

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL ACUÍFERO DE CHETUMAL, QUINTANA ROO

INFORME FINAL

Subcoordinación de Hidráulica Urbana
- Coordinación de Hidráulica
Jiutepec, Morelos

Por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA)
Othón P. Blanco, Quintana Roo

México 2016



CONTENIDO

Introducción	9
Metodología	11
Objetivos y Alcances	13
1. RESUMEN EJECUTIVO	15
1.1. Geofísica y Geohidrología	15
1.2. Diagnóstico de las PTARs	16
1.2.1. PTAR Subteniente López y Huay Pix	16
1.2.2. PTAR Fovissste V Etapa	17
1.2.3. PTAR Centenario	18
1.3. Alcantarillado sanitario y pluvial	19
1.3.1. Alcantarillado Sanitario	19
1.3.2. Alcantarillado Pluvial	20
2. INTRODUCCIÓN	23
2.1. Marco físico	24
2.1.1. Fisiografía	24
2.1.2. Climatología	25
2.1.3. Relieve y topografía	27
2.1.4. Geología	27
2.1.5. Vegetación	28
2.1.6. Flora	29
2.1.7. Vías de acceso y comunicación	29
2.1.8. Población y actividades económicas	29
2.2. Antecedentes	33
2.3. Zona de estudio	36
2.4. Objetivos	36
2.5. Alcances	37
3. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO	39
3.1. Recopilación de información	39
3.1.1. Levantamientos topográficos de la zona de estudio	39
3.1.2. Estudios Geohidrológicos	41
3.1.3. Infraestructura sanitaria de la ciudad de Chetumal	53
3.1.4. Proyecto de sectores sanitarios	56
3.2. Descripción de los recorridos de campo en la evaluación del desempeño operativo de las PTAR de la ciudad de Chetumal	66
3.3. Descripción de los recorridos de campo en la evaluación del análisis Geohidrológico	67
3.4. Descripción de los recorridos de campo en la evaluación del análisis sanitario y pluvial	68

3.4.1. Sistema de alcantarillado por vacío	69
3.4.2. Sistema por gravedad	75
3.4.3. Inspección de colectores sanitarios y pluviales	100
4. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	115
4.1. Antecedentes	115
4.2. Características del equipo	116
4.3. Metodología de campo y procesamiento de datos	116
4.4. Interpretación	122
4.5. Conclusiones de la exploración geofísica	124
5. ANÁLISIS GEOHIDROLÓGICO	127
5.1. Fisiografía	127
5.2. Geología	131
5.2.1. Geomorfología	131
5.2.2. Geología regional	134
5.2.3. Estratigrafía	135
5.2.4. Geología local	141
5.2.5. Geología estructural	146
5.3. Hidrogeología	147
5.3.1. Censo de pozos pluviales	147
5.3.2. Profundidad al nivel estático	149
5.3.3. Red de pozos de observación	154
5.3.4. Levantamiento piezométrico en la red de pozos de observación	157
5.3.5. Nivelación de brócales	157
5.3.6. Elevación del nivel estático	160
5.3.7. Modelo conceptual	165
5.3.8. Dirección del flujo subterráneo	167
6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERATIVO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE CHETUMAL	169
6.1. Descripción general de la PTAR “Centenario”	169
6.1.1. Información preliminar de la planta	169
6.1.2. Tren de Agua	170
6.1.3. Tren de Lodos	179
6.1.4. Equipo electromecánico	183
6.1.5. Instalaciones civiles	191
6.1.6. Equipo de laboratorio	194
6.1.7. Medición de unidades de proceso	197
6.1.8. Calidad de agua de la PTAR Centenario	199
6.1.9. Caracterización influente – efluente 24 horas	204

6.1.10. Visita técnica – evaluación in situ	206
6.1.11. Factores de desempeño	219
6.1.12. Actividades de mejora del desempeño y recomendaciones	220
6.1.13. Costos de inversión	225
6.1.14. Conclusiones de la PTAR Centenario	226
6.2. Planta de tratamiento de aguas residuales “Huay Pix”	227
6.2.1. Descripción general de la PTAR “Huay pix”	227
6.2.2 . Tren de Agua	228
6.2.3. Tren de Lodos	233
6.2.4. Equipo electromecánico	234
6.2.5. Instalaciones civiles	237
6.2.6. Medición de unidades de proceso	237
6.2.7. Calidad del agua de la PTAR Huaypix	239
6.2.8. Caracterización influente – efluente 24 horas	245
6.2.9. Visita técnica – evaluación in situ	247
6.2.10. Factores de desempeño	257
6.2.11. Actividades de mejora del desempeño y recomendaciones	259
6.2.12. Costos de inversión	264
6.2.13. Conclusiones de la PTAR HuayPix	265
6.3. Descripción general de la PTAR “Subteniente López”	265
6.3.1. Información preliminar de la planta	265
6.3.2. Tren de Agua	267
6.3.3. Tren de Lodos	272
6.3.4. Equipo electromecánico	273
6.3.5. Instalaciones civiles	275
6.3.6. Medición de unidades de proceso	278
6.3.7. Calidad de agua	278
6.3.8. Caracterización influente – efluente 24 horas	286
6.3.9. Visita técnica – evaluación in situ	288
6.3.10. Factores de desempeño	299
6.3.11. Actividades de mejora del desempeño y recomendaciones	301
6.3.12. Conclusiones de la PTAR Subteniente López	306
6.4. Planta de tratamiento de aguas residuales Fovissste V etapa	307
6.4.1. Descripción general de la PTAR “Fovissste V etapa”	307
6.4.2. Tren de Agua	309
6.4.3. Reactor de aeración	309
6.4.4. Tanque de contacto de cloro	311
6.4.5. Tren de Lodos	313

6.4.6. Equipo electromecánico	314
6.4.7. Instalaciones civiles	315
6.4.8. Medición de unidades de proceso	316
6.4.9. Calidad del agua de la PTAR Fovissste V etapa	317
6.4.10. Caracterización influente – efluente 24 horas	323
6.4.11. Visita técnica – evaluación in situ	325
6.4.12. Factores de desempeño	333
6.4.13. Actividades de mejora del desempeño y recomendaciones	335
6.4.14. Costos de inversión	338
6.4.15. Conclusiones del estudio realizado a la PTARs Fovissste V etapa	339
7. SISTEMA DE ALCANTARILLADO	341
7.1. Drenaje Sanitario	341
7.1.1. Sistema de alcantarillado por vacío	343
7.1.2. Sistema de alcantarillado de la ciudad de Chetumal	343
7.1.3. Áreas de influencia de los cárcamos de bombeo	347
7.1.4. Sentido del flujo de los cárcamos de aguas residuales	349
7.1.5. Problemática existente en la infraestructura hidráulica usada para el desalojo del agua sanitaria.	351
7.1.6. Cálculo de aportaciones de aguas residuales por cárcamo.	355
7.1.7. Modelo de simulación sanitario	356
7.2. Acciones identificadas	417
7.3. Conclusiones específicas	419
7.3.1. Recomendaciones	420
7.4. Drenaje Pluvial	420
7.4.1. Sistema pluvial de ciudad de Chetumal	422
7.4.2. Principales problemas de capacidad de desalojo óptimo	424
7.4.3. Inundación del 17 al 19 de octubre del 2015	429
8. MAPAS DE ZONAS INUNDABLES.	443
8.1. Delimitación de las áreas tributarias	443
8.1.1. Modelo Digital de Elevaciones	443
8.1.2. Planimetría	444
8.1.3. Traza urbana, nombres de calles, colonias y sitios importantes.	445
8.1.4. Líneas de corriente principales.	446
8.1.5. Generación de subcuencas de aportación	447
8.2. Hietogramas de precipitación	455
8.2.1. Estaciones climatológicas	455
8.2.2. Análisis de información pluviográfica	455
8.2.3. Lluvias de proyecto.	458

8.2.4. Curvas Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años)	459
8.3. Modelo de simulación hidráulica	464
8.4. Parámetros de simulación de alcantarillado pluvial	465
8.5. Mapas de riesgo por inundación en la zona urbana de Chetumal	472
8.5.1. Metodología para los mapas de vulnerabilidad y su aplicación en la ciudad de Chetumal	473
8.6. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo de daño estructural en vivienda por efectos de inundación	487
8.7. Generación de mapas de riesgo de daño estructural en vivienda en la ciudad de Chetumal para diferentes periodos de retorno	488
8.8. Cálculo del Índice contra inundaciones (ICI)	491
8.9. Cálculo del índice de inundaciones (IDI)	496
8.10. Calles afectadas por las inundaciones	499
8.11. Tirantes de inundación en diferentes colonias de Chetumal	502
8.12. Áreas de inundación	507
8.13. Acciones identificadas	510
8.14. Conclusiones específicas.	510
8.14.1. Recomendaciones	511
Bibliografía	513
Anexos	519
A. Vialidades con afectaciones para diferentes periodos de retorno	519
Ilustraciones	541
Tablas	558

8. MAPAS DE ZONAS INUNDABLES.

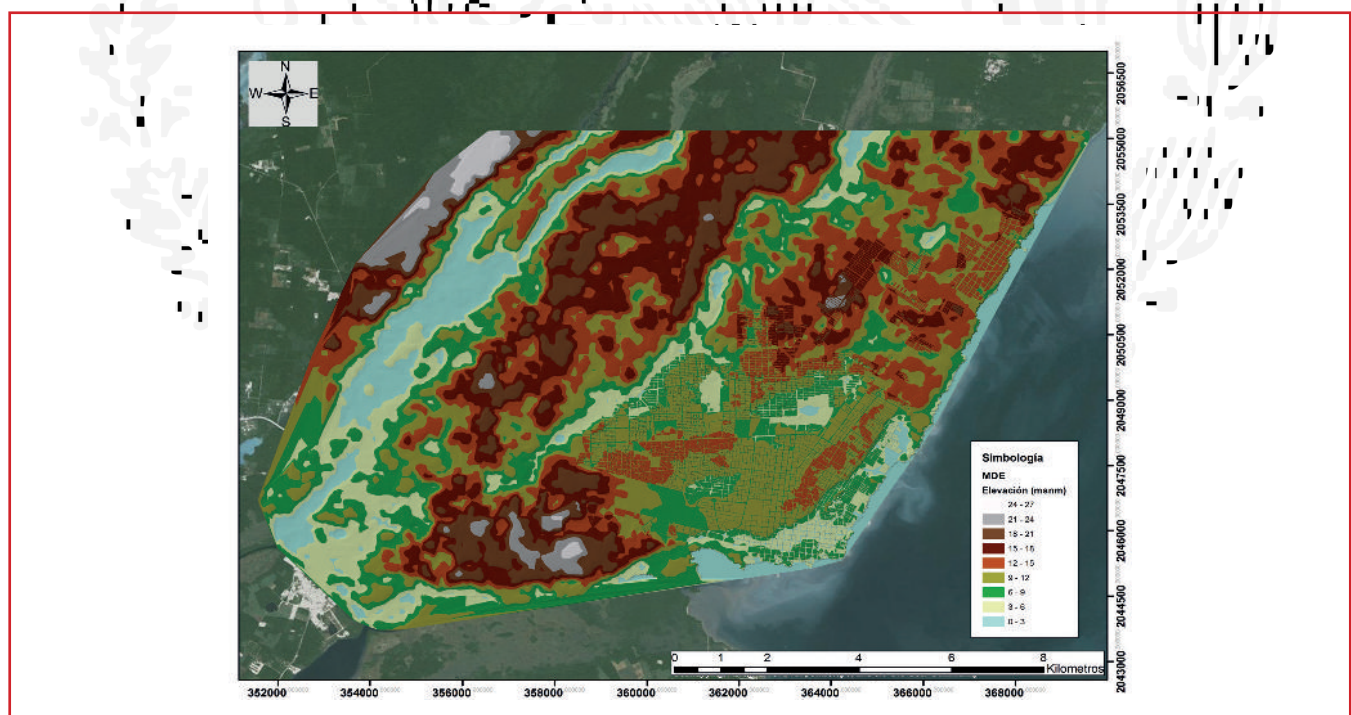
Para la construcción de los mapas de zonas inundables se requiere caracterizar la zona de estudio, por lo tanto se toma como referencia la metodología generada por Rodríguez et al (2015), en la cual se menciona la sistematización de los insumos necesarios para la creación de los mapas. Estos se determinan a partir de la construcción de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), planimetría de la zona urbana que resultara mediante un proceso descrito posteriormente las líneas principales de corriente. Se trabajará en el análisis hidrológico para conocer las lluvias de diseño, que permitirán construir el modelo de simulación hidráulica.

8.1. DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS TRIBUTARIAS,

8.1.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015), un modelo digital de elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. En la Ilustración 8.1 se presenta el MDE generado con ayuda de las partes Light Detection And Ranging -detecciones por luz y distancia- con abreviatura LIDAR proporcionadas por el INEGI. Esta información fue corroborada a través de levantamientos topográficos que cuenta la CAPA en su base de datos, ver Ilustración 8.1.

