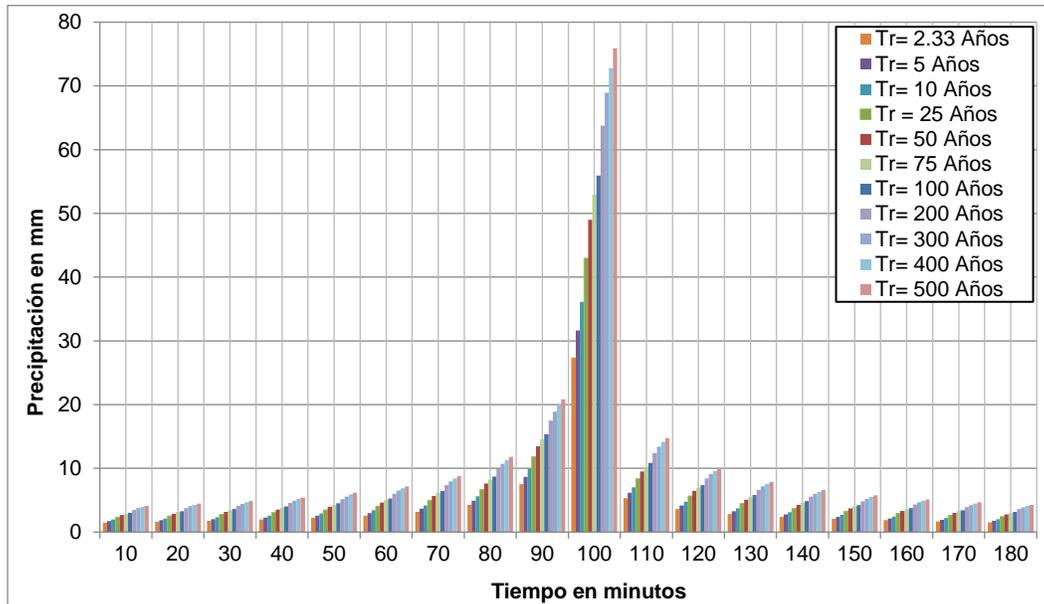


Figura 45. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria
Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1
20	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
30	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
40	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,4
50	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,5	5,2	5,6	5,9	6,2
60	2,6	3,0	3,4	4,1	4,6	5,0	5,3	6,0	6,5	6,9	7,2
70	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,1	6,5	7,4	8,0	8,4	8,8
80	4,3	4,9	5,6	6,7	7,6	8,2	8,7	9,9	10,7	11,3	11,8
90	7,5	8,7	9,9	11,8	13,5	14,5	15,4	17,5	18,9	20,0	20,8
100	27,4	31,7	36,1	43,0	49,0	53,0	55,9	63,8	68,9	72,8	75,9
110	5,3	6,2	7,0	8,4	9,5	10,3	10,9	12,4	13,4	14,1	14,8
120	3,6	4,2	4,8	5,7	6,5	7,0	7,4	8,4	9,1	9,6	10,0
130	2,8	3,3	3,7	4,5	5,1	5,5	5,8	6,6	7,2	7,6	7,9
140	2,4	2,8	3,1	3,7	4,3	4,6	4,9	5,6	6,0	6,3	6,6
150	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,8
160	1,9	2,1	2,4	2,9	3,3	3,6	3,8	4,3	4,7	4,9	5,1
170	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
180	1,5	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3

Fuente: elaboración propia

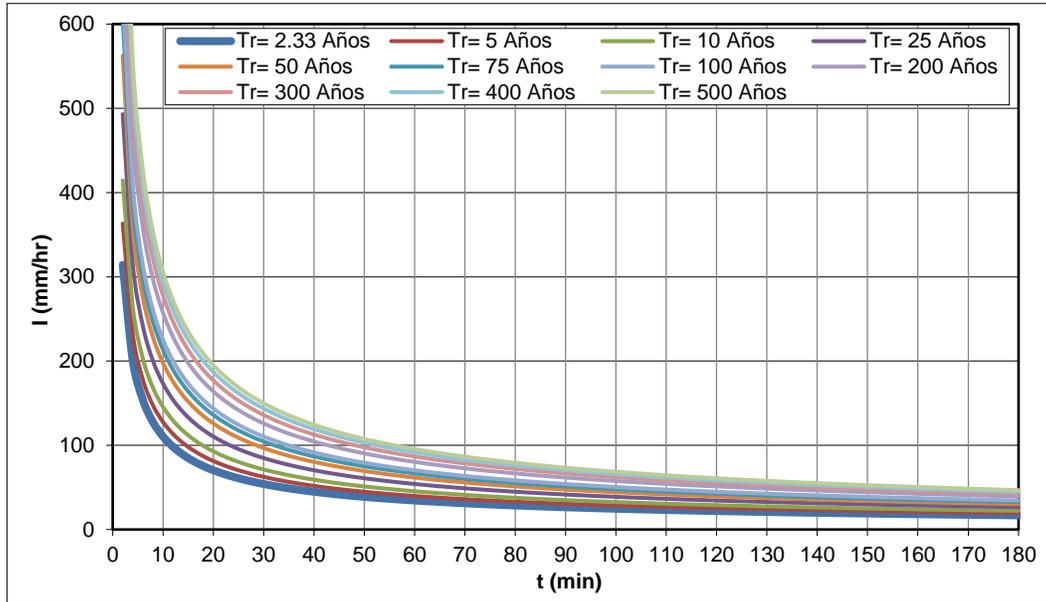


Figura 46. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Bellavista
Fuente: elaboración propia

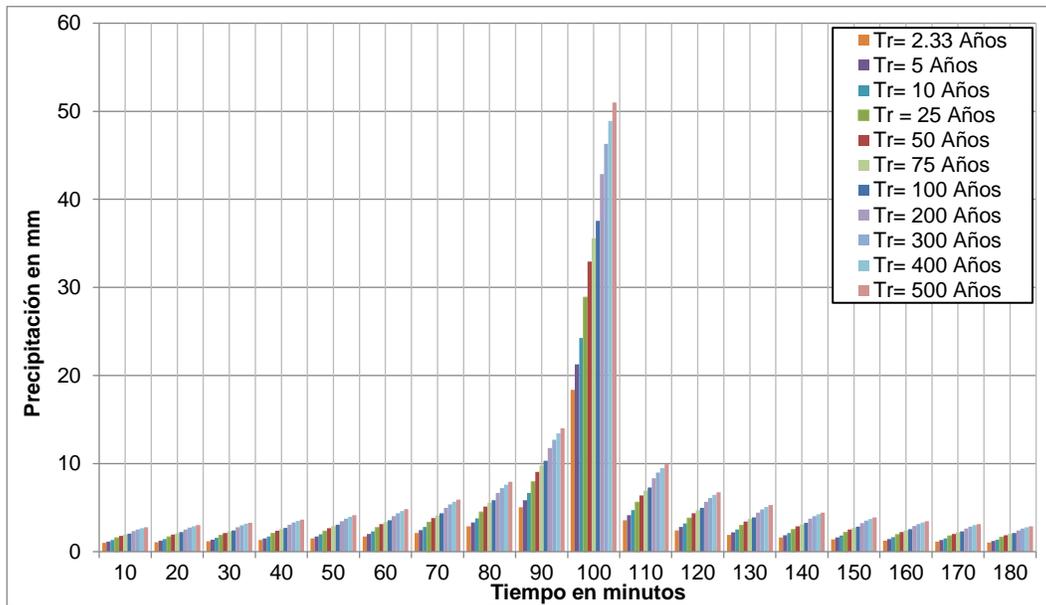


Figura 47. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista
Fuente: elaboración propia

Tabla 33. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	1,9	2,0	2,3	2,5	2,7	2,8
20	1,1	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0
30	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,8	3,0	3,2	3,3
40	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
50	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1
60	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,4	3,6	4,1	4,4	4,6	4,8
70	2,1	2,5	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	5,0	5,4	5,7	5,9
80	2,9	3,3	3,8	4,5	5,1	5,5	5,8	6,7	7,2	7,6	7,9
90	5,1	5,8	6,7	7,9	9,0	9,8	10,3	11,8	12,7	13,4	14,0
100	18,4	21,3	24,3	28,9	32,9	35,6	37,6	42,9	46,3	48,9	51,0
110	3,6	4,1	4,7	5,6	6,4	6,9	7,3	8,3	9,0	9,5	9,9
120	2,4	2,8	3,2	3,8	4,3	4,7	5,0	5,7	6,1	6,5	6,7
130	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,4	4,8	5,1	5,3
140	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,3	4,4
150	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	3,7	3,9
160	1,2	1,4	1,6	2,0	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,5
170	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
180	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,0	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9

Fuente: elaboración propia

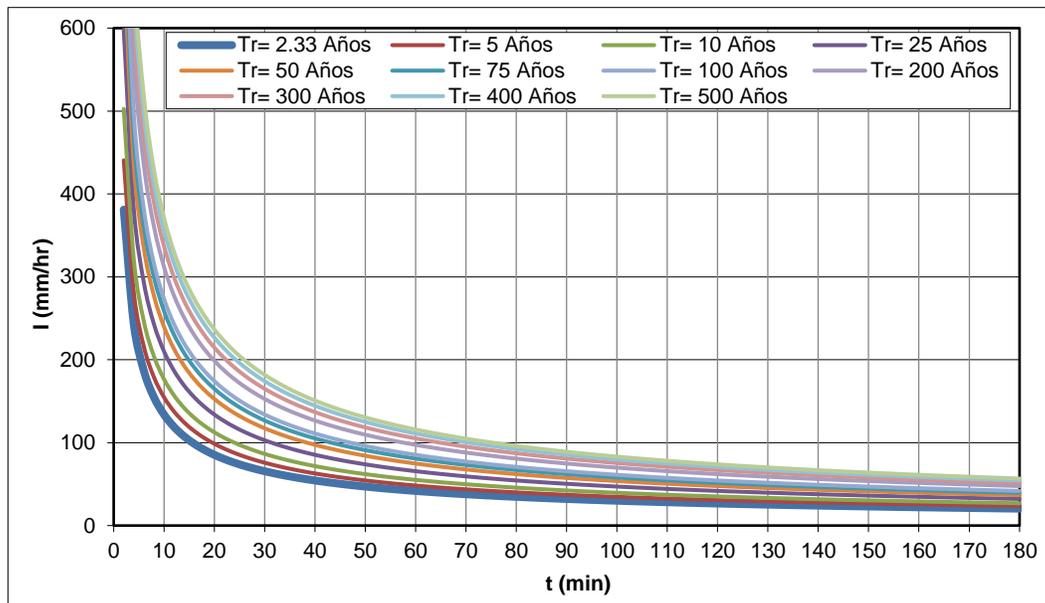


Figura 48. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Chambú

Fuente: elaboración propia

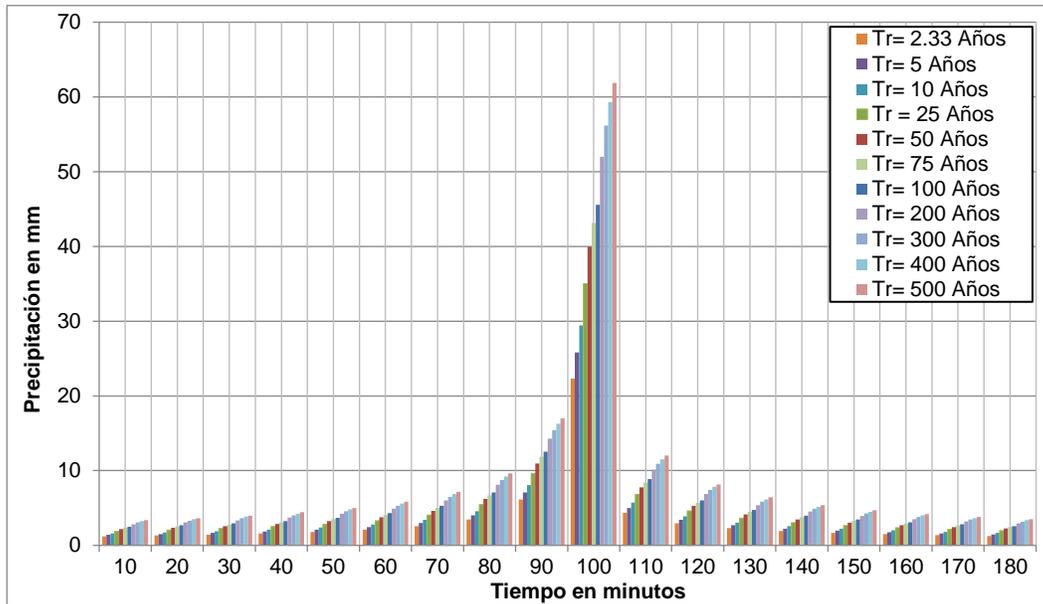


Figura 49. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú

Fuente: elaboración propia

Tabla 34. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,8	3,1	3,2	3,4
20	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
30	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,4	3,6	3,8	4,0
40	1,6	1,8	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,2	4,4
50	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
60	2,1	2,4	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
70	2,6	3,0	3,4	4,1	4,6	5,0	5,3	6,0	6,5	6,9	7,2
80	3,5	4,0	4,6	5,4	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
90	6,1	7,1	8,1	9,6	11,0	11,8	12,5	14,3	15,4	16,3	17,0
100	22,3	25,8	29,4	35,0	40,0	43,1	45,6	52,0	56,2	59,3	61,9
110	4,3	5,0	5,7	6,8	7,8	8,4	8,9	10,1	10,9	11,5	12,0
120	2,9	3,4	3,9	4,6	5,3	5,7	6,0	6,9	7,4	7,8	8,2
130	2,3	2,7	3,1	3,6	4,1	4,5	4,7	5,4	5,8	6,2	6,4
140	1,9	2,2	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,5	4,9	5,2	5,4
150	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
160	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8
180	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5

Fuente: elaboración propia

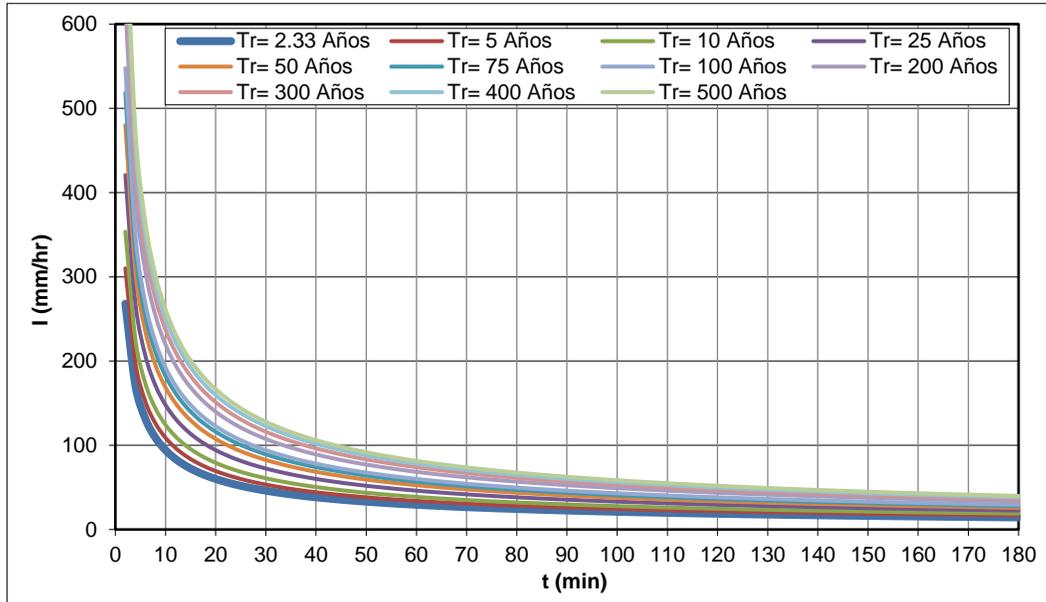


Figura 50. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Ceja
Fuente: elaboración propia

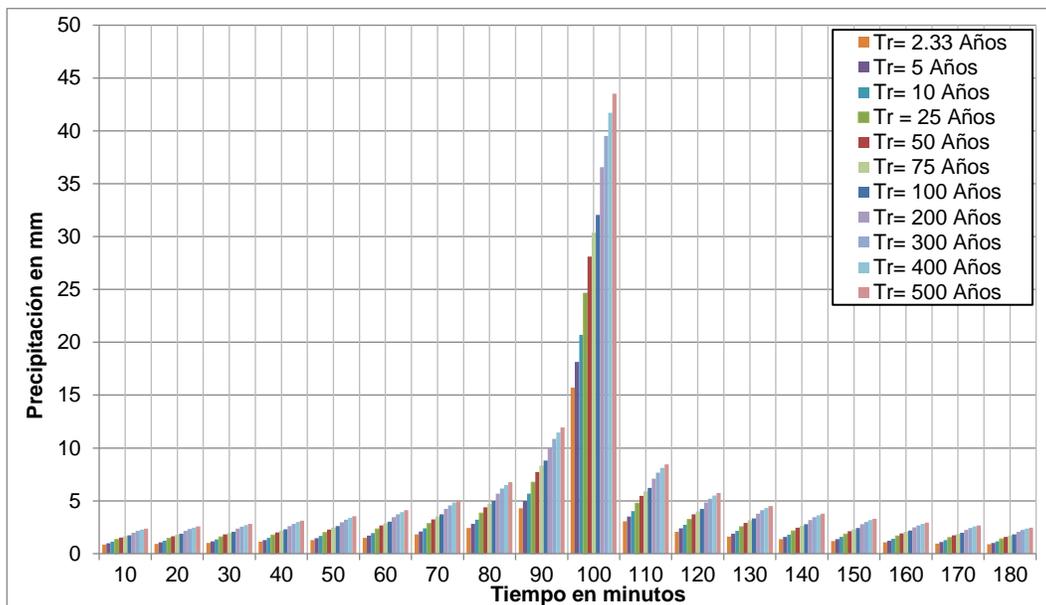


Figura 51. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja
Fuente: elaboración propia

Tabla 35. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,7	2,0	2,2	2,3	2,4
20	0,9	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	2,2	2,3	2,5	2,6
30	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,8
40	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
50	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
60	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,7	3,9	4,1
70	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
80	2,4	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,1	6,5	6,8
90	4,3	5,0	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	10,0	10,8	11,5	12,0
100	15,7	18,1	20,7	24,6	28,1	30,4	32,1	36,6	39,5	41,7	43,5
110	3,1	3,5	4,0	4,8	5,5	5,9	6,2	7,1	7,7	8,1	8,5
120	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
130	1,6	1,9	2,1	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
140	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
150	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,8	3,0	3,2	3,3
160	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0
170	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,3	2,4	2,6	2,7
180	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,1	2,2	2,4	2,5

Fuente: elaboración propia

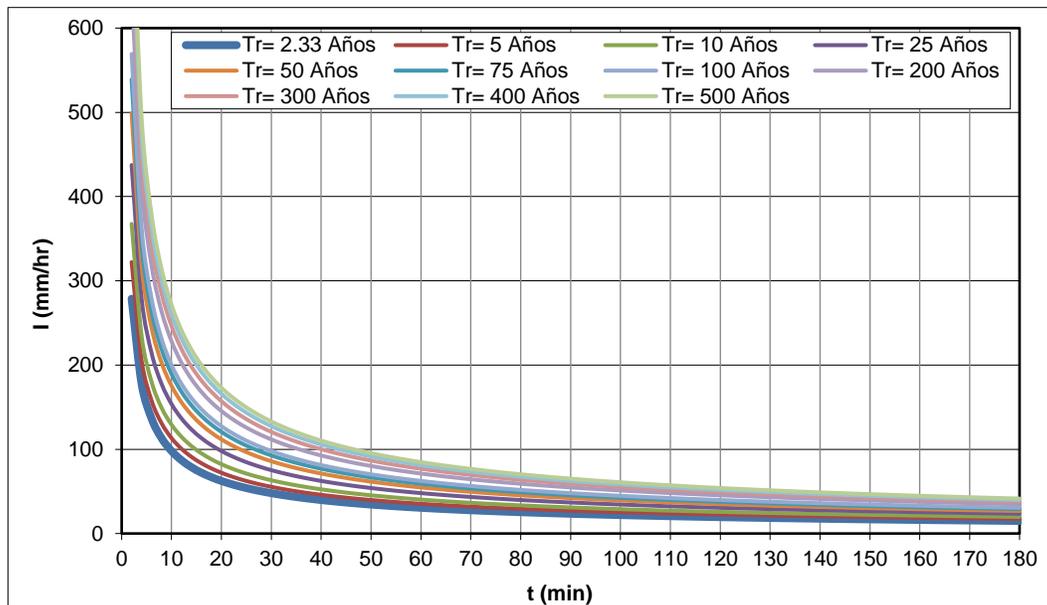


Figura 52. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Sirena

Fuente: elaboración propia

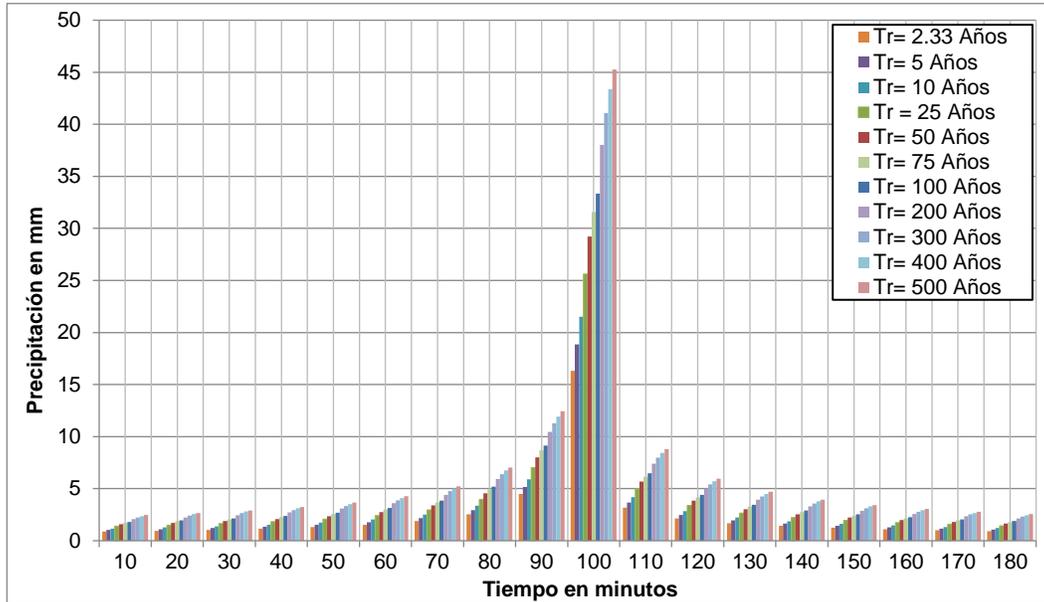


Figura 53. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena
Fuente: elaboración propia

Tabla 36. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,1	2,2	2,4	2,5
20	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7
30	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,1	2,5	2,6	2,8	2,9
40	1,2	1,4	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
50	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
60	1,5	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
70	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,4	4,8	5,0	5,2
80	2,5	2,9	3,3	4,0	4,5	4,9	5,2	5,9	6,4	6,7	7,0
90	4,5	5,2	5,9	7,0	8,0	8,7	9,2	10,4	11,3	11,9	12,4
100	16,3	18,9	21,5	25,6	29,2	31,6	33,3	38,0	41,1	43,4	45,3
110	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,1	6,5	7,4	8,0	8,4	8,8
120	2,2	2,5	2,8	3,4	3,9	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
130	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
140	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
150	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
160	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,6	2,8	2,9	3,1
170	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8
180	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	2,2	2,3	2,5	2,6

Fuente: elaboración propia

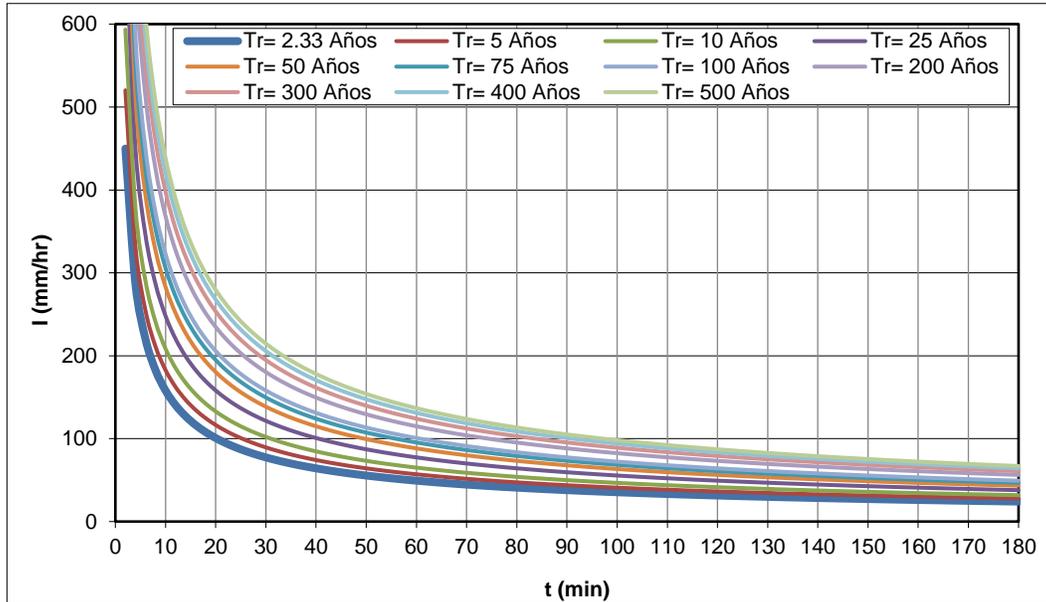


Figura 54. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Soledad
Fuente: elaboración propia

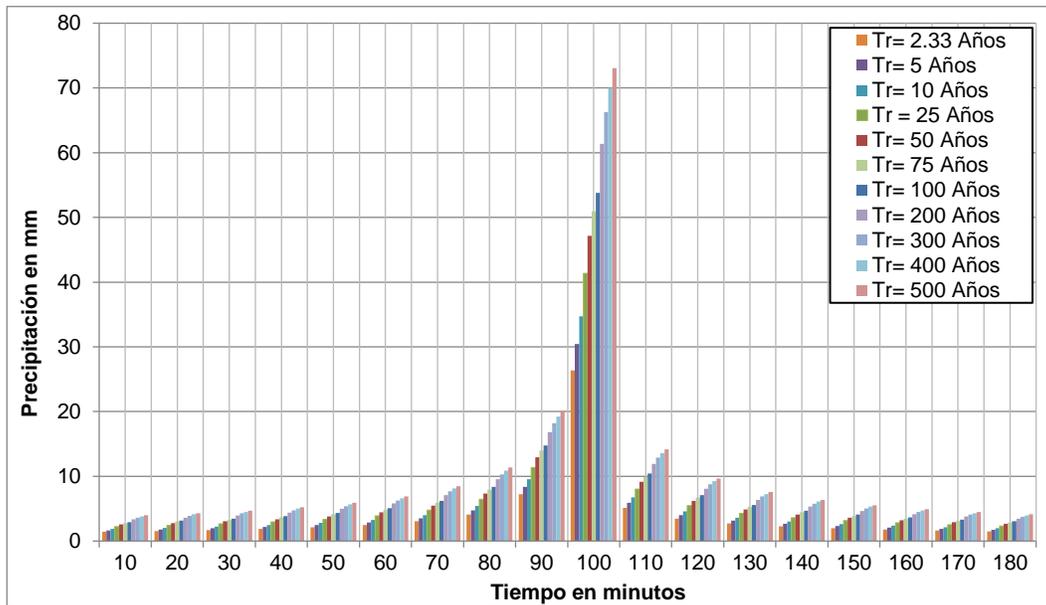


Figura 55. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad
Fuente: elaboración propia

Tabla 37. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0
20	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
30	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	4,0	4,3	4,5	4,7
40	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,6	3,9	4,4	4,7	5,0	5,2
50	2,1	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,4	5,0	5,4	5,7	5,9

Tabla 37. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
60	2,5	2,9	3,3	3,9	4,5	4,8	5,1	5,8	6,3	6,6	6,9
70	3,0	3,5	4,0	4,8	5,5	5,9	6,2	7,1	7,7	8,1	8,5
80	4,1	4,7	5,4	6,4	7,3	7,9	8,4	9,6	10,3	10,9	11,4
90	7,2	8,4	9,5	11,4	12,9	14,0	14,8	16,9	18,2	19,2	20,1
100	26,3	30,5	34,7	41,3	47,2	50,9	53,8	61,4	66,3	70,0	73,1
110	5,1	5,9	6,8	8,0	9,2	9,9	10,5	11,9	12,9	13,6	14,2
120	3,5	4,0	4,6	5,5	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
130	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
140	2,3	2,7	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,8	6,1	6,4
150	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
160	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,6	4,2	4,5	4,7	5,0
170	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
180	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1

Fuente: elaboración propia

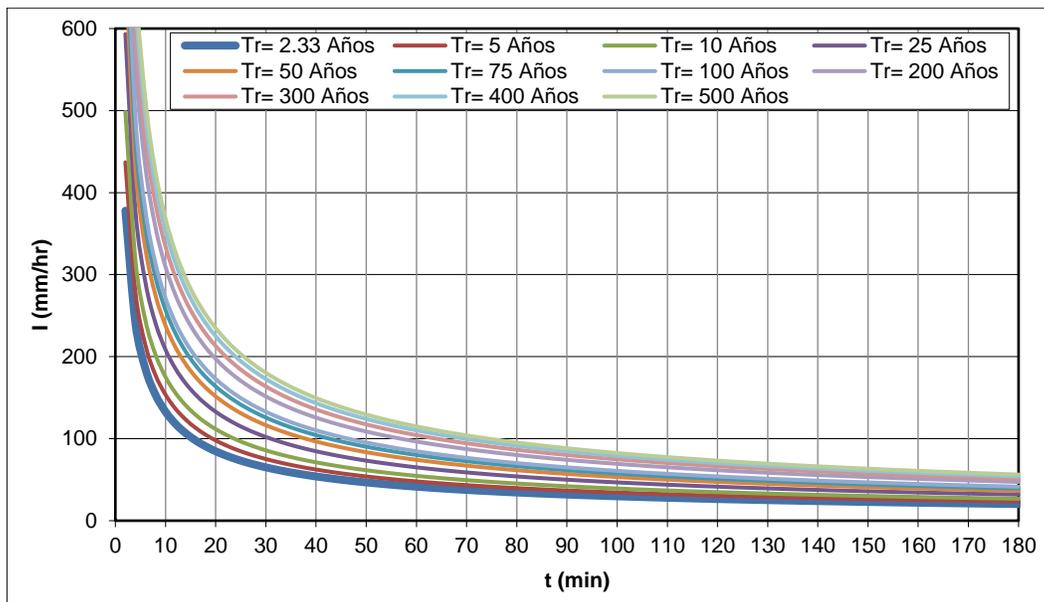


Figura 56. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Planta Nima

Fuente: elaboración propia

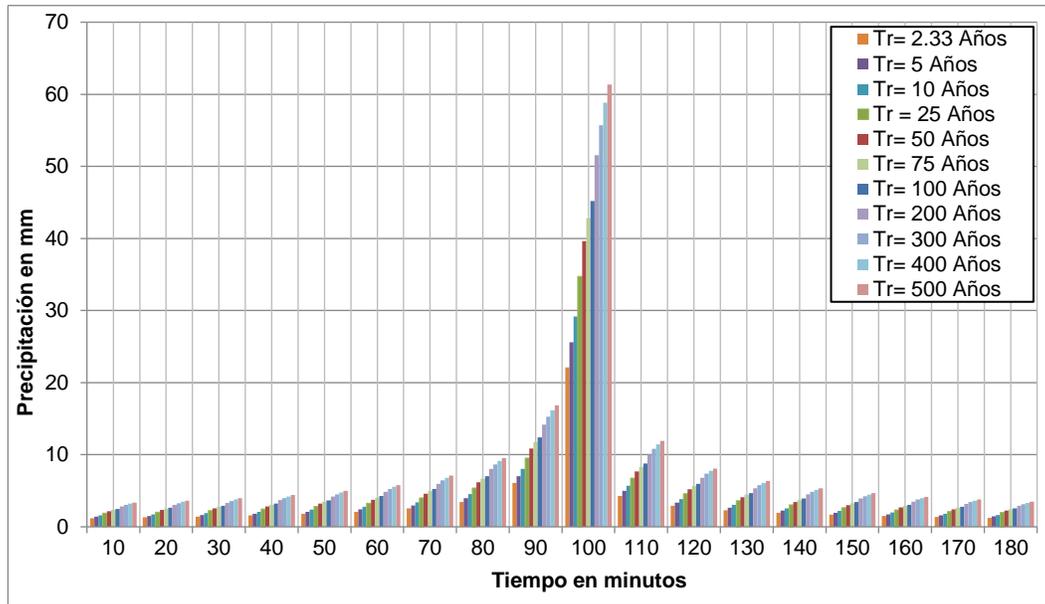


Figura 57. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima
Fuente: elaboración propia

Tabla 38. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3
20	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	3,5	3,6
30	1,4	1,6	1,9	2,2	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0
40	1,6	1,8	2,1	2,5	2,8	3,1	3,2	3,7	4,0	4,2	4,4
50	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
60	2,1	2,4	2,8	3,3	3,7	4,0	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
70	2,6	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,2	6,0	6,4	6,8	7,1
80	3,4	4,0	4,5	5,4	6,2	6,7	7,0	8,0	8,7	9,2	9,5
90	6,1	7,0	8,0	9,5	10,9	11,8	12,4	14,2	15,3	16,2	16,8
100	22,1	25,6	29,2	34,7	39,6	42,8	45,2	51,6	55,7	58,8	61,4
110	4,3	5,0	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	10,0	10,8	11,4	11,9
120	2,9	3,4	3,9	4,6	5,2	5,6	6,0	6,8	7,3	7,8	8,1
130	2,3	2,7	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,4	5,8	6,1	6,4
140	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	3,7	3,9	4,5	4,9	5,1	5,3
150	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,2	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
160	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
180	1,3	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,2	3,3	3,5

Fuente: elaboración propia

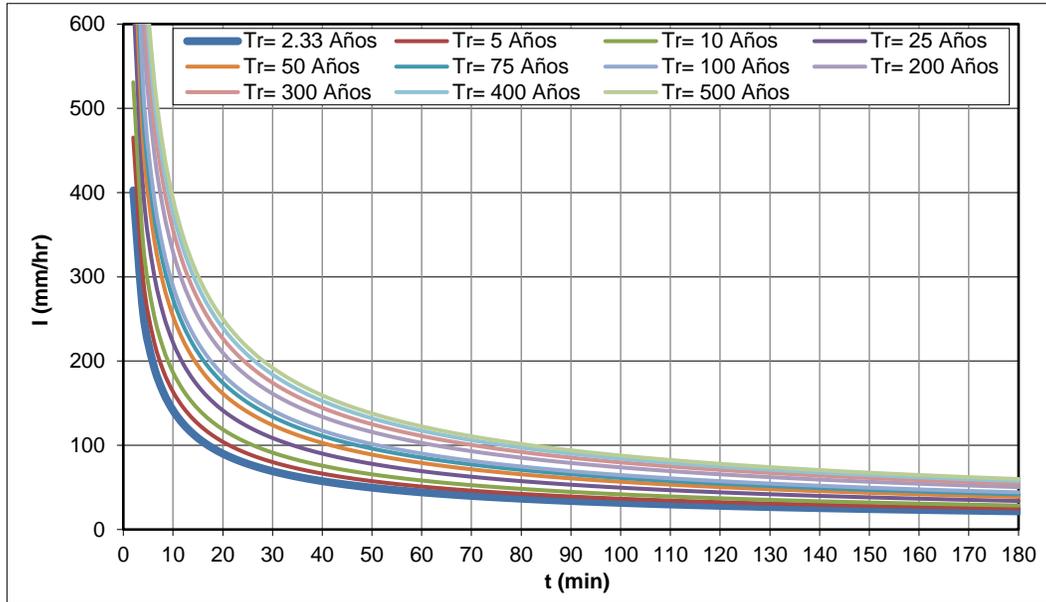


Figura 58. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Emigdio
Fuente: elaboración propia

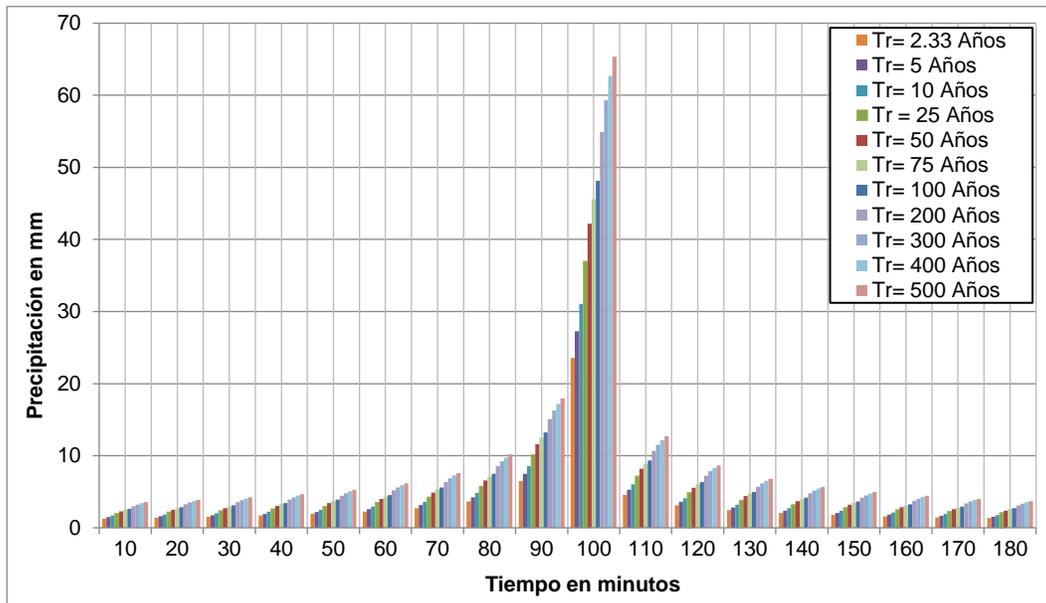


Figura 59. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio
Fuente: elaboración propia

Tabla 39. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,6
20	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
30	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
40	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
50	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
60	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,6	5,2	5,6	5,9	6,2
70	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
80	3,7	4,2	4,8	5,8	6,6	7,1	7,5	8,5	9,2	9,7	10,2
90	6,5	7,5	8,5	10,2	11,6	12,5	13,2	15,1	16,3	17,2	17,9
100	23,6	27,2	31,1	37,0	42,2	45,6	48,1	54,9	59,3	62,6	65,4
110	4,6	5,3	6,0	7,2	8,2	8,9	9,4	10,7	11,5	12,2	12,7
120	3,1	3,6	4,1	4,9	5,6	6,0	6,4	7,2	7,8	8,3	8,6
130	2,4	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
140	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
150	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
160	1,6	1,8	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,2	4,4
170	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
180	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,5	3,7