Ilustración 8.1 Modelo Digital de Elevaciones de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.



8.1.2. PLANIMETRÍA

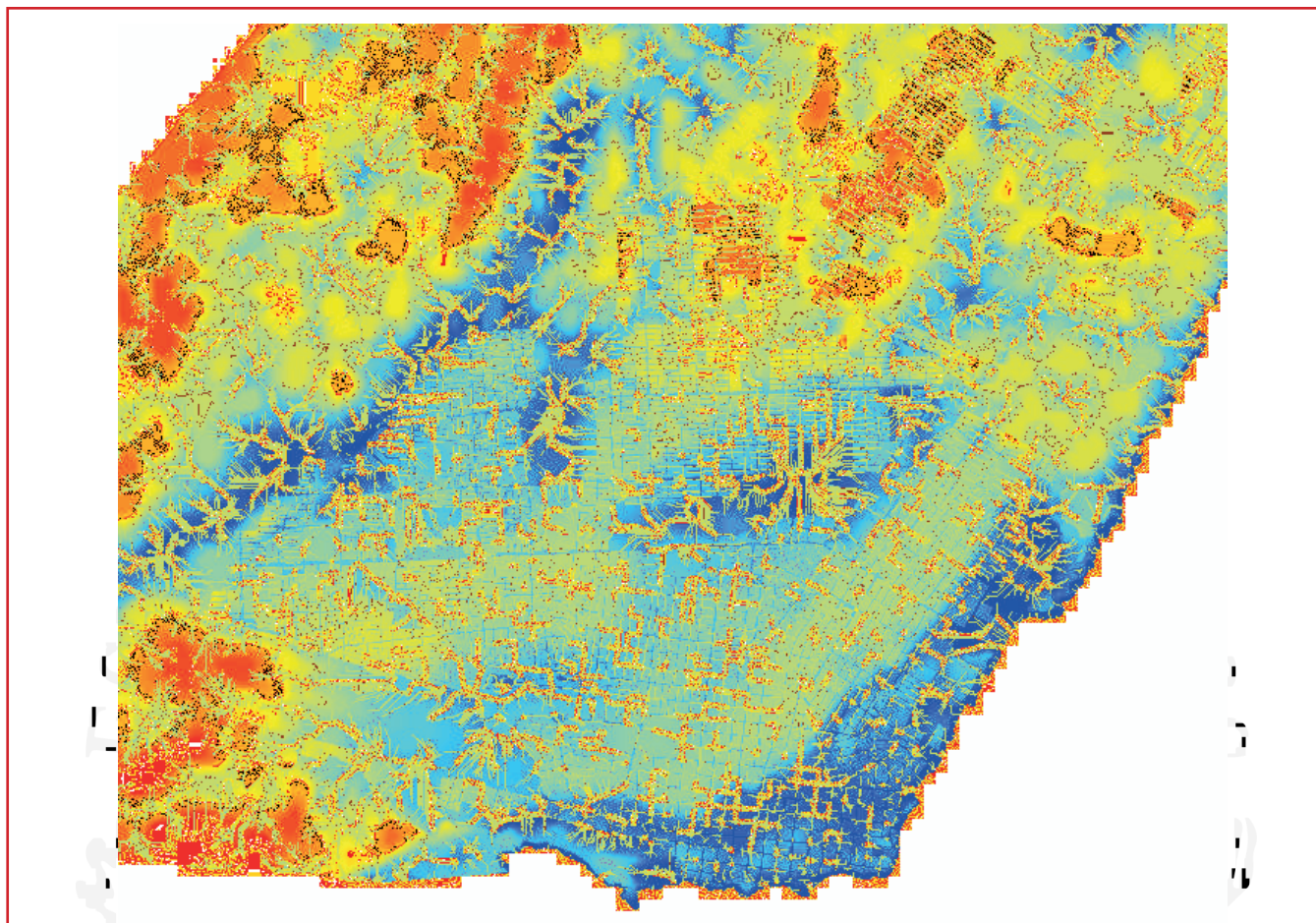
La planimetría de la zona, es un conjunto de métodos y procedimientos utilizados para obtener la representación a escala de todos los detalles relevantes del terreno sobre una superficie plana, prescindiendo del relieve y representando al objeto en forma horizontal.

Los datos de la planimetría se obtuvieron a partir de datos de la información proporcionada por el organismo operador de agua potable y se corroboraron a través de los datos del INEGI (AGEB's), representándose las divisiones realizadas para el seccionamiento de las zonas de construcciones, ya sean delimitadas por avenidas o calles. En la Ilustración 8.2 se presenta la planta de la zona urbana de la ciudad de Chetumal.

Ilustración 8.2 Planimetría de la Ciudad de Chetumal.



Ilustración 8.5 Líneas de corriente calculadas a partir del modelo digital de elevaciones en el que se incluye la planimetría (Rodríguez et al., 2012)



8.1.5. GENERACIÓN DE SUBCUENCAS DE APORTACIÓN

Para la generación de las microcuencas se tomó como punto de partida el MDE con zonas urbanas, el archivo se procesó con ayuda de un software que trabaje mediante algún Sistema de Información Geográfica (SIG). Se utilizó el programa ArcGis®, ya que permite trabajar datos con datos topográficos, bases de datos y facilita la delimitación de las microcuencas de acuerdo con las elevaciones registradas en el MDE.

La extensión del ArcGis utilizada es HecGeo-Hms®, la Ilustración 8.6 contiene los pasos a seguir para delimitar las áreas, ver Ilustración 8.7.

A continuación se da una breve explicación de los pasos que se siguieron para la delimitación.

Ilustración 8.6 Diagrama para generar microcuencas de aportación

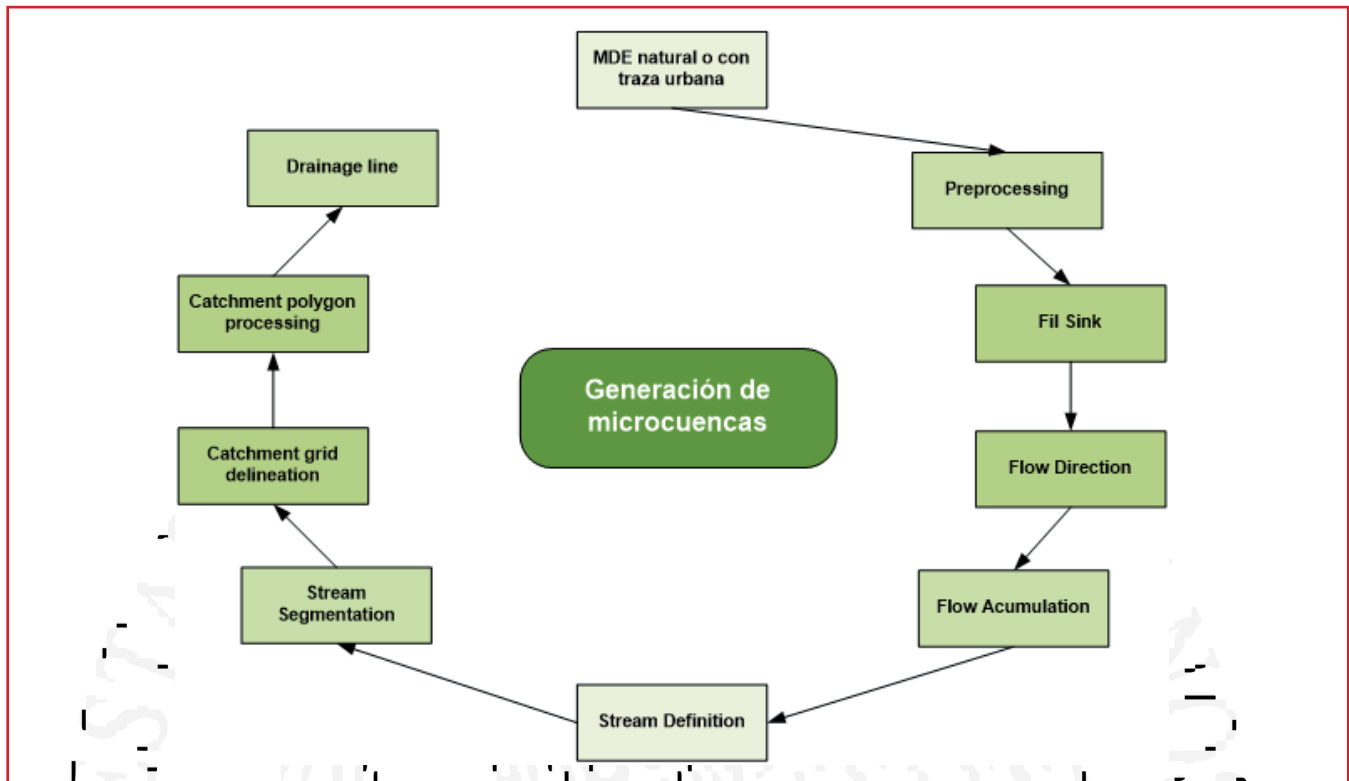
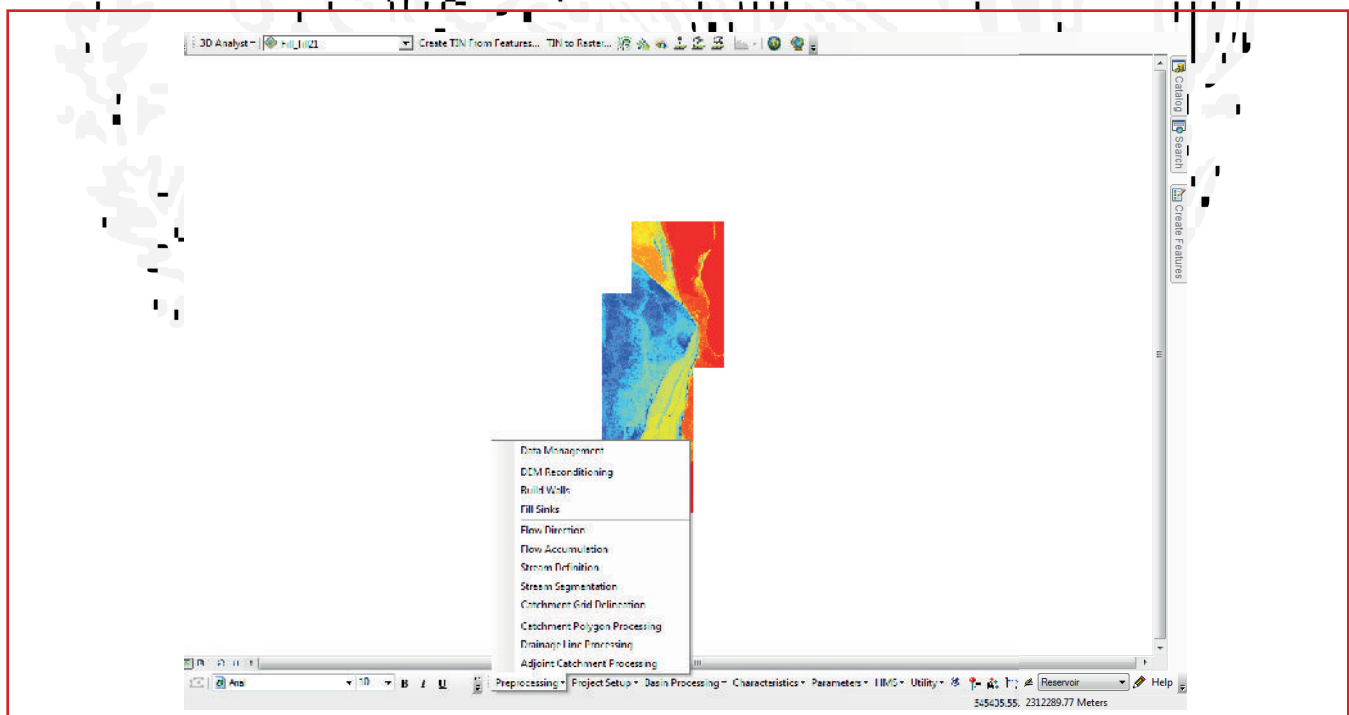


Ilustración 8.7 Extensión Hec-GeoHMS.