Fuente: elaboración propia

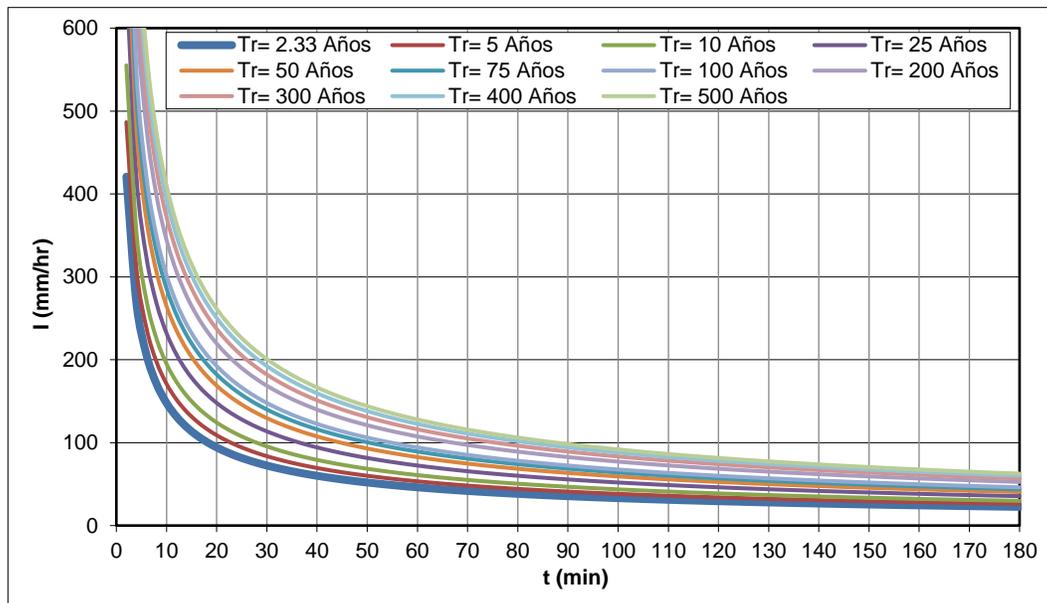


Figura 60. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Nicolás

Fuente: elaboración propia

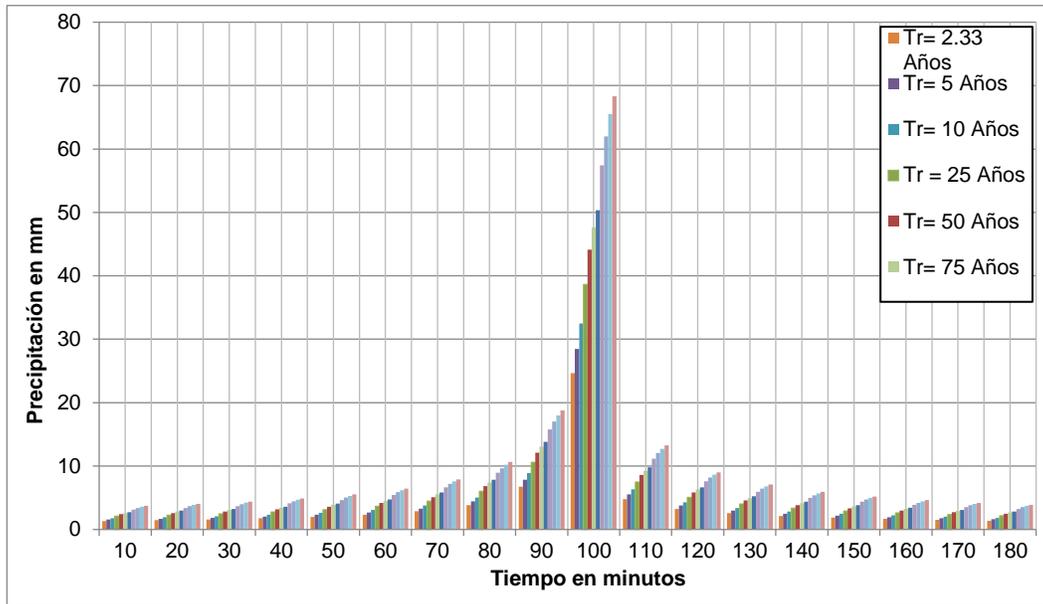


Figura 61. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas
Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,6	3,7
20	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
30	1,6	1,8	2,1	2,5	2,8	3,1	3,2	3,7	4,0	4,2	4,4
40	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
50	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
60	2,3	2,7	3,1	3,7	4,2	4,5	4,8	5,4	5,9	6,2	6,5
70	2,9	3,3	3,8	4,5	5,1	5,5	5,8	6,6	7,2	7,6	7,9
80	3,8	4,4	5,1	6,0	6,9	7,4	7,8	8,9	9,6	10,2	10,6
90	6,8	7,8	8,9	10,6	12,1	13,1	13,8	15,8	17,0	18,0	18,8
100	24,6	28,5	32,5	38,7	44,1	47,7	50,3	57,4	62,0	65,5	68,3
110	4,8	5,5	6,3	7,5	8,6	9,3	9,8	11,2	12,1	12,7	13,3
120	3,3	3,8	4,3	5,1	5,8	6,3	6,6	7,6	8,2	8,6	9,0
130	2,6	3,0	3,4	4,0	4,6	4,9	5,2	6,0	6,4	6,8	7,1
140	2,1	2,5	2,8	3,4	3,8	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
150	1,9	2,2	2,5	2,9	3,4	3,6	3,8	4,4	4,7	5,0	5,2
160	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,2	3,4	3,9	4,2	4,4	4,6
170	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
180	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9

Fuente: elaboración propia

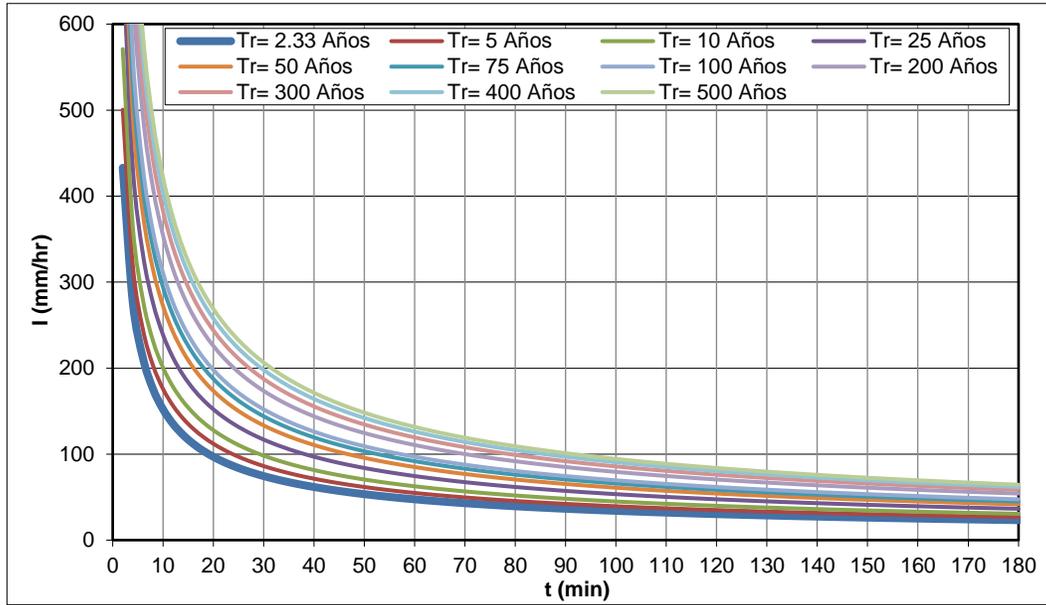


Figura 62. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenjo
Fuente: elaboración propia

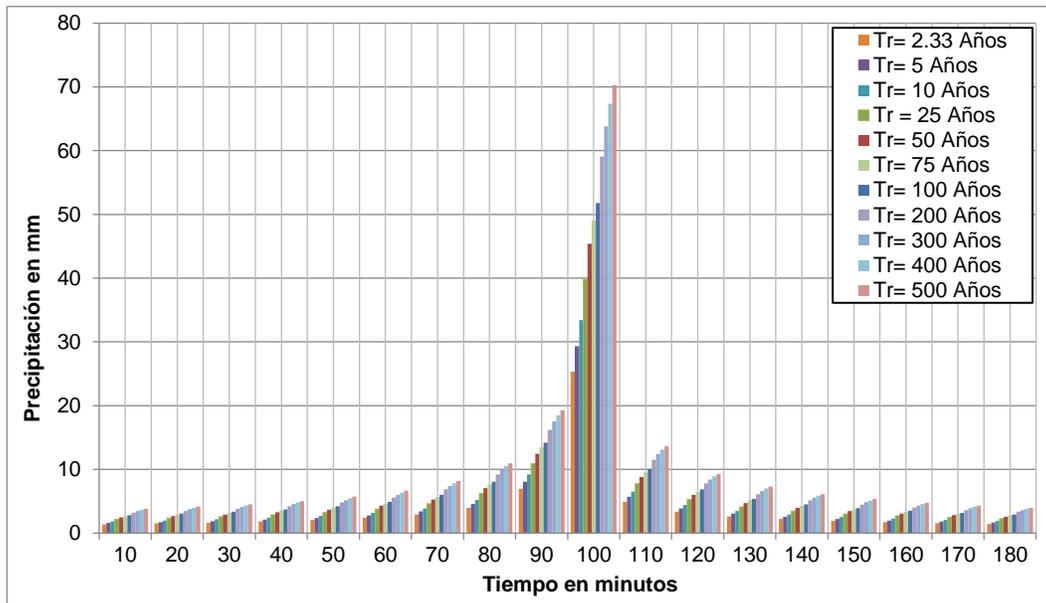


Figura 63. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo
Fuente: elaboración propia

Tabla 41. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo

Duración (min)	Precipitación (mm)										
	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8
20	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,1
30	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
40	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
50	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
60	2,4	2,8	3,2	3,8	4,3	4,6	4,9	5,6	6,0	6,4	6,6
70	2,9	3,4	3,9	4,6	5,3	5,7	6,0	6,8	7,4	7,8	8,1
80	3,9	4,6	5,2	6,2	7,1	7,6	8,1	9,2	9,9	10,5	10,9
90	7,0	8,0	9,2	10,9	12,5	13,5	14,2	16,2	17,5	18,5	19,3
100	25,3	29,3	33,4	39,8	45,4	49,0	51,8	59,1	63,8	67,4	70,3
110	4,9	5,7	6,5	7,7	8,8	9,5	10,1	11,5	12,4	13,1	13,7
120	3,3	3,9	4,4	5,3	6,0	6,5	6,8	7,8	8,4	8,9	9,3
130	2,6	3,0	3,5	4,1	4,7	5,1	5,4	6,1	6,6	7,0	7,3
140	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,5	5,1	5,6	5,9	6,1
150	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
160	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
170	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
180	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0

Fuente: elaboración propia

9.2 Régimen de caudales

9.2.1 Caracterización de caudales en las corrientes hídricas

En la zona de estudio y su área de influencia se identificaron cuatro (4) estaciones limnimétricas y dos (2) limnigráficas (Tabla 42). La selección de las estaciones hidrométricas a emplear se realizó a partir de su ubicación en la zona de influencia del área de estudio y las que cuentan con periodos de datos más cercanos a la fecha actual.

Tabla 42. Estaciones hidrológicas con influencia en el área de estudio

ESTACIÓN	ENTIDAD	CÓDIGO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	CATEGORIA	AÑO INICIO
JUANCHITO	CVC	2610000401	Palmira	873452,42	1066908,69	956	Limnimétrica	1945
AMAIME	CVC	2612800403	El Cerrito	890926,02	1089535,54	1032	Limnimétrica	1984
BOLO ARRIBA	CVC	2612720401	Palmira	875802,67	1086633,44	984	Limnimétrica	1960
BOLO LOS MINCHOS	CVC	2612720403	Pradera	869952,34	1100392,68	1394	Limnigráfica	1992
FRAILE BUCHITOLO	CVC	2612710401	Candelaria	864927,09	1080859,43	979	Limnimétrica	1961
GUACHAL PALMASECA	CVC	2612700401	Palmira	885379,02	1068903,35	947	Limnigráfica	1977

Fuente: elaboración propia

En la Figura 64 se presenta la ubicación de las estaciones hidrométricas con influencia en el área de estudio, de las cuales se seleccionó la estación Amaime localizada sobre el cauce del río del mismo nombre, ya que los drenajes que transitan por la zona urbana del municipio son derivaciones del río Nima, principal tributario del Amaime.

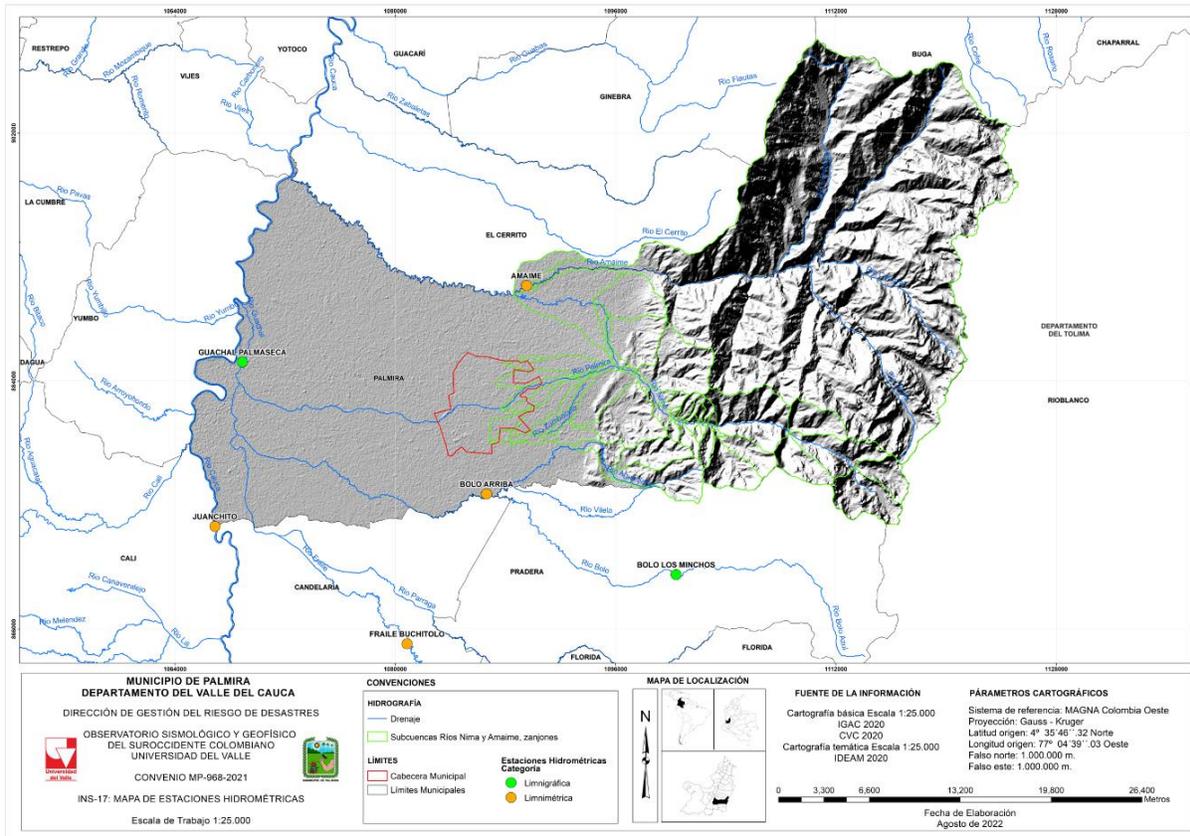


Figura 64. Localización de las estaciones hidrológicas en relación con el área de estudio del municipio de Palmira.

Fuente: elaboración propia

9.2.1.1 Caudales río Amaime

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos en el río Amaime, estación hidrológica Amaime, se presentan en la Figura 65.

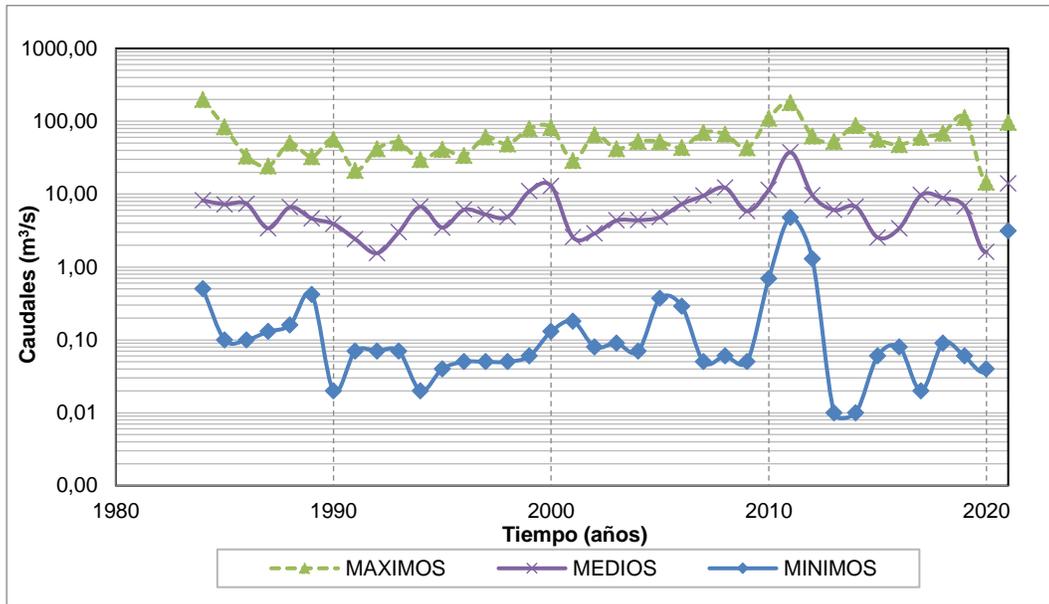


Figura 65. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Amaime. Estación Amaime. Período: 1984 - 2021.

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Amaime, en la estación del mismo nombre registra una variación anual de caudales máximos que está entre los $14,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y los $198,8 \text{ m}^3/\text{s}$, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de $62,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales medios anuales oscilan entre $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, con un valor promedio de $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y un promedio de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados en la estación Amaime, el mes que presenta mayores valores es noviembre, mientras que septiembre exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver Figura 66).

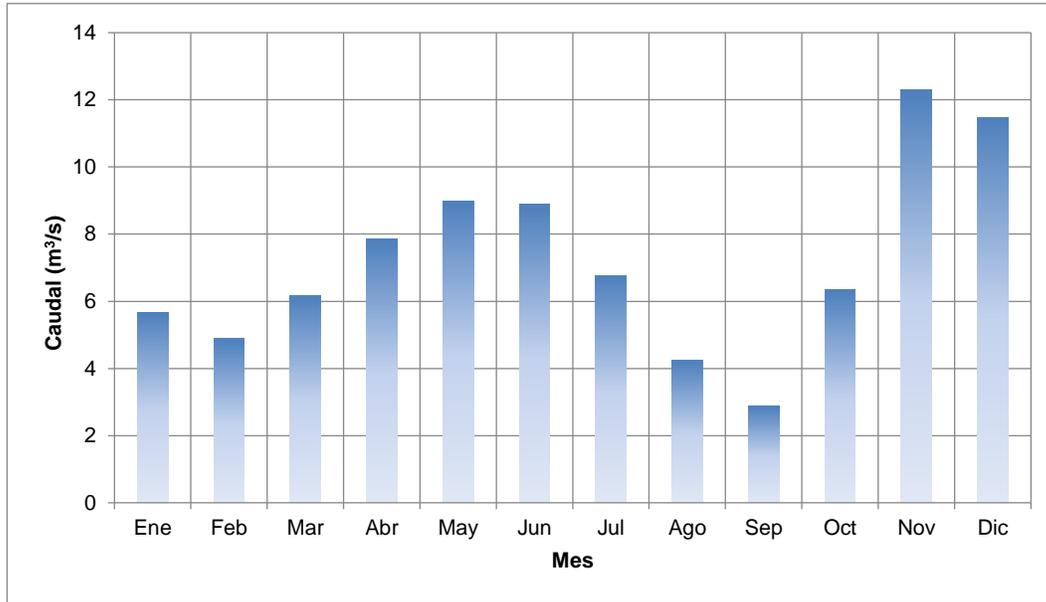


Figura 66. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.

Fuente: elaboración propia

La evaluación de la disponibilidad de agua sin regulación se representa, generalmente, a través de la curva de duración de caudales. Esta consiste en un gráfico en el cual se relacionan los caudales medios del río, ordenados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos del porcentaje total.

Las curvas de duración de caudales indican el número de días del año o periodo de tiempo (en términos de porcentaje) en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 67 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Amaime. En la Tabla 44 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1984 y 2021.

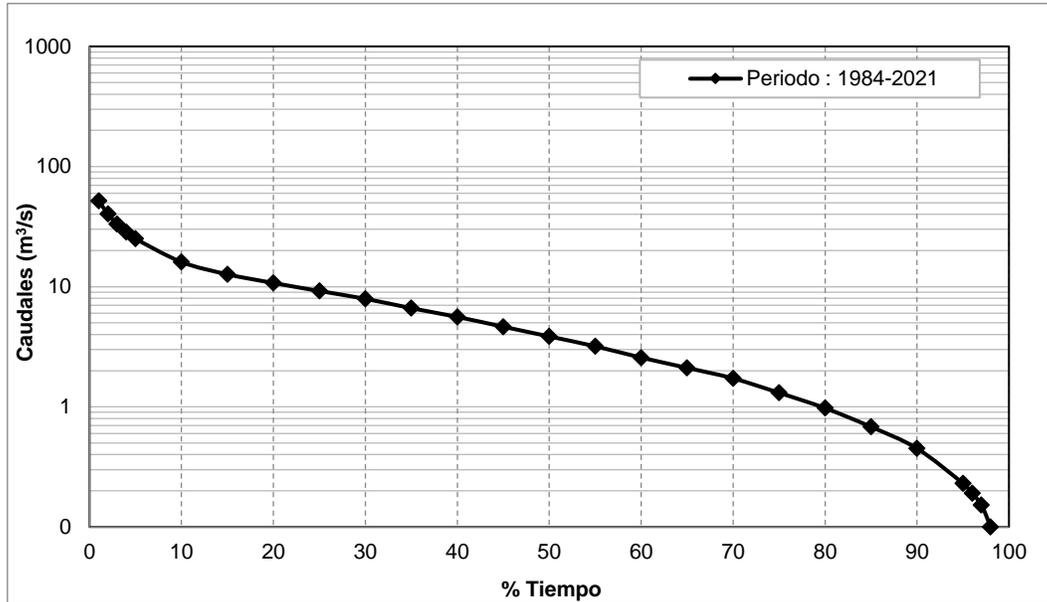


Figura 67. Curva de duración de caudales diarios en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales diarios de la estación Amaime ubicada sobre el cauce del drenaje del mismo nombre, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 13.8 m³/s, un Q50 (caudal medio) de 5.1 m³/s, un Q90 (caudal base) de 0.93 m³/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años para el periodo comprendido entre los años 1984 y 2021, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III, Log Pearson y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 68 mientras que, en la Tabla 43 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson.

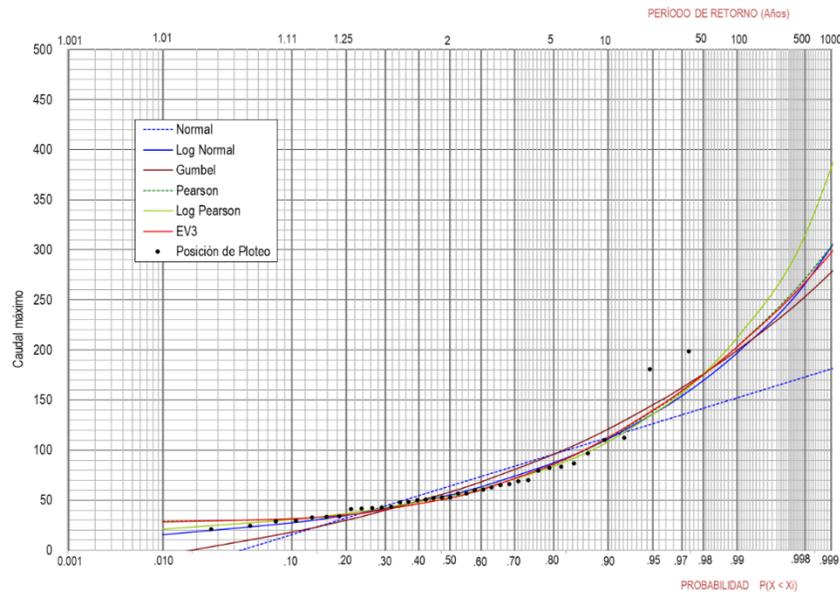


Figura 68. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.

Fuente: elaboración propia

Tabla 43. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes periodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR
2,33	70,8	65,3	57,7	59,1	60,8
5	95,8	96,0	85,7	84,0	87,4
10	112,4	121,0	111,7	108,2	111,1
25	130,2	152,5	147,2	144,4	143,6
50	141,6	176,0	174,8	175,9	169,4
100	151,9	199,2	203,0	211,4	196,7
500	172,8	253,0	270,8	313,7	265,9
chi 2	201,16	206,86	32,37	28,66	34,57

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 44 se presentan los principales caudales registrados por la estación Amaime. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 44. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021)

CAUDAL CARACTERÍSTICO		VALOR		
Caudal Medio Multianual (m ³ /s)	Máximo	82,7	Diciembre	
	Mínimo	0,1	Septiembre	
	Medio	7,2		
Caudal Instantáneo Histórico (m ³ /s)	Máximo	198,8	1984	
	Mínimo	0,01	2014	
Curva de Duración de Caudales	Caudal (m ³ /s)	% de Tiempo	10%	13,82
		en que los	25%	9,63
		caudales son	50%	5,07
			75%	2,24

Tabla 44. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021)

CAUDAL CARACTERÍSTICO		VALOR	
	igualados o excedidos	90%	0,93
	T=2,33	59,1	
	T=5	61,4	
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m ³ /s)	T=10	108,2	
	T=25	144,4	
	T=50	175,9	
	T=100	211,4	
	T=500	313,7	
	T=10000	605,9	

Fuente: elaboración propia

9.3 Variabilidad Climática

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, en conjunto con el Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT y la Gobernación del Valle, formularon el Plan Integral de Cambio Climático a nivel departamental, lanzado en el año 2019 y adoptado mediante el Decreto No 1-3-1646 en octubre del 2020. Dicho plan incluye un análisis hidrológico, por medio del modelo matemático SWAT, en el que se establecieron cambios en la producción hídrica respecto al escenario Rutas de Concentración Representativas - RCP 4.5 proyectado para el año 2040.

De acuerdo con el escenario de cambio climático de la RCP 4.5 para el año 2040 en el valle del río Cauca donde se encuentra ubicado parte del municipio de Palmira, se proyecta un pequeño aumento de la precipitación promedio para los meses de junio y julio, la segunda temporada de lluvias presentará una disminución marcada en todos los meses, en especial en septiembre; para el mes de agosto, uno de los meses con más bajas precipitaciones, se proyectan mayores disminuciones. Por otro lado, en la primera temporada de lluvia se proyectan disminuciones en marzo y mayo, mientras que, para el mes de abril, mes que presenta las mayores precipitaciones, se prevén incrementos de hasta el 15 % respecto a las condiciones actuales.

Dicho estudio presenta la calibración (Figura 69) realizada en el modelo SWAT, donde se observa similitud en el comportamiento general de las curvas; sin embargo, no es posible corroborar la calibración del modelo porque se identifican diferencias de más de 100 m³/sen los caudales simulados con respecto a los caudales medidos, por lo cual, según sea el caso, los resultados deberán ser verificados y contrastados con los estudios generados por el IDEAM u otra fuente de análisis.

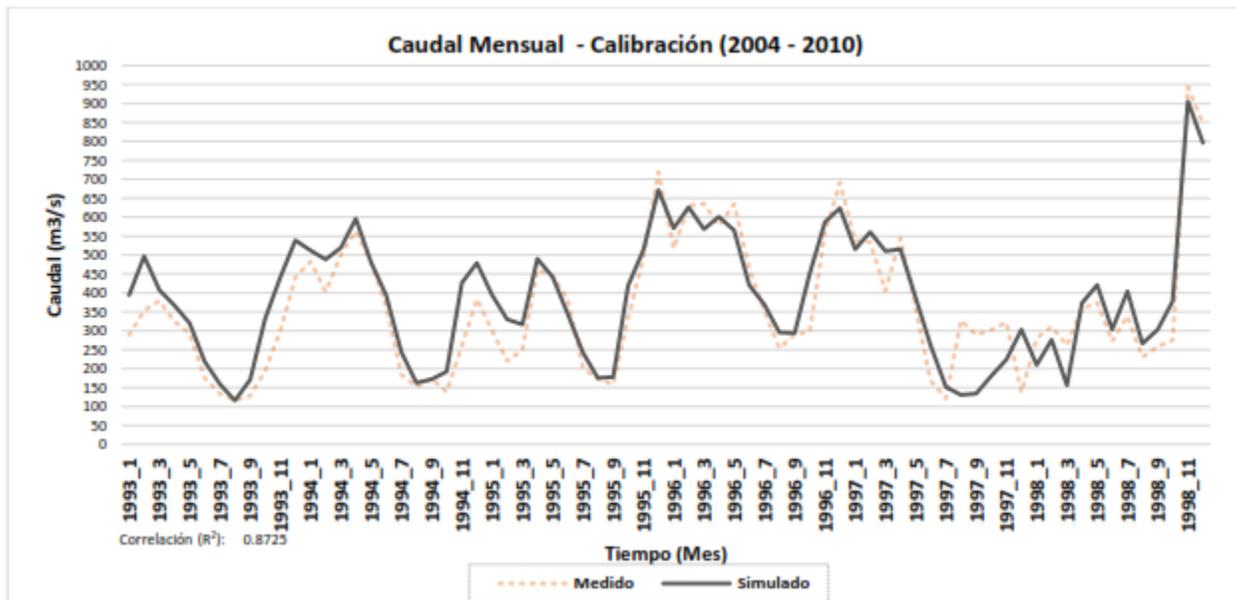


Figura 69. Calibración del modelo SWAT: Caudales medios mensuales medidos y simulados en el río Cauca. Estación Paso de la Torre. Periodo: 2004-2010.

Fuente: (CVC, Gobernación del Valle del Cauca, CIAT, 2018)

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en la Tercera comunicación nacional de cambio climático, a partir de la medición regular de las variables de precipitación, temperatura y viento, así como de las metodologías meteorológicas, generó los Nuevos Escenarios de Temperatura y Precipitación para Colombia 2011-2100 a nivel nacional y regional, como la mejor forma de aproximarse al posible comportamiento que las variables climáticas tendrán en el futuro; esto tuvo como guía los lineamientos propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) que establece que el cambio climático se evalúa a partir de cuatro escenarios diferentes, donde el comportamiento de la temperatura y la precipitación depende del forzamiento radiativo impuesto por la concentración esperada de Gases de Efecto Invernadero en las diferentes épocas de evaluación (periodos 2011- 2040; 2040 – 2070 y 2071 – 2100).

De los escenarios al año 2100 se identifica que, si bien el departamento del Valle del Cauca no presentará reducciones, será el que permanecerá con la precipitación más estable en la región Pacífica. Por su parte, los principales aumentos de precipitación se observarán hacia el sur del departamento, donde se localiza el municipio de Palmira (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015) .

Es de resaltar que, de acuerdo con lo señalado por el IDEAM, los mapas de Escenarios de Cambio Climático, presentados en la Tercera comunicación nacional de cambio climático, se consideran los más estratégicos para la planificación y el desarrollo del país, pues consolidan la respuesta de los diversos escenarios, poniéndola al servicio de los tomadores de decisiones de una manera más sencilla, pero no menos robusta científicamente, para facilitar su comprensión.

Por su parte, en el producto 3 de los Estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo al Plan de Ordenamiento Territorial - POT de Palmira y cartografía de formulación, ejecutados en el año 2018 por el Municipio de Palmira y el Departamento Nacional de Planeación, se señala que bajo el análisis de cambio climático, el escenario de amenaza por inundación seleccionado corresponde al periodo de retorno de 10 años, debido a que la recurrencia de los eventos es cada vez mayor, en comparación con otros periodos de retorno superiores (Tr 50 y 100 años).

10 ESTUDIO HIDROLÓGICO

Considerando que, en la zona de estudio del municipio de Palmira no todas las corrientes de agua cuentan con estaciones hidrométricas sobre los cauces que aporten información sobre sus caudales, se hace necesaria la implementación de modelos hidrológicos que permitan conocer los respectivos caudales máximos, asociados, para este caso, a los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años.

De esta forma, en el presente estudio los análisis hidrológicos se realizaron para todos los drenajes del municipio de Palmira y sus áreas de influencia y posteriormente se extrajeron los valores de los caudales necesarios para definir las condiciones de frontera en las modelaciones hidráulicas de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira; todo esto con el fin de determinar las cotas, las profundidades y las velocidades del agua y las áreas máximas de inundación y luego realizar la zonificación de la amenaza por inundaciones.

10.1 Generalidades teóricas del modelo

Un modelo hidrológico es una herramienta que permite representar la realidad de una manera simplificada y que posee un valor predictivo útil para la utilización de los recursos hídricos; además, sirve como orientación en la toma de decisiones para la solución de problemas que se puedan presentar en una zona determinada.

Dentro de las herramientas informáticas para la generación de modelos de simulación hidrológica usados a nivel mundial se encuentra HEC-HMS 4.9, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. El modelo HEC-HMS 4.9 fue diseñado para simular la escorrentía superficial de respuesta de una cuenca a la precipitación mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos (Figura 70), cada uno de los cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía a partir de parámetros físicos e hidrológicos (U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2020).

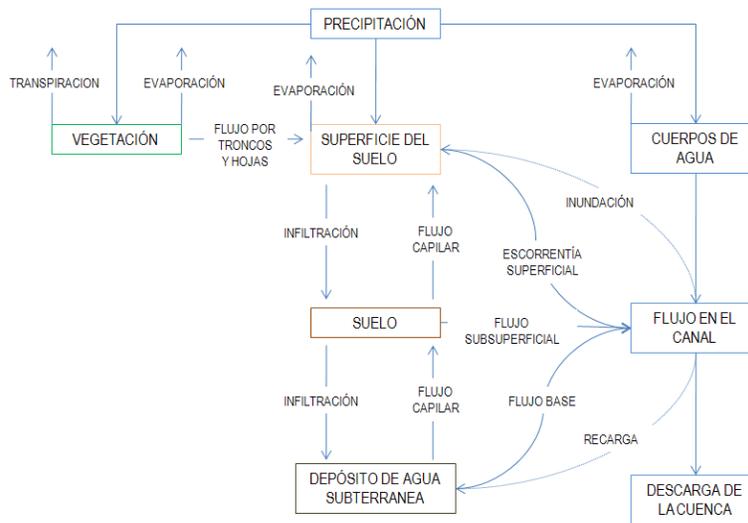


Figura 70. Esquema de las componentes hidrológicas e hidráulicas que utiliza el modelo HEC-HMS para representar una cuenca hidrográfica.

Fuente: Adaptado de HEC-HMS (2000).

HEC-HMS es un modelo de uso libre y ampliamente evaluado a nivel nacional e internacional (Cunderlink y Simonovic, 2004, Knebl et al., 2005, McColl y Aggett, 2006, Moges et al., 2006), el cual puede clasificarse como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y/o continuo, distribuido y/o agregado y de propósito general. En HEC-HMS, la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros). Entre los múltiples procedimientos hidrológicos disponibles en HEC-HMS para transformar la precipitación en escorrentía, por su parsimonia y buen desempeño en estudios y análisis anteriores, en este proyecto se han seleccionado los métodos del número de curva para la estimación de la precipitación efectiva, el hidrograma triangular del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de la precipitación de excesos en escorrentía directa y el método de tránsito de Muskingum para el tránsito hidrológico de la creciente entre tramos (Rodríguez S. & Gonzalez P., 2007).

10.1.1 Variables y parámetros de modelación

La efectividad de la simulación de un proceso lluvia-escorrentía depende fundamentalmente de la calidad de la información de entrada, tanto de la lluvia como de las características físicas de la cuenca o área de influencia. A pesar de las dificultades que generalmente se presentan para conseguir información de calidad, la tendencia en hidrología es al uso de estos modelos, específicamente por la capacidad para simular eventos que no han sido registrados históricamente, pero que son dependientes de parámetros físicos factibles de medir con la tecnología desarrollada en los sistemas de comunicación modernos. Esto los hace más robustos que los modelos estocásticos que dependen básicamente de la historia.

El modelo HEC-HMS permite desarrollar la implementación de la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), el cual establece básicamente cinco

componentes de interés. A partir de la precipitación, se calculan las pérdidas como función de la infiltración para obtener un hidrograma unitario, que luego, mediante el rastreo hidrológico, es llevado a diferentes puntos de la cuenca para hacer cálculos generales de caudales. El modelo tiene, además, un algoritmo matemático de optimización de los parámetros básicos que permite realizar la calibración del modelo sobre la cuenca.

Precipitación: La Lluvia es parte fundamental en el sistema hidrológico y su representación adecuada en los modelos de Precipitación - Escorrentía es muy importante, pero con frecuencia difícil. La variación temporal y espacial de la lluvia afecta directamente el comportamiento de la escorrentía, pues es el resultado directo una de otra. Los eventos de lluvia son medidos en estaciones localizadas estratégicamente, para luego ser generalizados en el área de influencia mediante promedios. La lluvia puede obtenerse con procesos sencillos, como promedios de series históricas o con medidas a tiempo real que requiere técnicas de medición más sofisticadas.

Distribución espacial de la precipitación: Lo más común en la evaluación espacial de la lluvia es promediar las medidas de pluviómetros a lo largo y ancho de la cuenca, ya sea por falta de tecnologías especiales para la medición directa e instantánea de eventos, por falta de recursos para el desarrollo e implementación de nuevas técnicas de medición o por desconocimiento de métodos estadísticos apropiados. Tres métodos de evaluación espacial de la lluvia se han usado con frecuencia: Promedio Aritmético de magnitudes de lluvia puntuales, los Polígonos de Thiessen y el Método de Isoyetas. Lo más apropiado para la aplicación de estos métodos sería una alta densidad de estaciones de lluvia en el área de influencia del sector en estudio.

Distribución temporal de la precipitación: Los eventos de lluvia que van a ser simulados deben ser distribuidos tanto espacialmente como en forma temporal. La distribución temporal es expresada generalmente en forma gráfica o analítica mediante hietogramas. Para conseguir esta distribución se debe desarrollar un análisis estadístico que relacione el tiempo con los incrementos de lluvia. Se debe agrupar los eventos de acuerdo a la duración, pues las lluvias se distribuyen en forma diferente según sea su duración. Por esta razón no es lógico distribuir una lluvia de 24 horas con una distribución de duraciones pequeñas.

Precipitación Efectiva y Pérdidas de Precipitación: Se hace referencia con esto al destino del volumen de lluvia total; por un lado, las pérdidas son agrupadas en los fenómenos como la infiltración, evapotranspiración, evaporación, almacenamiento en depresiones topográficas e Intercepciones. Por otro lado, la lluvia efectiva, es aquella que se convierte en escorrentía directa.

Infiltración: Como parte componente de las pérdidas de precipitación, la infiltración es la cantidad de lluvia que llega al suelo, sobrepasa el estrato superficial, siguiendo caminos subterráneos más lentos para conformar en algún momento parte del flujo base. Este es un parámetro muy importante en la simulación de los modelos P-E, sirviendo de patrón para evaluar el resto de parámetros que componen las pérdidas de lluvia.

El software HEC-HMS basa el cálculo de pérdidas de lluvia en la infiltración, teniendo opciones como: pérdidas iniciales uniformes, en tiempo y espacio, pérdidas no uniformes y, en general, la metodología del SCS. El método del SCS, empleado en el presente estudio, tiene como parámetro principal Número de Curva (CN), para el cálculo de las pérdidas. Este parámetro es función del tipo de suelo, tipo de cobertura de la superficie (uso del suelo) y condición de humedad antecedente. La formulación de este modelo se presenta de la siguiente manera:

Número de curva: Siguiendo el proceso, necesario para la caracterización de las cuencas del sistema hidrológico en estudio, se hace un reconocimiento sobre el tipo de superficie que cubre el área de las mismas, utilizando como herramienta el plano temático de uso del suelo y el grupo hidrológico el cual se basa en el tipo de suelo, geomorfología y geología. En forma inicial, los suelos son agrupados en categorías, dependientes del potencial de escorrentía y de su capacidad de infiltración. La agrupación de los suelos se hace teniendo en cuenta la siguiente clasificación (Chow, 1994):

Grupo A Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.

Grupo D Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

De acuerdo con el método del SCS, se deben ajustar las características de la cuenca a los requerimientos, condiciones y clasificación básica del método.

Para el cálculo de las cantidades de escorrentía directa de una lluvia, el valor de S se relaciona con el número de curva de escorrentía, CN, según la siguiente expresión:

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

La condición de humedad antecedente (AMC, por sus siglas en inglés) o condición promedio o normal de potencial de escorrentía (AMC II), para condición mínima o seca de potencial de escorrentía (AMC I) o condición máxima o húmeda de potencial de escorrentía (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse empleando las siguientes expresiones:

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

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

En la Tabla 45 se muestra el rango para las condiciones de humedad antecedente para cada clase. Los valores de CN para varios tipos de uso de la tierra se presentan en la Tabla 46. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto.