1. **Fill sinks** (relleno de sumideros), consiste en rellenar las depresiones del MDE, donde se aumenta la cota de las celdas vecinas, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes, ver Ilustración 8.8
2. **Flow direction** (dirección de flujo), se define la dirección de la mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas circundantes del análisis, ver Ilustración 8.9
3. **Flow accumulation** (acumulación de flujo), se determinan el número de celdas que drenan a cada celda, una forma de calcularse manualmente es multiplicar el número de celdas por el área de cada celda, ver Ilustración 8.10
4. **Stream definition** (definición del flujo), etapa en la cual se clasifican las celdas con flujo procedente de un número mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje ver Ilustración 8.10
5. **Stream Segmentation** (segmentación del flujo), se dividen los cauces en segmentos ver Ilustración 8.10
6. **Catchment grid delineation** (delimitación de las cuencas) en la cual se definen las cuencas por cada segmento del cauce ver Ilustración 8.11
7. **Catchment Polygon Processing** (proceso de una cuenca en polígono), proceso que convierte las sub-cuencas de malla a un formato de vector, con esto se conocen las áreas de aportación originadas por el escurrimiento que puede producirse ver Ilustración 8.12
8. **Drainage line Processing** (proceso del trazo de las líneas de corriente), se convierten los cauces de la malla a un formato de vector, ver Ilustración 8.13

Ilustración 8.8 Ventana de Fill Sinks para introducir datos, b) Resultado de Fill Sinks.

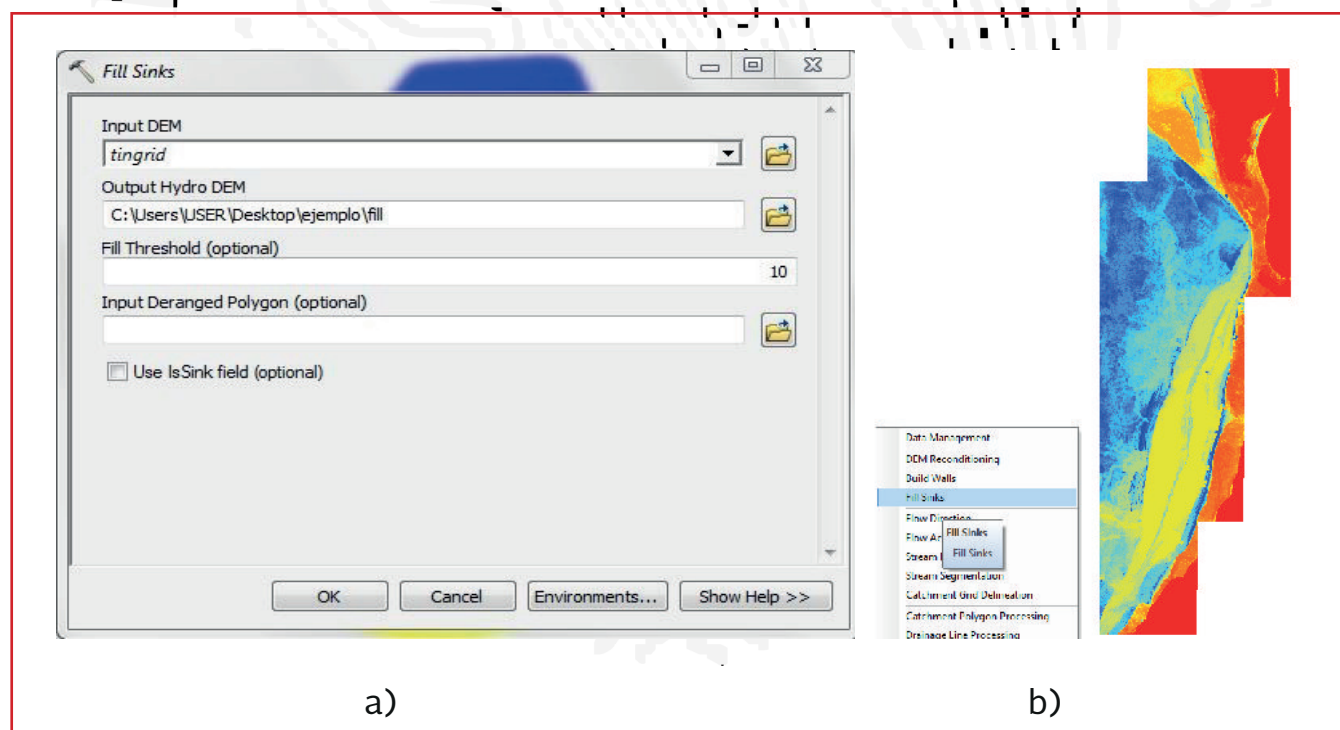


Ilustración 8.9 Ventana de Flow Direction para introducir datos, b) Resultado de Flow Direction.

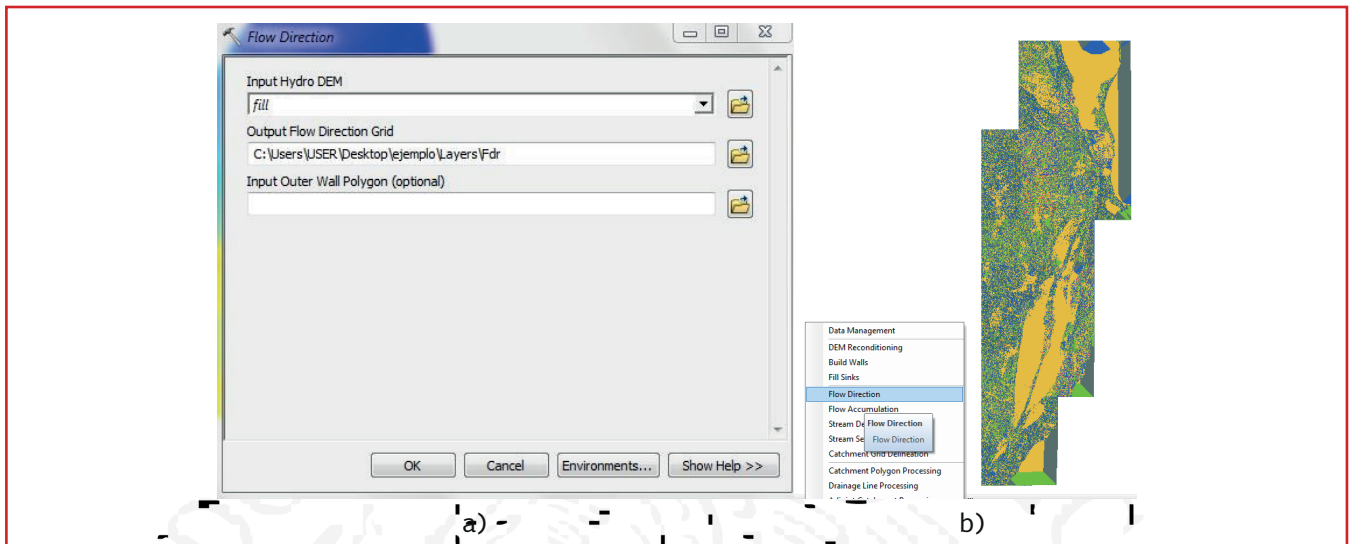


Ilustración 8.10 a) Ventana principal de Flow Accumulation, b) Ventana Stream Definition, c) Ventana Stream Segmentation.

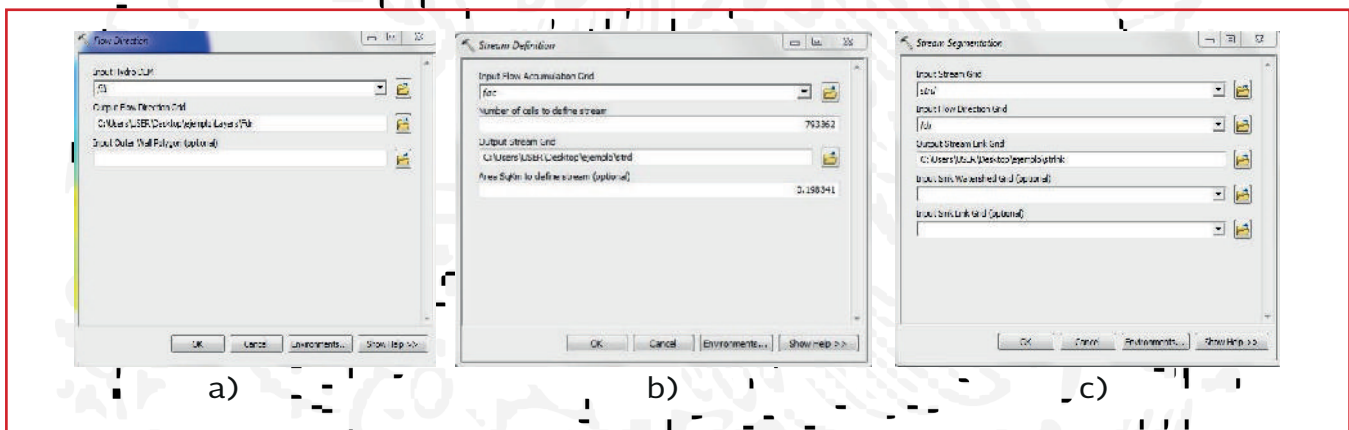


Ilustración 8.11 a) Ventana de la herramienta Catchment Grid, b) Resultado de Catchment Grid.

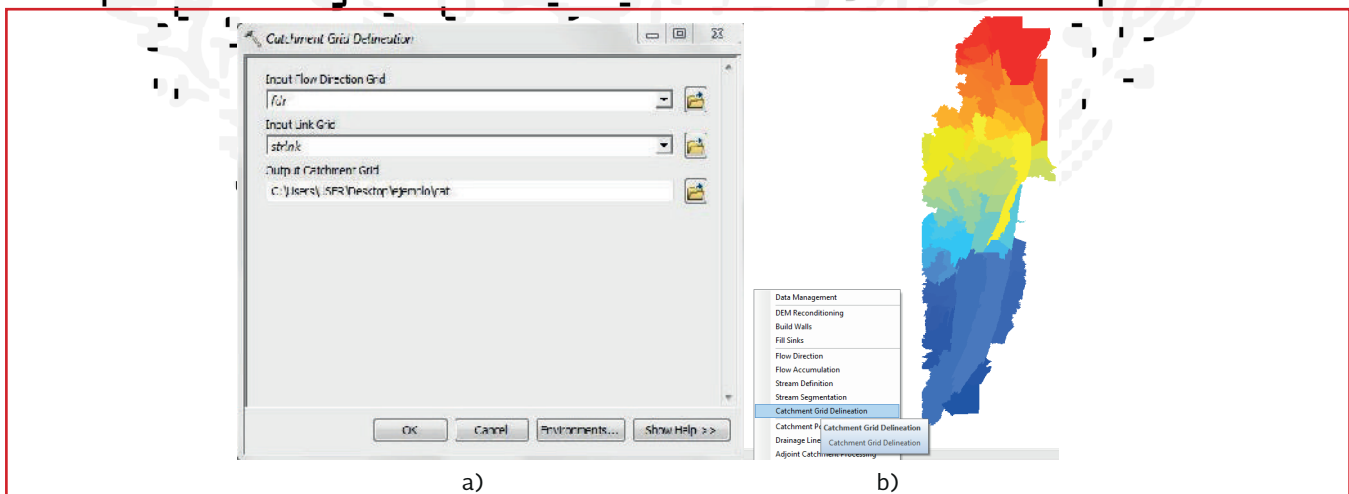


Ilustración 8.12 a) Ventana de la herramienta Catchment Polygon, b) Subcuencas obtenidas del MDT.

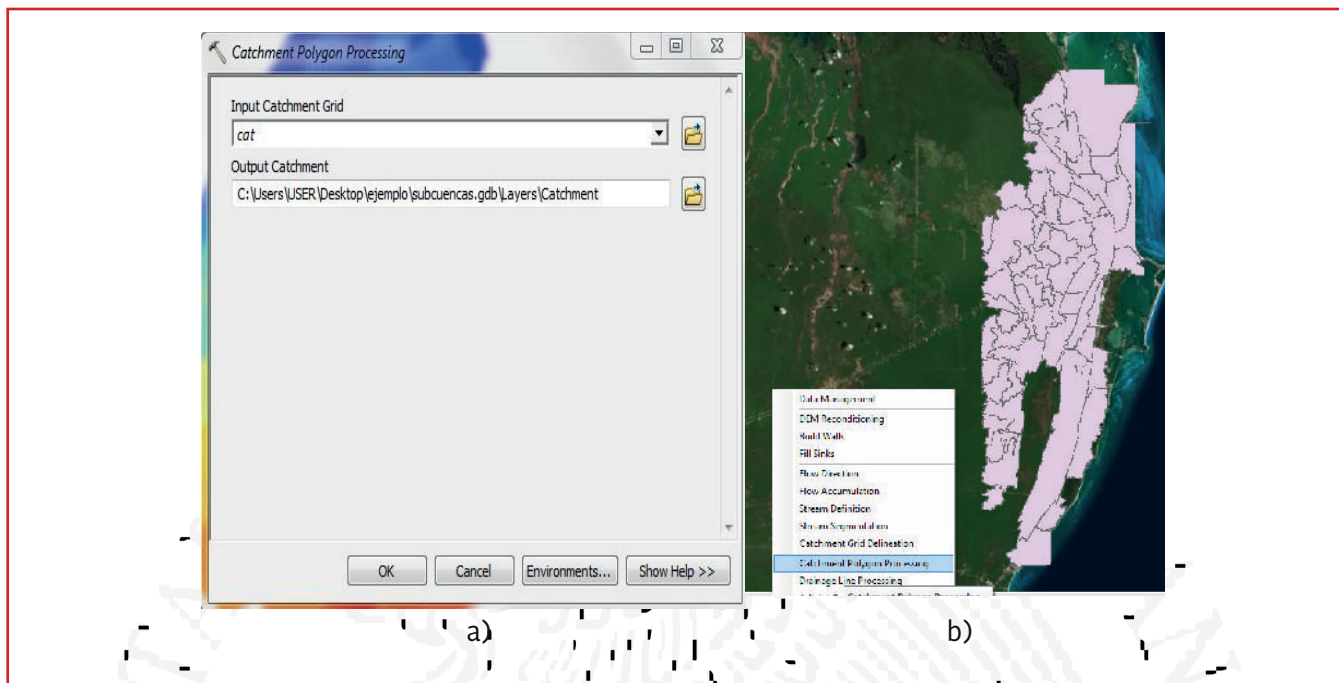
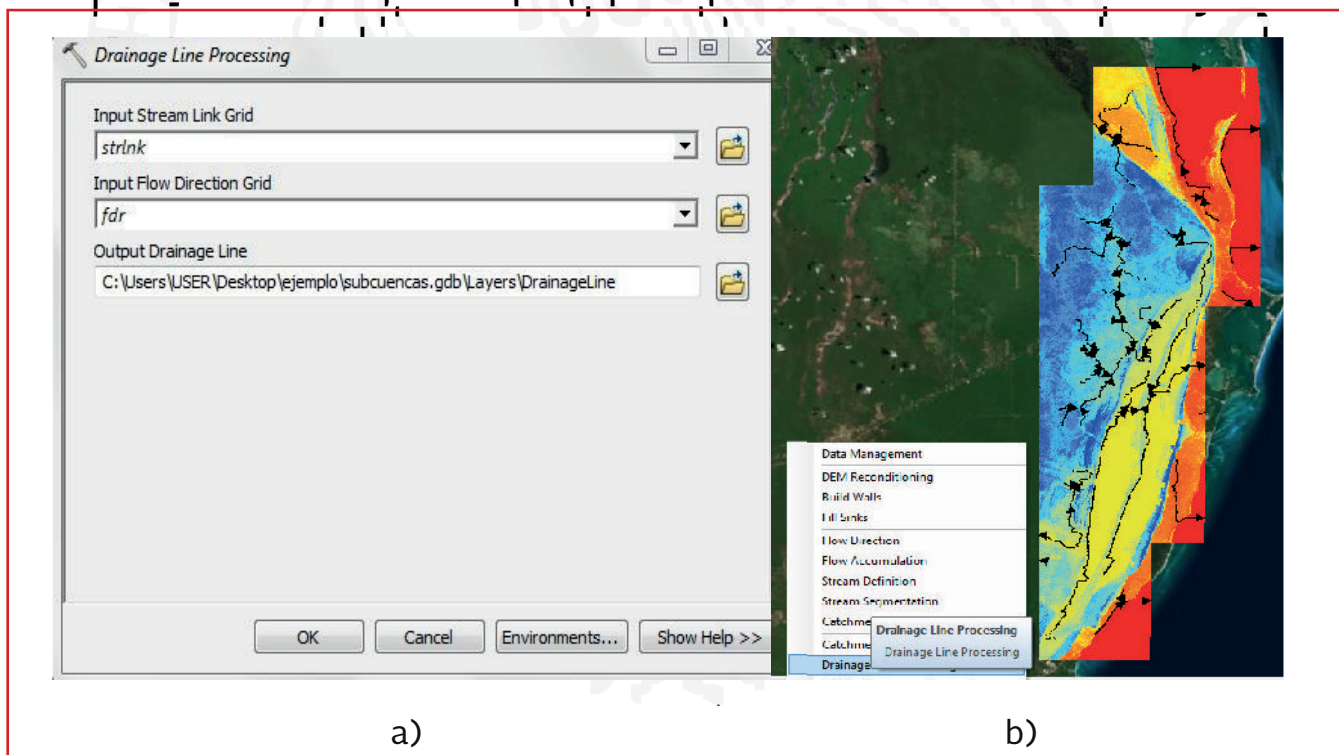
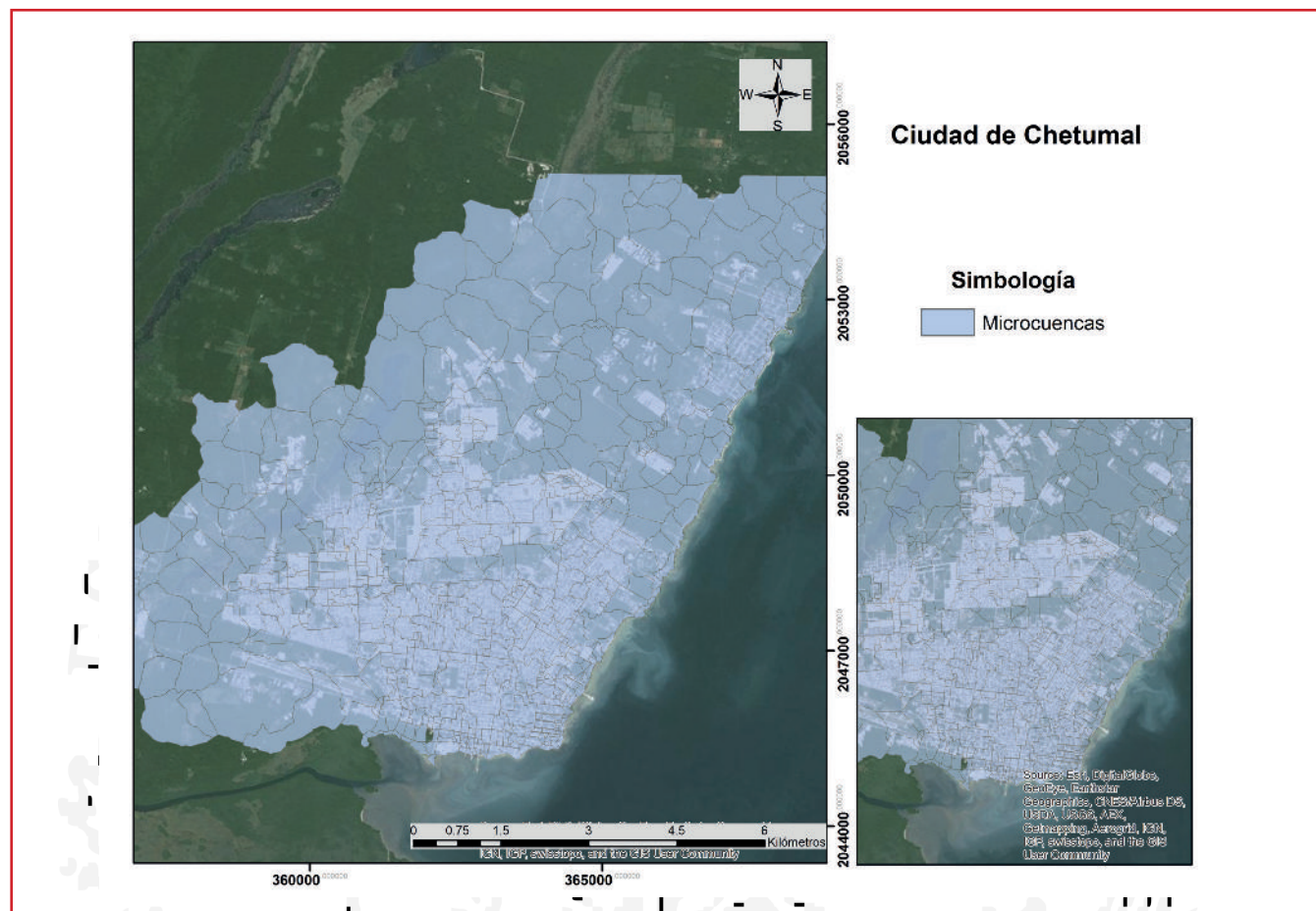


Ilustración 8.13 a) Ventana de la herramienta Drainage Line, b) Líneas de corriente del MDE.



A partir del proceso descrito anteriormente, resultaron para la zona de estudio un total de 674 microcuencas de aportación para la ciudad de Chetumal (ver Ilustración 8.14)

Ilustración 8.14 Microcuencas de aportación de la ciudad de Chetumal



8.1.5.1. Caracterización de la subcuencas y microcuencas de aportación

Con el estudio realizado por Rodríguez et al (2012) se identificaron los usos de suelo de la zona en estudio, divididos en 4 rubros. Pavimento constituido por las calles, Áreas no desarrolladas conformado por el terreno natural, las casas habitación indicadas en el plano de planimetría, y los Parques y terrenos sin construir dentro de la mancha urbana indicados como Parques y Baldíos (Ilustración 8.15).

Para el análisis de escurrimientos en calles y colectores pluviales, las cuencas de la zona de estudio se dividieron en microcuencas. En total se obtuvieron 674 (ver Ilustración 8.14) para cada una de ellas se calcularon sus parámetros siguientes: área, altura máxima y mínima (en msnm), porcentaje de área impermeable (ver Ilustración 8.16), pendiente de la cuenca (ver Ilustración 8.17), tiempo de concentración (ver Ilustración 8.18), etcétera.

Ilustración 8.15 Usos del suelo (Rodríguez et al., 2012)

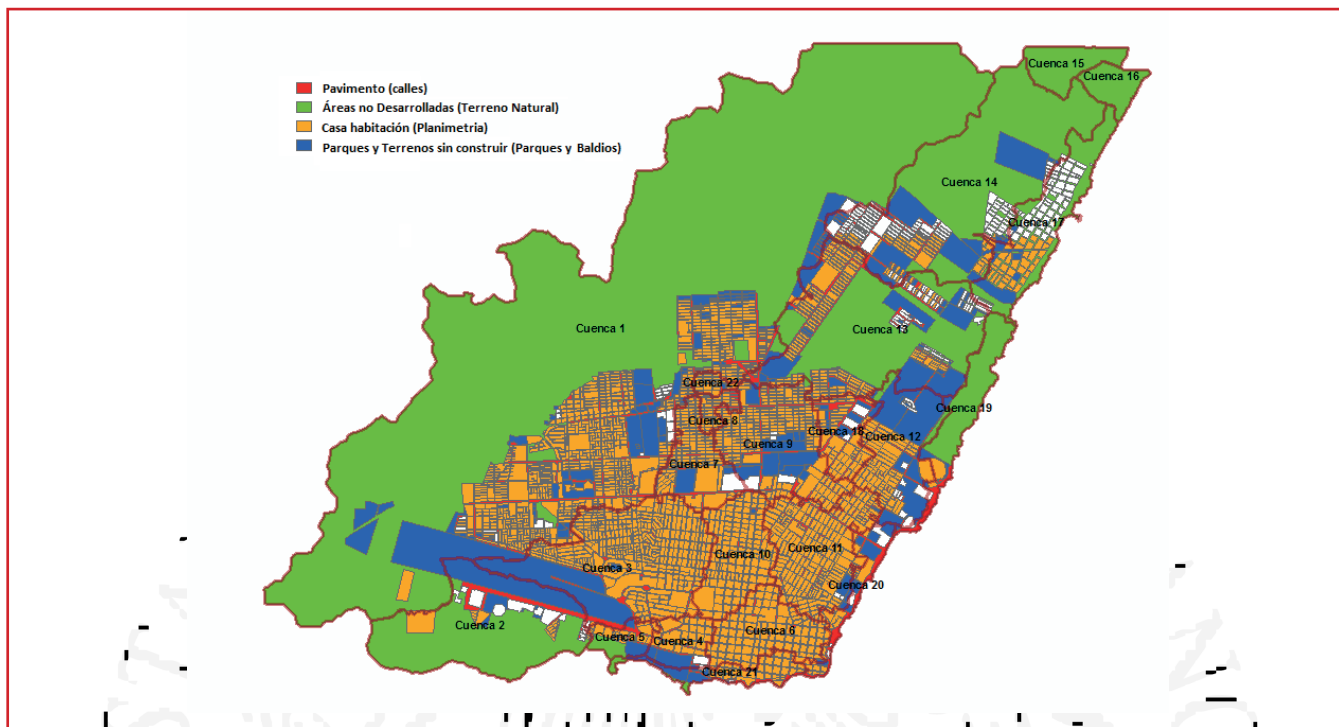


Ilustración 8.16 Porcentaje de área impermeable por microcuenca (Rodríguez et al., 2012)