Tabla 45. Clasificación de clases de humedad antecedente (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación Inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0,5	Menor que 1,4
II	0,5 a 1,1	1,4 a 2,1
III	Sobre 1,1	Sobre 2,1

Fuente: Soil Conservation Service, 1972 en Tabla 4.2, pág. 4.12 (Chow, 1994)

Tabla 46. Valores de CN para varios tipos de uso del suelo

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : 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: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	39	61	74	80
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	49	69	79	84
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	89	92	94	95
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y a1cantarillados ⁵	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

¹Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

² Una buena cubierta está protegida por pastizales, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

³ Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

⁴ Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva. S En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Fuente: Soil Conservation Service (Chow, 1994)

Una vez se haya establecido los valores de CN para cada tipo de suelo y tipo de cobertura, se procede a estimar la magnitud de las áreas que poseen estas características a fin de estimar el valor globalizado de este parámetro por cuenca.

Cálculo del caudal de escurrimiento: La máxima retención potencial (S) después de iniciada la escorrentía está dada por:

$$S = 100/CN$$

Las abstracciones iniciales se calculan como $Ia=0.2S$. Y por último, la escorrentía directa es calculada como una función de la lluvia (P), de Ia y de S:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P + 0.8S}$$

La evaluación de la infiltración se estima por el método de Holtan que se conceptualiza con base a la siguiente ecuación:

$$Fp = GI \cdot A \cdot SA^\alpha + fc$$

En donde Fp es la capacidad de infiltración, GI es un índice de crecimiento de la vegetación, SA es el volumen potencial de almacenamiento en el estrato superficial, fc es la razón constante de infiltración y α es un parámetro empírico que generalmente toma el valor de 1.4.

Como última alternativa se encuentra el modelo de Green-Amp, en el cual se hace el cálculo de la infiltración acumulada usando la siguiente ecuación:

$$F(t) = \frac{PSIF \cdot DTHETA}{f(t)/XKAST - 1}$$

Donde $F(t)$ es la infiltración acumulada, $f(t)$ es la razón de infiltración, $XKAST$ es la conductividad hidráulica saturada, $DTHETA$ es el déficit volumétrico de humedad y $PSIF$ es la succión del frente húmedo. Las últimas tres variables son los parámetros del modelo que deben ser calibrados.

Hidrograma unitario: Para la determinación del hidrograma unitario, el que puede ser determinado mediante tres alternativas, el hidrograma de Clark, el hidrograma de Snyder y el método del SCS.

En el método de Clark se utilizan los conceptos del hidrograma instantáneo para definir un único hidrograma para la cuenca analizada. Los parámetros que se deben calibrar son el tiempo de concentración (t_c), el coeficiente de almacenamiento (R) y una curva tiempo-área que es expresada como una proporción del tiempo de concentración.

El método de Snyder, es un proceso que se basa en las características de la cuenca para la determinación del hidrograma unitario. Los parámetros a calibrar son el tiempo de desfase (t_p) y el coeficiente de almacenamiento (C_p).

El método del SCS, usado en HEC-HMS, se basa en el desarrollo de un hidrograma unidimensional obtenido del análisis de muchos hidrogramas unitarios para pequeñas cuencas rurales que representan diferentes zonas geográficas. El parámetro que debe ser calibrado es el tiempo de concentración (t_c).

Tiempo de concentración: Es el tiempo que demora una partícula de agua desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de interés. Corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. También se puede definir como el lapso de tiempo entre el inicio de la precipitación y el momento en que toda el área de drenaje contribuye al escurrimiento superficial.

Existe diversidad de métodos y propuestas para la estimación del tiempo de concentración en cuencas no instrumentadas, el valor promedio en la práctica se asemeja a los resultados de las ecuaciones propuestas como la de Kirpich (Upegui & Gutierrez, 2010) la cual se establece mediante la siguiente formula:

$$T_c = 0.0078L_p^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración expresado en minutos

L_p : es la longitud del curso de agua más largo (km),

S : la pendiente promedio del cauce principal (m/m)

Rastreo de inundaciones: El modelo HEC-HMS posee una opción general para hacer rastreo de inundaciones; su único enfoque en este aspecto es el rastreo hidrológico. Dentro de esta concepción se tienen: el método Muskingum-Cunge, el método de rastreo de onda cinemática, el método Muskingum, el método "straddle / stagger" y los métodos de almacenamiento, como los métodos modificado de "puls", de profundidad normal y el de niveles de embalse. El modelo tiene la opción de optimizar los parámetros de los tres últimos métodos.

10.2 Implementación del modelo hidrológico

Dentro de los requerimientos de información o datos de entrada del modelo hidrológico HEC - HMS se encuentran la siguiente información:

- Cartografía básica (red hídrica, curvas de nivel, límite de divisoria de aguas)
- Cartografía temática (uso y cobertura del suelo, tipo de suelos)
- Información precipitación total de las estaciones más cercanas
- Hietogramas de precipitación.
- Información de caudales base.

10.2.1 Delimitación y características morfométricas de las unidades de modelación

Para la delimitación de las cuencas de las corrientes de agua en estudio con influencia en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira; se empleó cartografía base (curvas de nivel y drenajes) y fotografías satelitales disponibles (Figura 71).

Posteriormente se procedió a determinar las respectivas características morfométricas de las unidades de modelación (Anexo 5), tales como la longitud del cauce principal, el valor de las cotas aguas arriba y aguas abajo del cauce, la pendiente del cauce principal y los tiempos de concentración (ver Tabla 47), información requerida para el estudio hidrológico.

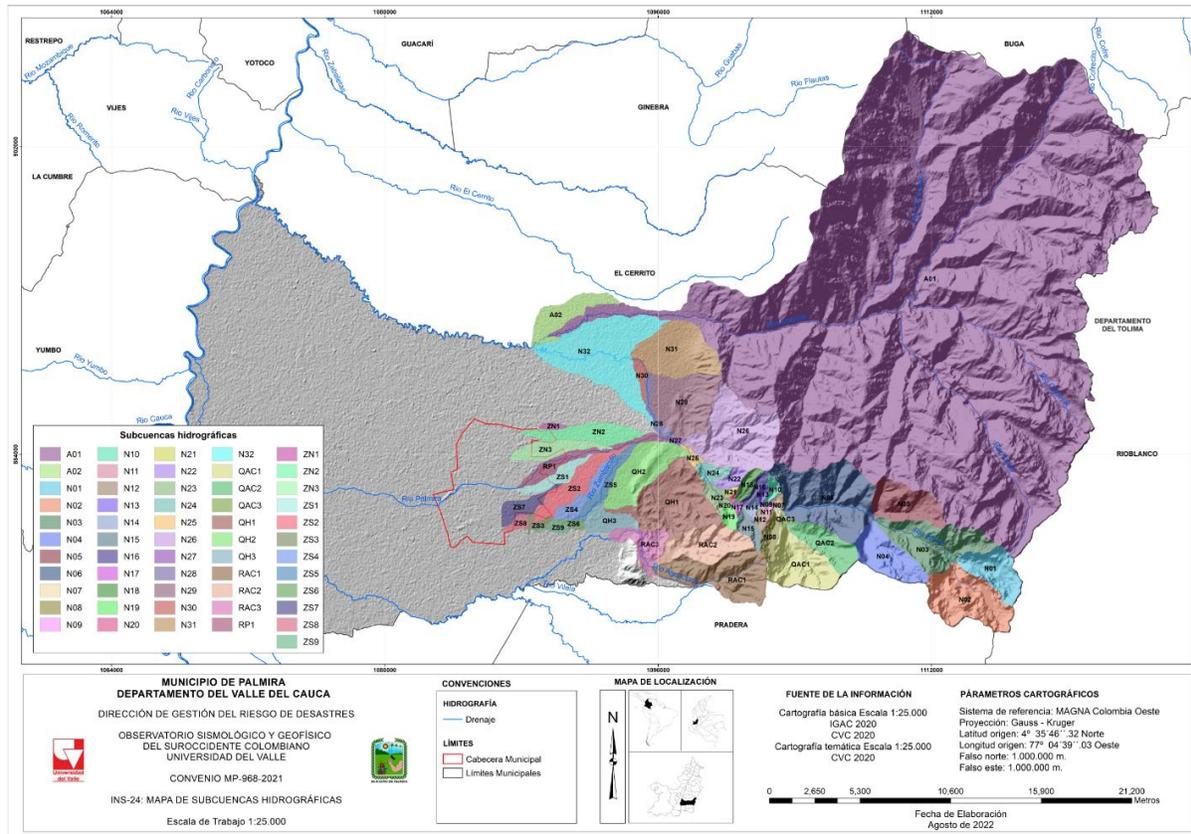


Figura 71. Subcuencas hidrográficas en estudio municipio de Palmira
 Fuente: elaboración propia

Tabla 47. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés

ID	Subcuenca	No.	Área (Km ²)	Longitud Cauce principal (Km)	Cota máx. (msnm)	Cota mín. (msnm)	Tiempo de concentración (min)
1	Río Amaime Estación Amaime	A01	478,33	44,56	3750	1023	406
2	Río Amaime hasta Barrio Azul	A02	5,97	1,57	1023	1018	123
3	Quebrada Santa Rita	N01	6,77	4,61	3950	3340	65
4	Quebrada Casa de Teja	N02	12,62	3,48	3820	3325	54
5	Río Nima	N03	12,36	5,62	3325	2360	70
6	Quebrada Los Cuervos	N04	8,03	5,67	3980	2360	60
7	Quebrada Golondrinas	N05	8,06	4,84	3950	2330	52
8	Río Nima	N06	19,29	6,40	2360	1720	91
9	Río Nima	N07	0,55	0,52	1720	1660	18

Tabla 47. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés

ID	Subcuenca	No.	Área (Km ²)	Longitud Cauce principal (Km)	Cota máx. (msnm)	Cota mín. (msnm)	Tiempo de concentración (min)
10	Quebrada Las Mirilas	N08	2,29	3,55	2640	1660	44
11	Río Nima	N09	0,18	0,62	1900	1630	15
12	Río Nima	N10	0,93	1,93	2350	1630	27
13	Drenaje Sin Nombre	N11	0,33	0,90	1955	1595	16
14	Cañada Los Amores	N12	0,61	1,37	2555	1596	18
15	Río Nima	N13	0,57	1,47	2250	1595	21
16	Quebrada Careperro	N14	0,73	1,14	1595	1520	33
17	Cañada El Cofre	N15	1,94	2,97	2500	1520	37
18	Río Nima	N16	0,94	2,66	2410	1520	34
19	Quebrada El Cofre	N17	0,31	0,77	1780	1480	15
20	Drenaje Sin Nombre	N18	1,49	1,93	1990	1480	30
21	Río Nima	N19	1,05	1,82	2000	1465	28
22	Drenaje Sin Nombre	N20	0,25	1,28	1780	1445	22
23	Cañada Naranjales	N21	0,31	1,17	1830	1445	20
24	Río Nima	N22	1,45	2,26	1930	1385	34
25	Río Nima	N23	1,51	1,58	1465	1385	44
26	Río Nima	N24	1,73	1,36	1385	1325	42
27	Quebrada Los Negros	N25	0,69	1,72	1325	1245	47
28	Río Nima	N26	16,70	7,58	2390	1245	87
29	Río Nima	N27	0,36	1,10	1245	1202	36
30	Quebrada Honda	N28	1,62	4,52	1202	1078	103
31	Río Nima	N29	11,91	7,11	1505	1078	110
32	Quebrada Aguazul o Anasco	N30	1,17	1,48	1078	1064	72
33	Quebrada Tablones	N31	11,94	5,97	1745	1064	80
34	Río Nima	N32	21,03	9,46	1064	1018	303
35	Quebrada Agua Clara	QAC1	9,52	5,27	2980	1790	62
36	Quebrada La María	QAC2	5,78	4,89	3140	1790	55
37	Quebrada Agua Clara	QAC3	0,40	0,80	1790	1720	24
38	Quebrada La Honda	QH1	15,51	11,27	1895	1037	145
39	Quebrada El Guavito	QH2	9,32	3,82	1096	1037	117
40	Quebrada La Honda	QH3	3,31	2,67	1037	1022	127
41	Río Aguaclara	RAC1	12,89	7,54	2695	1190	81
42	Quebrada Chontaduro	RAC2	8,28	7,19	1350	1190	159
43	Río Aguaclara	RAC3	4,60	6,26	1190	1042	140
44	Río Palmira	RP1	4,27	10,60	1202	1004	202
45	Acequia La Rica	ZN1	0,51	0,94	1041	1032	53
46	Zanjón Zamorano	ZN2	5,78	8,26	1128	1017	193
47	Zanjón Mirriñao	ZN3	4,08	6,50	1091	1007	164
48	Zanjón Romero	ZS1	2,74	5,78	1066	1004	157
49	Zanjón Beringo	ZS2	5,79	6,54	1076	1004	176
50	Zanjón Beringo, Beringuito y San José Final	ZS3	0,85	2,37	1012	999	113
51	Zanjón Beringuito	ZS4	2,98	4,03	1019	1012	244
52	Río Zumbaculo	ZS5	2,96	6,70	1126	1019	159
53	Acequia San José	ZS6	0,62	1,81	1022	1012	94
54	Área Aferente Acequia Barrancas	ZS7	2,73	4,93	1032	989	148
55	Acequia Barrancas	ZS8	0,87	1,17	998	989	67
56	Acequia Barrancas	ZS9	0,82	2,48	1016	1000	109

Fuente: elaboración propia

10.2.2 Esquematzación de las cuencas

Definida las zonas de estudio, procesada la información requerida para la implementación del modelo y evaluada la calidad de la misma, se procede a la esquematización de las cuencas, la evaluación de características morfométricas e hidrológicas y las corridas del modelo hidrológico como se muestra a continuación.

Para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de determinada cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma (basin model), que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En la Figura 72 se presenta un esquema general de las cuencas en el modelo HEC-HMS 4.9.

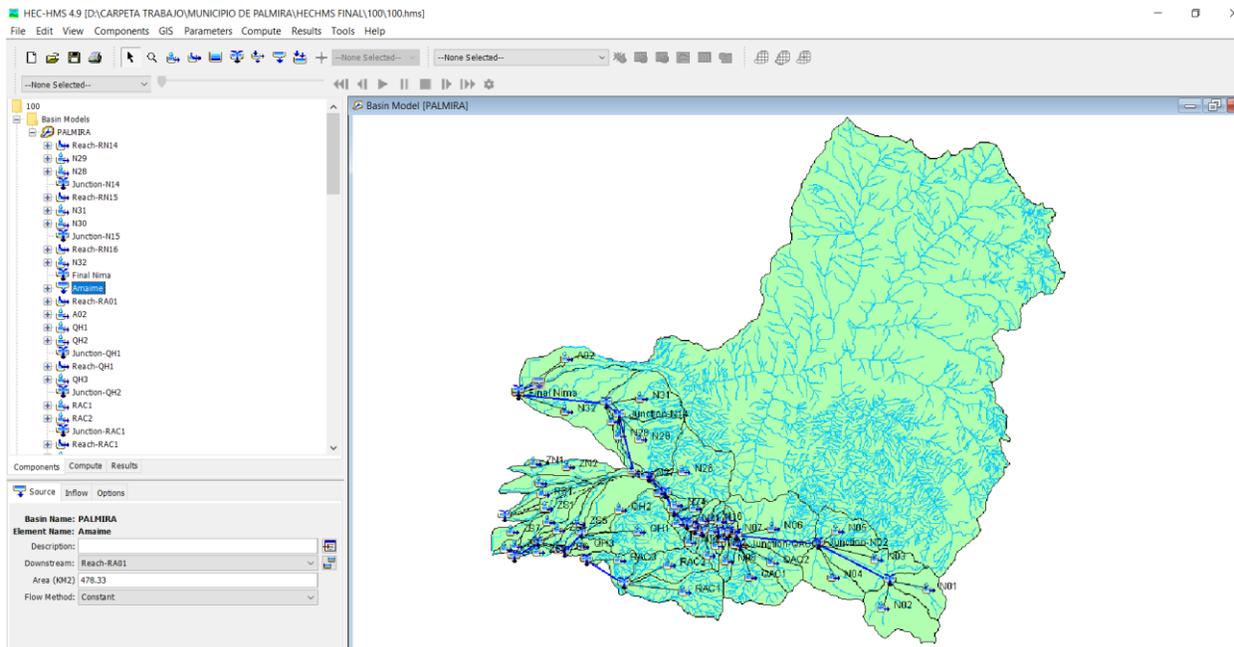


Figura 72. Esquema de las cuencas en estudio en el modelo HEC-HMS 4.9

Fuente: elaboración propia

10.2.3 Suelos

En el año 2014 la CVC y el IGAC, mediante el Convenio Interadministrativo N°CVC-087-IGAC-4488, realizaron el levantamiento semidetallado de suelos a escala 1:25000 en 37 cuencas hidrográficas ubicadas en 41 municipios del norte, centro y sur del departamento del Valle del Cauca, priorizadas por la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014) (ver Anexo 6), incluida el área de trabajo del presente estudio, correspondiente al municipio de Palmira. Dicho levantamiento identifica alternativas de uso y manejo sostenible de los suelos, como herramienta básica de trabajo en la elaboración de instrumentos de planificación y gestión a nivel municipal, departamental y regional.

De esta forma, entre otros, presenta el origen, la evolución y la distribución de los suelos en el paisaje del departamento.

A continuación, en la Tabla 48 y en la Figura 73 se presentan los suelos existentes en el área de estudio del municipio de Palmira en el Valle del Cauca y sus respectivos componentes y características.

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Cuerpo de agua CA	133,2
Litología Componente	Cuerpo de agua Cuerpo de agua	
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada MGB	2350,5
Litología Componente	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas de mediano y bajo grado (anfíbolitas-esquistos) y en algunos sectores (turba ligeramente descompuesta) Inasociación: Typic Hapludands o Typic Haplofibrists o Lithic Udorthents o Typic Endoaquands o Afloramientos rocosos	
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada; No hay desarrollo de suelos MGA	4979,0
Litología Componente	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y/o rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y en algunos sectores (diabasas) Inasociación: Typic Hapludands o Afloramientos rocosos o Lithic Udorthents	
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta SO	98,4
Litología Componente	Coluviones heterométricos Consociación: Typic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta ES	247,1
Litología Componente	Coluviones heterométricos Consociación: Udic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica Unidad Cartográfica de Suelo	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta (ES-PR)	88,9
Litología	Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Componente	Complejo: Udic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esquelal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	GU	22,5
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Consociación: Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada	
Unidad Cartográfica de Suelo	AM	602,7
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Consociación: Typic Ustifluvents, francosa gruesa, no ácida, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MN	587,7
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Consociación: Cumulic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta; muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(MN-PL)	232,8
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Complejo: Cumulic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica; Pachic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	PL	2415,3
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Consociación: Pachic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, texturas moderadamente finas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLC	24099,0
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos)	
Componente	Asociación: Typic Fulvudands; Typic Udorthents	
Característica	Muy profundos, texturas moderadamente finas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad alta; muy profundos, texturas medias a moderadamente gruesas, bien drenados, fuertemente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLB	208,2
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos)	
Componente	Asociación: Typic Fulvudands; Humic Eutrudepts	

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Característica	Muy superficiales a superficiales, texturas moderadamente gruesas, cascajos y pedregosas y moderadamente finas, gravillosas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; superficiales, texturas moderadamente finas gravillosas	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQH	103,3
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Asociación: Typic Eutrudepts; Typic Udifluvents	
Característica	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	CE	112,4
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, esqueletal francosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta; superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(CE-NM)	98,2
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, esqueletal francosa sobre fragmental, isohipertérmica; Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales limitados por saturación de sodio mayor de 15%, moderadamente drenados, fuertemente alcalinos, fertilidad muy baja	
Unidad Cartográfica de Suelo	LF	28,7
Litología	Aluviones medianos	
Componente	Consociación: Sodic Calcisterts, fina, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales, texturas moderadamente finas gravillosas, imperfecta a pobremente drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos a profundos, texturas moderadamente finas, imperfectamente drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQJ	33,8
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Complejo: Aquertic Hapludalfs; Aquic Argiudolls; Aeríc Endoaqualfs	
Característica	Muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas, bien drenados, muy fuerte a ligeramente ácidos, fertilidad baja	
Unidad Cartográfica de Suelo	MRC	7256,0
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	
Componente	Asociación: Lithic Ustorthents; Humic Dystrustepts; Typic Haplustepts	
Característica	N/A	
Unidad Cartográfica de Suelo	MEA	8604,8
Litología	Rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y/o rocas ígneas plutónicas félsicas, faneríticas y porfiríticas (cuarzodiorita), cubiertas parcialmente por depósitos piroclásticos de ceniza volcánica	

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Componente	Inasociación: Afloramientos rocosos o Lithic Cryorthents o Lithic fulvicryands o Typic Haplocryands	
Característica	No hay desarrollo de suelos; muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas, bien drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MRD	517,4
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfíricas (diabasas) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	
Componente	Complejo: Afloramientos rocosos; Lithic Ustorthents; Humic Dystrustepts	
Característica	Profundos a superficiales, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; superficiales, texturas moderadamente finas y finas gravilosas, bien drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQD	3888,6
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfíricas (diabasa) y en algunos sectores (basaltos)	
Componente	Asociación: Typic Dystrudepts; Lithic Udorthents	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(FL-GU)	0,1
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, arenosa, isohipertérmica; Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	AR	1161,4
Litología	Aluviones finos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, esqueletal arenosa, isohipertérmica; Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(AR-PR)	317,2
Litología	Aluviones finos y coluviones heterométricos	
Componente	Complejo: Vertic Haplustalfs, fina, esmectítica, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(AR-NM)	51,9
Litología	Aluviones finos y coluviones heterométricos	
Componente	Complejo: Vertic Haplustalfs, fina, esmectítica, isohipertérmica; Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta.	5031,7

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Unidad Cartográfica de Suelo	MLA	
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfíricas (diabasas)	
Componente	Asociación: Typic Hapludands; Typic Eutrudepts; Typic Hydrudands	
Característica	Profundos, texturas moderada mente finas, bien drenados, muy fuerte a moderadamente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; profundos, texturas moderadamente gruesas, moderada a bien drenados, moderada a ligeramente ácidos	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLD	3634,5
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas dinamo-termales de mediano grado (neis, anfibolitas)	
Componente	Asociación: Typic Hapludands; Andic Dystrudepts	
Característica	Superficiales a moderadamente profundos, texturas finas, pedregosas, moderadamente bien drenados, moderadamente ácidos a neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLE	476,7
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Consociación: Typic Argiudolls	
Característica	Superficiales a muy superficiales, texturas medias a finas gravillosas, bien drenados, ligera a moderadamente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales, texturas moderadamente finas y moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLG	596,1
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Asociación: Inceptic Hapludalfs; Entic Hapludolls	
Característica	Superficiales a muy superficiales, texturas medias gravillosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales y superficiales, texturas moderadamente gruesas y gruesas, bien drenados, ligeramente ácidos	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQI	523,0
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos)	
Componente	Complejo: Entic Hapludolls; Typic Udifluvents	
Característica	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	NM	1688,6
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(NM-PR)	406,2
Litología	Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, neutros, fertilidad muy alta	150,2

Tabla 48. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Unidad Cartográfica de Suelo	GL	
Litología	Aluviones finos	
Componente	Consociación: Udic Calciusterts, fina, vermiculítica, isohipertérmica	
Característica	Superficiales, texturas moderadamente finas a medias gravilosas, pedregosas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad alta; muy profundos, texturas medias a moderadamente finas, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad muy alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLF	370,6
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos) y depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica)	
Componente	Asociación: Typic Hapludolls; Typic Fulvudands; Typic Endoaquands	
Característica	Superficiales, texturas moderadamente finas y finas pedregosas, moderadamente drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, texturas finas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada	
Unidad Cartográfica de Suelo	PRA	2135,3
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos) cubiertos parcialmente por depósitos superficiales piroclásticos (ceniza volcánica)	
Componente	Asociación: Ultic Haplustalfs; Humic Dystrustepts; Typic Haplustands	
Característica	Zona urbana	
Unidad Cartográfica de Suelo	ZU	680,5
Litología	Zona urbana	
Componente	Zona urbana	

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014)

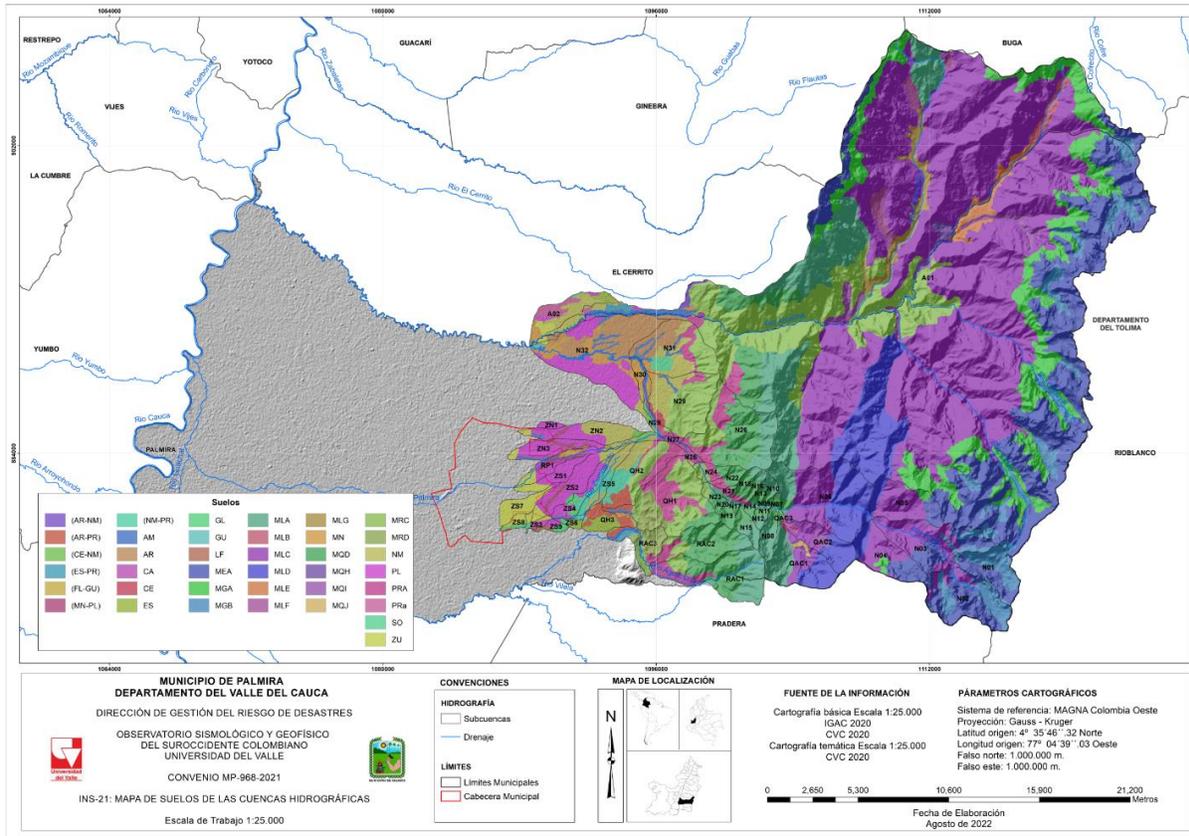


Figura 73. Suelos de las cuencas hidrográficas en estudio

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014)

10.2.4 Usos del suelo – Número de escurrimiento

Para el cálculo del número de curva de las cuencas hidrográficas, CN, se utilizó la información de uso y cobertura del suelo suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Con base en la información de cobertura y grupo hidrológico de los suelos del área se procesa para obtener el valor de CN, el cual fue ponderado con respecto al área total de la unidad de codificación para obtener el CN ponderado para cada unidad.

Con base en la cartografía temática se estableció que la cobertura del suelo que predomina en el área de estudio corresponde a Bosque mixto denso alto de tierra firme con 18,1%, seguido del Pasto cultivado con 14,9% (ver Tabla 49). En la Figura 74 se observa el uso del suelo de la zona de estudio de acuerdo con las coberturas identificadas.

Tabla 49. Cobertura del suelo de la zona de estudio

Cobertura	Área (Ha)	Área (%)
Afloramientos rocosos	47,0	0,06
Arbustal y matorral abierto alto de tierra firme	1528,5	2,07
Arbustal y matorral abierto bajo de tierra firme	2641,0	3,58
Arbustal y matorral abierto bajo inundable	15,7	0,02
Arbustal y matorral abierto bajo paramuno	635,5	0,86

Tabla 49. Cobertura del suelo de la zona de estudio

Cobertura	Área (Ha)	Área (%)
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	810,5	1,10
Arbustal y matorral denso alto inundable	0,5	0,00
Arbustal y matorral denso bajo de tierra firme	1649,8	2,23
Arbustal y matorral denso bajo inundable	31,6	0,04
Áreas de cultivo con suelo desnudo	888,4	1,20
Áreas de deslizamientos	24,1	0,03
Áreas naturales desnudas	260,2	0,35
Áreas quemadas	103,9	0,14
Arenal	11,0	0,01
Bosque de guadua	283,4	0,38
Bosque mixto abierto alto de tierra firme	2952,4	4,00
Bosque mixto abierto bajo de tierra firme	1496,2	2,03
Bosque mixto denso alto de tierra firme	13363,5	18,09
Bosque mixto denso bajo de tierra firme	1445,8	1,96
Bosque mixto fragmentado con pastos y cultivos	1390,3	1,88
Bosque mixto fragmentado con vegetación natural	2082,7	2,82
Bosque mixto relictual	102,1	0,14
Café	122,4	0,17
Café-Otros arbóreos	272,0	0,37
Café-Otros cultivos	113,7	0,15
Café-Plátano	135,0	0,18
Caña de azúcar	6632,9	8,98
Canal	17,3	0,02
Cebolla de rama	248,1	0,34
Embalse	2,7	0,00
Estanques artificiales	73,0	0,10
Eucalipto	950,4	1,29
Eucalipto cosechado	220,3	0,30
Guanábano	0,3	0,00
Helechal	7,0	0,01
Herbazal natural abierto rocoso	179,3	0,24
Herbazal natural denso arbolado	763,5	1,03
Herbazal natural denso con arbustos	4025,5	5,45
Herbazal natural denso no arbolado	5935,0	8,04
Isla	1,2	0,00
Lagunas	215,0	0,29
Limón	1,1	0,00
Maíz	25,1	0,03
Misceláneo de árboles frutales	6,8	0,01
Misceláneo de Cítricos	14,4	0,02
Misceláneo de cultivos y espacios naturales	67,0	0,09
Misceláneo de pastos y cultivos	1236,1	1,67
Misceláneo de pastos y espacios naturales	32,9	0,04
Otras asociaciones de cultivos	2,0	0,00
Otras superficies artificiales con construcción	400,2	0,54
Otras superficies artificiales sin construcción	219,6	0,30
Otras superficies pantanosas	11,9	0,02
Otros cuerpos de agua	16,2	0,02
Otros cultivos arbóreos plantados abiertos	23,2	0,03
Otros cultivos arbóreos plantados densos	185,5	0,25
Otros cultivos arbustivos plantados abiertos	417,1	0,56
Otros Cultivos confinados	8,0	0,01
Otros cultivos herbáceos plantados densos	647,8	0,88
Pasto cultivado	11017,5	14,92
Pasto cultivado arbolado	396,1	0,54
Pasto cultivado enmalezado	3978,1	5,39
Piña	49,7	0,07
Pino	243,0	0,33

Tabla 49. Cobertura del suelo de la zona de estudio

Cobertura	Área (Ha)	Área (%)
Pino cosechado	40,0	0,05
Plátano	7,8	0,01
Ríos	194,0	0,26
Superficies de inundación temporal	22,1	0,03
Tomate-Habichuela	1,3	0,00
Turberas	1,2	0,00
Vegetación secundaria o transición	2108,3	2,85
Zonas urbanas continuas	426,5	0,58
Zonas urbanas discontinuas	382,6	0,52

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía CVC 2020 y UNIVALLE 2021

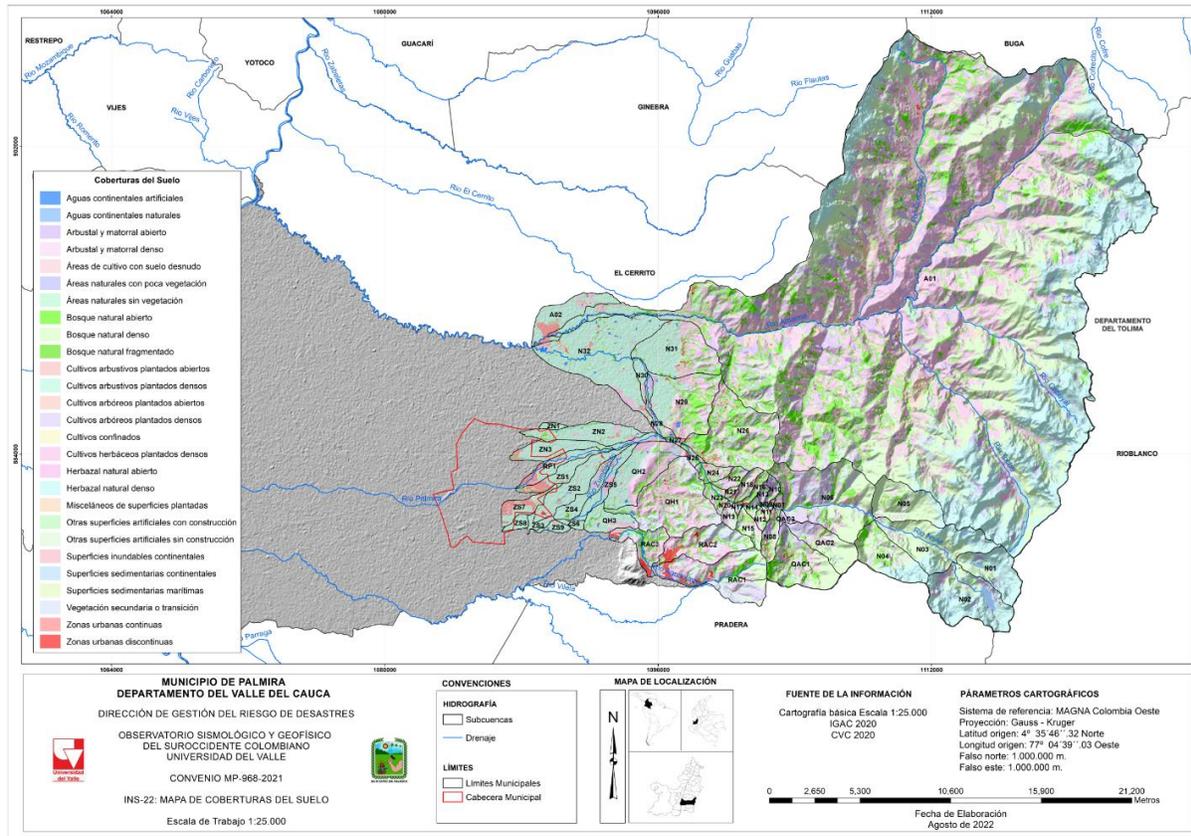


Figura 74. Uso y cobertura del suelo de las cuencas hidrográficas en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía CVC 2020 y UNIVALLE 2021

Una vez ponderados las coberturas de uso del suelo con número de curva se estimaron los valores correspondientes al CN, teniendo como referencia los valores para varios tipos de suelo (Chow, 1994). En la Figura 75 y en la Tabla 50 se presentan los resultados obtenidos.

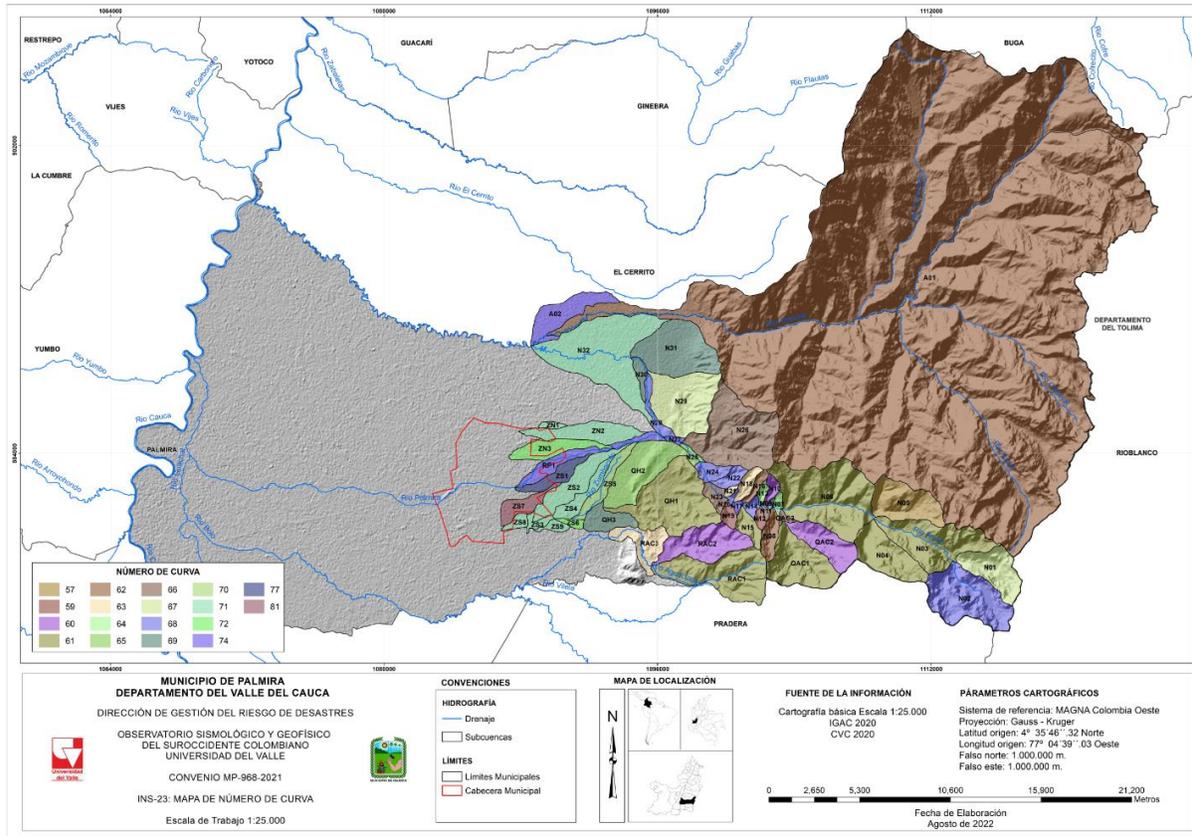


Figura 75. Valores de CN cuencas hidrográficas en estudio.
 Fuente: elaboración propia

Tabla 50. Valores de CN para las cuencas hidrográficas en estudio

ID CUENCAS	CN	ID CUENCAS	CN
A01	62	N26	66
A02	74	N27	74
N01	67	N28	68
N02	68	N29	67
N03	61	N30	69
N04	61	N31	69
N05	57	N32	71
N06	61	QAC1	61
N07	64	QAC2	60
N08	62	QAC3	66
N09	69	QH1	61
N10	60	QH2	65
N11	66	QH3	69
N12	59	RAC1	61
N13	64	RAC2	60
N14	68	RAC3	63
N15	61	RP1	74
N16	62	ZN1	71
N17	74	ZN2	71
N18	63	ZN3	72
N19	59	ZS1	77
N20	68	ZS2	71
N21	63	ZS3	71
N22	68	ZS4	71
N23	66	ZS5	70
N24	68	ZS6	72
N25	65	ZS7	81

ID CUENCAS	CN
ZS8	71

ID CUENCAS	CN
ZS9	71

Fuente: elaboración propia

En la zona plana urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira predomina el uso de suelo asociado a coberturas antropizadas, conformadas principalmente por cultivos y tejido urbano.

10.2.5 Flujo base

Los parámetros hidrológicos se analizaron espacialmente implementando herramientas de SIG a partir de los mapas temáticos de la zona de estudio y el modelo digital de elevaciones – DEM (siglas en inglés). En la Tabla 51 se muestran los parámetros hidrológicos calculados utilizando las metodologías expuestas anteriormente.