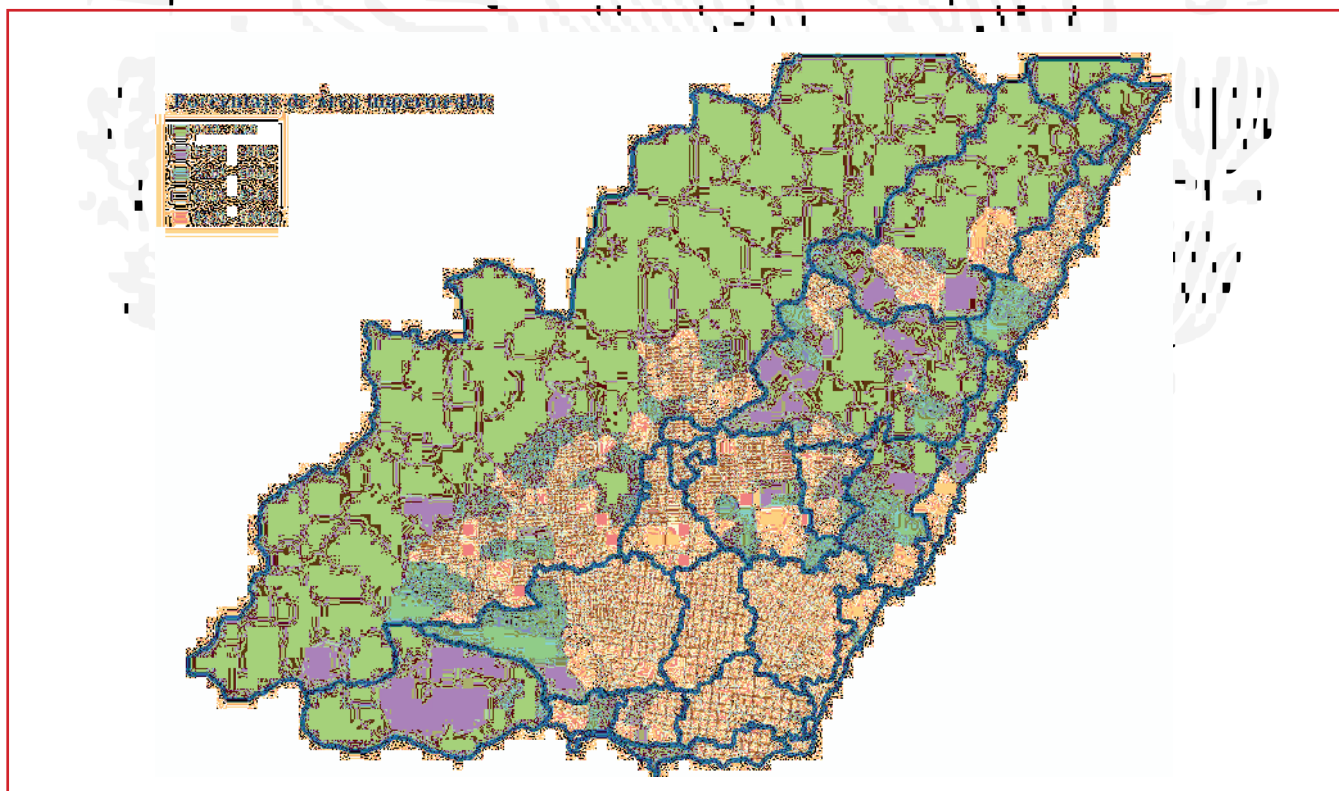


Ilustración 8.17 Pendiente (%) de las microcuencas (Rodríguez et al., 2012)

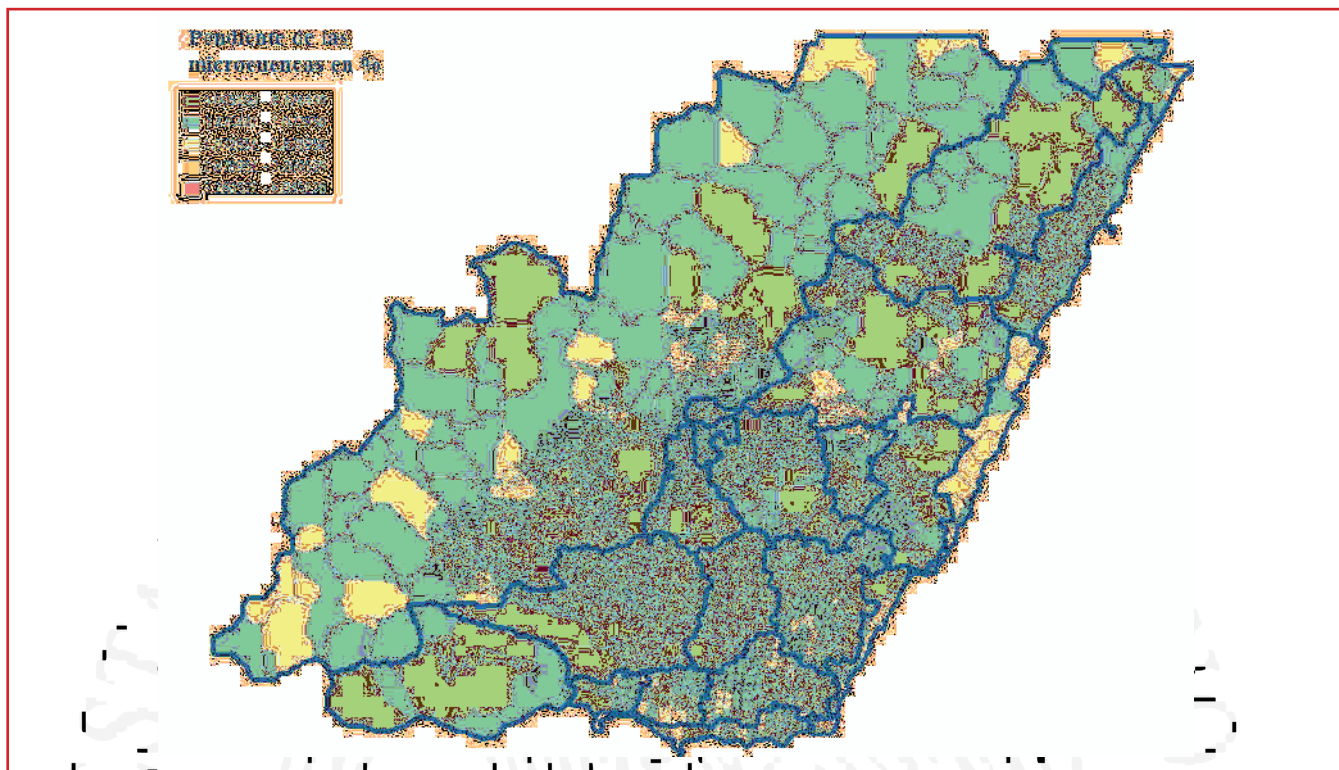
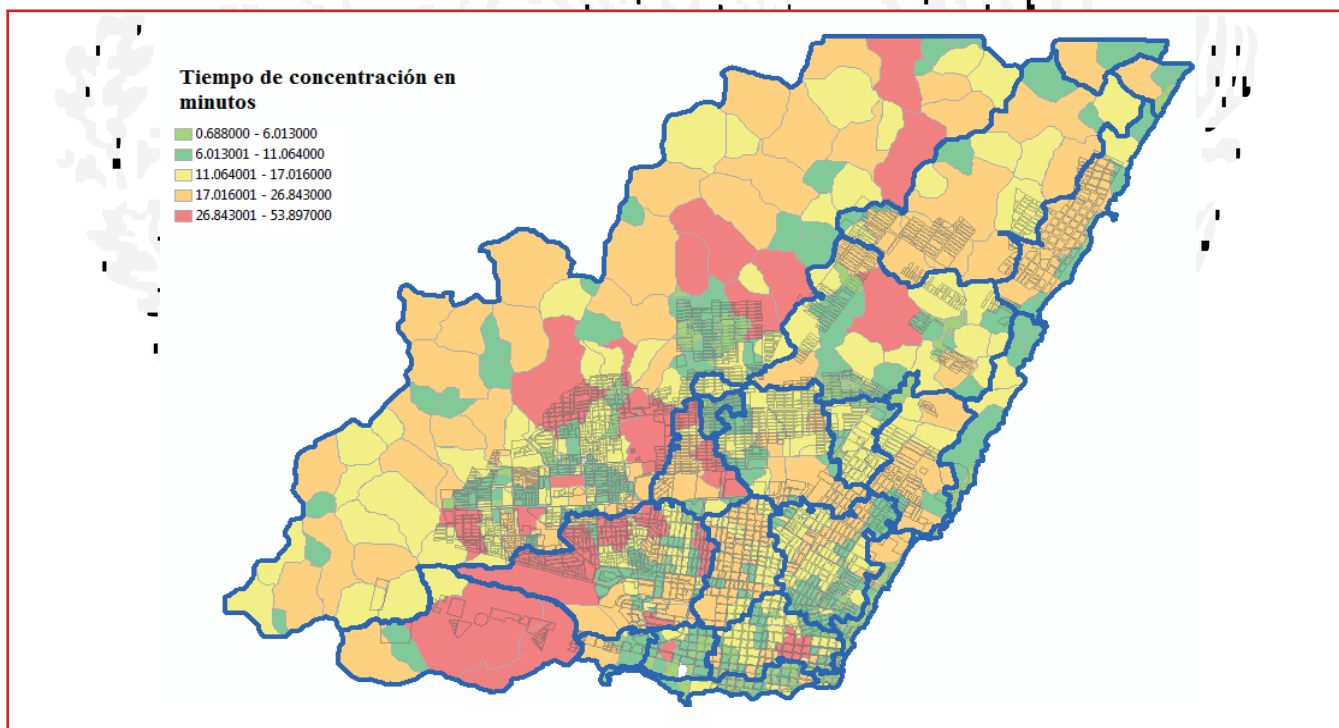


Ilustración 8.18 Tiempo de concentración en minutos (Rodríguez et al., 2012)



8.2. HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN

8.2.1. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Los hietogramas de precipitación se tomaron en base al estudio realizado por Rodríguez et al. en el año 2012, donde con la base ERIC III V2.0, se localizaron nueve estaciones pluviométricas en la zona, las cuales tenían un conjunto de datos mayores a 12 años, se corrigieron y estimaron datos faltantes de la serie, para posteriormente mediante un análisis de funciones de distribuciones de probabilidad obtener un relación de precipitación y periodo de retorno, ver Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Lluvias Precipitación (mm)- Periodo de retorno (años) para las estaciones climatológicas (Rodríguez et al., 2012)

Nombre de la Estación	Chetumal, Tecnológico Othón P. Blanco	Chetumal, Observatorio	Los Pozos, Othón P. Blanco	INIA, Caechet, Othón P. Blanco	Bacalar, Payo Obispo
Número de estación	23153	23032	23015	23049	23002
Mejor ajuste	Distribución exponencial 2 parámetros	Distribución Gumbel Doble	Distribución Log Normal 2 parámetros	Distribución exponencial 2 parámetros	Distribución Normal (momentos)
Error estándar	20.40	3.60	4.91	10.92	5.15
Tr (años)					
2	110.63	100.8	82.03	104.06	65.09
5	167.38	154.45	115.61	157.41	88.33
10	207.31	194.55	137.78	196.05	102.29
25	260.37	251.1	165.78	248.68	119.08
50	301.6	297.48	186.64	290.66	131.3
100	344.15	347.99	207.49	334.94	143.38
200	388.19	403.46	228.42	381.83	155.5

8.2.2. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PLUVIOGRÁFICA

Para el análisis de la información pluviográfica, se utiliza una estación meteorológica automática (EMA), encargada de registrar datos a cada 10 minutos de diferentes parámetros como los son el viento, la temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros. La EMA analizada está ubicada al sur del aeropuerto de Chetumal (ver Ilustración 8.19):

Estación: SMN EMAS CHETUMAL, QROO

Operada por: Servicio Meteorológico Nacional (SMN – EMAS)

Longitud: 88°19'40" Latitud: 18°30'02" Altitud: 14

Inicio con registros el 25/04/2000

Ilustración 8.19 Localización de la EMA, Chetumal Quintana Roo y de las estaciones climatológicas (Rodríguez et al., 2012)



Para conocer la distribución temporal de la lluvia, se requiere calcular el promedio de lluvias que se presenta más veces en Chetumal. Dicha forma de lluvia se emplea para determinar las lluvias de diseño. Del análisis se tiene:

- Generación de la lluvia acumulada en cada tormenta (ver Ilustración 8.20 e Ilustración 8.21)

Ilustración 8.20 Lluvias acumuladas para cada tormenta (adimensional) con duración menor a 60 minutos y mayor a 30 minutos (Rodríguez et al., 2012)