Tabla 51. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio

ID	SUBCUENCA	No.	Tlag (min)	CN	S (mm)	la (mm)	Flujo Base (m ³ /s)
1	Río Amaime	A01	244	62	158	32	4,646
2	Río Amaime	A02	74	74	89	18	0,112
3	Río Nima	N01	39	67	125	25	0,108
4	Río Nima	N02	32	68	121	24	0,212
5	Río Nima	N03	42	61	164	33	0,145
6	Río Nima	N04	36	61	165	33	0,090
7	Río Nima	N05	31	57	189	38	0,075
8	Río Nima	N06	55	61	166	33	0,233
9	Río Nima	N07	11	64	144	29	0,011
10	Río Nima	N08	27	62	157	31	0,039
11	Río Nima	N09	9	69	115	23	0,004
12	Río Nima	N10	16	60	170	34	0,016
13	Río Nima	N11	10	66	128	26	0,007
14	Río Nima	N12	11	59	175	35	0,010
15	Río Nima	N13	13	64	144	29	0,013
16	Río Nima	N14	20	68	120	24	0,019
17	Río Nima	N15	22	61	160	32	0,035
18	Río Nima	N16	21	62	153	31	0,020
19	Río Nima	N17	9	74	90	18	0,010
20	Río Nima	N18	18	63	149	30	0,032
21	Río Nima	N19	17	59	176	35	0,018
22	Río Nima	N20	13	68	118	24	0,007
23	Río Nima	N21	12	63	150	30	0,007
24	Río Nima	N22	20	68	121	24	0,035
25	Río Nima	N23	26	66	128	26	0,033
26	Río Nima	N24	25	68	120	24	0,037
27	Río Nima	N25	28	65	136	27	0,012
28	Río Nima	N26	52	66	132	26	0,352
29	Río Nima	N27	22	74	88	18	0,009
30	Río Nima	N28	62	68	118	24	0,031
31	Río Nima	N29	66	67	126	25	0,234
32	Río Nima	N30	43	69	112	22	0,022
33	Río Nima	N31	48	69	115	23	0,242
34	Río Nima	N32	182	71	103	21	0,375
35	Río Nima Quebrada Agua Clara	QAC1	37	61	161	32	0,131
36	Río Nima Quebrada La María	QAC2	33	60	169	34	0,066

Tabla 51. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio

ID	SUBCUENCA	No.	Tlag (min)	CN	S (mm)	la (mm)	Flujo Base (m ³ /s)
37	Río Nima Quebrada Agua Clara	QAC3	14	66	132	26	0,008
38	Río Aguaclara	QH1	87	61	164	33	0,203
39	Río Aguaclara	QH2	70	65	134	27	0,147
40	Río Aguaclara	QH3	76	69	115	23	0,057
41	Río Aguaclara	RAC1	49	61	164	33	0,180
42	Río Aguaclara	RAC2	96	60	167	33	0,120
43	Río Aguaclara	RAC3	84	63	151	30	0,065
44	Río Palmira	RP1	121	74	90	18	0,082
45	Zanjones Norte	ZN1	32	71	103	21	0,006
46	Zanjones Norte	ZN2	116	71	104	21	0,097
47	Zanjones Norte	ZN3	99	72	97	19	0,065
48	Zanjones Sur	ZS1	94	77	77	15	0,055
49	Zanjones Sur	ZS2	106	71	103	21	0,100
50	Zanjones Sur	ZS3	68	71	106	21	0,012
51	Zanjones Sur	ZS4	147	71	103	21	0,053
52	Zanjones Sur	ZS5	95	70	109	22	0,053
53	Zanjones Sur	ZS6	57	72	100	20	0,011
54	Zanjones Sur	ZS7	89	81	61	12	0,056
55	Zanjones Sur	ZS8	40	71	104	21	0,012
56	Zanjones Sur	ZS9	66	71	101	20	0,014

Fuente: elaboración propia

10.2.6 Resultados de la simulación y análisis hidrológico

El presente estudio tiene como objetivo determinar los caudales máximos de crecidas para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años. Con el fin de evaluar los eventos de interés se implementó el modelo hidrológico mediante el programa computacional HEC – HMS 4.9, el cual se fundamenta en la relación lluvia – escorrentía, pues permite calcular los caudales máximos en función de la profundidad total de precipitación, parámetros de forma (morfométrica de las cuencas) y de parámetros de abstracción.

En la Tabla 52 se presentan los caudales máximos generados con el modelo hidrológico para las cuencas hidrográficas en estudio. En el Anexo 7 se encuentra el modelo hidrológico con las hidrógrafas para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 52. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km ²)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Amaime	478,33	59,1	61,4	108,2	144,4	175,9	196,1	211,4	251,8	277,9	297,7	313,7
A02	5,97	7,7	10,9	14,7	21,3	27,6	32	35,4	44,8	50,8	55,7	59,7
Diversion-1	117,18	48,3	74,2	109,8	183,4	260,2	316,4	360,4	484,5	573	642,4	700,8
Final Amaime	484,3	66,8	72,3	122,9	165,7	203,5	228,1	246,8	296,6	328,7	353,4	373,4
Final Nima	164,85	59,7	89	124,9	201,4	281,8	340,8	387	517,2	609,5	682,1	743
Junction-N01	19,39	15,3	25,7	38,7	63,9	88,7	106,3	120,4	158,1	184,9	206,4	224,6
Junction-N02	47,84	17,5	31,8	50,9	90,8	134,1	166,4	191,9	263,7	315,4	356	390,7
Junction-N03	82,83	26,5	48,3	76,5	135,9	199,9	247,7	284,8	389,8	465,5	526,7	578,5
Junction-N04	85,67	28,9	52	82	144,6	210,1	259,8	299	410,1	490,2	553,1	606,1

Tabla 52. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km ²)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Junction-N05	86,78	29,4	52,8	83,7	146,4	213,4	263	301,7	410,9	489,2	551,4	604,6
Junction-N06	87,72	29,7	53,5	84,8	147,5	214,6	264,7	303,8	414,4	493,8	556,1	608,5
Junction-N07	91,33	32,9	58,4	91,5	157,2	227	278,9	319,4	434,2	516,3	580,9	635,1
Junction-N08	93,13	34,2	60,4	94	161,4	232,7	285,1	326,1	441,9	524,6	589,6	644,2
Junction-N09	94,18	34,6	61	94,8	163,4	235,2	287,9	329,2	445,6	528,8	594,2	649,1
Junction-N10	94,74	34,6	61	94,9	162,7	234,3	287	328,3	444,8	528,2	593,7	648,7
Junction-N11	97,7	35,6	62,2	96,9	166,2	238,5	291,6	333,1	450,2	533,9	599,7	654,9
Junction-N12	99,43	35,8	62,5	97,3	166,7	239,1	292,2	333,8	451	534,8	600,6	655,9
Junction-N13	116,82	50,8	76,5	112	186,8	264,5	321,1	365,5	491	580,4	650,8	710
Junction-N14	130,71	50,6	77	111,6	185,6	263	319,2	363,3	487,9	576,6	646,3	705
Junction-N15	143,82	51	77,4	111,9	185,8	262,9	319	362,9	487,1	575,6	645,2	703,7
Junction-QAC01	15,3	4,9	9	14,9	27,7	41,3	52,1	60,6	84,9	102,4	116,3	127,8
Junction-QH1	24,83	19,5	30,7	44,7	69,2	94	111,2	125,1	163,3	189,3	210,3	226,7
Junction-QH2	28,14	24	37	53,5	82,3	111,2	130,8	146,7	190,1	219,5	243,3	261,7
Junction-RAC1	21,17	13,5	22	32,9	53,3	74,3	88,7	100,3	132,3	155,2	173,1	187,7
Junction-RAC2	25,77	16,7	27,2	40,4	64,5	89,7	107,1	121,3	160,3	187,4	208,6	225,8
Junction-RP1	7,01	9,7	12,6	16,1	21,9	27,6	31,4	34,3	42,5	47,7	52	55,3
Junction-ZS1	6,56	6,7	9,5	12,9	18,6	24,1	27,7	30,6	38,5	43,9	48,1	51,4
Junction-ZS2	14,02	13,1	18,8	25,5	37	48,3	55,7	61,8	78,1	89	97,5	104,3
N01	6,77	3,2	5,5	8,5	14,8	21,1	25,8	29,4	39,8	47,3	53,2	58,1
N02	12,62	12,5	20,9	30,8	49,6	67,9	81,5	92,4	121,8	142,4	158,3	171,8
N03	12,36	2	4,3	7,3	14,3	22,1	28,2	33,1	47,4	58	66,3	73,4
N04	8,03	1,4	2,9	4,9	9,8	15,4	19,8	23,1	33,3	40,9	46,9	52,1
N05	8,06	0,6	1,7	3,2	6,7	11,2	15,1	18,2	27,4	34,4	39,9	44,7
N06	19,29	5,1	9,7	15,7	28,4	42	52,4	60,4	83,4	99,8	112,7	123,7
N07	0,55	1,3	2,2	3,4	5,5	7,5	8,9	10	13	15,1	16,7	18
N08	2,29	3,4	5,6	8,5	13,6	18,8	22,4	25,2	33	38,3	42,5	45,8
N09	0,18	0,8	1,2	1,6	2,4	3,1	3,6	4	5,1	5,8	6,3	6,7
N10	0,93	1,1	2,1	3,3	5,6	8	9,7	11,1	15,1	17,9	20,1	21,9
N11	0,33	1,1	1,8	2,6	4	5,3	6,2	6,9	8,8	10,1	11,1	11,9
N12	0,61	0,8	1,6	2,6	4,6	6,7	8,1	9,2	12,4	14,6	16,3	17,6
N13	0,57	1,2	2,1	3,3	5,3	7,4	8,8	9,9	13	15	16,7	18
N14	0,73	2,3	3,5	4,9	7,3	9,7	11,3	12,5	15,8	18,1	19,8	21,2
N15	1,94	2,8	4,8	7,3	12,1	17,1	20,5	23,3	30,8	36,1	40,1	43,4
N16	0,94	1,4	2,4	3,7	6,1	8,5	10,2	11,5	15,3	17,8	19,8	21,4
N17	0,31	2,2	3	4	5,5	7	7,9	8,6	10,6	12	13,1	13,9
N18	1,49	2,7	4,5	6,9	11,1	15,2	18,1	20,3	26,6	30,8	34,1	36,8
N19	1,05	1,2	2,3	3,8	6,4	9,1	11	12,5	16,7	19,5	22	23,9
N20	0,25	1	1,5	2,2	3,2	4,3	5	5,5	7	8	8,8	9,4

Tabla 52. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km ²)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
N21	0,31	0,7	1,2	1,9	3	4,2	5	5,6	7,3	8,5	9,4	10,2
N22	1,45	4,4	6,7	9,5	14,1	18,7	21,8	24,1	30,7	35,1	38,5	41,2
N23	1,51	3,5	5,5	7,8	11,7	15,6	18,2	20,2	25,9	29,9	33	35,4
N24	1,73	4,3	6,5	9,1	13,6	18,1	21,2	23,6	30,4	34,9	38,4	41,3
N25	0,69	1,1	1,8	2,6	4,1	5,6	6,7	7,4	9,7	11,2	12,4	13,4
N26	16,7	29,8	43,9	60,4	90,4	118,9	138,5	153,6	195,8	224	245,9	264
N27	0,36	1,5	2,1	2,8	4,1	5,2	6	6,5	8,1	9,2	10	10,7
N28	1,62	2,1	3,1	4,3	6,4	8,5	9,9	11,1	14,2	16,3	18	19,3
N29	11,91	18,7	27,3	37,2	55,1	72	83,5	92,7	118,1	135,2	148,6	159,6
N30	1,17	2	2,9	4,1	6,1	8	9,3	10,4	13,2	15,1	16,7	17,9
N31	11,94	28,6	41,2	55,1	80,5	104,4	120,6	133,4	168	191,1	209	223,6
N32	21,03	11,8	17,2	23,5	34,5	45,3	52,6	58,4	74,3	84,6	93,1	99,9
QAC1	9,52	4	7,1	11,6	20,8	30,6	37,8	43,7	60,3	72,3	81,7	89,5
QAC2	5,78	1	2	3,4	6,9	11	14,3	17	24,6	30,1	34,6	38,3
QAC3	0,4	1	1,7	2,5	4	5,4	6,4	7,2	9,3	10,7	11,8	12,8
QH1	15,51	10,6	16,9	25	39,4	54	64	72,2	94,9	110,3	122,9	132,7
QH2	9,32	9,5	14,4	20,6	31,1	41,8	49,1	55	71,2	82,1	90,9	97,8
QH3	3,31	5	7,2	9,9	14,3	18,6	21,5	23,8	30	34,2	37,6	40,2
RAC1	12,89	9,9	16,7	25,3	41,3	58	69,4	78,7	104,4	122,5	136,9	148,7
RAC2	8,28	4,8	7,8	11,6	18,4	25,3	30	33,9	44,6	52,1	58	62,7
RAC3	4,6	3,3	5,2	7,6	11,9	16,2	19,2	21,6	28,1	32,7	36,2	39,1
Reach-QAC1	15,3	4,9	9	14,8	27,6	41,3	51,6	60,1	84,3	101,7	115,6	127,1
Reach-QH1	24,83	19,4	30,6	44,5	68,9	94	111,1	124,9	163	188,7	209,6	225,9
Reach-RAC1	21,17	13,4	22	32,9	52,7	73,7	88,2	99,9	132,3	154,8	172,4	186,7
Reach-RA01	478,33	59,1	61,4	108,2	144,4	175,9	196,1	211,4	251,8	277,9	297,7	313,7
Reach-RN01	19,39	15,2	25,3	38,1	63,2	88,1	105,8	119,9	157,9	184,6	205,3	222,9
Reach-RN02	47,84	17,5	31,6	50,5	90,3	131,4	162	187,1	258,2	309,5	349,9	384,5
Reach-RN03	82,83	26,3	48	76,3	135,6	198,4	245,3	281,7	388,3	465,4	526,1	577,2
Reach-RN04	85,67	28,7	51,8	81,9	143,7	209,9	259,1	297,4	405,5	483,2	544	596,5
Reach-RN05	86,78	29,2	52,8	83,3	145,4	211,8	261,5	300,3	410,1	488,9	550,8	602,9
Reach-RN06	87,72	29,6	53,5	84,4	147,4	212,9	262,8	301,8	412,3	491,6	554	606,5
Reach-RN07	91,33	32,8	58,3	91,3	156,7	226,8	278,5	318,9	433,1	514,8	579	632,9
Reach-RN08	93,13	34,2	60,4	94	161,4	232,7	285,1	326,1	441,9	524,6	589,6	644,2
Reach-RN09	94,18	34,5	60,9	94,7	162,2	233,8	286,4	327,6	444	527,3	592,8	647,7
Reach-RN10	94,74	34,5	60,9	94,6	162,6	234	286,6	327,6	443,6	526,6	591,8	646,5
Reach-RN11	97,7	35,6	62,2	96,9	166,2	238,5	291,6	333,1	450,2	533,9	599,7	654,9
Reach-RN12	99,43	35,8	62,5	97,2	166,4	238,5	291,4	332,7	449,3	532,6	598	653
Reach-RN13	116,82	50,5	76,4	112	185,5	262,4	318,6	362,6	486,7	575,1	644,6	702,9
Reach-RN14	117,18	48,2	74	109,4	183,2	260	315,8	359,6	483,4	571,6	640,9	699,2
Reach-RN15	130,71	50,6	76,9	111,5	185,5	262,5	318,6	362,5	486,8	575,2	644,8	703,3

Tabla 52. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km ²)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Reach-RN16	143,82	51	77,3	111,7	184,9	261,8	317,7	361,5	485,1	573,2	642,3	700,4
Reach-ZS1	6,56	6,7	9,5	12,9	18,5	24	27,7	30,6	38,5	43,8	48	51,3
RP1	4,27	4,1	5,8	7,8	11,1	14,4	16,6	18,3	23,1	26,2	28,7	30,7
ZN1	0,51	0,6	0,9	1,3	2,1	2,8	3,4	3,8	5	5,8	6,4	6,9
ZN2	5,78	4,8	6,9	9,5	13,9	18,4	21,3	23,7	30,2	34,4	37,8	40,6
ZN3	4,08	3,4	4,9	6,7	9,9	13,1	15,2	16,9	21,6	24,5	27,1	29
ZS1	2,74	3,5	4,9	6,5	9,1	11,6	13,3	14,6	18,3	20,6	22,5	24
ZS2	5,79	5,6	8,1	11	16,1	21,1	24,4	27,1	34,4	39,3	43	46,1
ZS3	0,85	0,8	1,2	1,7	2,5	3,4	3,9	4,4	5,6	6,5	7,1	7,6
ZS4	2,98	2,7	3,8	5,2	7,4	9,6	11,1	12,2	15,4	17,5	19,2	20,5
ZS5	2,96	3,7	5,3	7,3	10,5	13,6	15,7	17,4	21,9	25	27,4	29,3
ZS6	0,62	1,2	1,7	2,3	3,3	4,2	4,9	5,4	6,8	7,7	8,5	9
ZS7	2,73	4,9	6,6	8,4	11,5	14,5	16,3	17,7	21,7	24,4	26,3	27,9
ZS8	0,87	1	1,6	2,3	3,5	4,7	5,5	6,2	8,1	9,3	10,3	11,1
ZS9	0,82	1	1,4	2	2,9	3,8	4,4	4,9	6,3	7,2	7,9	8,5

Fuente: elaboración propia

10.2.6.1 Caudales máximos de corrientes de agua que discurren por la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

A continuación en la Tabla 53, se relacionan los caudales para los diferentes periodos de retorno que serán empleados en las modelaciones hidráulicas de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.

Tabla 53. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno a ser empleados en la modelación hidráulica de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

Hydrologic Element	Nombre	Drainage Area (km ²)	2,33 años	25 años	50 años	100 años
Junction-RP1	Junction Río Palmira	7,01	9,7	21,9	27,6	34,3
Junction-ZS1	Junction Zanjón Romero	6,56	6,7	18,6	24,1	30,6
Junction-ZS2	Junction Zanjón Beringo	14,02	13,1	37	48,3	61,8
RP1	Río Palmira	4,27	4,1	11,1	14,4	18,3
ZN1	Acequia La Rica	0,51	0,6	2,1	2,8	3,8
ZN2	Zanjón Zamorano	5,78	4,8	13,9	18,4	23,7
ZN3	Zanjón Mirriñao	4,08	3,4	9,9	13,1	16,9
ZS1	Zanjón Romero	2,74	3,5	9,1	11,6	14,6
ZS2	Zanjón Beringo	5,79	5,6	16,1	21,1	27,1
ZS3	Zanjón Beringo, Beringuito y San José Final	0,85	0,8	2,5	3,4	4,4
ZS4	Zanjón Beringuito	2,98	2,7	7,4	9,6	12,2
ZS5	Río Zumbaculo	2,96	3,7	10,5	13,6	17,4
ZS6	Acequia San José	0,62	1,2	3,3	4,2	5,4

Tabla 53. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno a ser empleados en la modelación hidráulica de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

Hydrologic Element	Nombre	Drainage Area (km^2)	2,33 años	25 años	50 años	100 años
ZS7	Area Aferente Acequia Barrancas	2,73	4,9	11,5	14,5	17,7
ZS8	Acequia Barrancas	0,87	1	3,5	4,7	6,2
ZS9	Acequia Barrancas	0,82	1	2,9	3,8	4,9

A continuación, desde la Figura 76 hasta la Figura 79, se presentan de forma esquemática las hidrógrafas para los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años, las cuales serán empleadas en la modelación hidráulica de los drenajes que discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.

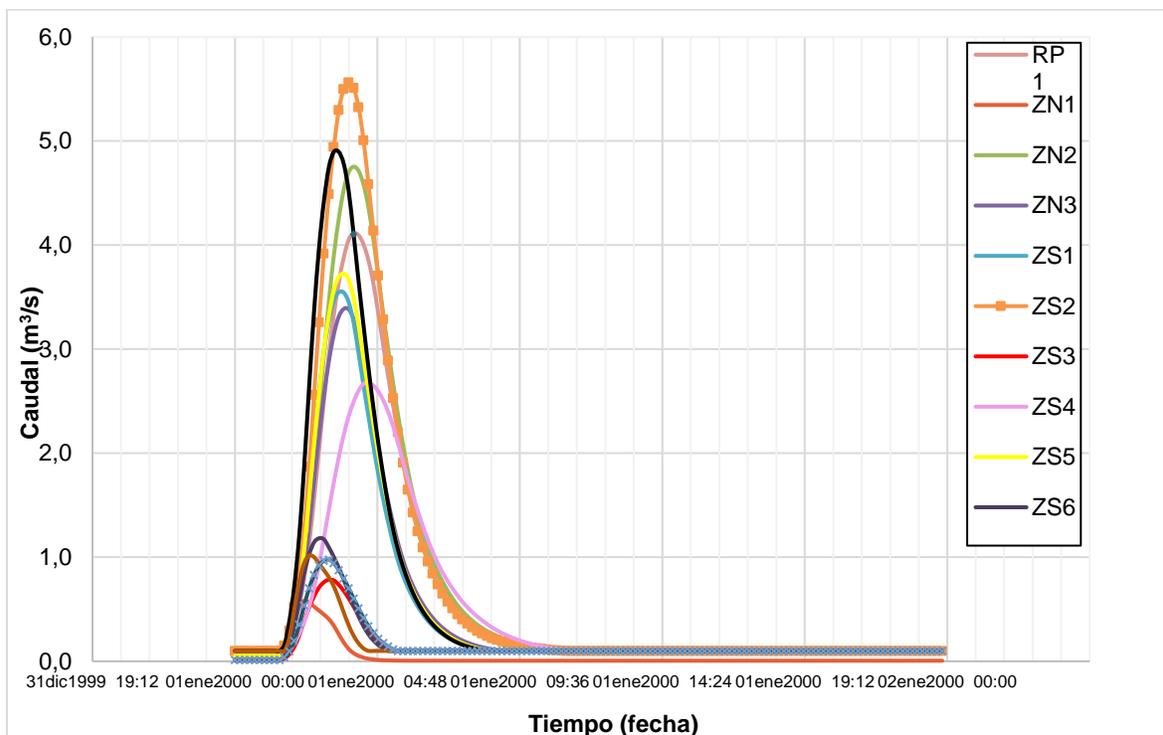


Figura 76. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 2,33 años
Fuente: elaboración propia

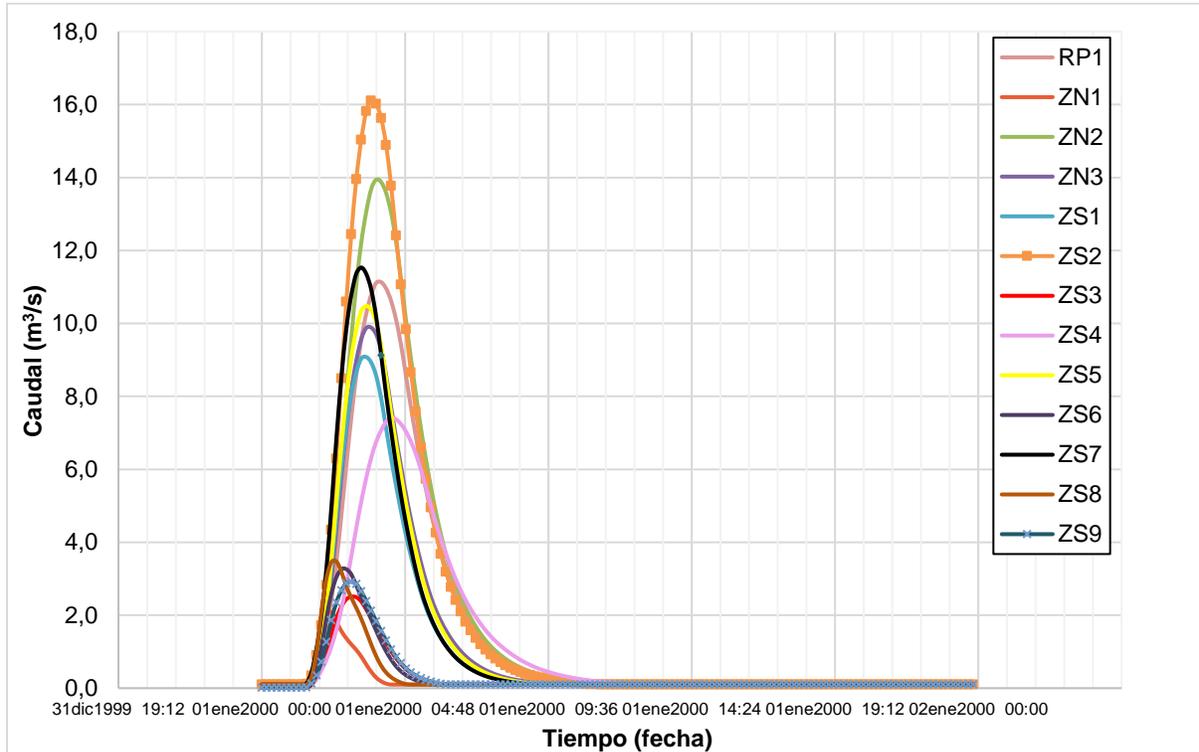


Figura 77. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 25 años
Fuente: elaboración propia

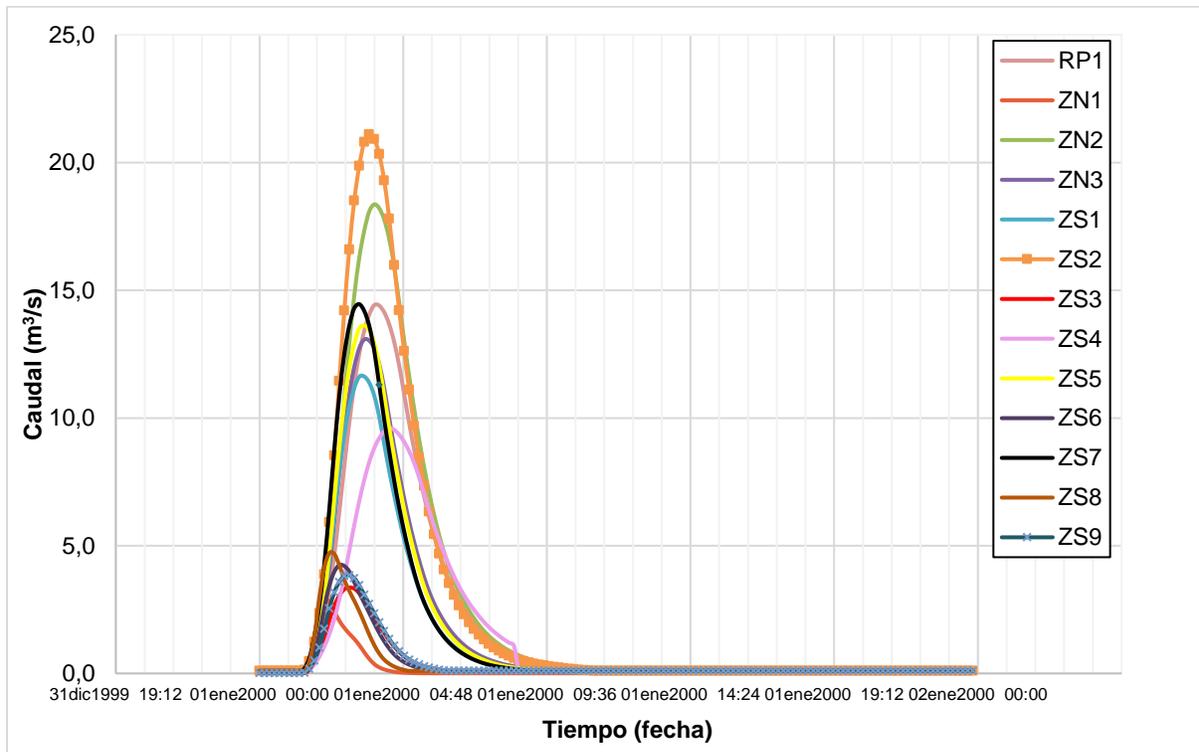


Figura 78. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 50 años
Fuente: elaboración propia

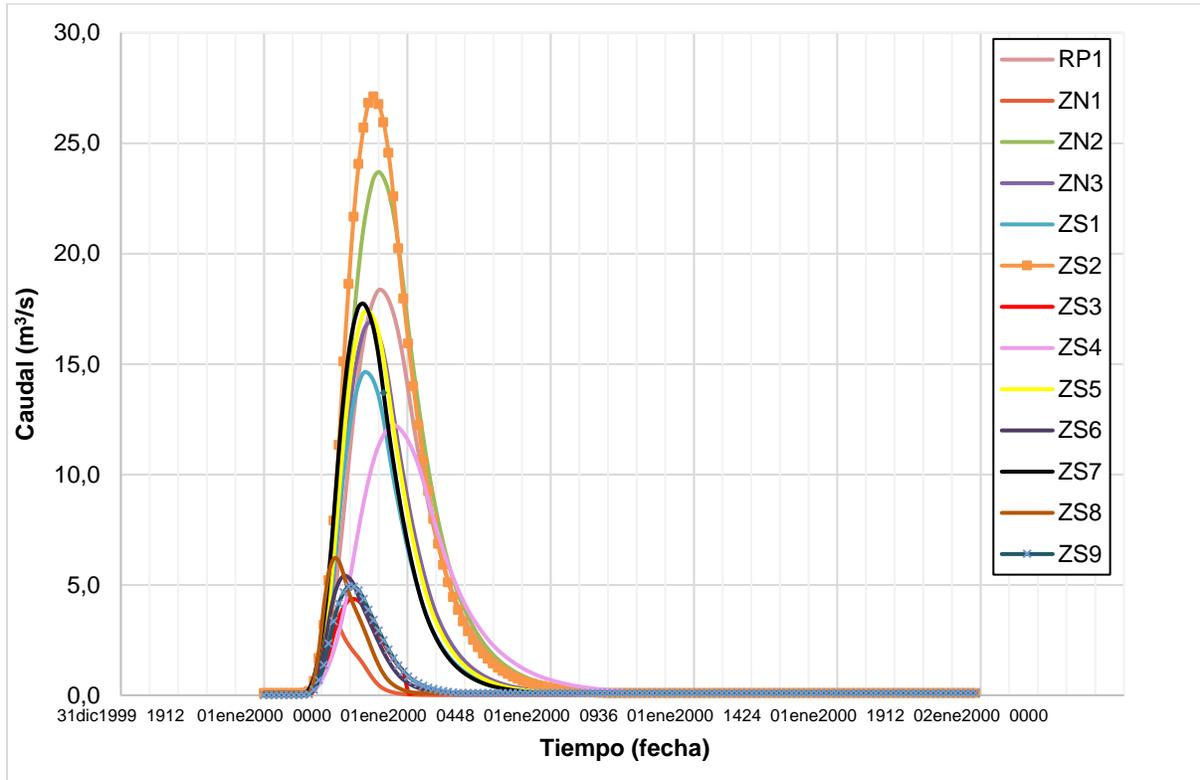


Figura 79. Hidrógrafas para el periodo de retorno de 100 años
Fuente: elaboración propia

11 ESTUDIO HIDRÁULICO

En este capítulo inicialmente se realizó la caracterización geométrica e hidráulica de los cauces en las zonas de estudio; posteriormente, se realizaron las modelaciones hidrodinámicas de los cauces y se efectuaron las simulaciones de las crecientes con períodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años; y, por último, se generaron los mapas de velocidades y profundidades máximas de flujo en los cauces y las áreas inundadas.

11.1 Modelación hidráulica

Los drenajes de las zonas de estudio correspondientes al área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira se modelaron empleando el software HEC RAS 6.1, para lo cual inicialmente se generó el Modelo Digital de Terreno – MDT de cada zona de estudio y se ingresaron los hidrogramas obtenidos de la modelación hidrológica de las corrientes de agua.

11.1.1 Descripción del modelo hidráulico a desarrollar mediante el software HEC-RAS 6.1 aspectos teóricos

La herramienta computacional HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, por sus siglas en inglés) es un modelo de dominio público desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2021). HEC-RAS 2D es un software libre para realizar la modelación hidráulica bidimensional de cauces, puede determinar el tirante de agua y velocidad en cualquier punto del cauce de un río y áreas de probable inundación.

11.1.1.1 Ecuación gobernante de lámina libre de Saint-Venant

La ecuación de lámina libre de Saint-Venant 2D utiliza como solución el método de volúmenes finitos implícitos, es similar a la formulación de las ecuaciones de Navier-Stokes, teniendo consideración el efecto de Coriolis, la cual permite tener en cuenta los efectos de rotación de la tierra sobre la solución del área de flujo 2D de la modelación hidráulica.

Las ecuaciones conservativas de continuidad y cantidad de movimiento de Saint-Venant Bidimensional considera lo siguiente:

- Flujo newtoniano ($\mu_{\text{agua}} = 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$)
- Distribución de la velocidad en toda la profundidad
- Velocidad y aceleración vertical son despreciables ($w = 0 \text{ m/s}$ y $a_z = 0 \text{ m/s}^2$)
- Flujo incompresible ($\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$)
- Flujo No permanente (Variación de caudal en el tiempo)
- Efecto de Coriolis

A continuación, se detalla el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan un flujo bidimensional de la lámina libre de Saint-Venant:

Ecuación de continuidad de flujo bidimensional de lámina libre de Saint-Venant

De la Figura 80, “ H ” representa cota de la superficie de lámina libre de agua, “ h ” representa el tirante hidráulico de flujo, “ Z ” representa la cota de fondo del lecho del río. Se deduce la siguiente ecuación:

$$H_{(x,y,t)} = Z_{(x,y)} + h_{(x,y,t)}$$

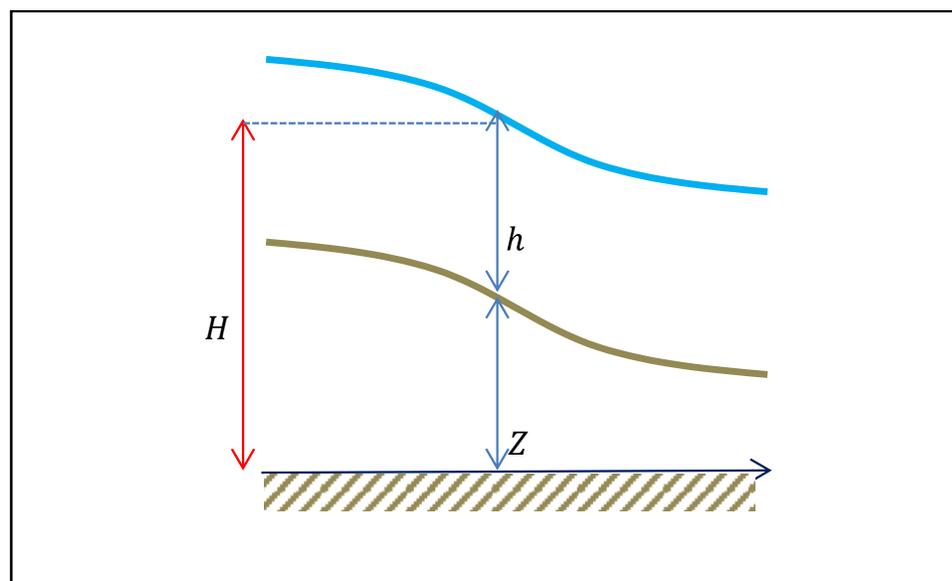


Figura 80. Representación gráfica de las variables de lámina de flujo.
Fuente: (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2021)

Donde, las variables de la ecuación anteriormente descritas son variables dependientes de la posición (x, y) y el tiempo (t).

De la ecuación general de flujo bidimensional de lámina libre:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

El modelo HEC-RAS adiciona una variable “ q ” (infiltración).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + h \frac{\partial(u)}{\partial x} + h \frac{\partial(v)}{\partial y} + q = 0$$

Donde:

H : Cota de la superficie de lámina libre de agua

h : Tirante de agua

u : Velocidad en el eje “ x ”

v : Velocidad en el eje “ y ”

t : Tiempo

q : Infiltración del fondo de lecho

11.1.1.2 Ecuaciones de cantidad de movimiento de flujo bidimensional de lámina libre de Saint-Venant

En las ecuaciones de cantidad de movimiento las variables de esfuerzos superficiales y de fondo, según el software HEC-RAS, solo se considera el esfuerzo de fondo de lecho mas no considera el esfuerzo superficial (resistencia al flujo por vegetación y viento); el modelo considera un parámetro de Coriolis “ f ” que afecta las velocidades en las dos direcciones “ x ” y “ y ”, dándole así este factor a las ecuaciones un parámetro de ajuste propios de los criterios de contracción y expansión de Saint Venant.

La ecuación de cantidad de movimiento en el eje “ x ” es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + u_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

Y la ecuación de cantidad de movimiento en el eje “ y ” es:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + u_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

C_f : coeficiente de fricción de lecho, que depende del coeficiente de rugosidad

En HEC-RAS el coeficiente de rugosidad (C_f) representa el coeficiente de resistencia de flujo de manera general, tomando en cuenta la rugosidad del lecho, la rugosidad por vegetación, la rugosidad por sinuosidad, la rugosidad por obstrucción, etc.

El modelo bidimensional HEC-RAS (Brunner, 2016) en su procesamiento por el método de Volúmenes Finitos Implícitos (MVF- Implícitos) asume lo siguiente para las ecuaciones de cantidad de movimiento.

$$\mu_{xx} = \mu_{yy} = 0$$

Donde μ_{xx} , μ_{yy} son los coeficientes de viscosidad turbulenta axiales

Del mismo modo, HEC-RAS considera que los coeficientes de viscosidad de turbulencia tangenciales tendrán un valor único “ μ_t ” en las ecuaciones de la cantidad de movimiento:

$$\mu_{xy} = \mu_{yz} = \mu_{yz} = \mu_t$$

Para la determinación del coeficiente de viscosidad turbulencia tangencial de flujo ut se utiliza el modelo numérico de viscosidad de Eddy que plantea lo siguiente:

$$\mu_t = Dh \left[\frac{n\sqrt{g(u^2 + v^2)}}{R^{1/6}} \right]$$

Donde:

ut : Coeficiente de viscosidad de turbulencia tangencial al flujo

h : Tirante de agua

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

g : Aceleración de la gravedad

u, v : Velocidades del flujo en las direcciones “ x ” y “ y ”

R : Radio Hidráulico

D : Constante adimensional del modelo HEC-RAS 2D

La constante adimensional “ D ” se determina a partir de la Tabla 54 propuesta por (Brunner, 2016).

Tabla 54. Valores de la constante adimensional “ D ”

D	Grado de Turbulencia	Superficie de Fondo
0.11 a 0.26	Pequeño	Superficies de lecho de fondo suaves
0.30 a 0.77	Moderado	Superficies de lecho de fondo moderadamente irregulares
2.00 a 5.00	Fuerte	Superficies de lecho de fondo muy rugosos

La constante gravitatoria “ g ” según (Brunner, 2016) está relacionada a las siguientes variables.

$$g = 9.780326 \left(\frac{1 + k\sin^2\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \right)$$

Donde:

k : Contante gravitatoria normal ($k = 0.0019318$)

e : Excentricidad de la tierra ($e = 0.00669438$)

φ : Latitud del centro del área de flujo 2D, en grados decimales

Efecto de Coriolis

El modelo HEC-RAS 2D considera un efecto de Coriolis que al multiplicar con la velocidad al eje “ x ” y “ y ” ajustan el modelo hidráulico.

$$f = 2\omega\sin\varphi$$

Donde:

ω : Es la velocidad angular sideral del terreno $\omega = 0.000072911/s$

φ : Latitud del centro del área de flujo 2D, en grados decimales

El valor de " φ " tiene los siguientes criterios: al ser mayor que cero se considera que está ubicado en el hemisferio norte y un valor menor que cero se considera localizado en el hemisferio sur.

Coeficiente de fricción del lecho

La herramienta computacional HEC-RAS 2D se basa en la formulación de Chézy, Gauckler-Manning-Strickler, obteniéndose finalmente la siguiente expresión (Brunner, 2016).

$$C_f = \frac{n^2 g \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{4/3}}$$

Donde:

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

g : Aceleración de la gravedad

u, v : Velocidades del flujo en las direcciones " x " y " y "

h : Radio hidráulico

Método de Volúmenes Finitos

El método de volúmenes finitos (MVF) aplicado en la herramienta computacional HEC-RAS 2D a las ecuaciones bidimensionales de flujo de lámina libre de Saint-Venant se basa en los criterios formulados por McDonald (Brunner, 2016) para la simulación de problemas bidimensionales de flujo hidráulico. Este método discretiza un subdominio del espacio físico (topografía del terreno) en poliedros (que son representados por celdas o superficies de 3 a 8 lados) del espacio físico, en los que previamente se realiza un mallado estructurado y no estructurado a la vez. La principal ventaja del método MVF es que la discretización espacial se lleva a cabo en el espacio físico. Por lo tanto, no hay problemas de la transformación a otros sistemas de coordenadas, como ocurre con el método de diferencias finitas (MDF).

Método de Volúmenes Finitos con Aproximación por la Divergencia de Gauss

El método de volúmenes finitos (MVF) se basa en asignar puntos espaciados de manera aproximada sobre el dominio del espacio físico topográfico y aplicar las ecuaciones constitutivas de flujo (ecuaciones de flujo bidimensional de Saint-Venant del modelo HEC-RAS) en cada punto del cauce del río y a los alrededores, como se puede observar en la configuración geométrica del método de volúmenes finitos del modelo HEC-RAS 2D.