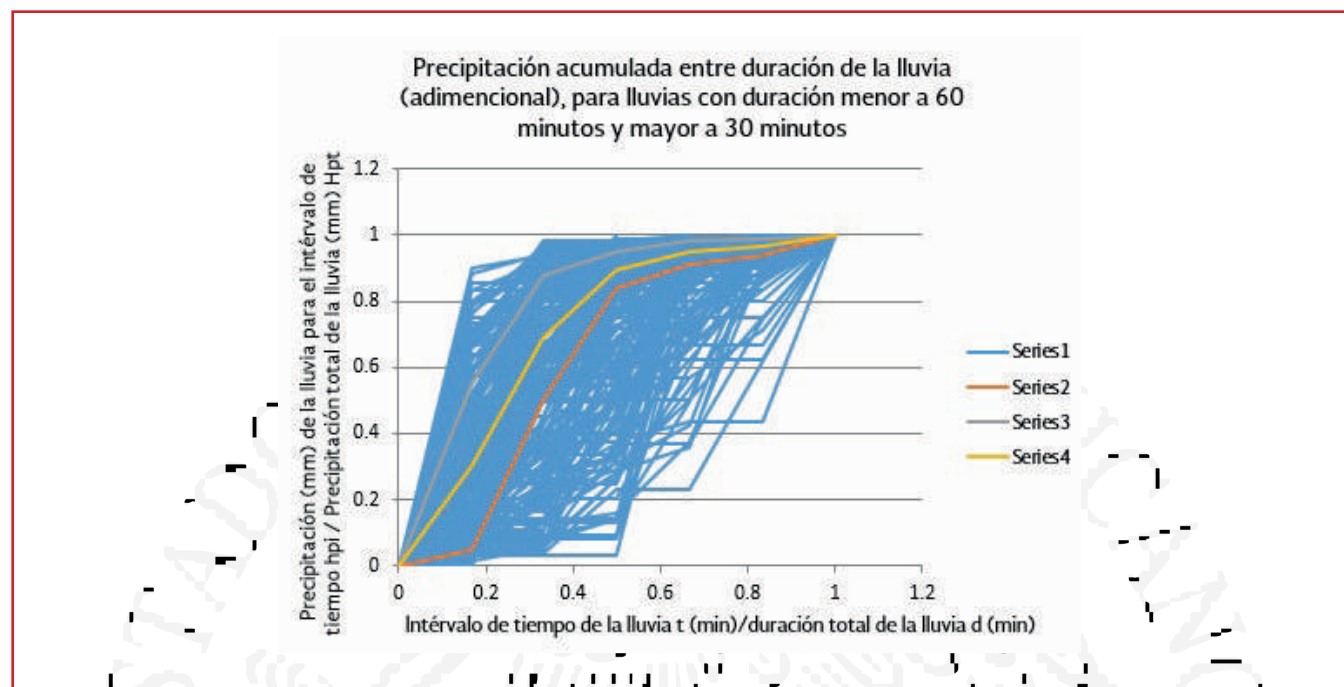
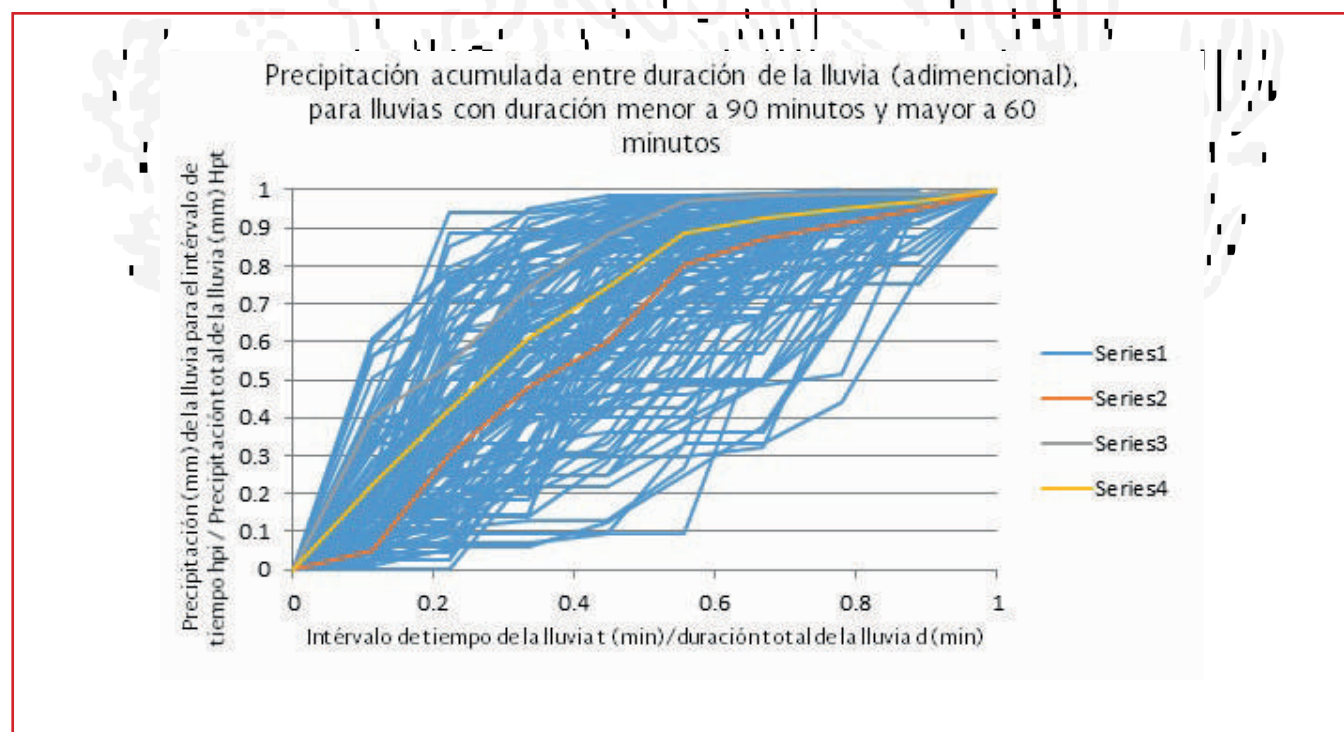
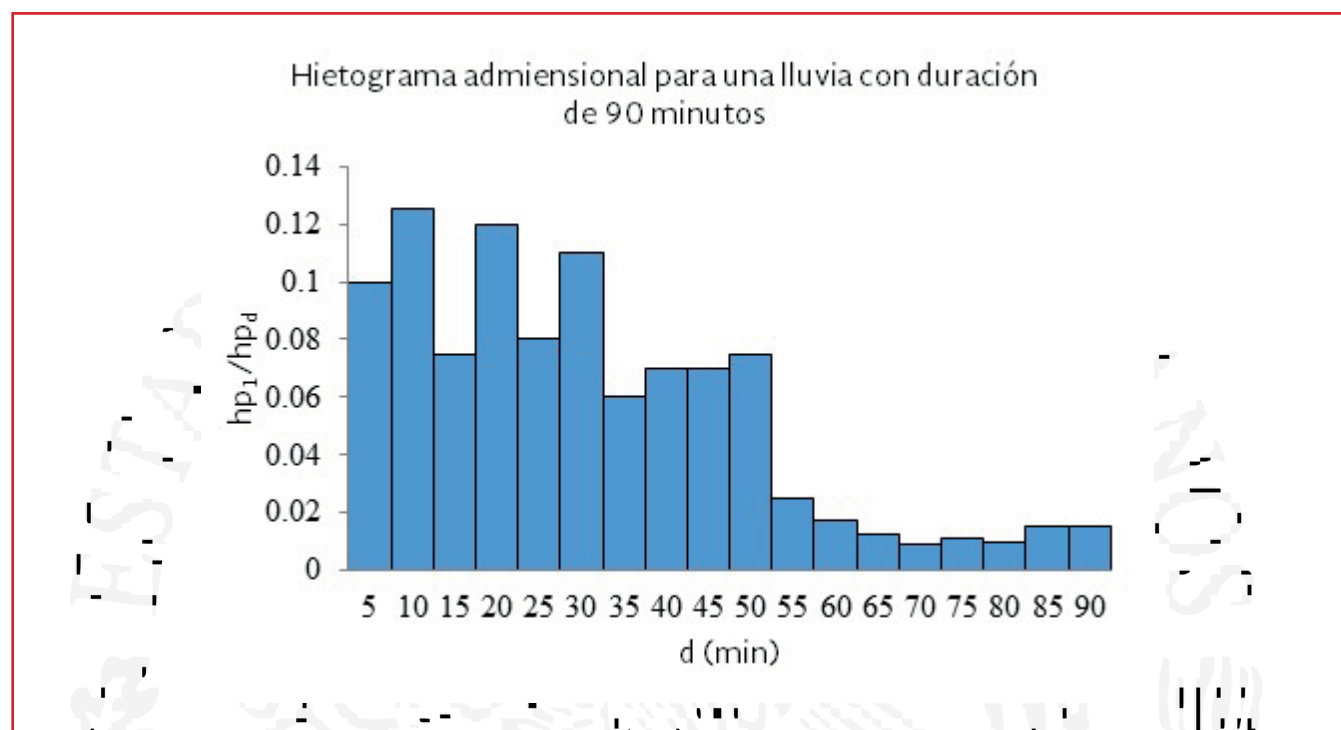


Ilustración 8.21 Lluvias acumuladas para cada tormenta (adimensional) con duración menor a 90 minutos y mayor a 60 minutos (Rodríguez et al., 2012)



A partir de las distribuciones adimensionales medias, mostradas en la ilustración anterior, se construyeron los histogramas adimensionales para las lluvias de proyecto y que son presentados en la Ilustración 8.22 para una lluvia tipo con duración de 90 minutos. Estos Hietogramas adimensionales serán usados como base para construir las lluvias tipo para el análisis de los colectores.

Ilustración 8.22 Hietograma adimensional para una lluvia con duración de 90 minutos (Rodríguez et al., 2012)



8.2.3. LLUVIAS DE PROYECTO.

Para la determinación de las curvas altura de precipitación – duración – periodo de retorno, y con la información generada (lluvias máximas acumuladas diarias para diferentes periodos de retorno mostradas en la Tabla 8.1, se procede a la desagregación de dichos eventos a lluvias con duraciones menores a 24 horas.

El método empleado es el denominado “Bell” que permite estimar la altura de precipitación para cualquier periodo de retorno y para cualquier duración. Esta relación lluvia – duración – periodo de retorno es directamente proporcional a la lluvia horaria con un periodo de retorno igual a dos años.

$$hp_d^4 = [0.35 \ln(Tr) + 0.76] [0.54d^{0.25} - 0.50] hp_{Tr=2}^{4-\frac{60}{d}}$$

Ecuación 8.1

Dónde:

d = Duración en minutos

Tr = Periodo de retorno en años

hp_T^d = Altura de precipitación para cualquier duración y para cualquier periodo de retorno

El interés en aplicar la ecuación arriba mostrada, radica en que los registros existentes de lluvias con cortas duraciones son escasos en la zona de estudio. Sin embargo se dispone de registros de lluvias máximas diarias de buena calidad y con longitudes de registro aceptables, por lo cual lluvias con duraciones menores a 24 horas pueden ser evaluadas en relación a ésta, para iguales periodos de retorno.

El éxito de aplicación de la ecuación anterior, radica en la correcta evaluación de la lluvia horaria con un periodo de retorno igual a dos años. Adicionalmente, para la evaluación de la lluvia horaria antes citada, se deberán realizar previamente dos correcciones al valor representativo de la lluvia máxima diaria, estimada en cada una de las estaciones, para un periodo de retorno de dos años. La primera es la corrección por intervalo fijo de observación y la segunda es debida a la reducción del área de la cuenca.

8.2.4. CURVAS PRECIPITACIÓN (hp mm) – DURACIÓN (d min) – PERIODO DE RETORNO (Tr AÑOS)

Para la ciudad de Chetumal, se calcularon las curvas Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años) y curvas Intensidad (I mm/hr) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años), como el promedio de las curvas de las estaciones 23153 y 23032 y estas lluvias de diseño será usada para fines de la simulación. En la Tabla 8.2.

Tabla 8.2 Curvas de Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años) para la Ciudad de Chetumal

Tr (años)	Duración (minutos)									
	5	10	20	30	40	50	60	90	120	1440
2	17.3	25.9	36.2	43.0	48.3	52.7	56.5	65.5	72.5	159.1
5	22.9	34.2	47.7	56.8	63.8	69.6	74.5	86.4	95.7	210.0
10	27.1	40.5	56.5	67.2	75.4	82.3	88.2	102.3	113.2	248.5
20	31.3	46.8	65.2	77.6	87.2	95.1	101.9	118.1	130.7	287.0
25	32.6	48.8	68.0	80.9	90.9	99.1	106.3	123.2	136.4	299.4
50	36.8	55.1	76.8	91.4	102.6	111.9	119.9	139.1	153.9	337.9
100	41.0	61.3	85.5	101.7	114.3	124.6	133.6	154.9	171.4	376.4
200	45.1	67.6	94.2	112.1	126.0	137.4	147.3	170.8	189.0	414.9

Con la información de las curvas Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años) de la Tabla 8.2 y los histogramas adimensionales para las lluvias de proyecto y que son presentados en los Hietogramas para las lluvias tipo para una duración de 90 minutos se muestran en la Tabla 8.3 y de la Ilustración 8.23 a la Ilustración 8.29.