El MVF tiene como punto de partida la ecuación de Poisson diferencial de aproximación, que indica que el laplaciano de una variable " u " a evaluar puede ser aproximado a una función " b ".

$$\nabla^2 u - b = R \approx 0$$

Dónde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b : Función de aproximación

R : Error residual

A partir de lo anterior se utiliza el método de ponderación de “residuos pesados” en el dominio “ Ω ” de geometría variable (celdas de 3 lados hasta 8 lados) que tiene un peso ponderativo propio que se considera único para cada celda, entonces la ecuación con este criterio se puede escribir de la siguiente forma:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 u - b) \omega \partial \Omega = 0$$

Donde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b : Función de aproximación

ω : Función ponderativa ($\omega = 1$); en volúmenes finitos

Ω : Dominio superficial del elemento

De esta forma se obtiene lo siguiente para el volumen finito cuadrangular central:

$$\int_{\Omega} \nabla^2 \omega \partial \Omega = \int_{\Omega} b \partial \Omega = b \nabla_x \nabla_y$$

Dónde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b : Función de aproximación

Ω : Dominio superficial del elemento

$\Delta x, \Delta y$: Dimensión en el eje “x” y “y” del volumen finito cuadrangular central.

Posteriormente, se procede a desarrollar la integral del Laplaciano de la variable de interés “ $\nabla^2 u$ ”; para tal caso se utiliza “Teorema de Divergencia de Gauss”

$$\int_{\Omega} \nabla^2 u \partial \Omega = \int_S (\nabla u \cdot \vec{n}) ds$$

Donde:

S : Dominio superficial para el flujo bidimensional

$\nabla u \cdot \vec{n}$: Derivada direccional

Por definición derivada se tiene:

$$\int_S (\nabla u \cdot \vec{n}) ds = \int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds$$

Para obtener finalmente:

$$\int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds = \int_S b d\Omega$$

Debido a que el dominio se dividió en volúmenes finitos en celdas (polígonos de 3 lados a 8 lados) se separa la integral en "i" dominios para cada uno de los cuales su frontera constara de "k" lados adyacentes (j=1,2,3,..., k=8 lados).

$$\int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds = \sum_{j=1}^k \int_{\Gamma_{i,j}} \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) dS_i = \sum_{j=1}^k \left(\frac{u_j - u_i}{h} \right) L(\Gamma_{i,j})$$

Dónde:

u : La variable diferencial

$du/(d\vec{n})$: Derivada direccional

l : Longitud tangencial de celda en la dirección de flujo

L : Longitud ortogonal de celda en la dirección de flujo

k : Numero de celdas de enmallado de la discretización

Obteniéndose de manera general en los ejes norte (N), sur (S), este (E) y oeste (W) de la celda central cuadrangular.

$$\left(\frac{u_\omega - u_i}{\Delta x} \right) \Delta y + \left(\frac{u_E - u_i}{\Delta x} \right) \Delta y + \left(\frac{u_N - u_i}{\Delta y} \right) \Delta x + \left(\frac{u_S - u_i}{\Delta y} \right) \Delta x = b \Delta x \Delta y$$

Dónde:

u_ω, u_E, u_N, u_S : Variable diferenciales de entrada en los distintos ejes cardinales

u_i : Variable diferencial de salida

$\Delta x, \Delta y$: Dimensión en el eje "x" y "y" del volumen finito cuadrangular central.

11.1.1.3 Divergencia de Gauss en las Ecuaciones de Flujo Bidimensional de Saint-Venant del Modelo HEC-RAS 2D

El desarrollo final de la introducción del método de volúmenes finitos a las ecuaciones de flujo que gobiernan el modelo bidimensional hidráulico de HEC-RAS 2D se describe a continuación. La formulación final de la aplicación del método de volúmenes finitos en la ecuación de continuidad (Brunner, 2016) es la siguiente:

$$\oint_S (H_n) dS \approx \sum_{r=1}^4 (H_r n_r) dS_r$$

Donde:

ds_r : Longitud en las cuatro paredes, en el contorno del mallado (i, j)

H_r : El flujo numérico de flujo a través de la celda de la que se enfrenta "r" contorno de la celda (i, j)

La evaluación del flujo numérico se explica aquí para la cara de la celda entre los nodos $(i + 1, j)$ y (i, j) ; similarmente se adopta para otras caras de celdas.

$$(H_3 n_3) dS = (H_n)_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2} [H_R + H_L - \alpha(U_R - U_L)] n_{i+\frac{1}{2},j}$$

Donde:

$\alpha = a$: Coeficiente positivo

$H_R = f(U_R)$: El flujo calculado utilizando la información del lado derecho de la cara de las celdas

$H_L = f(U_L)$: El flujo calculado utilizando la información del lado izquierdo de la cara de las celdas

U_R y U_L : son obtenidos usando las siguientes ecuaciones:

$$(U_L)_{i+\frac{1}{2},j} = U_{i,j} + \frac{1}{2} \delta U_{i,j}$$

$$(U_R)_{i+\frac{1}{2},j} = U_{i+1,j} - \frac{1}{2} \delta U_{i+1,j}$$

La integración de la ecuación en el dominio del tiempo se realiza mediante el uso de un enfoque predictor-corrector.

11.1.1.4 Condiciones de frontera del modelo hidráulico HEC-RAS 2D

Las condiciones de frontera para la modelación hidráulica bidimensional en flujo no permanente del modelo HEC-RAS pueden ser: la hidrógrafa de caudales, la hidrógrafa de niveles de agua, la profundidad normal y la curva de calibración nivel-caudal (Brunner, 2016), donde las dos primeras se emplean en las fronteras aguas arriba para ingresar el flujo al área y las dos últimas se utilizan en la frontera de aguas abajo, lo cual permite la salida del flujo.

11.1.1.5 Coeficiente de rugosidad del cauce

El modelo hidráulico HEC-RAS 2D mantiene los conceptos de rugosidad general de Manning para canales abiertos para flujos unidimensionales, el cual tiene en cuenta lo siguiente:

- Rugosidad del lecho del cauce
- La resistencia al flujo por vegetación
- El grado de sinuosidad del cauce
- Las irregularidades del cauce
- Las obstrucciones existentes en el cauce

11.1.1.6 Capacidades y ventajas de la modelación de flujo en 2D con HEC-RAS

HEC-RAS en sus versiones superiores a 5.0 resulta novedosa por su análisis en 2D. Este tipo de modelación ha permitido que desarrolle nuevas capacidades para la simulación de flujo en 2D; así se puede ejecutar modelos en 1D, 2D o una combinación de ambos. Estas capacidades son descritas a continuación (información tomada del manual del usuario de HEC-RAS 2D (Chero, 2015)).

- **Puede realizar modelación en 1D, 2D o una combinación de ambos.**

La capacidad de ejecutar modelos combinados permite al usuario trabajar en amplios sistemas de ríos; por ejemplo, se puede usar el modelo 1D sobre el cauce de un río y el modelo 2D sobre las zonas adyacentes al mismo, en donde se requiere mayor detalle de los resultados hidráulicos.

- **Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D**

El programa permite elegir entre las ecuaciones de Saint-Venant y de Onda Difusa en 2D para llevar a cabo la modelación. De forma general, las ecuaciones de Onda Difusa en 2D permiten que el software procese la información rápidamente y tiene mayores propiedades de estabilidad; sin embargo, las ecuaciones de Saint-Venant 2D son aplicables a una gama más amplia en la resolución de problemas.

- **Esquema numérico empleado: Volumen Finito Implícito**

El método de volúmenes finitos mejora la estabilidad y robustez del modelo con respecto a las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos, pudiendo manejar adecuadamente situaciones de flujo en regímenes subcrítico, supercrítico y mixto.

- **Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos 1D y 2D**

Este algoritmo permite la retroalimentación directa en cada intervalo de tiempo entre los elementos de flujo 1D y 2D. Por ejemplo, el caso del río modelado en 1D que se conecta a cualquiera área (modelada en 2D) mediante algún dique (estructura lateral).

Si consideramos que el flujo se desplaza por encima del dique, o por efecto de la ruptura del dique, del modelo 1D hacia el 2D, entonces el programa emplea la ecuación de vertedero para resolver el cómputo del flujo. Por cada paso de tiempo, la ecuación de vertedero emplea los resultados de los modelos 1D y 2D permitiendo la contabilización exacta del vertedero sumergido.

- **Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas**

HEC-RAS 6.0 fue diseñado para trabajar con mallas no estructuradas, pero también puede trabajar con mallas estructuradas. Las celdas computacionales de una determinada malla pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o polígonos de hasta 8 lados como máximo. La malla computacional no necesita ser ortogonal, sin embargo, si fuera así la discretización numérica es más simplificada y eficiente.

Cada celda de la malla computacional está compuesta de los siguientes elementos: centro de celda, contorno de celda y puntos en contorno de celda (Figura 81).

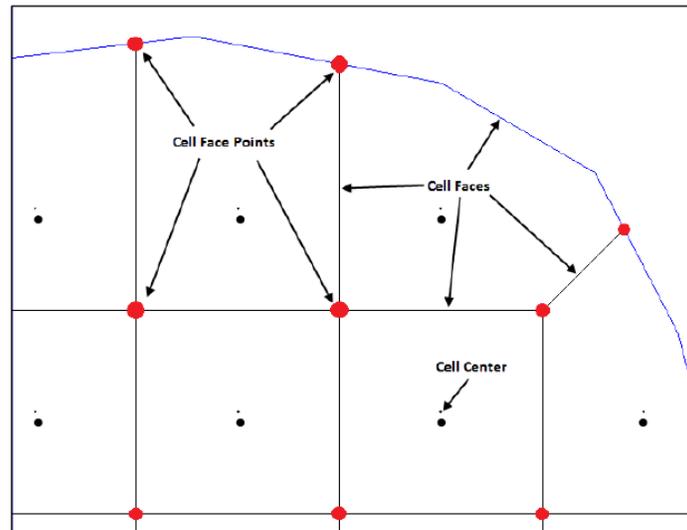


Figura 81. Propiedades de las celdas en una malla computacional.
Fuente: (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2021)

HEC-RAS realiza el proceso de mallado computacional siguiendo la técnica de triangulación de Delaunay y luego construye un diagrama de Voronoi. El proceso es análogo a cuando se construye el polígono de Thiessen para atribuir un área de cuenca a un pluviómetro específico. La elección del tamaño de malla es uno de los pasos importantes a considerar. En general debe optarse por elegir la malla que mejor se adecúe al terreno que controlará el movimiento del flujo. Las variaciones del tamaño de malla deben hacerse de forma gradual con el fin de mejorar la precisión de cálculo.

- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computacionales 2D

Cada celda y contorno de celda es preprocesada con la finalidad de obtener tablas de propiedades hidráulicas basadas en el terreno subyacente empleado en la modelación. Básicamente en el preproceso se calcula para cada celda la relación detallada de Elevación-Volumen y para cada contorno de celda calcula las relaciones Elevación-Perímetro Mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad y demás propiedades hidráulicas.

Estas relaciones que calcula el programa permiten al usuario crear celdas computacionales grandes, conservando los detalles del terreno, lo cual resulta ventajoso porque hace más rápido

los tiempos de cálculo, pues genera mayores detalles hidráulicos a nivel de cada celda. La elección del tamaño de celda se basa en el nivel de detalle que se quiere obtener.

- Mapas detallados de inundación y animaciones

HEC-RAS, a través de su herramienta RAS Mapper, ofrece la posibilidad de visualizar mapas de zonas inundadas, así como la animación del flujo de agua cuando ocurre la inundación. Dicho proceso se realiza en función del terreno subyacente y no en función del tamaño de celda computacional de la malla generada.

- Solución del esquema numérico basado en multiprocesadores

En HEC-RAS ha sido programado para obtener la solución aprovechando los procesadores que tiene el computador, lo cual permite que se ejecute más rápido que si solo empleara un procesador.

- Permite trabajar con procesadores de 64-Bit y 32-Bit

HEC-RAS puede trabajar ahora en computadores con procesadores de 32 y 64 bit, siendo conocido que un procesador de 64-Bit se ejecutará más rápido que el de 32-Bit y puede manejar gran cantidad de datos.

11.1.1.7 Intervalo de tiempo computacional en la modelación de flujo en 2D con HECRAS

Posterior a la selección del tipo de malla que emplea HEC-RAS para la modelación de flujo en 2D, existe la necesidad de elegir un intervalo de tiempo computacional adecuado. Con el fin de obtener simulaciones numéricamente estables y suficientemente precisas, el software HEC-RAS recomienda utilizar combinaciones del tamaño de celda Δx y del intervalo de tiempo Δt que conduzcan a Números de Courant inferiores a 3. Matemáticamente, la recomendación se expresa de la siguiente forma:

Ecuación de Saint-Venant:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0$$

Máximo Valor de C =3.0

Ecuación de Onda Difusa:

En el caso de utilizar la ecuación de onda difusa, la recomendación es la siguiente:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0$$

Máximo Valor de C =5.0

Donde:

C = Número de Courant

V = Velocidad del Flujo
 ΔT = Intervalo de tiempo computacional
 ΔX = Promedio de tamaño de celda

11.1.2 Información de entrada al modelo hidráulico del área urbana y de expansión urbana en el municipio de Palmira

La información de entrada al modelo hidráulico la compone los siguientes tópicos: hidrogramas con los caudales estimados mediante modelos hidrológicos, Modelo Digital de Terreno con topobatimetría de los cuerpos de agua y fronteras del modelo aguas abajo.

11.1.2.1 Levantamiento Topobatimétrico

La ejecución de las actividades correspondientes a los levantamientos topográficos de los drenajes en estudio se desarrolló para todos los cuerpos de agua que atraviesan el perímetro urbano de Palmira de occidente a oriente en el sentido de la escorrentía de las aguas, como son, Zanjón Zamorano y Zanjón Romero, que se ubican sobre la zona norte, Río Palmira y Zanjón Romero, ubicados sobre la parte central de la zona urbana, y los Zanjonos Beringo y Sesquicentenario, localizados sobre el extremo sur del área urbana de Palmira.

Para el levantamiento topobatimétrico de las corrientes hídricas de estudio se empleó una metodología de topografía convencional la cual se lleva a cabo por medio de la realización de una poligonal de amarre con puntos de control GNSS, capturados a partir del método “NTRIP”.

Para el inicio de las poligonales topográficas realizadas en la extensión correspondiente de las corrientes hídricas de la zona de estudio, se establecieron puntos de control a partir del posicionamiento cinemático con equipos GNSS de doble frecuencia, mediante corrección en tiempo real con metodología NTRIP.

Seguidamente, se definieron las comisiones de topografía, las cuales emplearon estaciones totales debidamente calibradas y certificadas para trabajos topográficos. Con estas estaciones se realizó la captura de la información por medio de radiaciones a cada uno de los elementos de la sección transversal. Estos elementos corresponden a los puntos del terreno natural, coronas, fondos y elementos construidos a lo largo del recorrido.

En el levantamiento de información topográfica, para fines de integración del modelo de elevación del canal del cuerpo de agua al modelo de elevación digital de la llanura de inundación, se recomienda interpolar utilizando líneas de quiebre; también para las secciones topobatimétricas se aplica este método de interpolación tomando puntos equivalentes a cada línea de quiebre en todas las secciones. Los puntos a levantar se pueden tomar siguiendo estas recomendaciones, bien sea por técnicas de topografía convencional con estación total o mediante posicionamiento GNSS en RTK o cinemático diferencial en fase portadora por post proceso.

En los casos donde la imagen presente desactualizaciones, como puede ser por obras nuevas, cambios en los niveles de la zona aledaña al cuerpo de agua, construcción de diques, jarillones y obras en general (puentes, box culvert, alcantarillas, entre otras), se realizarán levantamientos topográficos detallados para ser integrados al modelo de elevación digital empleado e incorporado en los modelos hidráulicos.

Como premisa de este trabajo topobatimétrico, se planteó la descripción de los canales de los cauces tratando de no alterar el nivel de detalle que ofrece el modelo de elevación digital LIDAR; esto teniendo en cuenta que en estos modelos la superficie se genera con millones de puntos y no se debe reemplazar un área útil del modelo de elevación digital LIDAR por una zona obtenida por interpolación de unos pocos puntos del levantamiento topográfico, de tal forma que la información se debe tomar extendiéndose hacia la llanura de inundación solamente lo necesario.

11.1.2.2 Modelo Digital de Terreno

Para la zona de estudio el grupo de Cartografía y SIG construyó un Modelo Digital de Terreno – MDT con un tamaño de píxel de 1 m (ver Figura 82), a partir del levantamiento de la zona mediante Lidar y con la batimetría de los tramos de los cauces del área urbana y de expansión urbana. En el informe técnico de Levantamiento Topobatimétrico del perímetro urbano se presentan los detalles y los procesos utilizados en la construcción de dicho producto (ver Anexo 8).

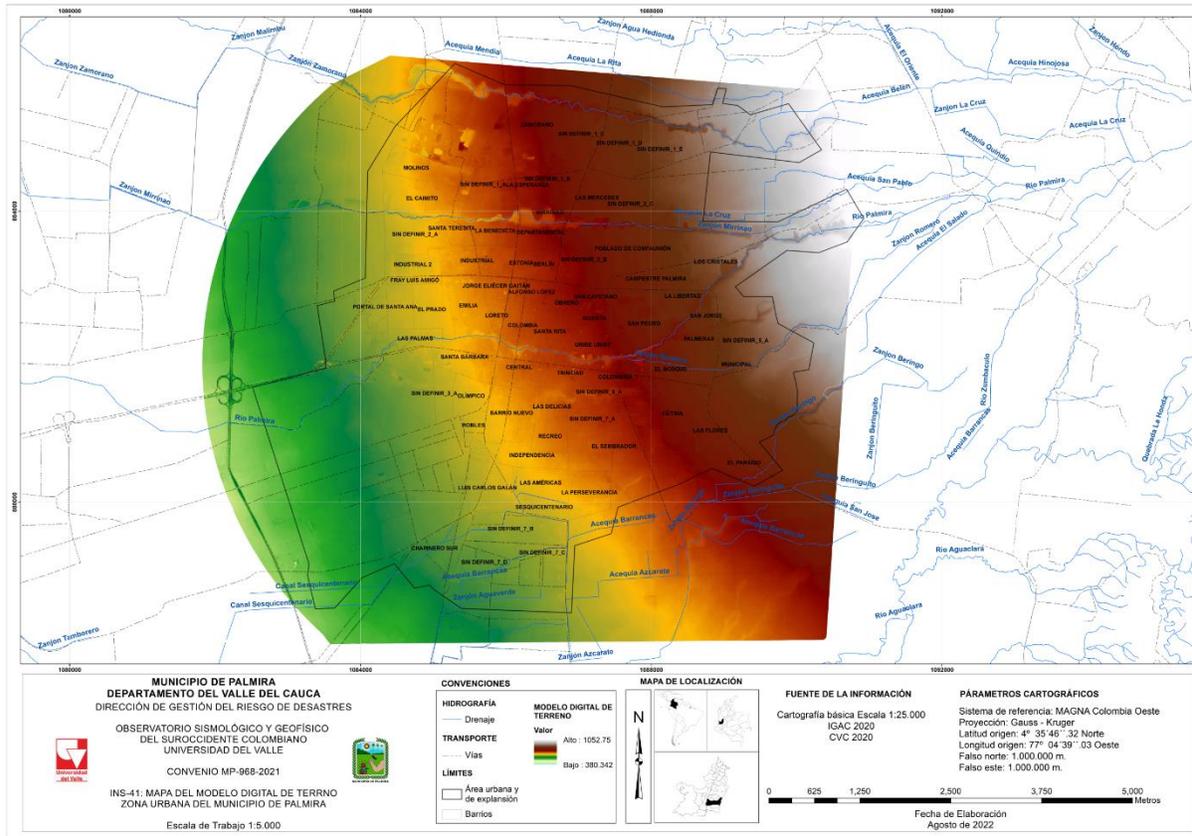


Figura 82. Modelo Digital de Terreno
 Fuente: elaboración propia

11.1.2.3 Caudales de modelación

Los caudales o los hidrogramas introducidos como frontera aguas arriba corresponden a los valores obtenidos mediante las modelaciones hidrológicas desarrolladas en el Capítulo 10 “ESTUDIO HIDROLÓGICO” (numeral 10.2.6.1) para los diferentes periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años.

11.1.2.4 Coeficiente de rugosidad

En la etapa de calibración de un modelo hidráulico una de las principales dificultades es la definición de la rugosidad de los cauces y las planicies adyacentes (coeficiente de rugosidad n Manning, en este caso). A partir de las características de los sedimentos y materiales del lecho, la vegetación de las bancas y las bancas de los cauces y las planicies en la zona e información de cobertura de uso del suelo, se define el coeficiente de rugosidad para el drenaje en estudio, tomando como referencia los valores de rugosidad n de Manning adaptados de la literatura, como lo es Ven Te Chow (Ver Tabla 55).

Tabla 55. Valores de rugosidad para diferentes tipos de suelos y coberturas

Rango Valores n Manning	Descripción del tipo de Cobertura
0,025 - 0,05	Aguas abiertas: áreas de aguas abiertas, generalmente con menos del 25% de cobertura de vegetación o suelo.
0,03 - 0,05	Espacio abierto desarrollado: áreas con una mezcla de algunos materiales construidos, pero principalmente vegetación en forma de césped. Las superficies impermeables representan menos del 20% de la cobertura total. Estas áreas más importantes incluyen unidades de vivienda unifamiliar en lotes grandes, parques, campos de golf y vegetación plantada en entornos desarrollados para recreación, control de erosión o con fines estéticos.
0,06 - 0,12	Desarrollado, de baja intensidad: áreas con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Las superficies impermeables representan del 20% al 49% de la cobertura total. Estas áreas suelen incluir unidades de vivienda unifamiliares.
0,08 - 0,16	Áreas desarrolladas de intensidad media con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Las superficies impermeables representan del 50% al 79% de la cobertura total. Estas áreas suelen incluir unidades de vivienda unifamiliares.
0,12 - 0,20	Desarrollado de alta intensidad: áreas altamente desarrolladas donde la gente reside o trabaja en grandes cantidades. Los ejemplos incluyen complejos de apartamentos, casas adosadas y comerciales / industriales. Las superficies impermeables representan del 80% al 100% de la cobertura total.
0,023 - 0,030	Tierra estéril (roca / arena / arcilla) : áreas de lecho rocoso, pavimento desértico, escarpes, talud, deslizamientos, material volcánico, escombros glaciales, dunas de arena, minas a cielo abierto, pozos de grava y otras acumulaciones de material de tierra. Generalmente, la vegetación representa menos del 15% de la cobertura total.
0,10 - 0,20	Bosque caducifolio: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Más del 75% de las especies de árboles pierden follaje simultáneamente en respuesta al cambio estacional.
0,08 - 0,16	Bosque siempre verde: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Más del 75% de las especies arbóreas mantiene sus hojas todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
0,08 - 0,20	Bosque mixto: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Ni las especies de hoja caduca ni las de hoja perenne superan el 75% de la cobertura total de árboles.
0,025 - 0,05	Matorral enano: solo áreas de Alaska dominadas por arbustos de menos de 20 centímetros de altura con un dosel de arbustos que generalmente supera el 20% de la vegetación total. Este tipo a menudo se asocia con pastos, juncos, hierbas y vegetación no vascular.
0,07 - 0,16	Arbustos / matorrales: áreas dominadas por arbustos; menos de 5 metros de altura con un dosel de arbustos que generalmente supera el 20% de la vegetación total. Esta clase incluye arbustos verdaderos, árboles jóvenes en una etapa de sucesión temprana o árboles atrofiados por las condiciones ambientales.
0,025 - 0,05	Pastizales / herbáceos - áreas dominadas por vegetación gramínea o herbácea, generalmente más del 80% de la vegetación total. Estas áreas no están sujetas a un manejo intensivo como la labranza, pero pueden utilizar para el pastoreo.
0,025 - 0,05	Juncia / herbáceas - Alaska solo áreas dominadas por juncos y hierbas, generalmente más del 80% de la vegetación total. Este tipo puede ocurrir con otras gramíneas importantes u otras plantas similares a las gramíneas, e incluye la tundra de juncia y la tundra de matas de juncia.
0,025 - 0,05	Pastizales / heno: áreas de pastos, leguminosas o mezclas de pastos y leguminosas plantadas para el pastoreo de ganado o la producción de semillas o cultivos de heno, típicamente en un ciclo perenne. La vegetación de pastos / heno representa más del 20% de la vegetación total.

Tabla 55. Valores de rugosidad para diferentes tipos de suelos y coberturas

Rango Valores n Manning	Descripción del tipo de Cobertura
0,020 - 0,05	Cultivos Cultivados: áreas utilizadas para la producción de cultivos anuales, como maíz, soja, hortalizas, tabaco y algodón, y también cultivos leñosos perennes como huertos y viñedos. La vegetación de los cultivos representa más del 20% de la vegetación total. Esta clase también incluye toda la tierra que se está cultivando activamente.
0,045 - 0,15	Humedales leñosos: áreas donde la vegetación de bosques o matorrales representa más del 20% de la cubierta vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente con agua.
0,05 - 0,085	Humedales herbáceos emergentes: áreas donde la vegetación herbácea perenne representa más del 80% de la cubierta vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente con agua.

Fuente: (Chow, 1994)

En la Tabla 56 se relacionan los valores de rugosidad n Manning a partir de la información disponible sobre los diferentes tipos de suelos, las coberturas y las granulometrías, entre otros, presentes en el área de estudio.

Tabla 56. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para el área de estudio, área urbana y de expansión urbana

Nombre	N Manning
Tejido urbano	0,16
Cultivos	0,05
Zanjón Zamorano	0,03
Arbolado	0,08
Pastos	0,03
Pastos arbolados	0,08
Río Palmira	0,04
Reservorio	0,05
Canal cultivo	0,03
Acequia Barrancas	0,03
Canal Sesquicentenario	0,02
Acequia Azcarate	0,03
Zanjón Mirriñaio	0,02
Acequia La Rita	0,03
Canal vial	0,02
Zanjón Romero	0,04

Fuente: elaboración propia

Finalmente, en este proceso se establece un mapa en formato ráster con la definición espacial del coeficiente de rugosidad de Manning considerando la información disponible sobre las características de los suelos indicada anteriormente (ver Figura 83).

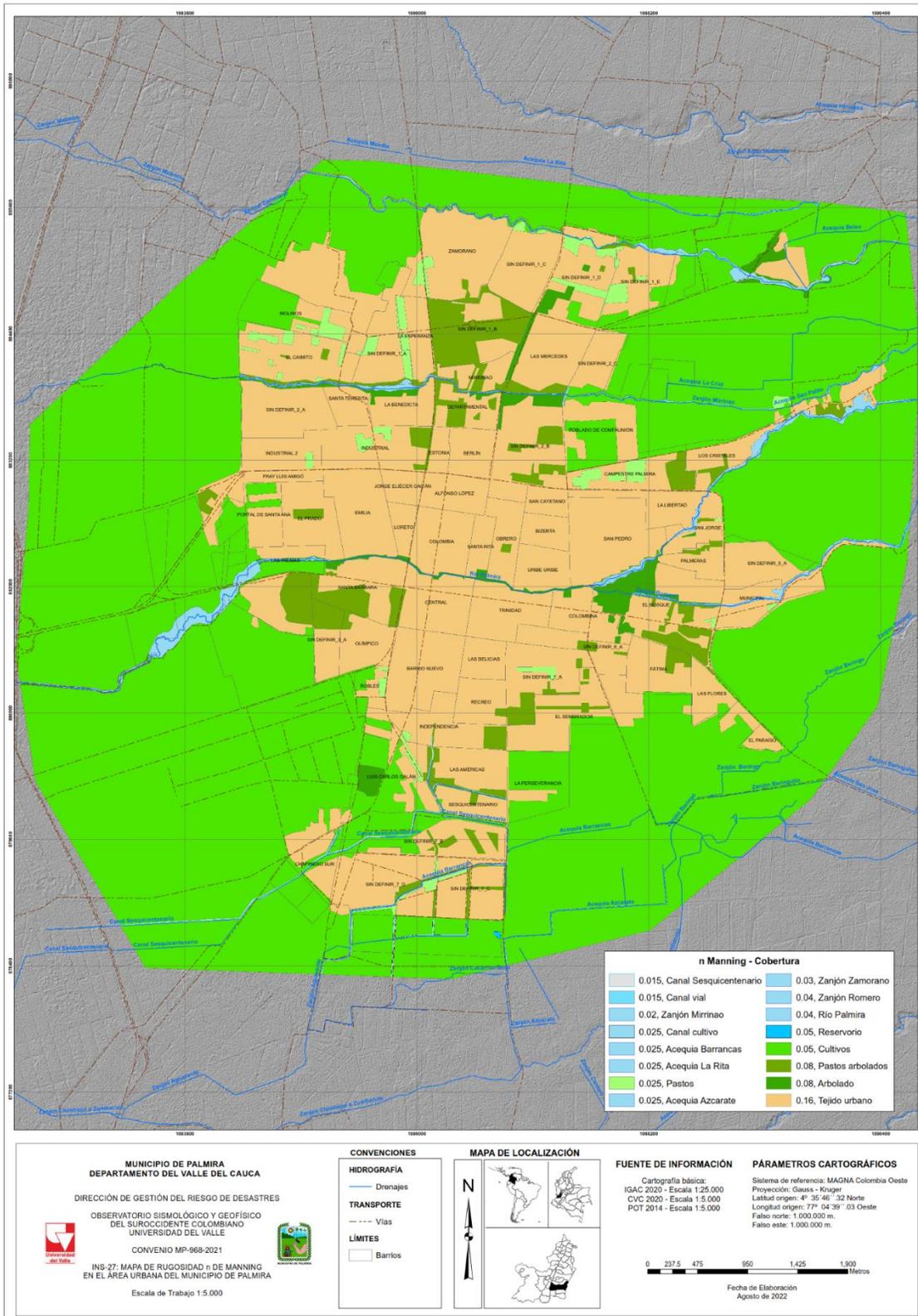


Figura 83. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning empleados en la modelación hidráulica área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.

Fuente: elaboración propia.

11.1.2.5 Malla computacional

Una vez elaborado el Modelo Digital de Terreno – MDT para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, se procedió a realizar el test de malla, que consistió en ejecutar modelos hidráulicos con varios tamaños de malla computacional, las cuales presentaron diferentes resultados (ver Tabla 57) hasta llegar a dividir la zona de modelación en tres sectores zona norte (acequia La Rita y zanjón Zamorano), zona centro (río Palmira, zanjones Mirriñao y Romero) y zona sur (zanjón Beringo, acequia Barrancas, canal Sesquicentenario), debido al gran tamaño del área a modelar, el detalle requerido para este tipo de estudios y los altos tiempos computacionales. De esta forma, al dividir el área en los tres sectores se garantiza la representatividad y el detalle necesario para los estudios básicos de amenaza por inundación de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

En la tabla Tabla 57 se presenta el análisis de las diferentes mallas computacionales empleadas en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, siendo la malla escogida para realizar las simulaciones de cada uno de los periodos de retorno la de mayor detalle. En la Figura 84 se presentan las mallas computacionales empleadas para las modelaciones hidráulicas de la zona de estudio.

Tabla 57. Análisis de diferentes mallas computacionales área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

Zona	Malla	Número de celdas	Observaciones
Urbana Total	100x100	4996	Tiempos computacionales bajos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
	50x50	19592	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más aproximados a la realidad.
	10x10	481633	Tiempos computacionales altos, por superar el millón de celdas el modelo presenta inestabilidad e inicia su procesamiento de forma óptima.
	5X5	1922649	Tiempos computacionales altos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
Norte	100x100	852	Tiempos computacionales bajos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
	50x50	3092	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más aproximados a la realidad.
	10x10	72152	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más representativos de la realidad. Malla seleccionada.
	5X5	286475	Tiempos computacionales bajos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
Centro	100x100	3211	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más aproximados a la realidad.
	50x50	11992	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más representativos de la realidad. Malla seleccionada.
	10x10	289827	Tiempos computacionales bajos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
	8x8	452459	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más aproximados a la realidad.
Sur	100x100	936	Tiempos computacionales bajos, con manchas de inundación amplias y profundidades extremadamente altas, lo cual no representa la realidad.
	50x50	3312	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más aproximados a la realidad.
	10x10	77008	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más representativos de la realidad. Malla seleccionada.
	5X5	305565	Tiempos computacionales altos, pero con resultados más representativos de la realidad. Malla seleccionada.

Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar que dentro de las características que se tienen en el programa HEC-RAS, específicamente en las últimas versiones (5 y 6), los resultados ráster (tamaño de pixel) de los cálculos realizados en la malla computacional definida están asociados principalmente a la resolución del DEM; por tal motivo, el tamaño de la malla computacional seleccionado deberá garantizar la representatividad del evento simulado respecto a las condiciones actuales de la zona.

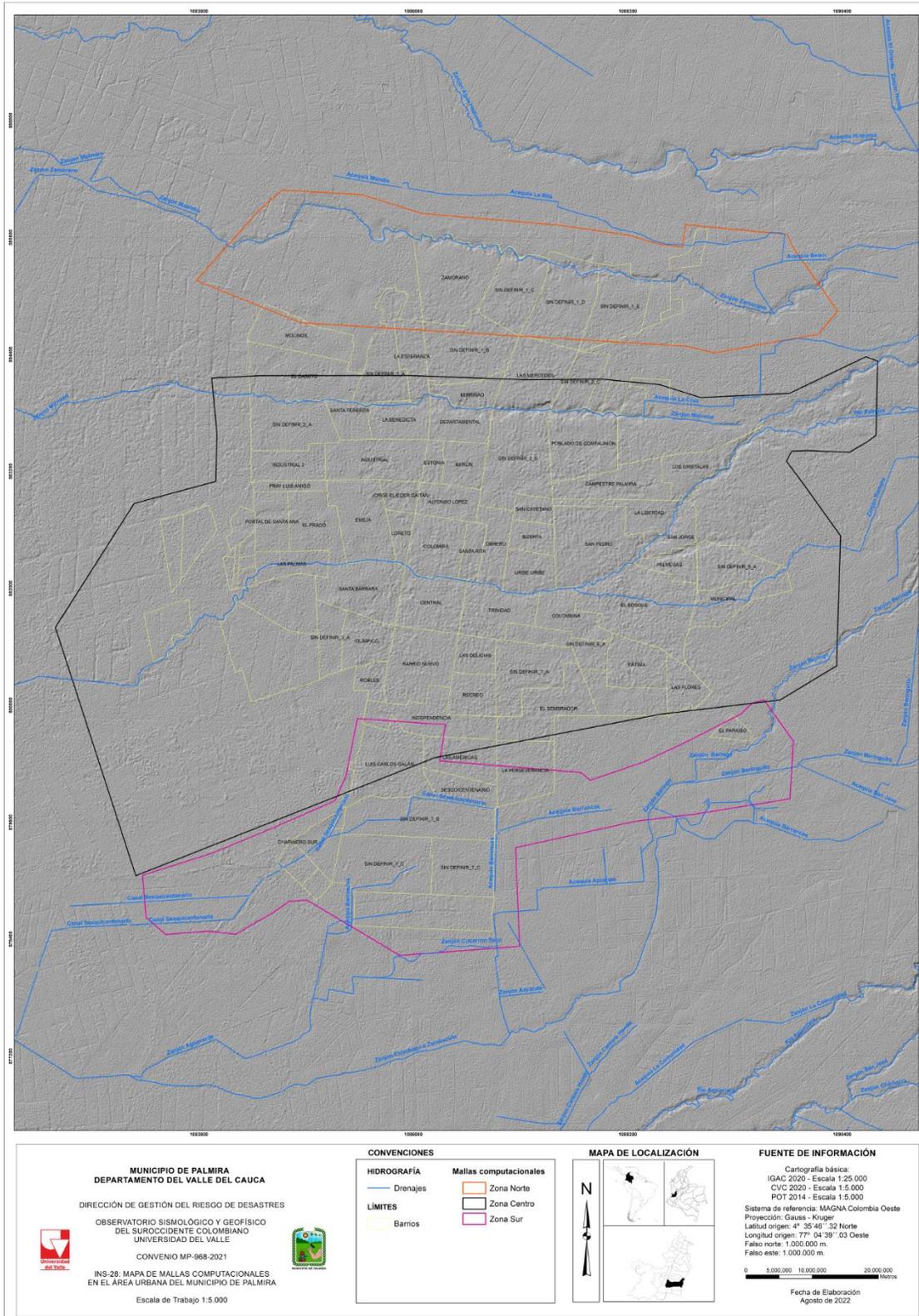


Figura 84. Grillas empleadas para las modelaciones hidráulicas área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

11.1.2.6 Condición de Frontera

Ubicar de manera apropiada las fronteras abiertas del modelo es de gran importancia, es decir, los sitios o secciones a través de los cuales ingresan y salen las corrientes de agua del área modelada. Se recomienda localizar las fronteras abiertas en aquellos sectores donde se cuente con la mayor cantidad de información posible como batimetría e hidrología.

En la condición de frontera aguas arriba de los modelos hidráulicos del área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira aparecen los caudales o hidrogramas de salida del modelo hidrológico (ver desde la Figura 76 hasta la Figura 79), correspondiente a las crecientes generadas para los diferentes periodos de retorno de los drenajes evaluados.

En lo que corresponde a la condición de frontera Aguas abajo, de acuerdo con los recorridos de campo y los estudios topográficos no se evidenciaron elementos que generaran una condición particular en el tramo de estudio, razón por la cual, se procedió a implementar una profundidad normal obtenida de la pendiente del fondo de las corrientes de agua en estudio en los tramos finales modelados.

11.1.2.7 Calibración del modelo hidráulico

La calibración de un modelo consiste en el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los coeficientes empíricos (hidráulicos, de transporte, de sedimentos, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que, los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la mejor manera posible los eventos de la naturaleza.

Generalmente, los resultados del modelo al inicio del proceso de calibración difieren en mayor o menor grado de los valores medidos en la naturaleza. El objetivo fundamental de la calibración es, por lo tanto, afinar el modelo de tal manera que las diferencias entre los valores calculados en la simulación y los valores medidos en la naturaleza sea mínima o despreciable. Este ajuste debe realizarse siempre teniendo en cuenta las características físicas de los diferentes parámetros y variables involucradas en los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en los cauces, de tal manera que los mismos (parámetros y variables) deben encontrarse dentro de rangos característicos de los cauces como de la zona de estudio (rangos físicamente válidos).

El potencial de un modelo para reproducir y predecir los eventos reales (flujos, sedimentación, erosión, etc.) y la calidad potencial de su calibración dependerá de la calidad y cantidad de los datos topográficos, topológicos, hidráulicos y sedimentológicos disponibles para el sistema en estudio (Cunge, 1980).

Desafortunadamente en el área de estudio no se cuenta con la información hidrométrica que permita una calibración del modelo como lo contempla el protocolo de modelación. Sin embargo,

como parte de una aproximación al proceso de calibración del modelo hidráulico, resulta conveniente verificar la representación espacial de los mapas de inundación generados por el modelo con base en lo observado en los recorridos de campo, los documentos técnicos asociados a la gestión del riesgo en el municipio de Palmira, la información aportada por el personal administrativo y operativo de Aquaoccidente, Bosque Municipal, Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio y comunidad en general, así como de la espacialización de los reportes de eventos por inundación en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira derivados de la cartografía social.

11.1.3 Resultados de la simulación hidráulica del área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira

Una vez definida la información de entrada al modelo, presentada previamente, se procedió a realizar las simulaciones para la determinación de las áreas potencialmente inundables y los niveles de amenaza en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira para los escenarios correspondientes a los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años (ver desde la Figura 110 hasta la Figura 117).

Las condiciones topográficas, morfológicas y climáticas del municipio de Palmira favorecen la ocurrencia periódica de inundaciones ocasionadas por las fuertes lluvias en las partes altas y medias de las cuencas, que provocan el aumento de los caudales y los niveles de agua en los cauces y la escorrentía directa que llega a la zona.

Las modelaciones hidrodinámicas (ver Anexo 9) de los cauces en estudio del área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira muestran desbordamientos en las corrientes de agua estudiadas (ver desde la Figura 110 hasta la Figura 117); esto se debe principalmente a las bajas capacidades hidráulicas y las bajas pendientes en algunos de sus tramos.

Respecto a las velocidades máximas de los flujos, los resultados de las modelaciones muestran algunas zonas aledañas a los cauces con valores superiores a los 0,8 m/s, las cuales ocurre únicamente en el instante inicial del desbordamiento del cauce hacia las planicies de inundación adyacentes.

Las zonas urbanas del municipio de Palmira fueron establecidas sobre terrenos que históricamente se encontraban ocupados por suelos principalmente agrícolas, con cultivos como caña de azúcar, y sobre las cuales, en su momento, los propietarios implantaron canales o acequias para riego y drenaje de los cultivos, siendo estos canales poco profundos, de bajas pendientes y poca capacidad hidráulica (ver Figura 85).



Figura 85. Cobertura vegetal asociada a cultivos de caña de azúcar y plátano aledaño al río Palmira (sector denominado “Callejón Los Roa”)

En la actualidad dichos canales son empleados como elementos del sistema pluvial del municipio (ver Figura 86); en algunos casos, dentro de la cabecera urbana, se modificaron sus condiciones hidráulicas mediante revestimiento en concreto y ampliación de su capacidad, mientras que en otros tramos, asociados principalmente a las zonas periurbanas (aledañas a cultivos de caña), no se han mejorado dichas condiciones y, por el contrario, se han ocupado sus orillas con edificaciones; es por ello que, al presentarse eventos de altas precipitaciones, se generan fácilmente inundaciones debido a la baja capacidad hidráulica del cauce y las áreas de amortiguación, así como a la ausencia de estructuras de mitigación.



Figura 86. Descargas del sistema de alcantarillado pluvial del municipio a los hoy drenajes urbanos

Otro de los factores que incide significativamente en las crecientes e inundaciones en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira corresponde al cambio en el uso del suelo, que al generar endurecimiento para el desarrollo urbanístico aumenta la impermeabilización impidiendo la infiltración del agua y, por ende, el aumento de los caudales máximos en comparación con los caudales en zonas naturales (sin intervención antrópica).

Para las condiciones actuales, las aguas producto de eventos extremos de precipitación se dirigen hacia los sectores más bajos donde se acumulan las aguas provenientes de las lluvias locales y de la escorrentía superficial; en estos sectores actualmente se encuentran ubicados desarrollos urbanísticos.

Los resultados de la modelación hidráulica para los diferentes periodos de retorno muestran que la mayoría de los puentes y box culverts existentes en la zona urbana del municipio de Palmira no tienen la capacidad hidráulica para transitar las crecientes de los periodos de retorno objeto de estudio; en contraste, las estructuras hidráulicas asociadas a los proyectos urbanísticos recientemente implantados, como canales y puentes, cuentan con una mayor capacidad hidráulica (ver desde la Figura 110 hasta la Figura 117).

Como era de esperarse, el escenario más crítico corresponde al periodo de retorno de 100 años, ya que se observa una mayor área de afectación debido a los hidrogramas transitados por los cauces. Los sectores que presentan mayor desbordamiento (ver Figura 117) corresponden al río Palmira antes del denominado Bosque Municipal y a la salida del box culvert localizado antes del cruce de la vía que conduce de Palmira a Cali y aguas abajo de la misma.

De igual forma, en el sector conocido como Guayabal, el zanjón Mirriñao presenta desbordamiento e inundaciones debido a su baja capacidad hidráulica, así como a la ocupación de las llanuras de inundación y a la falta de mantenimiento (ver Figura 87). Esta situación también se presenta en la vía que conduce de Palmira a Guayabal en la parte posterior del sector de establecimiento de moteles.

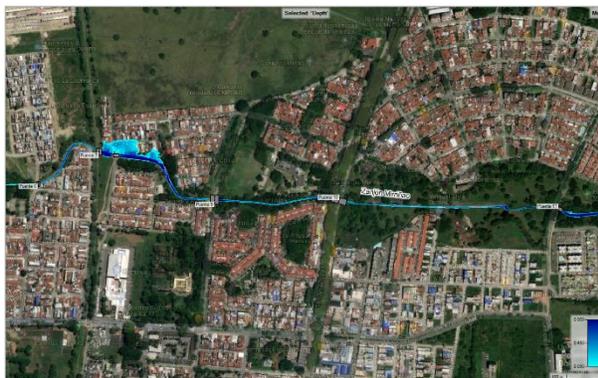


Figura 87. Zanjón Mirriñao sector conocido como Guayabal
Fuente: elaboración propia

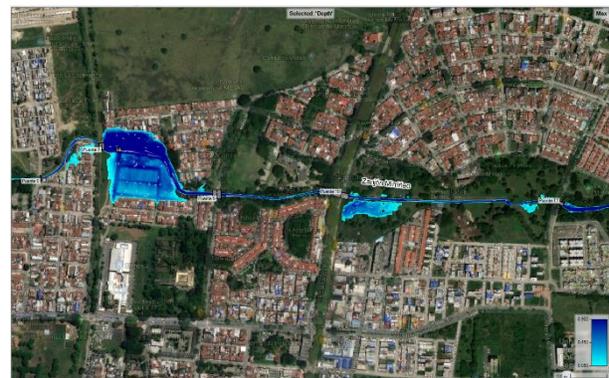
Por su parte, los resultados del estudio hidráulico del zanjón Mirriñao indican desbordamiento hacia el barrio del mismo nombre debido a la baja capacidad que presenta la estructura hidráulica ubicada en el cruce de la carrera 33.



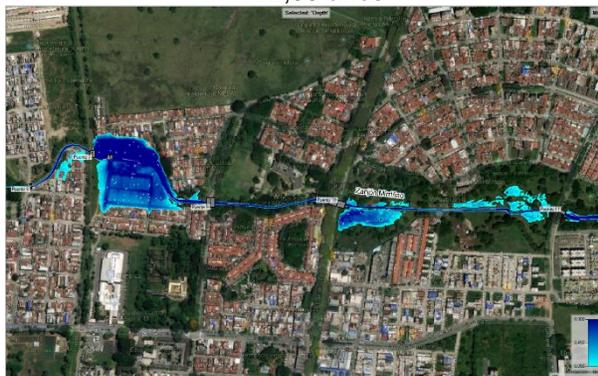
Figura 88. Zanjón Mirriñaio revestido en concreto barrio Mirriñaio
Fuente: elaboración propia



TR 2,33 años



TR 25 años



TR 50 años



TR 100 años

Figura 89. Mancha de inundación zanjón Mirriñaio
Fuente: elaboración propia

Cabe mencionar que la estructura hidráulica de paso del río Palmira sobre la calle 42 fue diseñada posiblemente para el periodo de retorno de 25 años de acuerdo con los lineamientos del Manual de Drenaje para Carreteras (Instituto Nacional de Vías, 2009), razón por la cual para los periodos de retorno de 50 y 100 años se evidencia represamiento por la baja capacidad de la estructura,

que afecta los barrios Los Cristales y Campestre Palmira (Figura 90). Adicionalmente, esta calle, por encontrarse más elevada que las casas localizadas en el lado derecho sentido occidente-orientado, funciona como dique de protección para las crecientes asociadas a los periodos de retorno de 50 años (ver Figura 115).

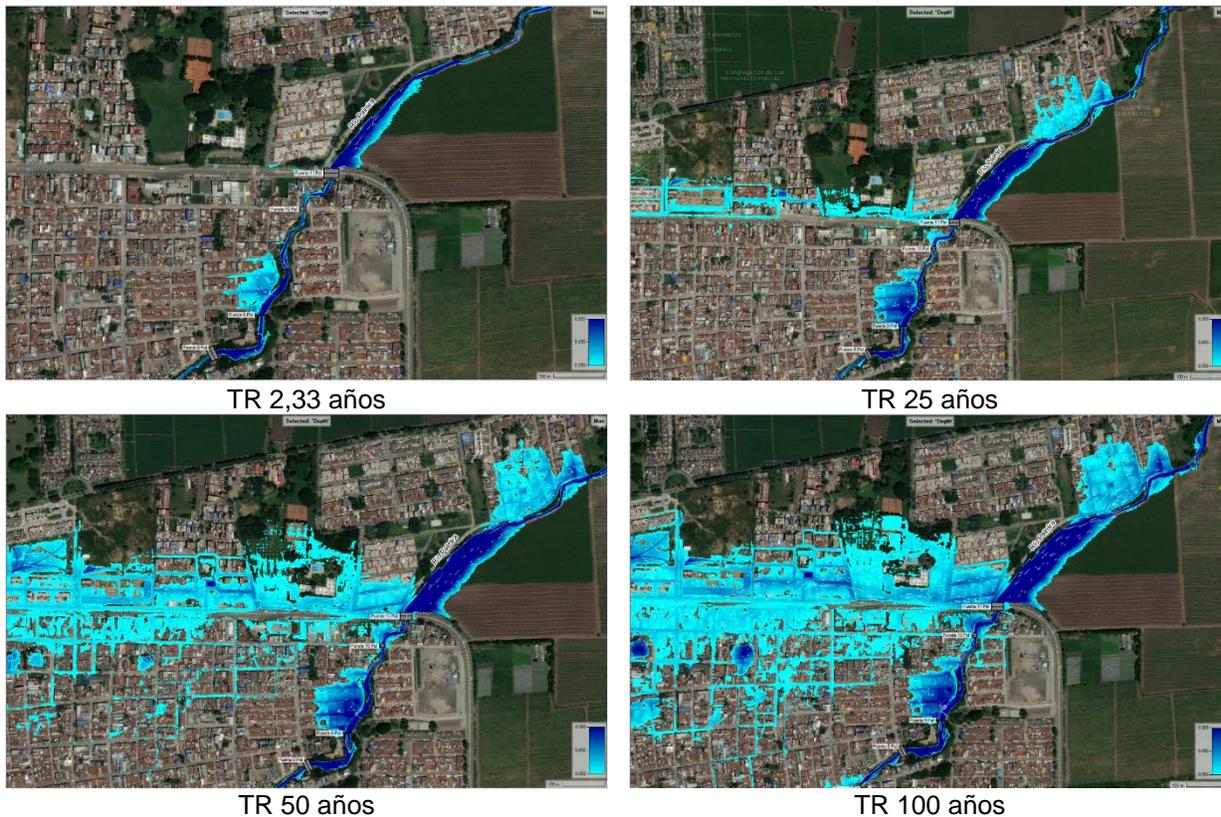


Figura 90. Mancha de inundación río Palmira a la altura de la calle
Fuente: elaboración propia

Aguas abajo de la calle 42, el río Palmira presenta desbordamiento sobre los sectores de los barrios San Jorge, La Libertad y San Pedro debido a que existen predios localizados a cotas menores que las de las orillas del río; adicionalmente, en la salida de campo realizada en desarrollo del estudio se observó disposición de residuos sólidos y de construcción y demolición hacia las orillas del drenaje, dejando en evidencia la falta de acciones de control, mantenimiento y limpieza (ver desde Figura 91 hasta la Figura 94).



Figura 91. Estructura hidráulica calle 42 río Palmira



Figura 92. Infraestructura aledaña del río Palmira



Figura 93. Falta de mantenimiento en el río Palmira



Figura 94. Residuos de construcción y demolición aledaña al río Palmira

En los tramos del río Palmira a la altura de la calle 35 en el barrio San Pedro se observa un proceso de erosión de orilla con posible volcamiento del muro de protección de la margen derecha del drenaje (ver Figura 95).



Figura 95. Proceso de erosión de orilla con muro fracturado en la calle 35 río Palmira
Fuente: elaboración propia

En el sector del Bosque Municipal, donde confluyen el zanjón Romero y el río Palmira, se localizan obras e infraestructura, tales como, rejillas de retención de sólidos, desarenador, canales, estructuras derivadoras de caudal, compuertas, puentes, lagos, box culvert y estación de bombeo (ver desde Figura 96 hasta la Figura 105); para su óptimo funcionamiento, como medida estructural para mitigación de riesgo por inundación por desbordamiento de este sector, se debe garantizar un adecuado mantenimiento, tanto del sistema mecánico de las estructuras como del canal en sí mismo (zanjón Romero y río Palmira); esto permitirá el tránsito libre de los caudales de las crecientes asociadas a los diferentes periodos de retorno, sin obstáculos generados por coberturas vegetales y residuos sólidos ordinarios, pues el taponamiento de una rejilla (box culvert) puede generar represamientos, embalsamientos, desbordamientos e inundaciones en las zonas aledañas.



Figura 96. Puente peatonal antes del Bosque Municipal



Figura 97. Vista aguas abajo del puente peatonal antes del Bosque Municipal



Figura 98. Estructura derivadora en límite del Bosque Municipal



Figura 99. Desarenador, compuertas, canales



Figura 100. Estructura y compuerta derivadora zanjón Romero



Figura 101. Estructura y compuerta derivadora zanjón Romero



Figura 102. Puente y dique transversal



Figura 103. Compuerta de conexión entre lago y río Palmira



Figura 104. Inicio box culvert río Palmira (rejilla, bocatoma, estación de bombeo y caseta de operación)

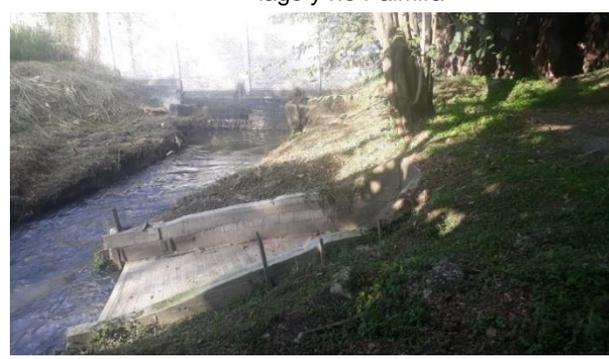


Figura 105. Muro y rejilla al inicio del bosque municipal río Palmira

El zanjón Romero, a la altura del barrio El Bosque y antes de ingresar al sector denominado Bosque Municipal, presenta desbordamiento debido a la baja capacidad hidráulica tanto del tramo del drenaje como de las estructuras existentes en el sector; adicionalmente, en la salida de campo

realizada se evidenció la invasión y proliferación de coberturas vegetales, las cuales no han sido removidas (evidenciando falta de mantenimiento), impidiendo el tránsito libre de los caudales (Figura 96 y Figura 97).

En el tramo del zanjón Romero, a la altura de la entrada vehicular al Bosque Municipal de Palmira por la carrera 12, para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años los modelos hidráulicos muestran que se presentan desbordamientos con flujos hacia el río Palmira y láminas de agua superficiales de poca profundidad hacia los barrios El Bosque y Colombina (Figura 106).

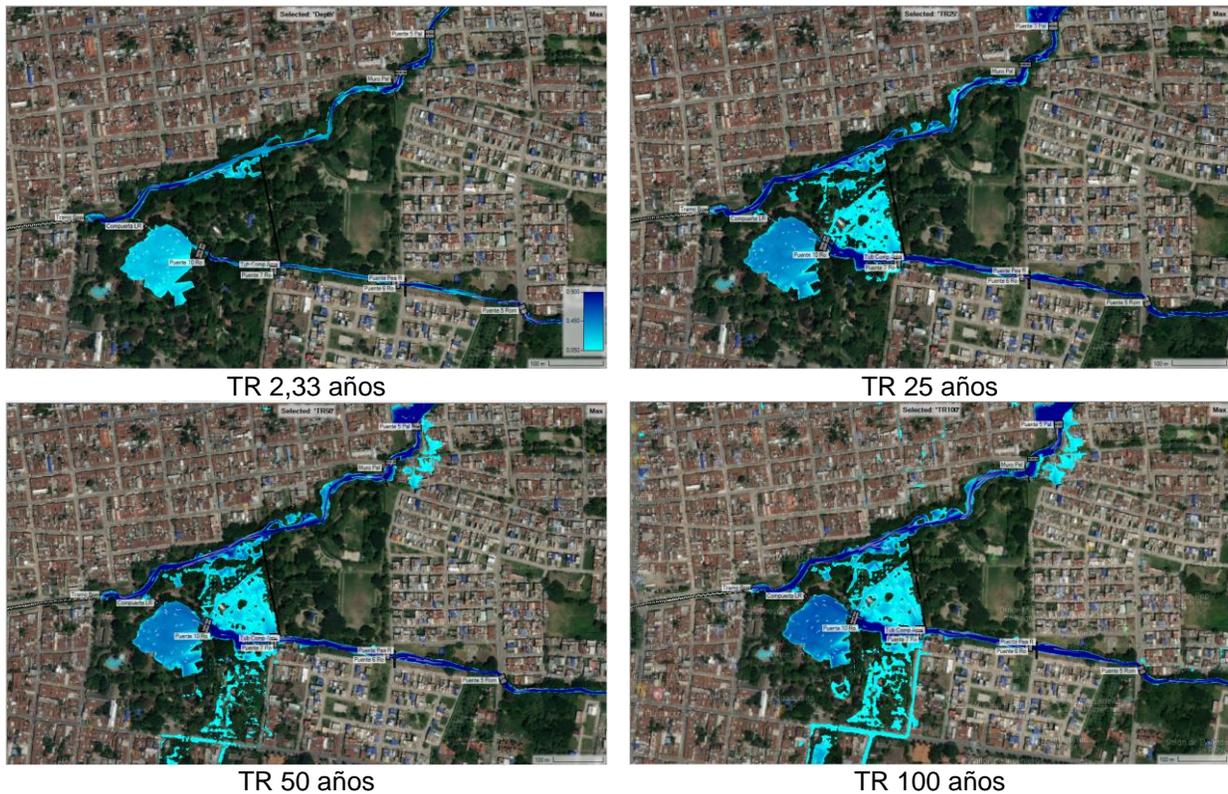


Figura 106. Mancha de inundación río Palmira y zanjón Romero antes del Bosque Municipal de Palmira
Fuente: elaboración propia

Asimismo, es notable el desbordamiento hacia las zonas aledañas del zanjón Zamorano, como son los barrios Zamorano y Monteclaro y a edificaciones contiguas al cauce y ubicadas frente a predios del Ingenio Manuelita en la diagonal 65 con carrera 35 (ver Figura 107).



Figura 107. Zanjón Zamorano a la altura de los barrios Zamorano y Monteclaro; con edificaciones contiguas al cauce ubicadas frente a predios del Ingenio Manuelita en la diagonal 65 con carrera 35
Fuente: elaboración propia

El canal Sesquicentenario, aguas abajo de la confluencia con el zanjón La María, presenta desbordamiento en la estructura del barrio Chapinero Sur a la altura de la diagonal 4. Cabe mencionar que en visita de campo, realizada en el transcurso del proyecto, se identificó un canal en concreto con un box culvert doble que presentaba residuos vegetales producto del arrastre sobre el pilote central de la estructura, donde fue evidente la falta de limpieza y mantenimiento (ver Figura 108).



Figura 108. Estructura hidráulica del canal Sesquicentenario barrio Chapinero Sur a la altura de la diagonal 4
Fuente: elaboración propia

El sector del zanjón Beringo y la acequia Barrancas, por tratarse de un sector asociado a cultivos agrícolas, cuenta con baja capacidad hidráulica para transitar las crecientes asociadas a los periodos de retorno de 100 años; razón por la cual los resultados del estudio hidráulico muestran

desbordamientos, afectando la urbanización Tulipanes de La Italia frente al ingreso a los predios de un ingenio, aproximadamente a la altura de la calle 4 con carrera 24.

De la misma forma, como ocurre con el río Palmira, la estructura hidráulica de paso del zanjón Beringo sobre la vía que conduce de Palmira a Pradera, muy posiblemente fue diseñada para el periodo de retorno de 25 años de acuerdo con los lineamientos del Manual de Drenaje para Carreteras (Instituto Nacional de Vías, 2009); se concluye esto porque para los periodos de retorno de 50 y 100 años los modelos hidráulicos indican represamientos en el sector debido a la baja capacidad de la estructura, afectando el barrio el Paraíso y los sectores agrícolas aledaños (ver Figura 109).

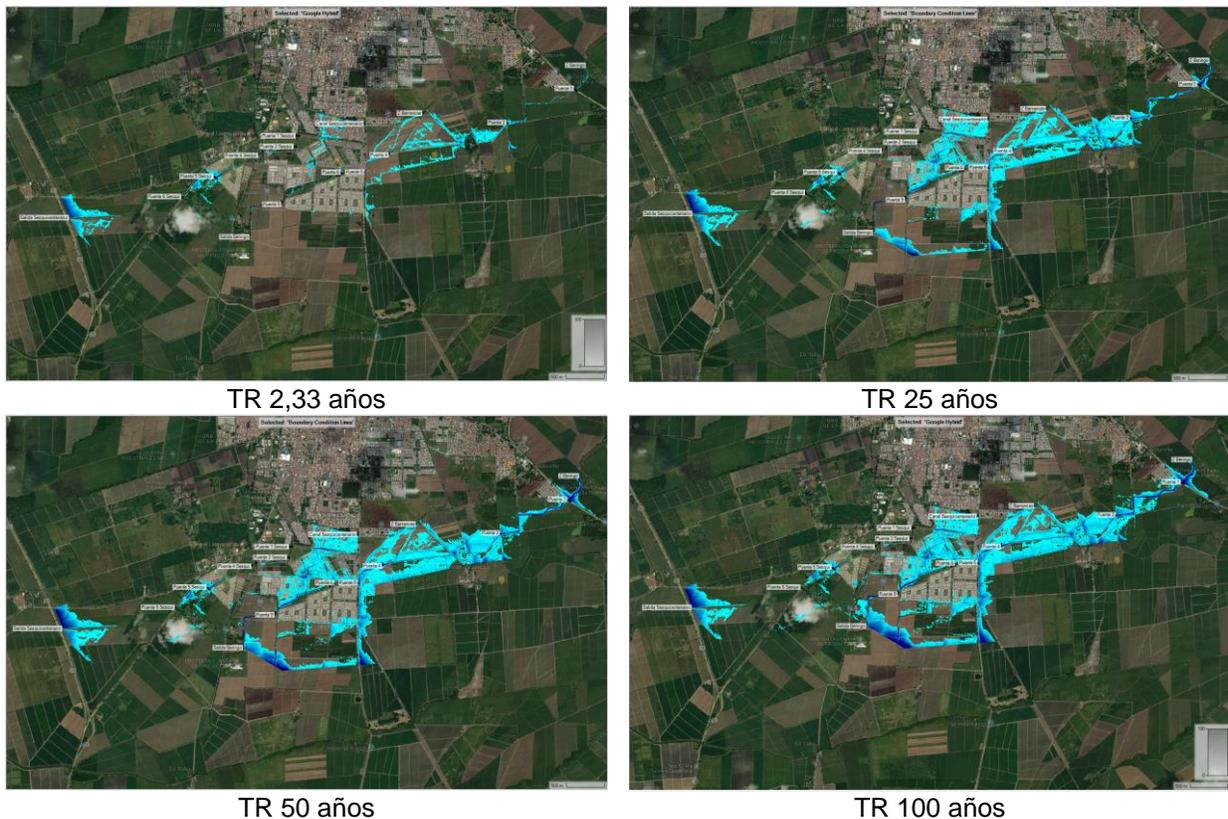


Figura 109. Mancha de inundación zanjones Barrancas y Beringo y canal Sesquicentenario

Fuente: elaboración propia

Los drenajes estudiados que se encuentran en condiciones naturales, debido a sus bajas pendientes y velocidades generan zonas meándricas en su recorrido, son propensos a desbordamientos; los resultados de las modelaciones hidráulicas para los periodos de retorno de 50 y 100 años muestran desbordamientos en estos sectores corresponden a áreas de amortiguamiento de crecientes las cuales deben conservarse y mantenerse libres de edificaciones y rellenos antrópicos.

Los resultados de las modelaciones muestran que los cauces de los zanjones en estudio se encuentran a banca llena (desde 2,33 años) y en muchos casos desbordados, lo cual indica que,

las aguas del sistema de alcantarillado pluvial no podrán ser entregadas, generando encharcamientos producto de los reboces.

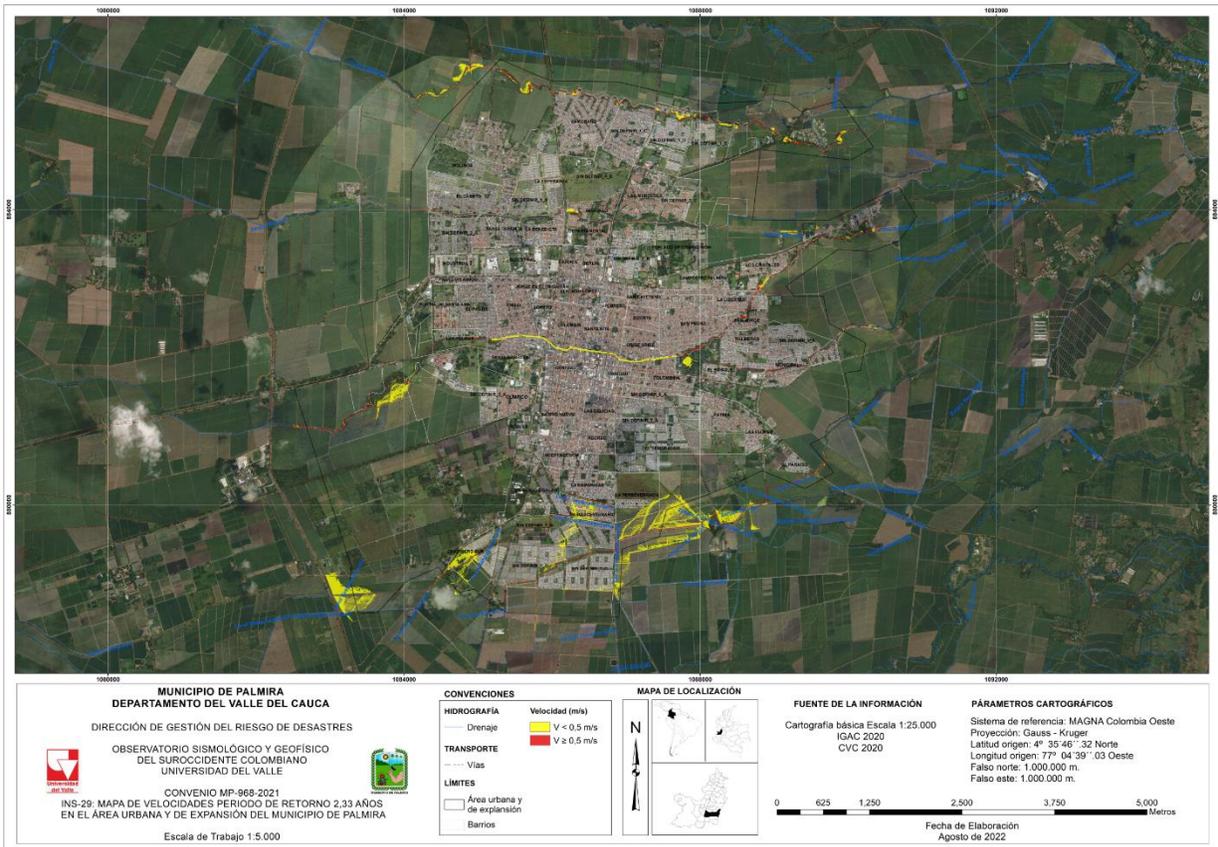


Figura 110. Velocidades máximas (m/s) TR 2,33 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

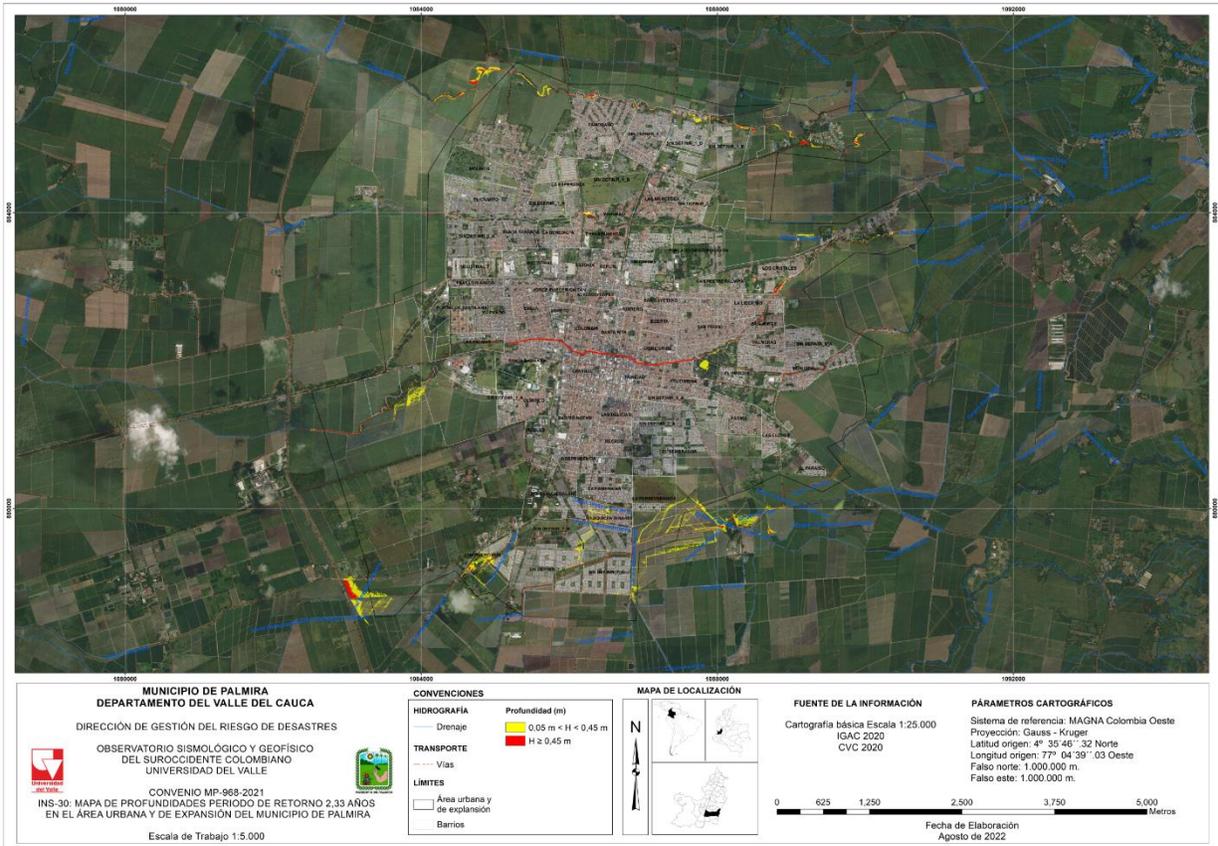


Figura 111. Profundidades máximas (m) TR 2,33 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

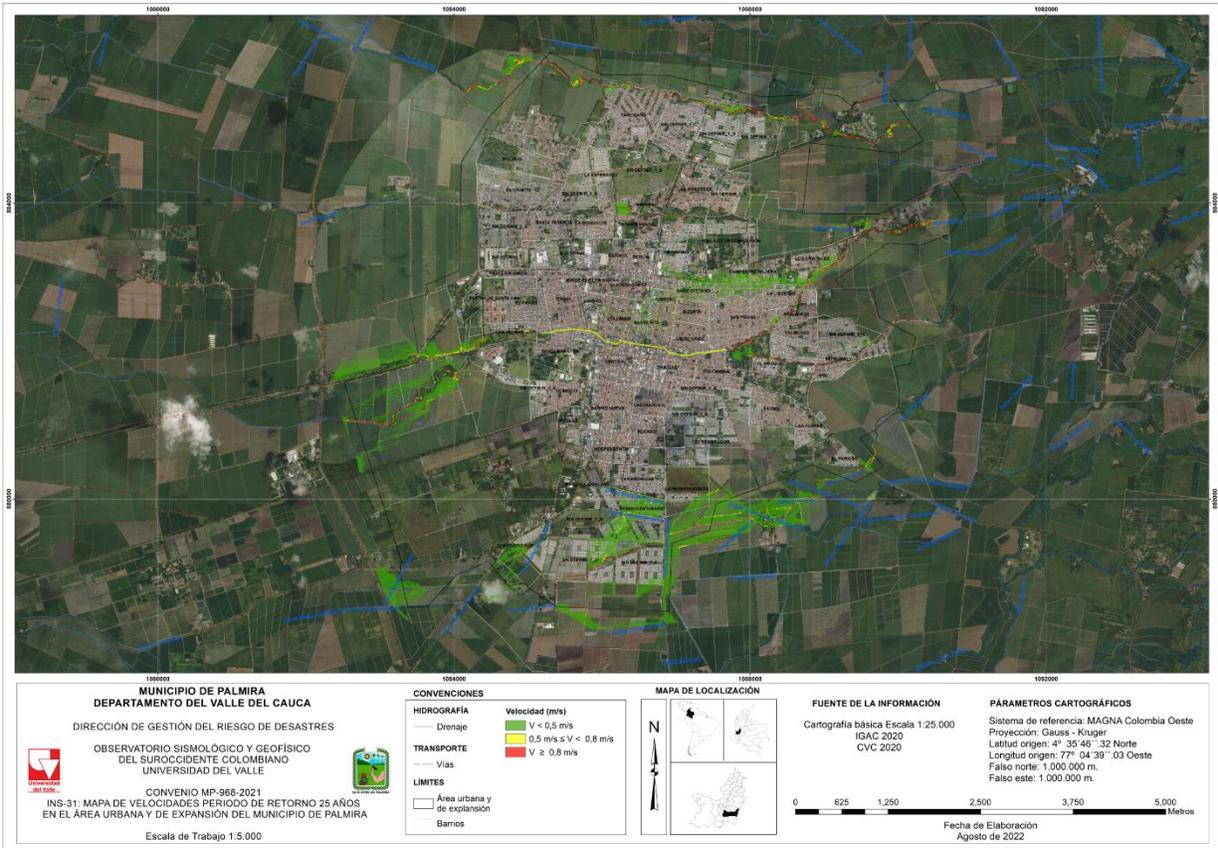


Figura 112. Velocidades máximas (m/s) TR 25 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

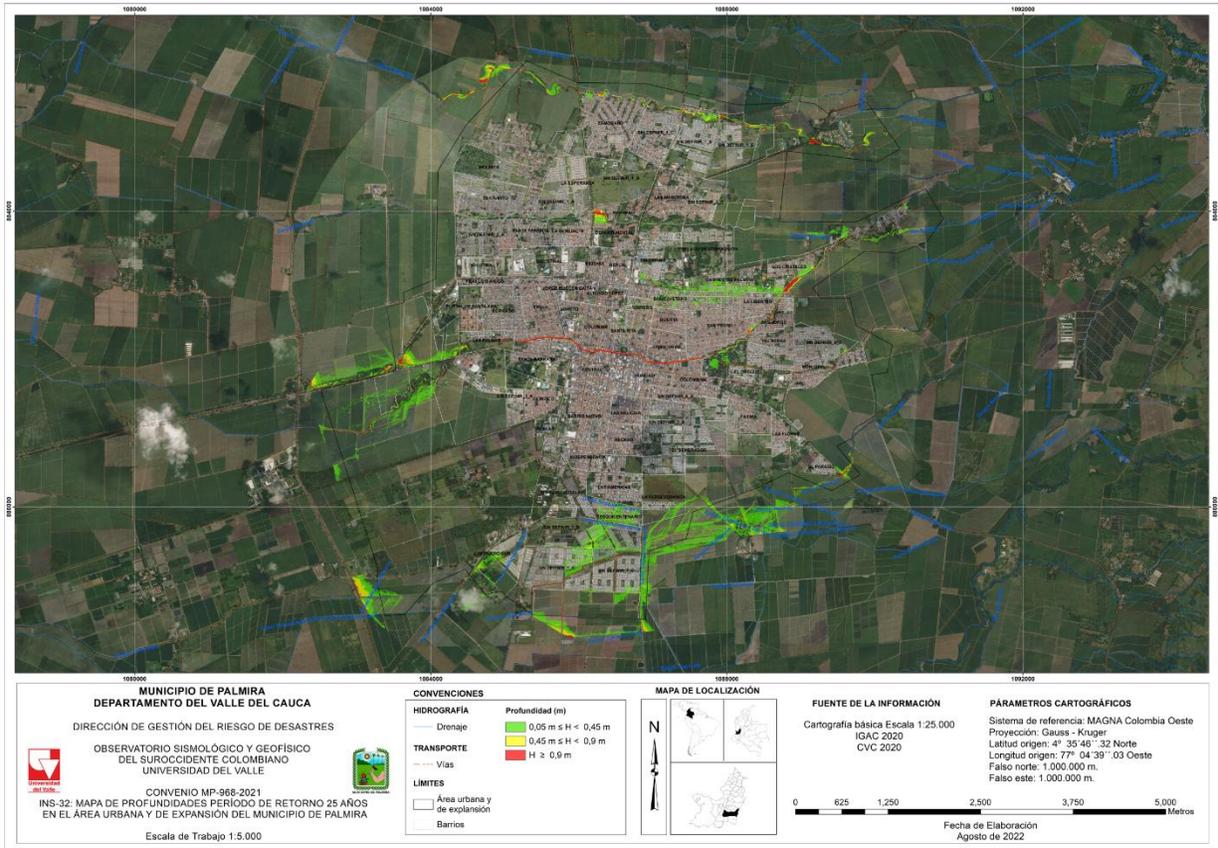


Figura 113. Profundidades máximas (m) TR 25 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira

Fuente: elaboración propia

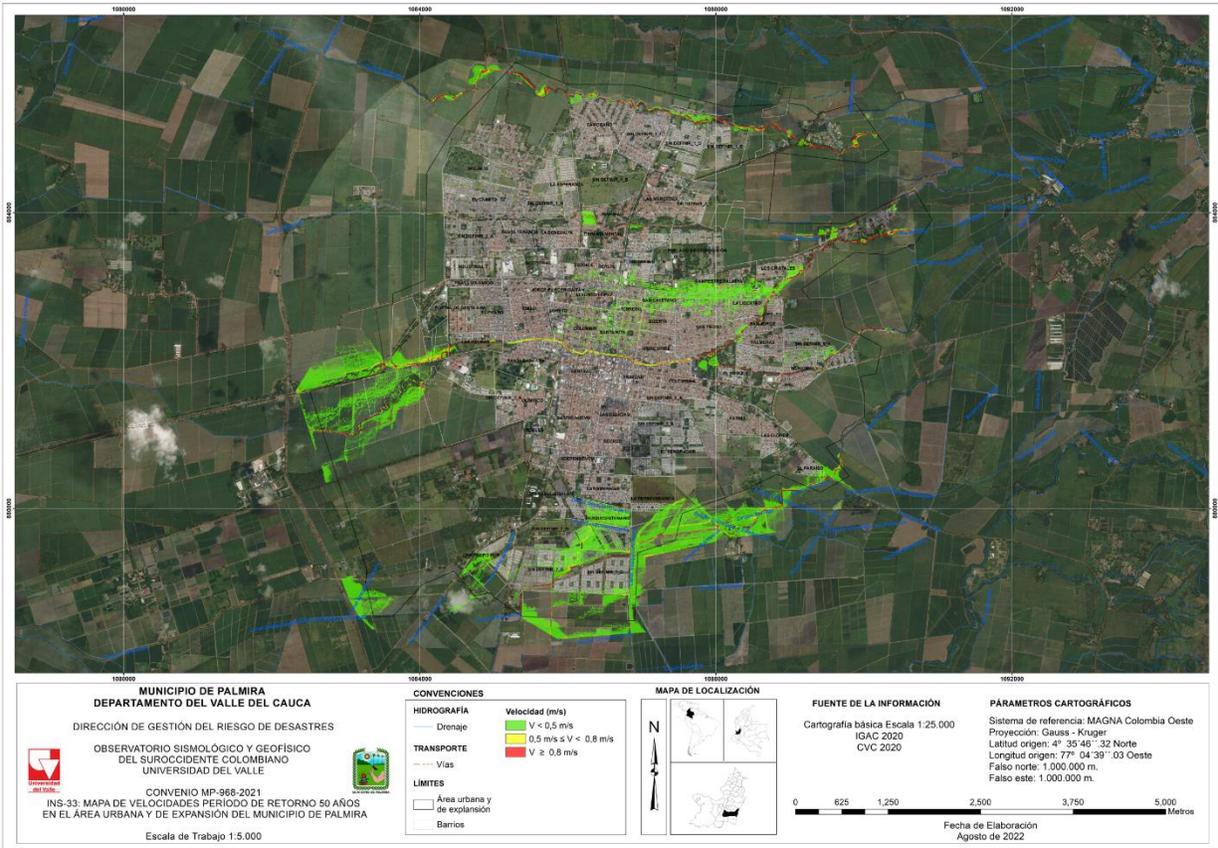


Figura 114. Velocidades máximas (m/s) TR 50 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
 Fuente: elaboración propia