Tabla 8.3 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y diferentes periodos de retorno.

Forma del Hietograma	Duración (min)	Periodos de Retorno (Tr)							
		2	5	10	20	25	50	100	200
0.1	5	6.5	8.6	10.2	11.8	12.3	13.9	15.5	17.1
0.125	10	8.2	10.8	12.8	14.8	15.4	17.4	19.4	21.3
0.075	15	4.9	6.5	7.7	8.9	9.2	10.4	11.6	12.8
0.12	20	7.9	10.4	12.3	14.2	14.8	16.7	18.6	20.5
0.08	25	5.2	6.9	8.2	9.4	9.9	11.1	12.4	13.7
0.11	30	7.2	9.5	11.2	13.0	13.6	15.3	17.0	18.8
0.06	35	3.9	5.2	6.1	7.1	7.4	8.3	9.3	10.2
0.07	40	4.6	6.0	7.2	8.3	8.6	9.7	10.8	12.0
0.07	45	4.6	6.0	7.2	8.3	8.6	9.7	10.8	12.0
0.075	50	4.9	6.5	7.7	8.9	9.2	10.4	11.6	12.8
0.025	55	1.6	2.2	2.6	3.0	3.1	3.5	3.9	4.3
0.0175	60	1.1	1.5	1.8	2.1	2.2	2.4	2.7	3.0
0.0125	65	0.8	1.1	1.3	1.5	1.5	1.7	1.9	2.1
0.009	70	0.6	0.8	0.9	1.1	1.1	1.3	1.4	1.5
0.011	75	0.7	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9
0.01	80	0.7	0.9	1.0	1.2	1.2	1.4	1.5	1.7
0.015	85	1.0	1.3	1.5	1.8	1.8	2.1	2.3	2.6
0.015	90	1.0	1.3	1.5	1.8	1.8	2.1	2.3	2.6