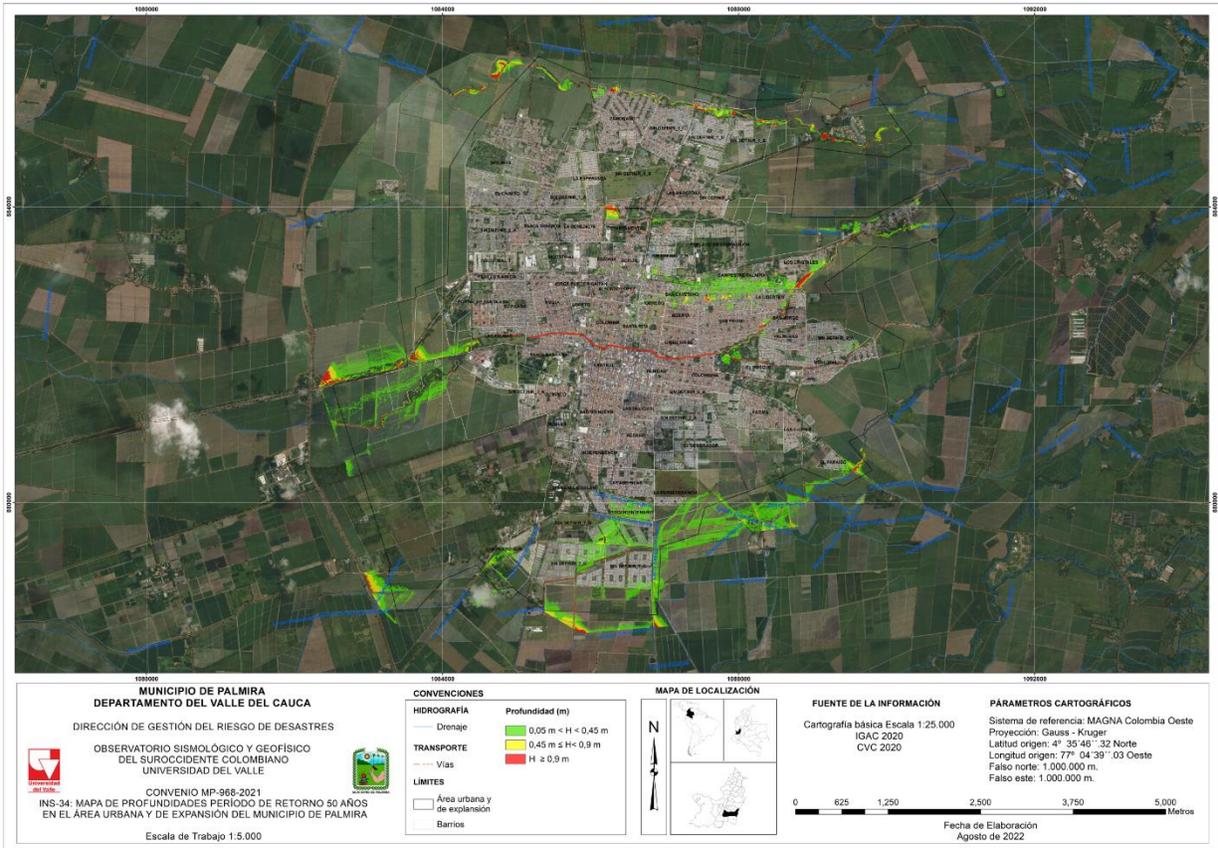


Figura 115. Profundidades máximas (m) TR 50 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

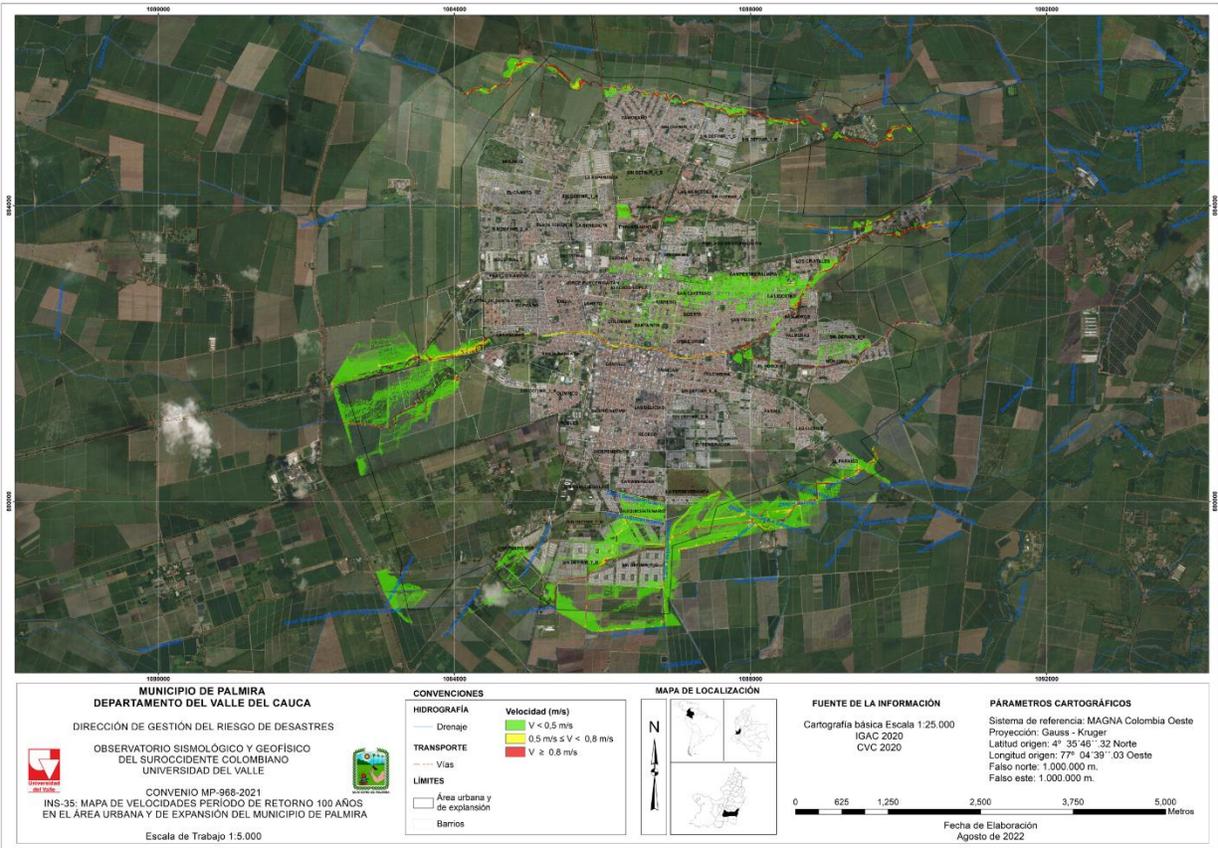


Figura 116. Velocidades máximas (m/s) TR 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

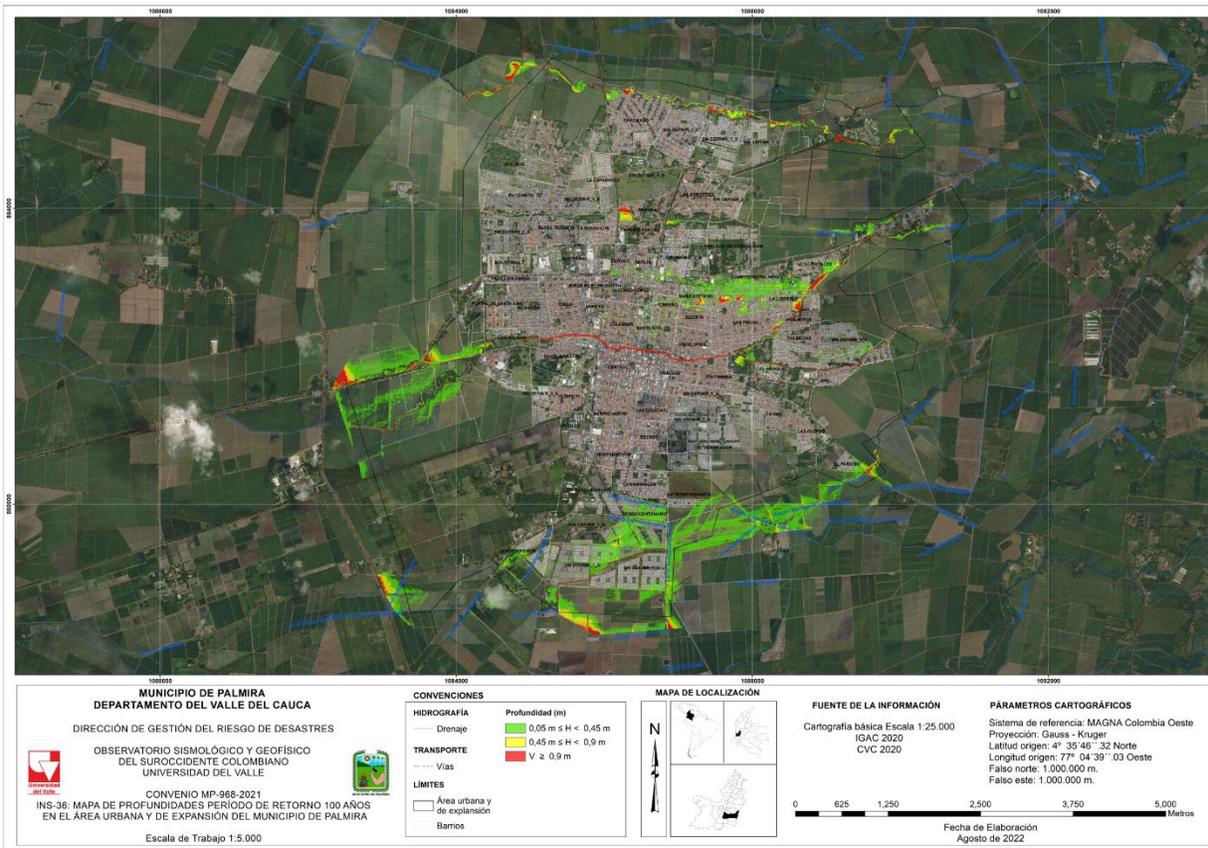


Figura 117. Profundidades máximas (m) TR 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

11.1.4 Análisis de resultados hidráulicos respecto a historicidad y susceptibilidad a inundación por geomorfología

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica para el periodo de retorno de 100 años coinciden en buena medida con los registros históricos de los eventos de inundaciones y lo indicado por los análisis de susceptibilidad por geomorfología, especialmente en los sectores donde el río Palmira presenta desbordamientos, esto es en los barrios Los Cristales, La Libertad y San Jorge, aproximadamente a la altura de la calle 42 (ver Figura 118). Asimismo, al analizar cada uno de los sectores visitados en trabajo de campo, previo a las modelaciones, en compañía del personal administrativo y operativo de Aquaoccidente, Bosque Municipal y la DGRD del municipio, se corrobora la problemática expuesta en cada uno de los sectores, ya sea por desbordamiento o por represamiento, los cuales fueron desarrollados en el numeral 11.1.3.

Respecto a la susceptibilidad a inundación por geomorfología, las manchas máximas de inundación resultantes de las modelaciones hidráulicas presentan correspondencia con las áreas asociadas al nivel de susceptibilidad alta a la inundación con geformas de procesos activos, recientes, al canal de movilidad de los cauces activos, llanuras o planicies de inundación, aquí representan procesos naturales, fluviales, antrópicos, denudacionales y estructurales de las

acequias, zanjones y río, debido a que la baja pendiente del terreno por donde transitan los caudales diarios y algunos extraordinarios han generado planicies de inundación o áreas de amortiguamiento, sumado a la baja capacidad de algunas estructuras hidráulicas que generan contracción en el cauce y a su vez procesos de represamiento aguas arriba de las mismas, erosión y socavación en estos sectores (ver Figura 118).

Hacia la zona sur del municipio, en los barrios denominados Chapinero Sur, La Italia y Sesquicentenario, donde existen canales conformados y revestidos en concreto como los denominados canal Sesquicentenario y zanjón La María, no se presentan inundaciones por desbordamiento en planicies de inundación sino por contracción de la sección hidráulica o presencia de estructuras con poca capacidad para transitar la creciente.

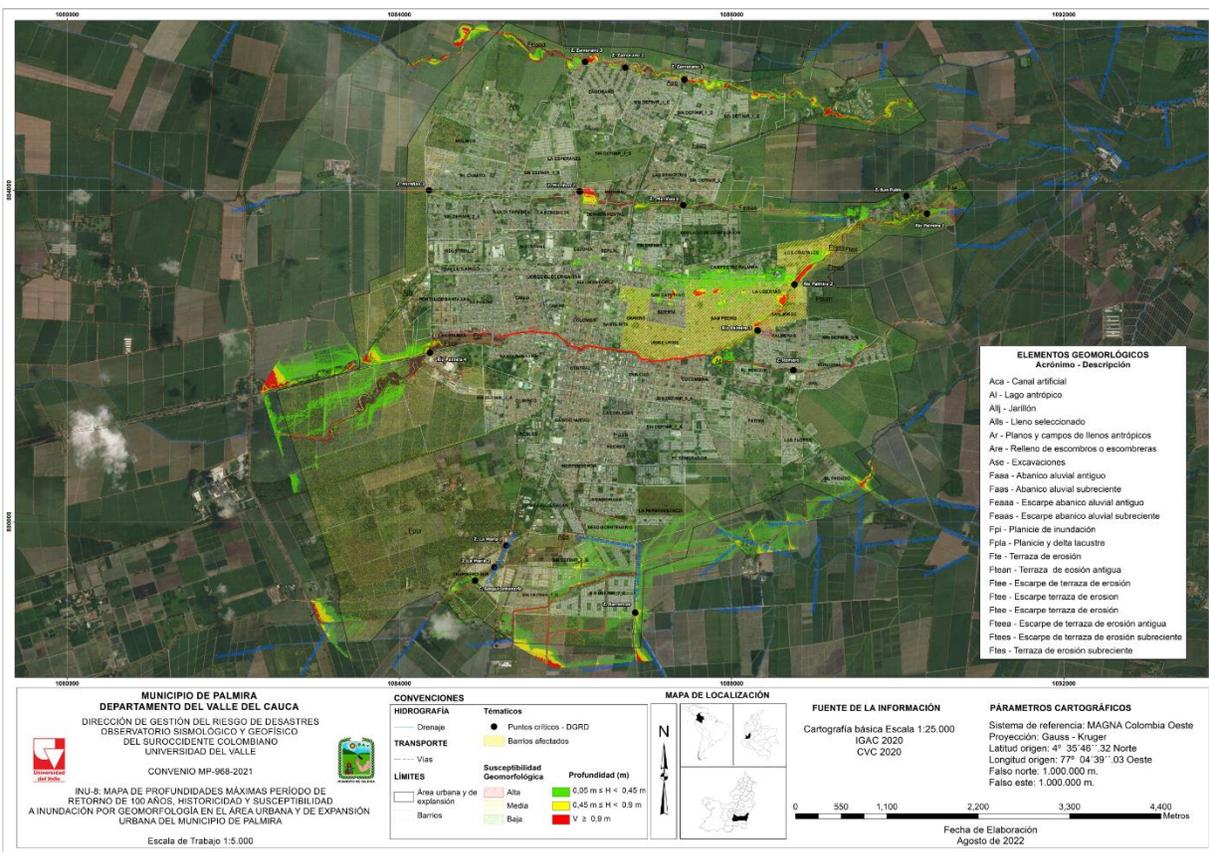


Figura 118. Profundidades máximas (m) TR 100 años, historicidad y susceptibilidad a inundación por geomorfología. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira
 Fuente: elaboración propia

11.1.5 Modelaciones hidráulicas escenarios de taponamiento

Debido a las diferentes estructuras hidráulicas existentes a los drenajes que discurren por la zona urbana y de expansión urbana, principalmente a las que encajonan o entuban las aguas y fácilmente pueden presentar obstrucción por arrastre de sedimentos, material vegetal, residuos sólidos ordinarios, residuos de construcción y demolición, entre otros, se realizaron dos

modelaciones con los escenarios de taponamiento de las estructuras del zanjón Romero a la altura del Bosque Municipal y del box culvert que encajona el río Palmira en el mismo sector, observándose que al obstruirse dichas estructuras, los caudales de la creciente del periodo de retorno de 100 años se desbordan por las zonas aledañas afectando los barrios que se concentran aguas abajo del Bosque Municipal, por lo cual, con el fin de garantizar que los elementos electrónicos y mecánicos del sistema funcionen de forma óptima, deben estar en constante monitoreo y mantenimiento, más aun teniendo en cuenta que muchas de estas compuertas funcionan de forma manual y dependen de un operador. Lo anterior con el fin de evitar sucesos como el ocurrido en la época invernal del año 2011, donde los tramos entubados y subterranizados (ductos) se taponaron y las corrientes de agua generaron represamiento y desbordamiento en este sector de la ciudad.

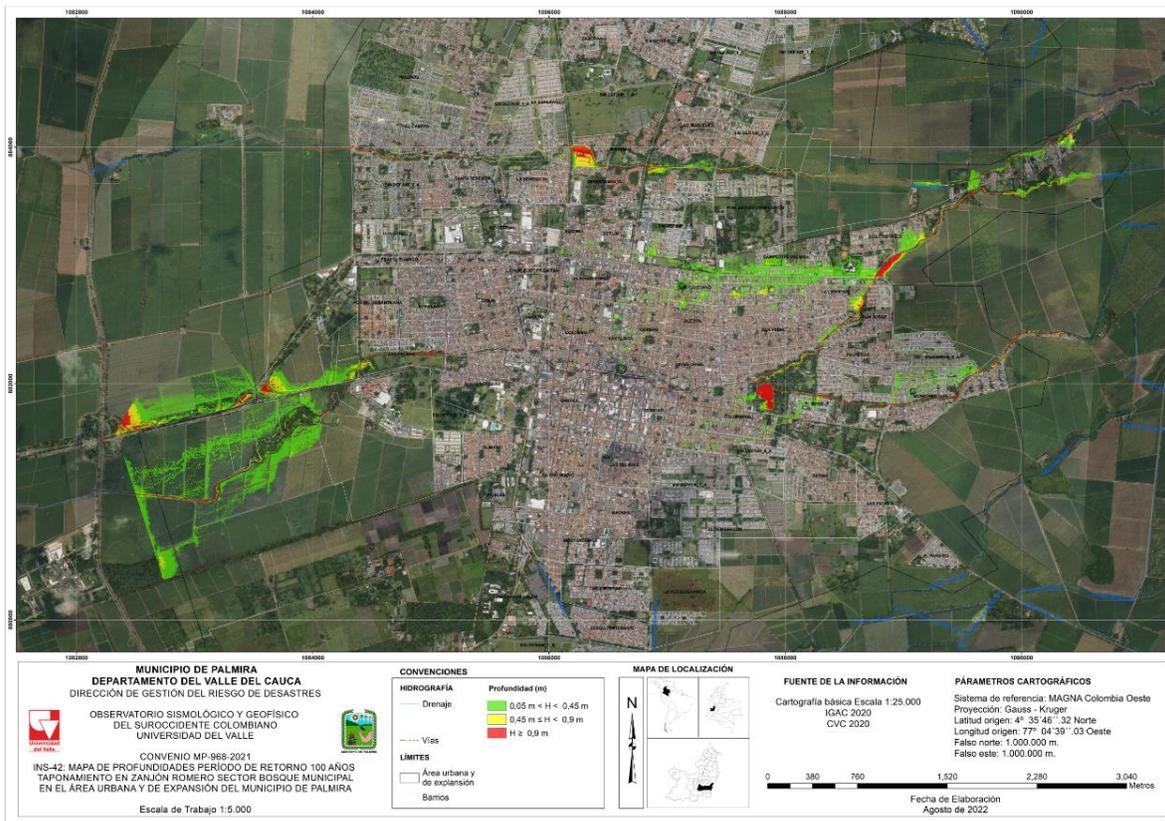


Figura 119. Profundidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento a la altura del Bosque Municipal
Fuente: elaboración propia

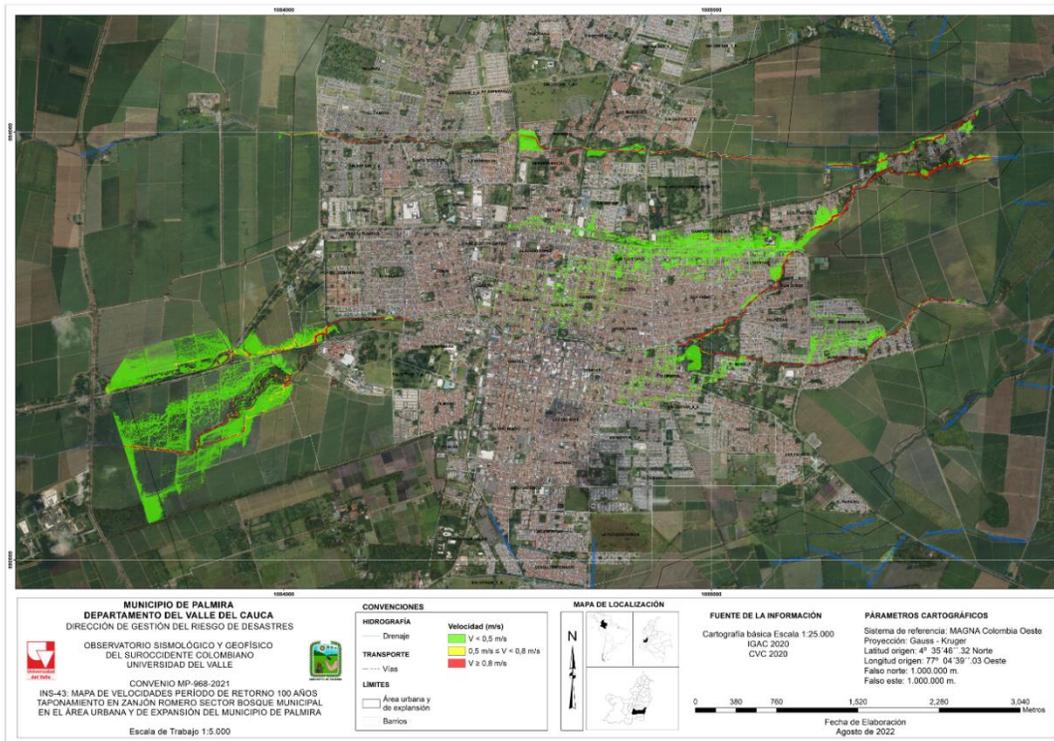


Figura 120. Velocidades en el escenario de desbordamiento producto de taponamiento a la altura del Bosque Municipal

Fuente: elaboración propia

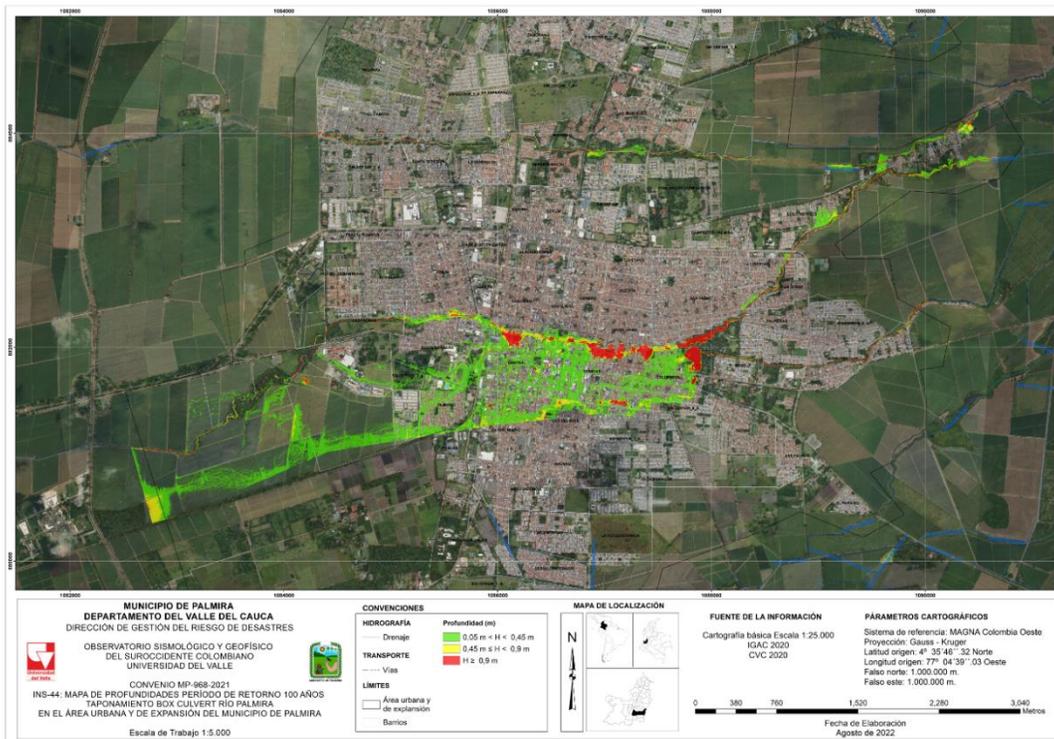


Figura 121. Profundidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento box culvert río Palmira

Fuente: elaboración propia

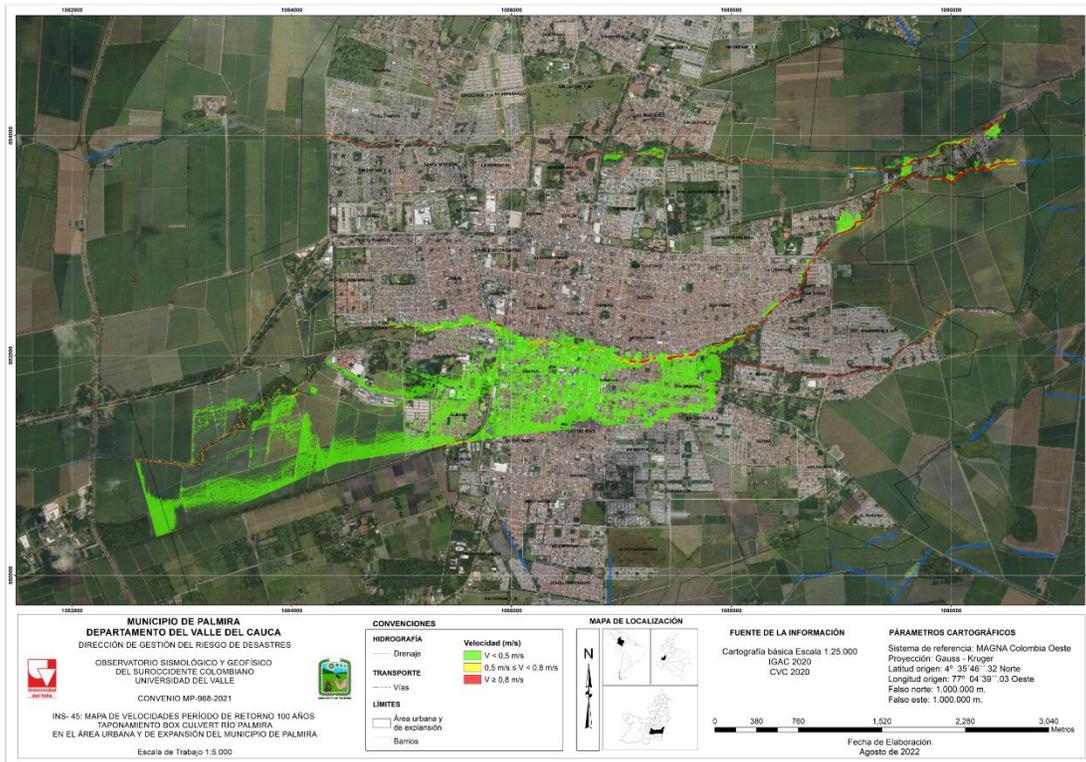


Figura 122. Velocidades en el escenario de inundación por desbordamiento producto de taponamiento box culvert río Palmira
Fuente: elaboración propia

12 ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN POR DESBORDAMIENTO

La zonificación es la representación cartográfica de áreas con características homogéneas. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo. De acuerdo con lo determinado en el Decreto 1077 de 2015 "para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, teniendo en cuenta el registro de eventos, la recurrencia de los mismos y la intensidad (niveles alcanzados) de la inundación".

La zonificación de amenaza de inundación por desbordamiento asociada a los cauces de los ríos localizados en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira parte de los resultados de los estudios hidrológicos e hidráulicos (velocidades y profundidades) presentados en el numeral 10.2.6.

12.1 Consideraciones generales conceptuales sobre las inundaciones

Las inundaciones constituyen eventos recurrentes en los ríos y se presentan como consecuencia de lluvias fuertes y continuas que superan la capacidad de transporte de los ríos y de absorción del suelo. Debido a esto el nivel del agua supera el nivel de banca llena del cauce principal del río y se produce la inundación de las planicies y tierras adyacentes. Estos eventos ocurren de forma aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales.

Las inundaciones pueden ocurrir debido al comportamiento natural de los ríos o a alteraciones producidas por el hombre. Las condiciones naturales corresponden a las características climáticas y físicas propiciadas por la cuenca en su estado natural, como son: el relieve, el tipo de precipitación, la cobertura vegetal y la capacidad de drenaje. Entre las alteraciones provocadas por la acción del hombre se tienen: la impermeabilización de los suelos al urbanizarlos, la deforestación, la alteración de los cursos y la canalización de los ríos, la construcción de obras hidráulicas, etc.

Una cuenca en estado natural posee mayor interceptación vegetal, mayores áreas permeables, menor escurrimiento superficial y un drenaje más lento en relación con las características que presenta una vez es intervenida. Por esta razón las inundaciones se producen con menor frecuencia en una cuenca no intervenida.

Los problemas resultantes de los desbordamientos de las corrientes de agua dependen del grado de ocupación de la planicie de inundación y de la frecuencia con la cual ocurren las inundaciones. La población de mayor poder adquisitivo tiende a habitar las localidades seguras, mientras que la población más pobre tiende a ocupar las áreas de alta amenaza de inundación, provocando problemas sociales que se repiten durante cada creciente. Cuando la frecuencia de las

inundaciones es baja la población subvalora la amenaza y ocupa las zonas inundables. Esta situación genera consecuencias catastróficas cuando se presentan nuevos desbordamientos. No obstante, la predicción de las inundaciones y sus efectos es una tarea bastante compleja, por cuanto el pronóstico del comportamiento hidrológico de largo plazo es difícil, debido, a la aleatoriedad de los fenómenos meteorológicos y al gran número de parámetros y variables involucradas en los procesos hidrológicos (lluvia – escorrentía).

Normalmente las inundaciones suelen ser descritas en términos de su periodo de retorno, el cual corresponde al intervalo promedio de recurrencia entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. Una inundación con un periodo de retorno de 100 años se refiere a un evento que presenta una probabilidad de ocurrencia del 1% en cualquier año, o también al evento que se presenta cada 100 años, en promedio. Estos periodos de retorno se determinan a partir de la información histórica existente, que en muchos casos corresponde a periodos demasiado cortos, por lo cual la estimación realizada tiene asociada una incertidumbre.

La variación del nivel del agua en una creciente de un río depende de las características climáticas y físicas de la cuenca hidrográfica y su predicción puede ser realizada a corto o largo plazo. La previsión a corto plazo, también llamada en tiempo real, permite establecer el nivel y su tiempo de ocurrencia en una sección de un río con una anticipación que depende de los tiempos de escurrimiento de la cuenca y las distribuciones temporal y espacial de la precipitación. Dado que estas distribuciones sólo pueden ser estimadas en forma confiable con antelación de pocos días u horas, la predicción de niveles no puede realizarse con una anticipación muy grande.

La predicción a largo plazo cuantifica la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en términos estadísticos, sin precisar cuándo ocurrirán. La predicción se basa en la estadística de ocurrencia de niveles en el pasado y permite escoger los niveles de crecientes para algunos riesgos escogidos.

12.1.1 Medidas para el control y el manejo de inundaciones

Las medidas para el control y el manejo de las inundaciones pueden ser de tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial evitando o mitigando los daños generados por las crecientes, en tanto que las medidas no estructurales son aquellas en que la magnitud de los daños se reduce como consecuencia de una mejor convivencia de la población con las crecientes. Las medidas estructurales son todas aquellas obras de ingeniería (diques, presas, canales de desviación, etc.) en las cuales se interviene el sistema fluvial natural afectando sus procesos hidrodinámicos y morfológicos. Estas intervenciones pueden originar efectos adversos en el sistema fluvial que requerirán para su manejo y control la construcción de nuevas obras.

Las medidas estructurales no pueden ser proyectadas para dar una protección total, ya que esto exigiría una protección contra la mayor creciente posible, lo cual física y económicamente no es factible. Es decir, las medidas estructurales no permiten controlar o evitar por completo las

inundaciones, solamente tienden a minimizar los impactos originados por éstas. Una medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, generando una mayor ocupación de áreas inundables, lo cual podría ocasionar daños significativos cuando se presenten inundaciones superiores al evento de diseño.

En consecuencia, el control y el manejo más eficaz de las inundaciones se obtiene al establecer estrategias que combinen las medidas estructurales y no estructurales, permitiendo a la población minimizar las pérdidas y lograr una convivencia armónica con el río. Es decir, las medidas no estructurales complementan con gran efectividad las actuaciones estructurales por encima de su umbral de protección.

El costo de protección de un área inundable a través de medidas estructurales, en general, es superior al de las medidas no estructurales. Por esta razón, las medidas no estructurales en conjunto con las estructurales pueden disminuir significativamente los daños con un costo menor.

12.1.2 Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería construidas para reducir el riesgo originado por las crecientes. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que cubren toda la cuenca, procurando modificar la relación entre precipitación y caudal, como, por ejemplo, un cambio en la cobertura vegetal del suelo, la cual reduce y retarda los picos de las crecientes y controla la erosión de la cuenca.

Las medidas intensivas son aquellas que se enfocan en el río y pueden ser de tres tipos: (i) obras que aceleran el escurrimiento como son la construcción de diques, el aumento de la capacidad de descarga de los ríos y el corte de meandros; (ii) obras que regulan la creciente, como, por ejemplo, las presas; y (iii) obras que desvían parte del caudal, como son los canales de desvíos. En la Tabla 58 se presentan las principales características de las medidas estructurales.

Tabla 58. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones

	MEDIDAS	VENTAJA	DESVENTAJA	APLICACIÓN
Extensivas	Cambio de la cobertura vegetal	Reducción pico de la creciente	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
	Control de pérdidas	Reducción del escurrimiento	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
	Construcción de diques	Alto grado de protección	Generación de grandes daños si fallan	Ríos grandes
Intensivas	Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento en la capacidad de drenaje con poca inversión	Efecto localizado	Ríos pequeños
	Corte de meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
	Construcción de represas	Regulación de la creciente	Difícil localización	Cuencas medianas

Tabla 58. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones

MEDIDAS	VENTAJA	DESVENTAJA	APLICACIÓN
Canales de desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes

Fuente: elaboración propia

12.1.3 Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales corresponden al conjunto de programas y actividades que permiten tener una mejor convivencia con las crecientes, minimizando las pérdidas que éstas pueden generar en las áreas inundables. Entre las medidas de protección no estructurales se tienen: la definición y protección de las zonas de ronda hídricas, la generación de los mapas de amenaza y de riesgos por inundación, los sistemas de previsión y alertas de inundaciones, los programas de protección civil y los programas de seguros contra crecientes.

12.2 Metodología adoptada

La metodología propuesta en el presente estudio para la determinación de los niveles de amenaza por fenómenos de inundación se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías presentadas en el Anexo 10 y en la experiencia del grupo de investigación de la Universidad del Valle, HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberales, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados). También se consideraron los planes y esquemas de ordenamiento territorial y los planes de prevención y de atención de desastres, emergencias y contingencias de la inundación.

12.2.1 Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones

A cada escenario seleccionado para el fenómeno de inundación se le debe asignar un nivel de frecuencia en términos cualitativos: frecuencia alta, media, moderada, baja, etc.

Los umbrales de periodos de frecuencia o recurrencia recomendados se presentan en la Tabla 59. Los umbrales de los periodos seleccionados corresponden inicialmente a dos veces el periodo de retorno de los diseños de los drenajes urbanos (10 años). El segundo umbral corresponde aproximadamente a los periodos que los diseños de las obras de infraestructura vial y de cultivos deben garantizar según la normatividad colombiana (30 años). El tercer umbral corresponde a lo previsto en el Acuerdo N° 052 de 2011, que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para una creciente con un periodo de retorno de 100 años (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2011).

Tabla 59. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones

FRECUENCIA	FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN
Tr ≤ 10 años	Alta
10 años < Tr ≤ 30 años	Media
30 años < Tr ≤ 100 años	Baja

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

12.2.2 Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones

El estado del arte en los criterios de evaluación de la magnitud del evento está basado en las combinaciones de factores hidrodinámicos y características del terreno sobre el cual actúa el fenómeno. En general, la magnitud e intensidad de la amenaza, originada por el desbordamiento de un río, en una planicie de inundación se ha establecido a partir de cuatro criterios (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

1. Magnitud e intensidad asociada a las profundidades de agua. Se estima que profundidades de agua superiores a cierto valor pueden causar daños importantes. Este criterio es el más utilizado y en algunas ocasiones el único implementado por las entidades encargadas de la administración de los recursos hídricos.

2. Magnitud e intensidad asociada a la velocidad del flujo. Se fundamenta en el peligro que representa para las personas y los vehículos la capacidad de arrastre y erosión de flujos de agua de altas velocidades.

3. Magnitud e intensidad asociada a la combinación de las profundidades de agua y las velocidades. A partir de ciertos valores esta combinación resulta peligrosa e impide que las personas permanezcan de pie o puedan maniobrar a través del flujo. En la actualidad se están desarrollando experimentos tendientes a determinar la profundidad y la velocidad del flujo que generan inestabilidad en las personas.

4. Magnitud e intensidad asociada a la capacidad del flujo para generar erosión y transportar escombros.

Bajo este contexto, las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad o magnitud son la profundidad (H), la velocidad (V) y el producto de la profundidad por la velocidad $H*V$.

Los umbrales de intensidad o magnitud del evento definido en el presente estudio se muestran en la Tabla 60. El primer umbral determinado corresponde al nivel o profundidad del agua observada a partir de la cual las comunidades desalojan sus viviendas (0,45 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual se considera que la vida de una persona está en riesgo (0,90 m). En lo que respecta a la velocidad del flujo, los umbrales corresponden a 0,5 m/s y 0,8 m/s, respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0,225 m²/s y 0,45 m²/s (ver Figura 123). Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud del

evento se toman de acuerdo con el rango de niveles, el rango de velocidades y los rangos del producto de la profundidad por la velocidad.

Tabla 60. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación

INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN	NIVEL DE INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN
$H \geq 0,9 \text{ m}$ ó $V \geq 0,8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alta
$0,45 \text{ m} \leq H < 0,9 \text{ m}$ ó $0,5 \text{ m/s} \leq V < 0,8 \text{ m/s}$ ó $0,225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Media
$0,05 \text{ m} < H < 0,45 \text{ m}$ y $V < 0,5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0,225 \text{ m}^2/\text{s}$	Baja

H= Profundidad; V= Velocidad

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

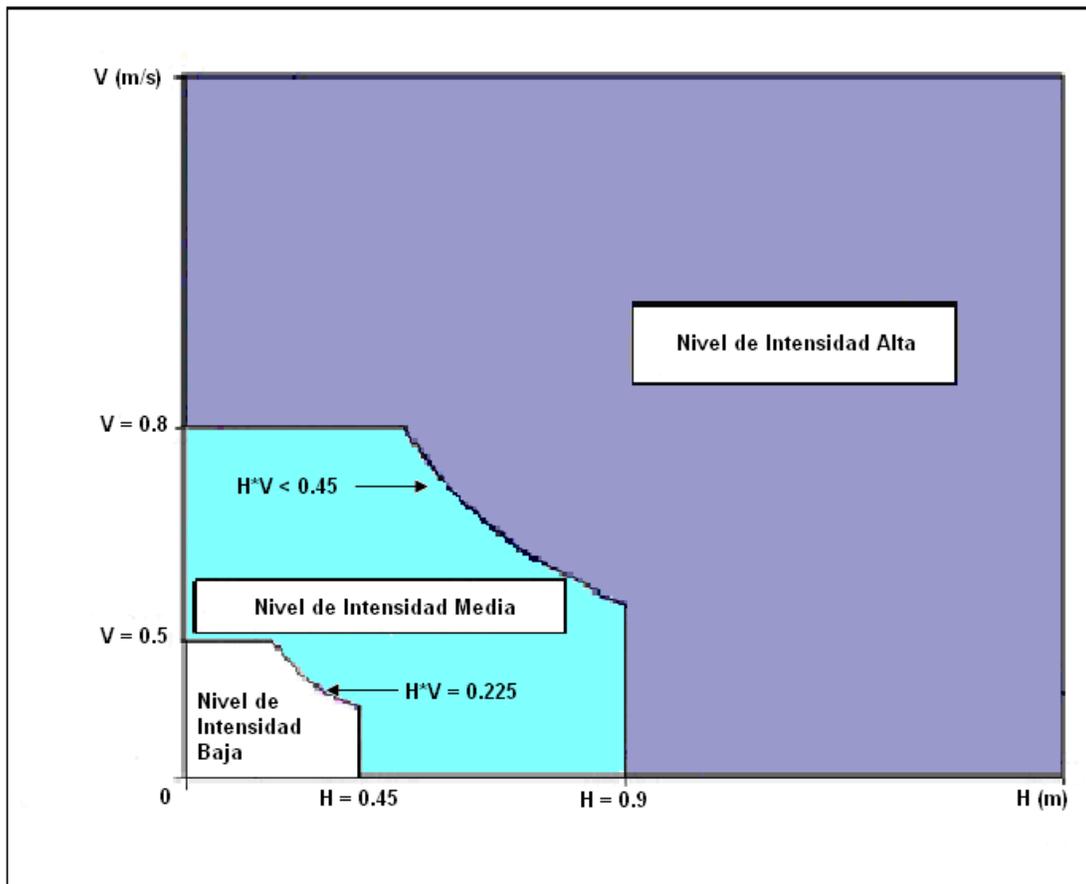


Figura 123. Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

12.2.3 Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones

Después de determinar los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad del evento se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, significativa, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomienda utilizar son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia del evento y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada mediante los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se presenta en la Tabla 61 y en la Tabla 62.

Tabla 61. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación

		NIVEL DE AMENAZA		
NIVEL DE INTENSIDAD	Nivel de intensidad alto $H \geq 0,9 \text{ m}$ ó $V \geq 0,8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Alto	Alto
	Nivel de intensidad medio $0,45 \text{ m} \leq H < 0,9 \text{ m}$ ó $0,5 \text{ m/s} \leq V < 0,8 \text{ m/s}$ ó $0,225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Medio	Medio
	Nivel de intensidad bajo $0,05 \text{ m} < H < 0,45 \text{ m}$ y $V < 0,5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0,225 \text{ m}^2/\text{s}$	Medio	Bajo	Bajo
FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN		Frecuencia alta $Tr \leq 10$	Frecuencia media $10 < Tr \leq 30$	Frecuencia baja $30 < Tr \leq 100$

H=Altura; V=Velocidad

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

Tabla 62. Clasificación de la amenaza por inundaciones

PROFUNDIDAD (M) Ó VELOCIDAD (M/S) Ó PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD (M ² /S)	NIVEL DE INTENSIDAD DE LA AMENAZA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	NIVEL DE FRECUENCIA DE LA AMENAZA	CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Alto
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Alto
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Medio
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Medio
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$Tr \leq 10$	Alto	Medio
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Bajo
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Bajo

H= Altura; V= Velocidad

Fuente (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

12.3 Mapa de amenaza por inundación por desbordamiento

Los mapas de amenaza por inundación se constituyen en conocimiento aplicado para la definición de medidas prospectivas de reducción de riesgo, que al ser adoptados mediante instrumentos normativos se convierten en medidas no estructurales para reducción de amenaza asociado a dicho fenómeno. Estos mapas son modelos que permiten la evaluación y predicción de las consecuencias de un evento de precipitaciones extraordinarias; es decir, permiten identificar, clasificar y valorar las áreas potencialmente inundables del territorio.

La condición de amenaza se presenta únicamente cuando ocurre un evento natural en un área ocupada por actividades humanas (elementos expuestos) que deben soportar las consecuencias de dicho evento. Por consiguiente, el riesgo puede dividirse en tres componentes estrechamente interrelacionados: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012 la amenaza se define como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

La amenaza o peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con una cierta magnitud, generalmente de carácter sorpresivo y de evolución rápida, que afecta a un componente o a la totalidad del sistema territorial expuesto. En consecuencia, las inundaciones constituyen las amenazas, que son el resultado de la combinación de la tipología, las características de los eventos lluviosos y el conjunto de factores físicos del área afectada. Desde esta perspectiva, la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo es que la primera se refiere a la probabilidad de que se manifieste un evento natural, mientras que el segundo está relacionado con la probabilidad de que se den ciertas consecuencias.

La vulnerabilidad se refiere a la predisposición o susceptibilidad de los componentes antrópicos del sistema territorial para ser dañados total (destrucción) o parcialmente (deterioro) debido al impacto de la amenaza. Representa la medida de probabilidad de daño o pérdida de un componente o sistema territorial expuesto a la acción de la amenaza. La vulnerabilidad depende de dos condiciones: la ubicación del componente respecto a la zona de impacto de la amenaza (exposición) y las características y el estado de conservación del mismo. Por tanto, la vulnerabilidad es esencialmente una condición humana.

La exposición o elementos en riesgos se refieren a la distribución espacial de la población, actividades económicas, bienes materiales, obras de ingeniería, etc., sobre las que puede impactar la amenaza. En consecuencia, el riesgo de las inundaciones depende de la ocurrencia y magnitud de la amenaza natural y de la vulnerabilidad de un elemento o sistema territorial expuesto a ella.

Un desastre natural constituye la ocurrencia efectiva y real del riesgo que, debido a la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos negativos sobre los mismos. En el caso de las inundaciones, la manifestación del desastre se presenta cuando el impacto de los desbordamientos supera los mecanismos de defensa adoptados por la sociedad, generando perjuicios económicos, sociales, físicos, etc. Así, para que un evento de desbordamiento se convierta en desastre es necesario que sus consecuencias tengan un impacto en una estructura humana vulnerable. Por esta razón, no todos los eventos de precipitaciones fuertes o constantes pueden ser considerados como amenazas, por cuanto su peligrosidad depende del grado de vulnerabilidad de los elementos expuestos al riesgo.

Para la evaluación del riesgo de inundaciones es necesario determinar, en primer término, los mapas de amenazas (mapa de inundación) y de vulnerabilidad, para posteriormente integrarlos, obteniendo el mapa de riesgos.

Con la realización de estudios básicos de zonificación de amenaza es posible plantear medidas prospectivas de reducción de riesgo para incorporar en los planes de ordenamiento territorial.

12.3.1 Cartografía de amenaza por inundaciones por desbordamiento en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira

A continuación en la Tabla 63, se presentan las áreas asociadas a cada uno de los niveles de amenaza por inundación por desbordamiento para las crecientes de los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años, obtenidas para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira.

Tabla 63. Áreas (ha) asociadas a nivel de amenaza por inundación de los escenarios

Nivel de amenaza	Área de inundación (ha)			
	TR 2,33 Años	TR 25 Años	TR 50 Años	TR 100 Años
Baja	---	240.60	303.18	345.37
Media	69.16	29.31	44.01	59.98
Alta	32.99	39.09	48.18	58.46

Fuente: elaboración propia

Los niveles de amenaza por inundación indican lo siguiente (H: Profundidades; V: velocidades):

1. Para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años:

- **Zonas de amenaza baja** ($0,05 \text{ m} < H < 0,45 \text{ m}$ y $V < 0,5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0,225 \text{ m}^2/\text{s}$). Son aquellas zonas con desbordes poco frecuentes en la cuales podrían presentarse daños leves a mobiliarios, viviendas, instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos; se considera que ante inundaciones de estas magnitudes las comunidades empiezan a desalojar sus viviendas.

- **Zonas de amenaza media** ($0,45 \text{ m} \leq H < 0,9 \text{ m}$ ó $0,5 \text{ m/s} \leq V < 0,8 \text{ m/s}$ ó $0,225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$). Son aquellas zonas con desbordes poco frecuentes en las cuales pueden ocurrir daños significativos pero reparables a viviendas, instalaciones comerciales, industriales y/o

servicios básicos; se considera que inundaciones de estas magnitudes ponen en riesgo la vida de las personas y obliga al desalojo de sus viviendas.

- **Zonas de amenaza alta** ($H \geq 0,9$ m ó $V \geq 0,8$ m/s ó $H*V \geq 0,45$ m²/s). Son aquellas zonas en las cuales se presentan desbordes poco frecuentes generando graves daños a núcleos urbanos expuestos; se considera que inundaciones de estas magnitudes pueden generar la pérdida de vidas humanas.

2. Para el periodo de retorno de 2,33 años:

- **Zonas de amenaza media** ($0,05$ m < H < $0,45$ m y V < $0,5$ m/s y $H*V$ < $0,225$ m²/s). Son aquellas zonas con desbordes frecuentes en las cuales podrían presentarse daños leves a mobiliarios, viviendas, instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos; se considera que estas inundaciones frecuentes y de estas magnitudes puede obligar a las comunidades a desalojar sus viviendas.

- **Zonas de amenaza alta** ($H \geq 0,45$ m ó $V \geq 0,5$ m/s ó $H*V \geq 0,225$ m²/s). Son aquellas zonas en las cuales se presentan desbordes frecuentes generando daños significativos y graves a núcleos urbanos expuestos; se considera que estas inundaciones frecuentes y de estas magnitudes pueden poner en riesgo la vida de las personas.

Los mapas de zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento para el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira presentan desde la Figura 124 hasta la Figura 127.

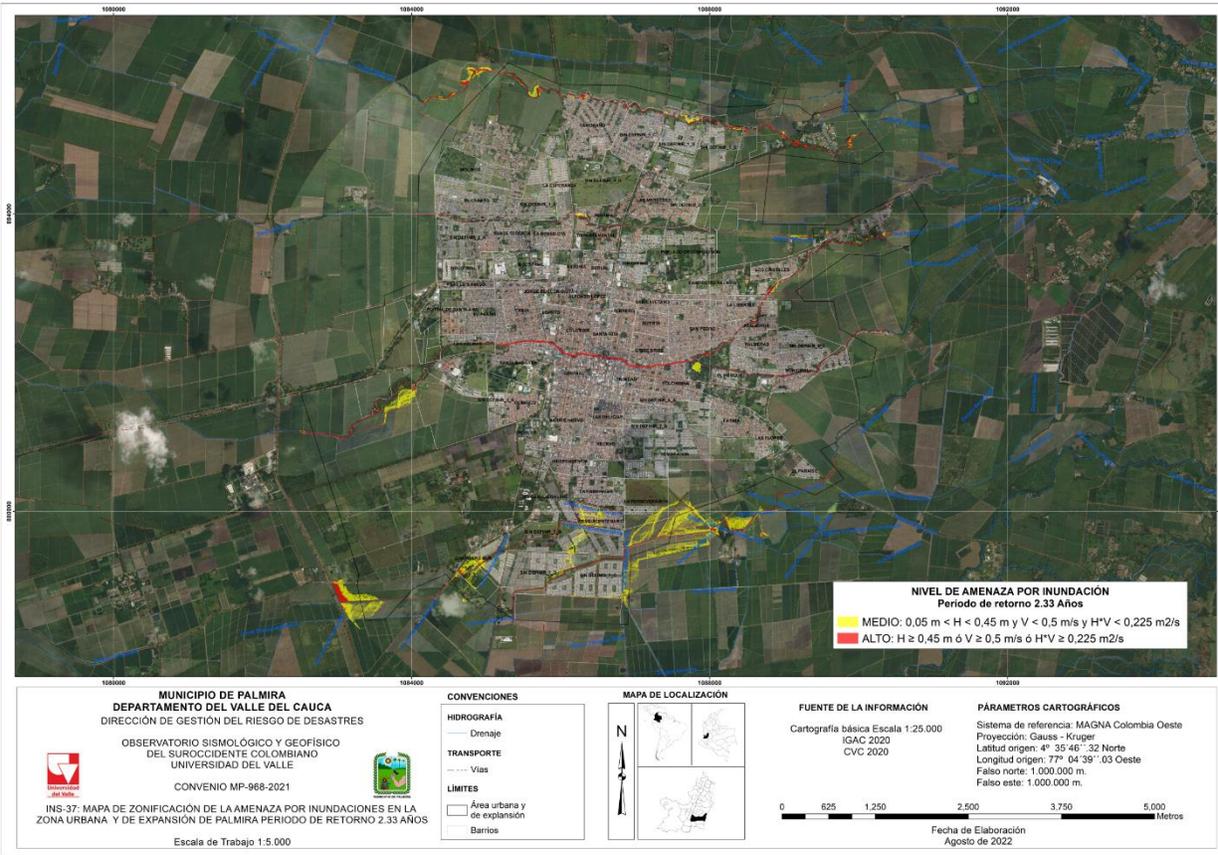


Figura 124. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 2,33 años.

Fuente: elaboración propia

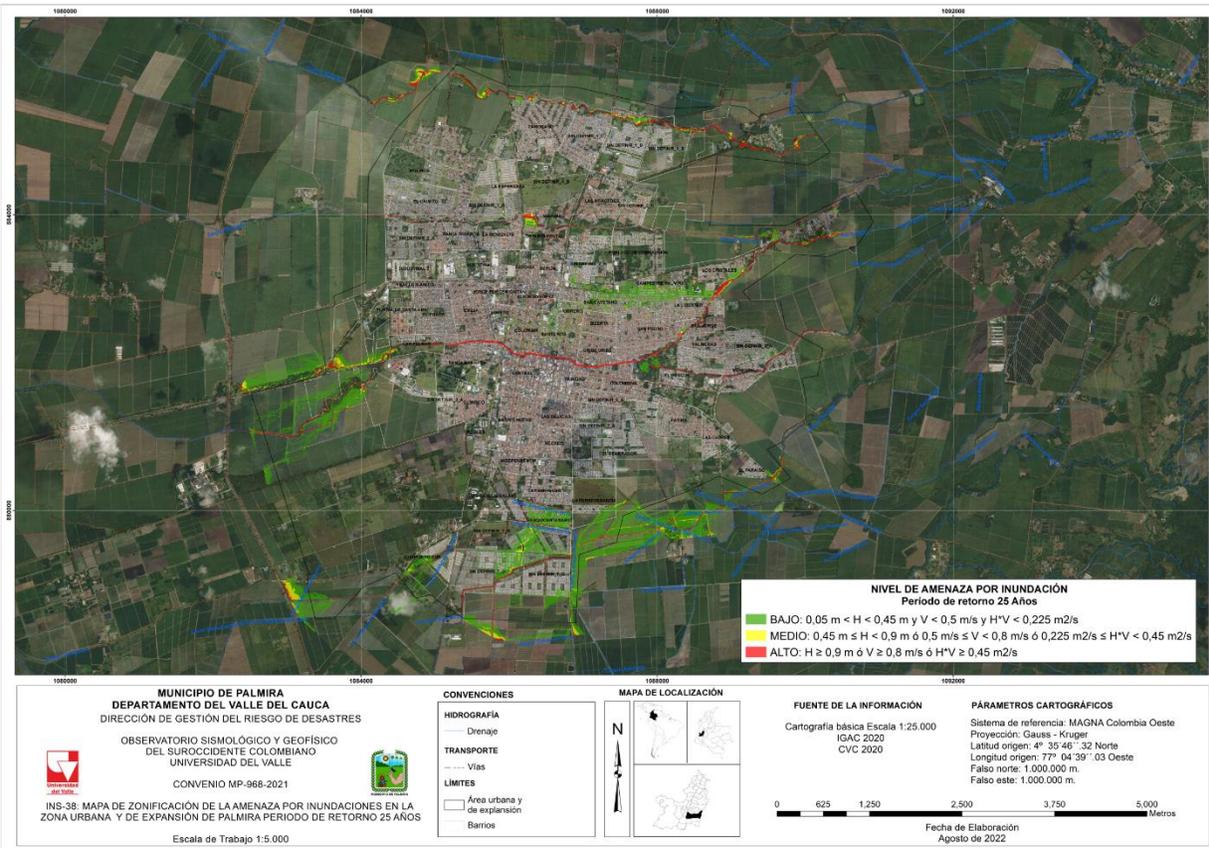


Figura 125. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 25 años.
Fuente: elaboración propia

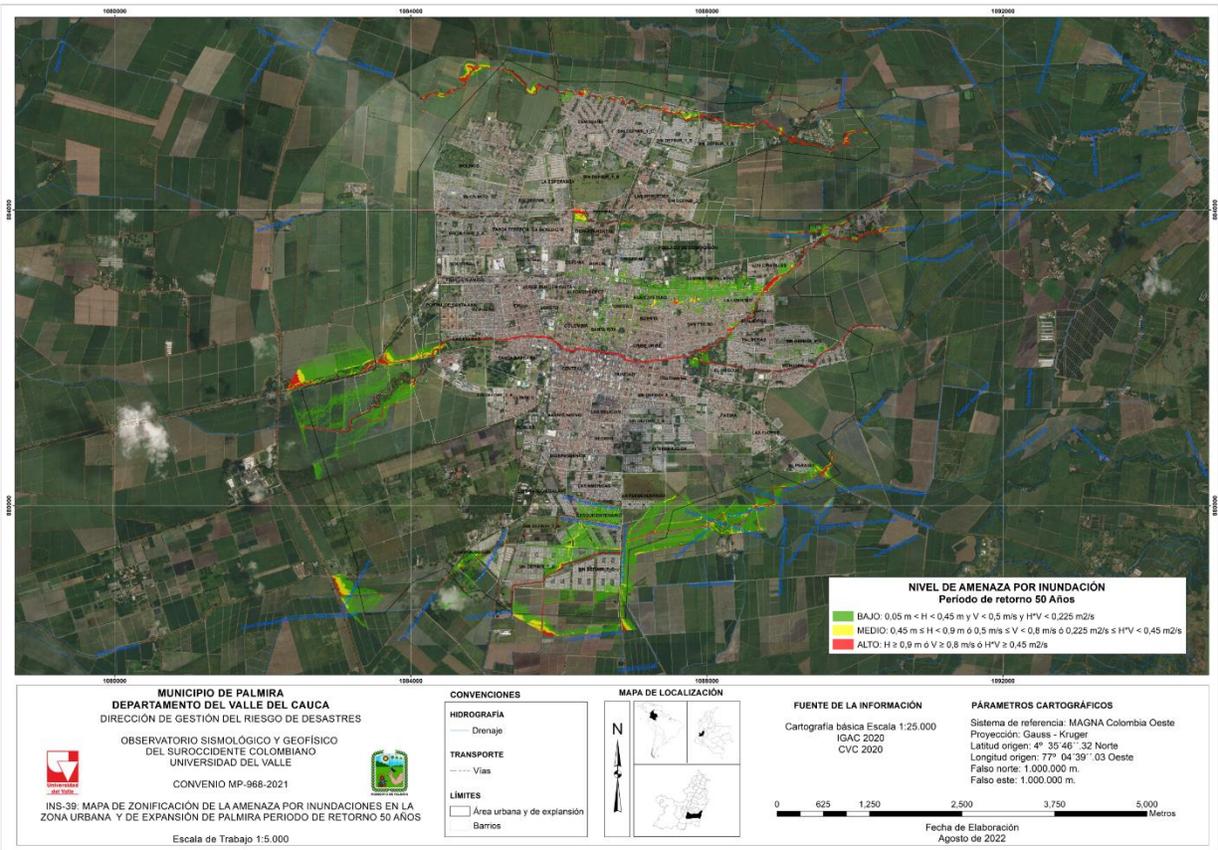


Figura 126. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 50 años.
Fuente: elaboración propia

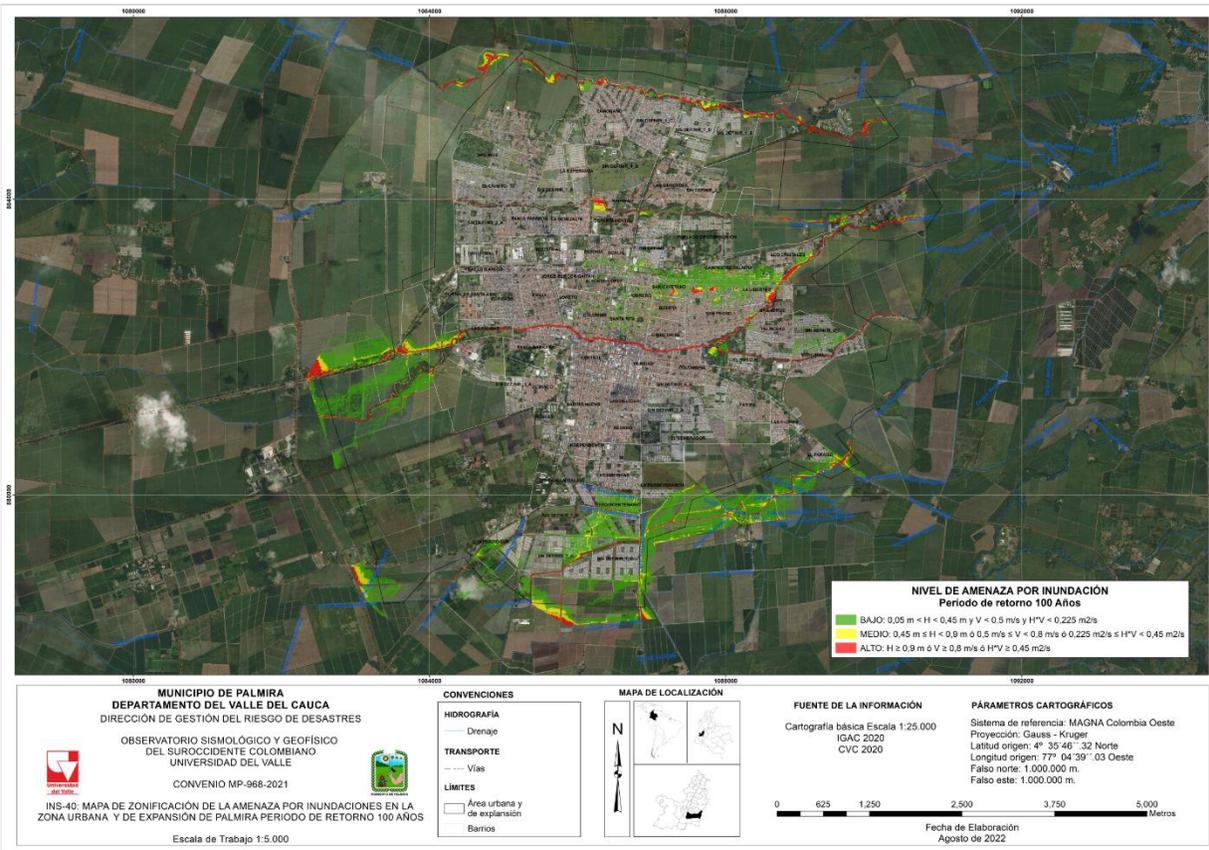


Figura 127. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, área urbana y de expansión urbana - Periodo de retorno de 100 años.
Fuente: elaboración propia

Debido a que las zonificaciones de amenaza por inundación por desbordamiento para los escenarios modelados hidráulicamente son diferentes, se generó un mapa global o consolidado para los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años en el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, estableciendo en cada celda el mayor nivel de amenaza encontrado (ver Figura 128). En la Tabla 64 se presentan las áreas asociadas a cada nivel de amenaza.

Tabla 64. Áreas (ha) asociadas a cada nivel de amenaza por inundación según el mapa consolidado para los periodos de retorno 2,33, 25, 50 y 100 años

Nivel de amenaza	Área de inundación (ha) Consolidado TR 2,33, 25, 50, 100 años
Baja	297.40
Media	105.38
Alta	61.23

Fuente: elaboración propia

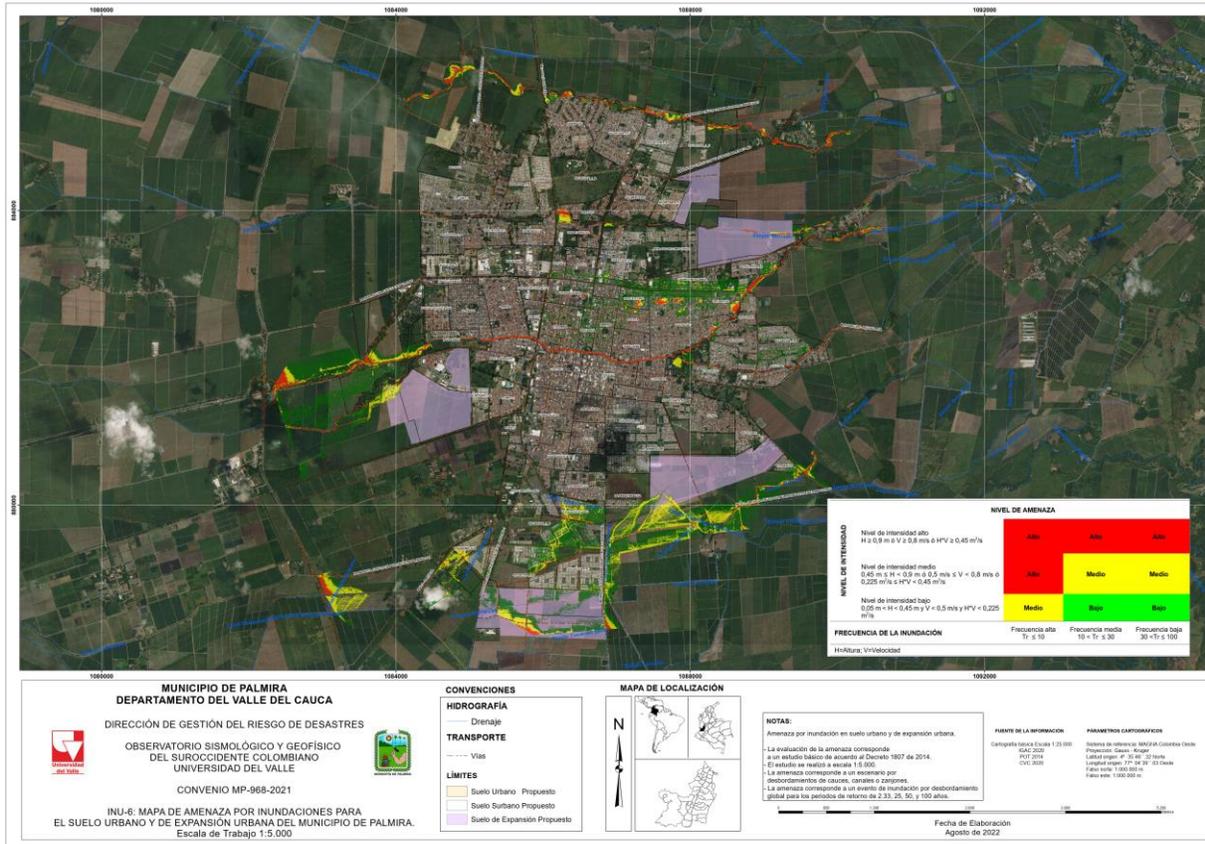


Figura 128. Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento global para los periodos de retorno de 2,33, 25, 50 y 100 años. Área urbana y de expansión urbana municipio de Palmira.

Fuente: elaboración propia

13 CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos de precipitación media mensual multianual obtenidos de las estaciones aledañas al área de influencia de los drenajes que discurren por la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, se observa que la distribución temporal de la lluvia presenta dos periodos de alta pluviosidad y dos de baja pluviosidad, con tendencia a un régimen de tipo bimodal; las mayores lluvias se presentan en los periodos comprendidos entre los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre, mientras que los periodos de menor pluviosidad se presentan en los meses de enero a febrero incluyendo diciembre y de junio a septiembre.

Se realizó la simulación de caudales a través de un modelo de tipo determinístico SCS implementado mediante la herramienta computacional HEC-HMS, el cual sirvió para estimar los caudales a diferentes periodos de retorno (2,33, 25, 50 y 100 años).

Las modelaciones hidrodinámicas realizadas a través del software HEC RAS 6.1, empleando la información disponible de los tramos de las corrientes de agua que discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira, muestran que se presentan desbordamientos en todas las corrientes hídricas en estudio debido principalmente a las bajas capacidades hidráulicas y pendientes suaves y moderadas en algunos de los tramos de los cauces, lo cual se agrava a causa de la falta de mantenimiento, disposición inadecuada de residuos y a la ocupación de las llanuras de inundación.

Algunos tramos de los drenajes en estudio (zanjones Mirriñao y Zamorano y río Palmira aguas abajo de la zona urbana) y que se encuentran en condiciones naturales, debido a sus pendientes y velocidades bajas generan zonas meándricas en su recorrido, cuyas áreas adyacentes funcionan como áreas de amortiguamiento natural de las crecientes, por lo cual deben conservarse y mantenerse libres de intervenciones antrópicas, tales como infraestructura, edificaciones y rellenos antrópicos.

Debido al desarrollo progresivo de actividades antrópicas de tipo productivo y habitacional, en las áreas planas de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira se presenta un predominio de uso de suelo asociado a cultivos y tejido urbano.

Para las condiciones actuales, el agua producto de eventos extremos de precipitación se dirige hacia los sitios más bajos, donde se acumulan las aguas de lluvia locales y de escorrentía superficial, zonas donde actualmente se encuentran ubicados los mencionados desarrollos urbanísticos. De esta forma, debido al endurecimiento de los suelos relacionado con el tejido urbano, hay un aumento en la impermeabilización de los suelos, impidiendo la infiltración del agua y, por ende, incrementando los caudales máximos en comparación con suelos bajo condiciones naturales. Todo ello conlleva a un aumento en la extensión de las áreas inundadas y el nivel de amenaza de las mismas debido a este fenómeno.

Los territorios urbanos actuales del municipio de Palmira fueron desarrollados sobre áreas que tradicionalmente se encontraban ocupadas por suelos con vocación principalmente agrícola, asociados a cultivos de caña de azúcar sobre las cuales, en su momento, los propietarios implantaron estructuras para riego y drenaje como canales y acequias, cuyas características de poca profundidad, bajas pendientes y reducida capacidad hidráulica.

En la actualidad dichas corrientes de agua en estudio (río, canales, zanjones y acequias) son empleadas como elementos del sistema pluvial del municipio en algunos casos sin mejorar sus condiciones hidráulicas iniciales, por lo cual, al presentarse eventos de altas precipitaciones generan inundación fácilmente, debido a su baja capacidad hidráulica.

Los cauces de los zanjones en estudio se encuentran a banca llena y en muchos casos desbordados, lo cual indica que, las aguas del sistema de alcantarillado pluvial no podrán ser entregadas, generando encharcamientos producto de los reboces.

La mayoría de los puentes y box culvert existentes en la zona urbana del municipio de Palmira no cuentan con la capacidad hidráulica para transitar las crecientes de los periodos de retorno objeto de estudio. Por el contrario, las estructuras hidráulicas asociadas a los proyectos urbanísticos recientemente desarrollados cuentan con una mayor capacidad hidráulica.

Como es de esperarse, el escenario más crítico identificado corresponde al periodo de retorno de 100 años, ya que se observa una mayor área de afectación debido a los hidrogramas transitados por los cauces.

Al comparar los resultados obtenidos de la modelación hidráulica para el periodo de retorno de 100 años con los productos de registros históricos y susceptibilidad a inundación por geomorfología, se concluye que hay concordancia en los sectores donde el río Palmira presenta desbordamientos, esto es en los barrios Los Cristales, La Libertad y San Jorge, aproximadamente a la altura de la calle 42 De igual forma con el estudio hidráulico se corrobora la problemática por desbordamiento y represamiento expuesta en cada uno de los sectores por el personal administrativo y operativo de Aquaoccidente, Bosque Municipal y la DGRD del municipio.

En el presente estudio se generaron los mapas de amenaza por inundación por desbordamiento de la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira originada por las crecientes del río Palmira, las acequias La Rica y Barrancas, los zanjones Zamorano, Mirriñao, Romero y Beringo y el canal Sesquicentenario, que al ser adoptados mediante acto administrativo se constituyen en una medida no estructural, que puede ser empleada para la formulación de diferentes instrumentos de planificación y gestión, entre ellos los planes de ordenamiento territorial, la optimización de los sistemas de alerta temprana y emergencia, el diseño y construcción de obras de protección y en general, la gestión del riesgo, de la siguiente forma:

- Optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio; de acuerdo con los niveles de amenaza, se deberá establecer el tipo de restricción de uso del suelo.

- Implementación y optimización de los sistemas de alerta temprana y emergencia ante la ocurrencia de inundaciones por desbordamiento. La predicción de la profundidad que alcanzaría el agua en la planicie de inundación, así como la velocidad del flujo y el producto de la profundidad por la velocidad, permiten estimar el posible impacto generado por una creciente y, en consecuencia, establecer prioridades en las actividades a implementar (medidas no estructurales) antes, durante y después de los desbordamientos.
- Los mapas de amenaza indican las zonas potencialmente inundables y las características de los flujos en dichas zonas en caso de presentarse un evento extremo, por lo cual permiten plantear y analizar diferentes alternativas de obras (medidas estructurales) que conduzcan a la prevención, mitigación y/o control del fenómeno y definir finalmente la alternativa más apropiada considerando los diferentes aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos.
- La cartografía de inundaciones generada representa una herramienta para el análisis de la amenaza asociada a inundaciones, que resulta indispensable para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación del riesgo por estos fenómenos.

14 RECOMENDACIONES

Se deben implementar acciones de monitoreo y seguimiento sobre el comportamiento de los cauces de los cuerpos de agua en estudio, que según sea el caso, generen alertas tempranas para actuaciones preventivas sobre el territorio y los elementos expuestos, considerando que las mayores lluvias se presentan en los periodos comprendidos entre los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre, mientras que los periodos de menor pluviosidad se presentan en los meses de enero a febrero incluyendo diciembre y de junio a septiembre.

En los sectores de vocación agrícola que presentan áreas de captación o derivación sin estructuras de control de niveles y caudales se sugiere el diseño y construcción de estructuras hidráulicas (bocatoma con compuertas) que regulen de forma adecuada los caudales derivados de las corrientes de agua, así como el establecimiento de diques de protección contra inundaciones.

En los zanjones y acequias que presentan poca capacidad hidráulica y que actualmente son empleados como parte del sistema de alcantarillado pluvial, se recomienda el diseño y construcción de canales con la suficiente capacidad para transitar los caudales de los diferentes periodos de retorno y/o construcción de diques de protección contra inundaciones, así como la implementación de Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles – SUDS en áreas proyectadas para desarrollo urbanístico.

Los drenajes río Palmira y zanjón Romero en la actualidad cuentan con un sistema para mitigación del riesgo por inundación conformado por cribas, compuertas mecánicas y sistemas de bombeo que ayudan a disminuir los niveles, sin embargo, con el fin de garantizar que los elementos electrónicos y mecánicos del sistema funcionen de forma óptima, deben estar en constante monitoreo y mantenimiento, mas aun teniendo en cuenta que muchas de estas compuertas funcionan de forma manual y dependen de un operador. Lo anterior con el fin de evitar sucesos como el ocurrido en la época invernal del año 2011, donde los tramos entubados y subterranizados (ductos) se taponaron y las corrientes de agua generaron represamiento y desbordamiento en el sector del Bosque Municipal.

Considerando la ocupación de algunas llanuras de inundación de los cauces y drenajes objeto del presente estudio resulta necesario la definición de áreas de protección y aislamiento que funcionen como franjas de amortiguamiento de las crecientes y conectores ambientales, junto al despliegue de las respectivas acciones de evaluación, control y seguimiento ambiental y policivo en lo referente a establecimiento de edificaciones en dichas áreas, equiparables a franjas de protección aferente ambiental.

Con el fin de tener una visión más amplia e integral del sistema hídrico del municipio de Palmira, se recomienda complementar el presente estudio con una evaluación de amenaza por el fenómeno de encharcamiento a partir de un análisis integral del sistema pluvial del municipio

enmarcado en el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado, incluyendo la propuesta de alternativas de infraestructura verde y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS.

Se deberá contemplar el desarrollo de obras de adecuación hidráulica y mantenimiento de los cauces de las corrientes de agua de la zona, al igual que desarrollar acciones de educación ambiental para la protección de los cuerpos hídricos, de conformidad con el régimen de usos establecido.

En los tramos del río Palmira donde se presenta erosión de orillas se recomienda la evaluación de los procesos morfodinámicos existentes, así como el diseño de obras de protección y estabilización de orillas.

En las cuencas de los drenajes que discurren por el municipio de Palmira, donde actualmente se observan cambios en los usos y coberturas del suelo -que conducen a una disminución de la capacidad de la regulación hídrica de la misma- se recomienda la implementación de actividades de educación ambiental, así como acciones de evaluación, control y seguimiento ambiental y policivo para la protección y recuperación integral de la cuenca y su funcionalidad.

En los tramos del río Palmira, zanjones, acequias y canales, donde se evidencia baja capacidad hidráulica en las estructuras de paso como box culvert, alcantarillas y puentes, se hace necesario el diseño y reemplazo de estas por estructuras de mayor capacidad que permitan el tránsito de las crecientes asociadas a los diferentes periodos de retorno.

En los sectores del cauce y zonas colindantes del río Palmira, zanjones, canales y acequias donde se identifica disposición inadecuada de residuos sólidos (basuras) y de construcción y demolición (escombros), se recomienda la implementación de acciones de mantenimiento y limpieza periódica de los cauces y llanuras de inundación, así como el desarrollo de actividades de educación ambiental y de evaluación, control y seguimiento ambiental y policivo.

Considerando que en el sector del Bosque Municipal, donde confluyen el zanjón Romero y el río Palmira, se localiza infraestructura asociada a la mitigación de riesgo por inundación por desbordamiento, tales como rejillas de retención de sólidos, desarenador, canales, estructuras derivadoras de caudal, compuertas, puentes, lagos, box culvert y estación de bombeo, sobre las cuales se evidenció colmatación y taponamiento por cobertura vegetal y residuos sólidos ordinarios, se hace necesario el despliegue de acciones de mantenimiento periódico con el fin de evitar represamiento, embalsamiento, desbordamiento e inundaciones en las zonas aledañas.

Pueden presentarse diferentes escenarios de inundaciones por desbordamiento producto de la falta de mantenimiento en los cauces o canales, estructuras hidráulicas como box culvert, puentes, compuertas, rejilla, entre otras. Con el fin de evitar dichos escenarios se recomienda realizar el mantenimiento permanente de los drenajes (dragado de sedimentos, retiro de material vegetal, residuos sólidos ordinarios, residuos de construcción y demolición, entre otros) que

discurren por el área urbana y de expansión urbana del municipio de Palmira y sus planicies de inundación.

15 REFERENCIAS

- Alcaldía municipal de Palmira - CIAT. (2020). *acueductos, Apoyo en la implementación de medidas de adaptación de acuerdo con el Plan Integral de Adaptación de Cambio Climático (PIACC) del municipio de Palmira - Análisis del riesgo climático en cuencas priorizadas que abastecen*. Palmira.
- Alcaldía municipal de Palmira - la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Diagnóstico y análisis preliminar del estudio pluviométrico del municipio de Palmira*. Palmira.
- Brunner, G. (2016). *HEC-RAS:River Analysis System*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic.
- Chero, W. E. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Barcelona.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá: Mc Graw Hill Interamericana S.A.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle. (2000). *Caracterización de los Ríos Tributarios del Río Cauca - Tramo Salvagina - La Virginia*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2014). *Levantamiento semidetallado de suelos a escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la CVC*. Bogotá D.C.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle. (2009). *Modelación Matemática del Sistema Río Cauca - Humedales*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2011). *Acuerdo N° 052 de 2011 "Por medio del cual se subroga el Acuerdo 23 de septiembre 12 de 1979 por el cual se dicatan norma generales relativas a ubicación de diques riberaños de cauces de aguas de uso público"*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle. (2010). *Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión*. Cali: Universidad del Valle.
- Cunge, J. A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. London.
- CVC, Gobernación del Valle del Cauca, CIAT. (2018). *Plan Integral de Cambio Climático para el Valled el Cauca PICC*.
- Diaz-Granados M, V. M. (2011). *Curvas Sintética Regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia*. Bogotá D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Nuevos excenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*.
- Municipio de Palmira - Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Estudios básicos para la incorporación de la gestión del riesgo al POT de Palmira y cartografía de formulación*. Palmira.
- Municipio de Palmira - Fundación Universidad del Valle. (2013). *Estudio social y de control de inundabilidad del sector La Isla, confluencia de los ríos Amaime y Nima*. Palmira.

- Rodriguez S., E. A., & Gonzalez P., R. A. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de Estudio en la parte baja del río Las Ceibas (Neiva - Huila). *Redalyc*.
- U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2020). *Water Surfaces Profile HEC-HMS, User Manual*. California.
- Upegui, J. J., & Gutierrez, A. B. (2010). Estimación de tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Redalyc*.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual Versión 6.0*. California.