Ilustración 8.23 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 2 años

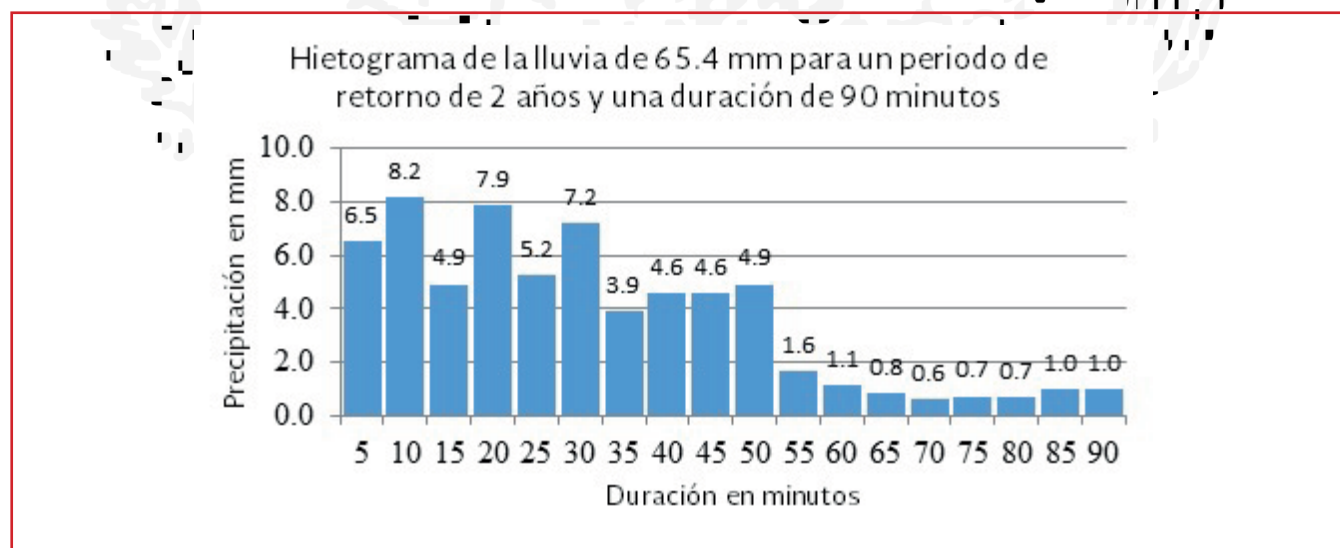


Ilustración 8.24 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 5 años

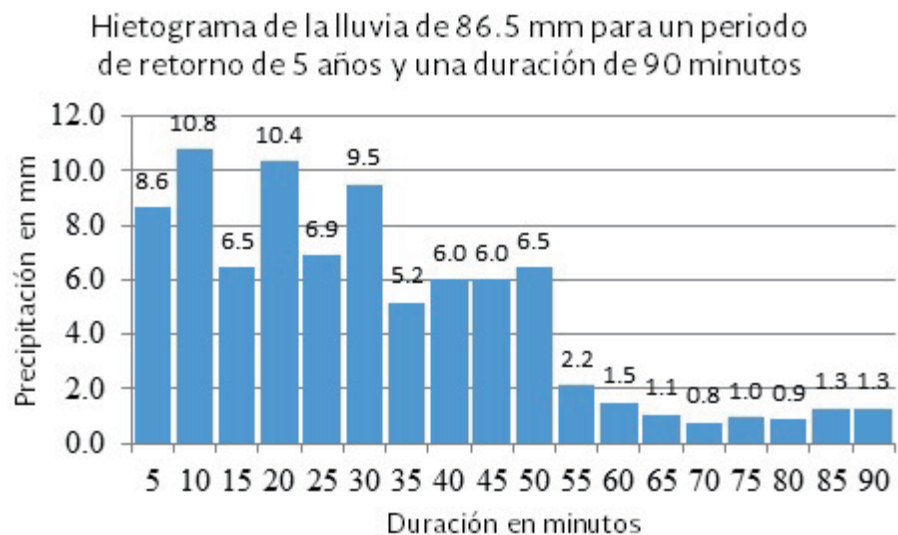


Ilustración 8.25 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 10 años

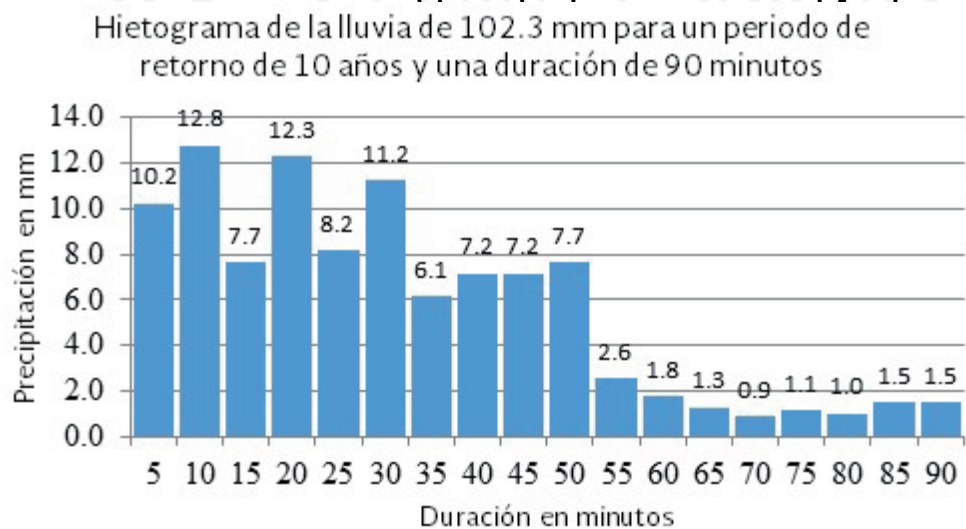


Ilustración 8.26 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 20 años

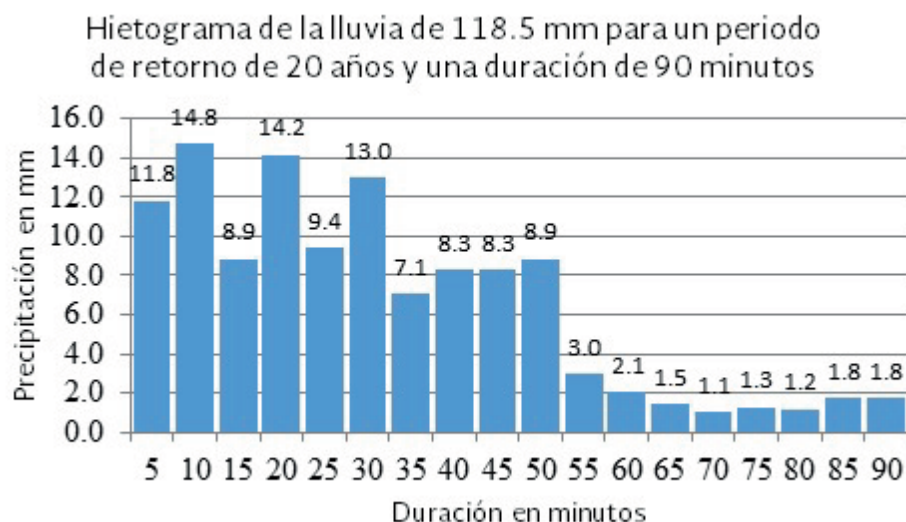


Ilustración 8.27 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 25 años

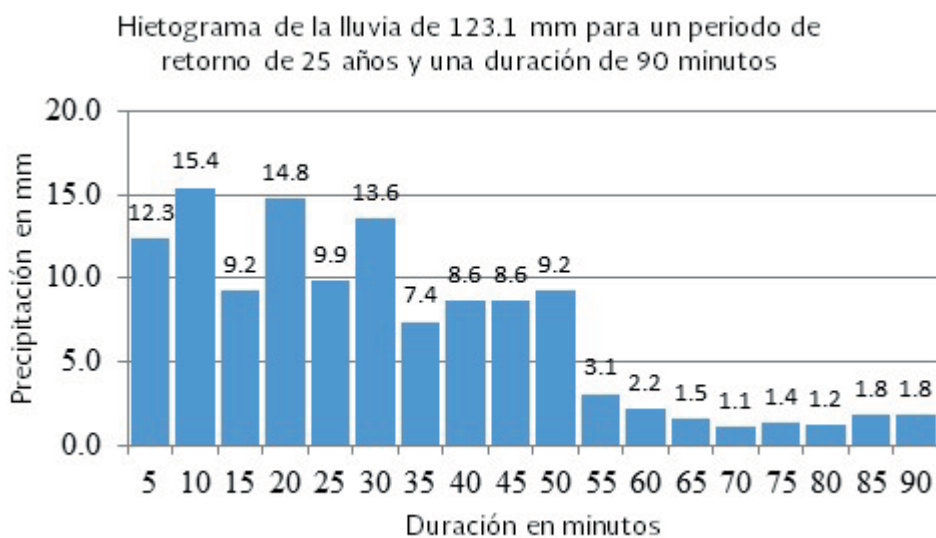


Ilustración 8.28 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 50 años

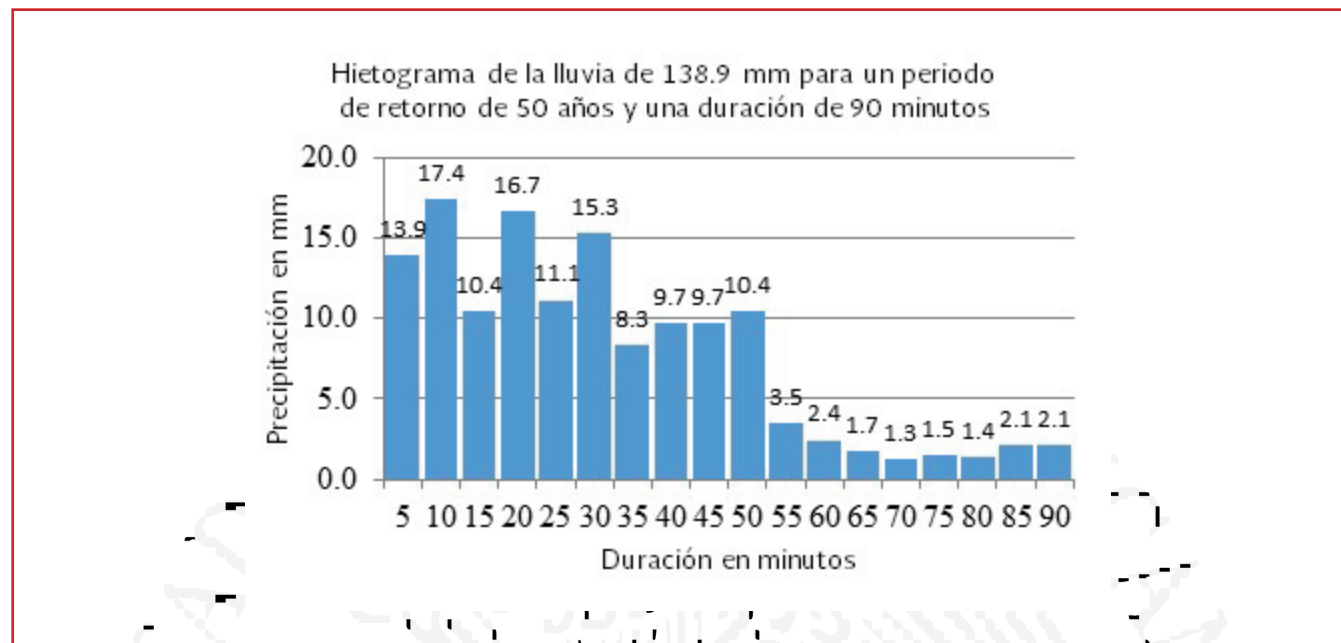
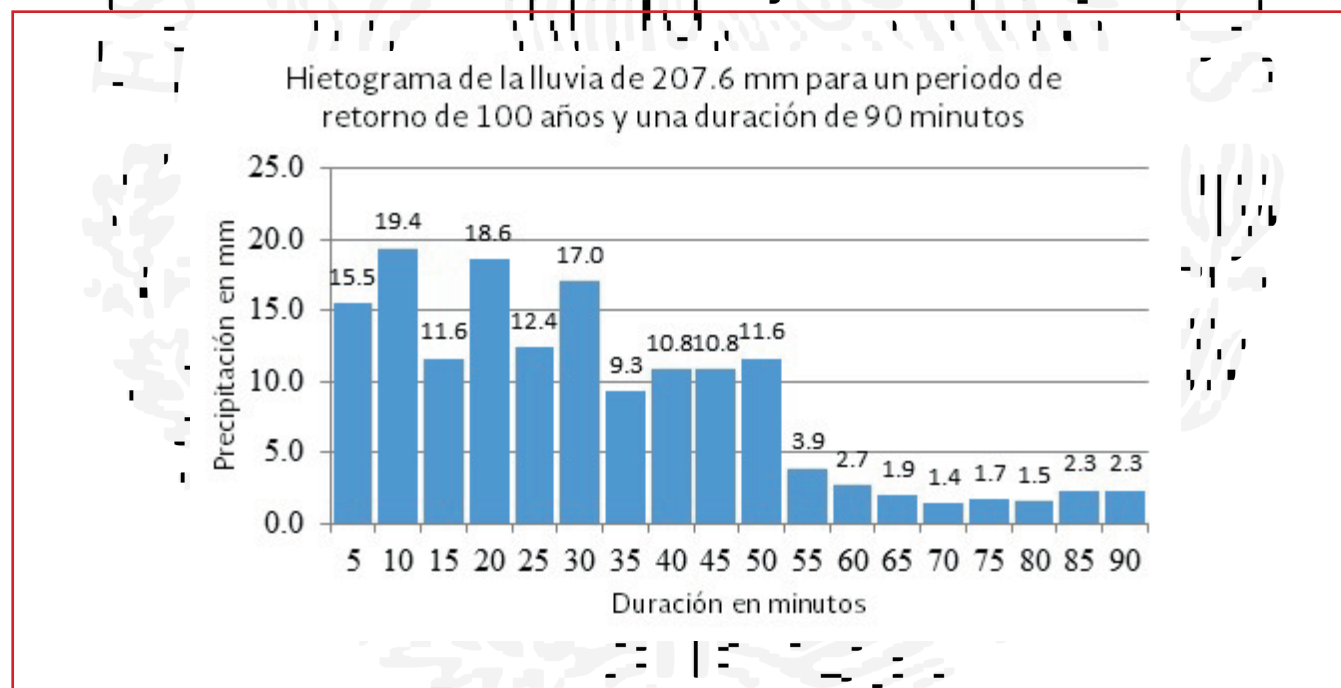


Ilustración 8.29 Hietograma de la precipitación para una duración de lluvia de 90 minutos y un periodo de retorno de 100 años



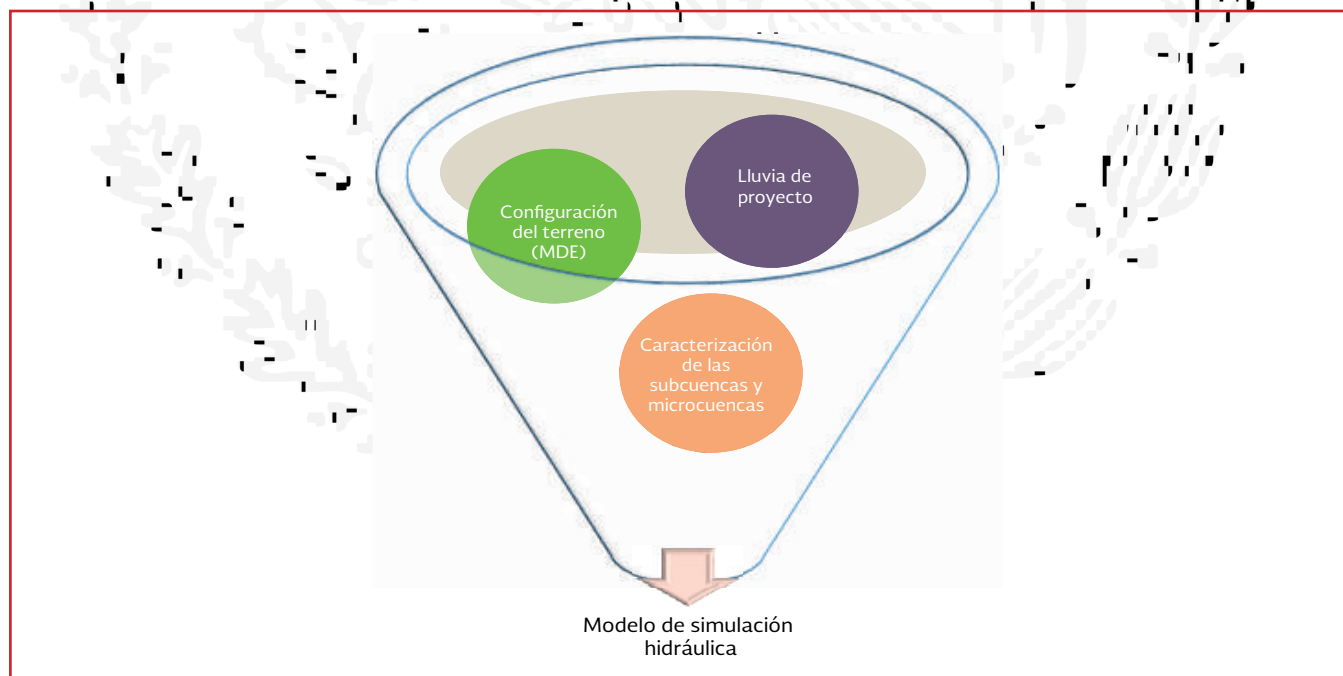
8.3. MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Un modelo de simulación se puede definir como un instrumento o herramienta que permite representar el comportamiento de un sistema, mediante métodos matemáticos (ecuaciones) o físicos. A partir del siglo XX y con el auge de los equipos de cómputo, esta tarea de representar la realidad por medio de ecuaciones matemáticas se hizo menos compleja, porque los tiempos largos de procesamiento se han reducido y las capacidad de los equipos han aumentado de manera exponencial, a tal grado que en nuestro tiempo estas herramientas se encuentran al alcance de todos.

Los modelos de simulación hidráulica (que representa la realidad de los fenómenos relacionados con el agua por medio de ecuaciones matemáticas), se utilizan preferentemente en el estudio de presas, redes de agua potable, alcantarillado y pluvial. Siendo un instrumento importante de diseño, revisión y control del sistema urbano. Para representar las condiciones de sitio, se requieren analizar y conocer las variables del sistema. Por lo que las variables principales que intervienen en estudio se presentan en Ilustración 8.30.

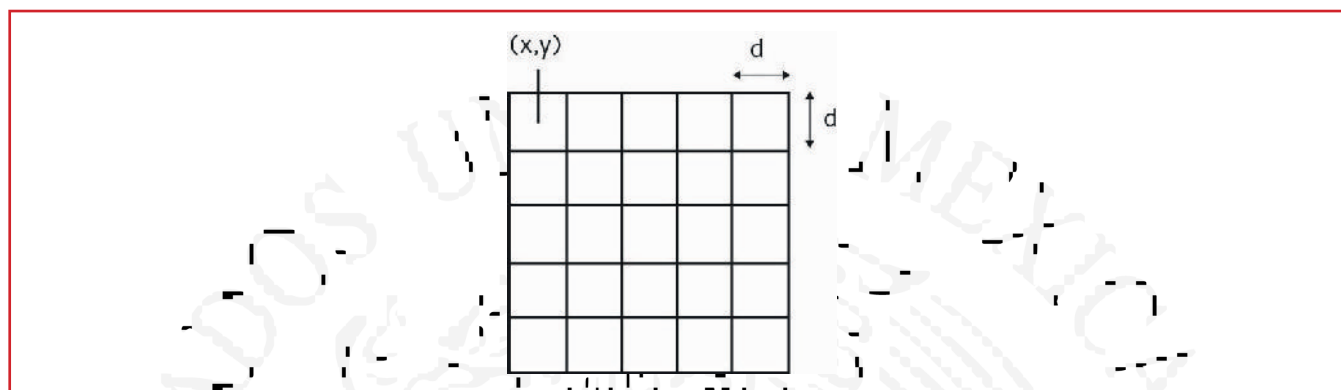
En los capítulos anteriores se generó la información necesario que requiere el modelo de simulación hidráulica, en el capítulo 6 se obtuvieron las lluvias de proyecto para diferentes probabilidades de ocurrencia, se construyó la configuración del terreno a través del MDE (con y sin infraestructura urbana), se delimitaron las subcuencas y microcuencas de aportación y se caracterizaron a través de coeficientes de escurrimiento, uso del terreno, perímetro, longitud del cauce principal, rugosidad del terreno). Ahora se requiere analizar por medio de un programa que permita conocer la variación de los tirantes y velocidades.

Ilustración 8.30 Variables esenciales de un modelo de simulación hidráulica



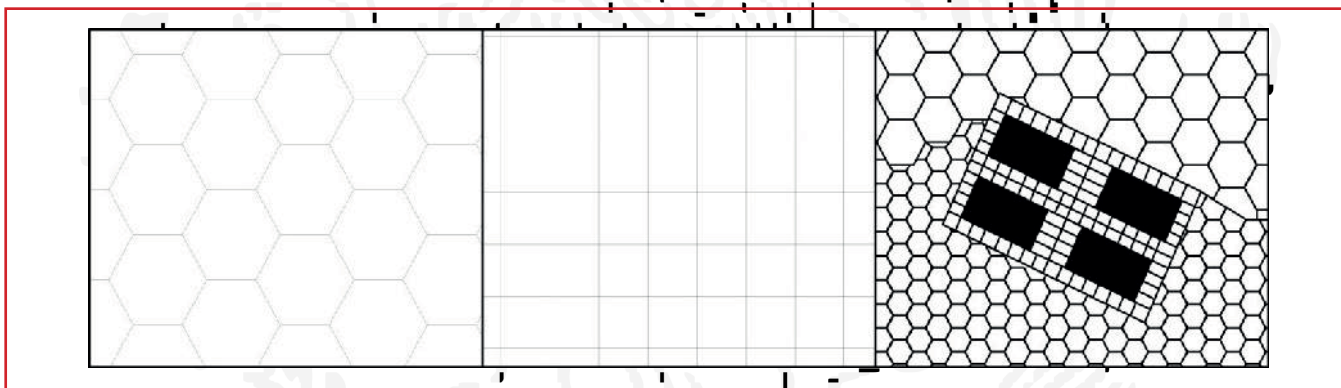
El modelo de simulación hidráulica utilizado es un modelo bidimensional, es decir si se encuentra en un plano de referencia x, y ; el agua se pueda desplazar en ambos ejes en el tiempo, este desplazamiento se obtiene a partir de la solución numérica de las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant por el método de diferencias finitas por medio de una malla de cálculo, ver Ilustración 8.31.

Ilustración 8.31 Malla de cálculo rectangular



Para generar un mallado, se toma una ponderación de las elevaciones de acuerdo con tamaño de la red, este valor permite analizar el sentido del flujo, la velocidad y nivel del agua para cada intervalo de análisis. Además se pueden trazar diferentes tipo de mallas (ver Ilustración 8.32)

Ilustración 8.32 Tipos de malla cálculo



8.4. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE ALCANTARILLADO PLUVIAL

Con base en la información de topografía, planimetría y de uso de suelo se obtuvieron los parámetros hidrográficos de las microcuencas, mismos que serán usados para la conformación del modelo de simulación de colectores pluviales en la plataforma SWMM tal como se muestra en la Ilustración 8.33 y Ilustración 8.34.

Ilustración 8.33 Microcuencas en la plataforma de PCSWMM 2D

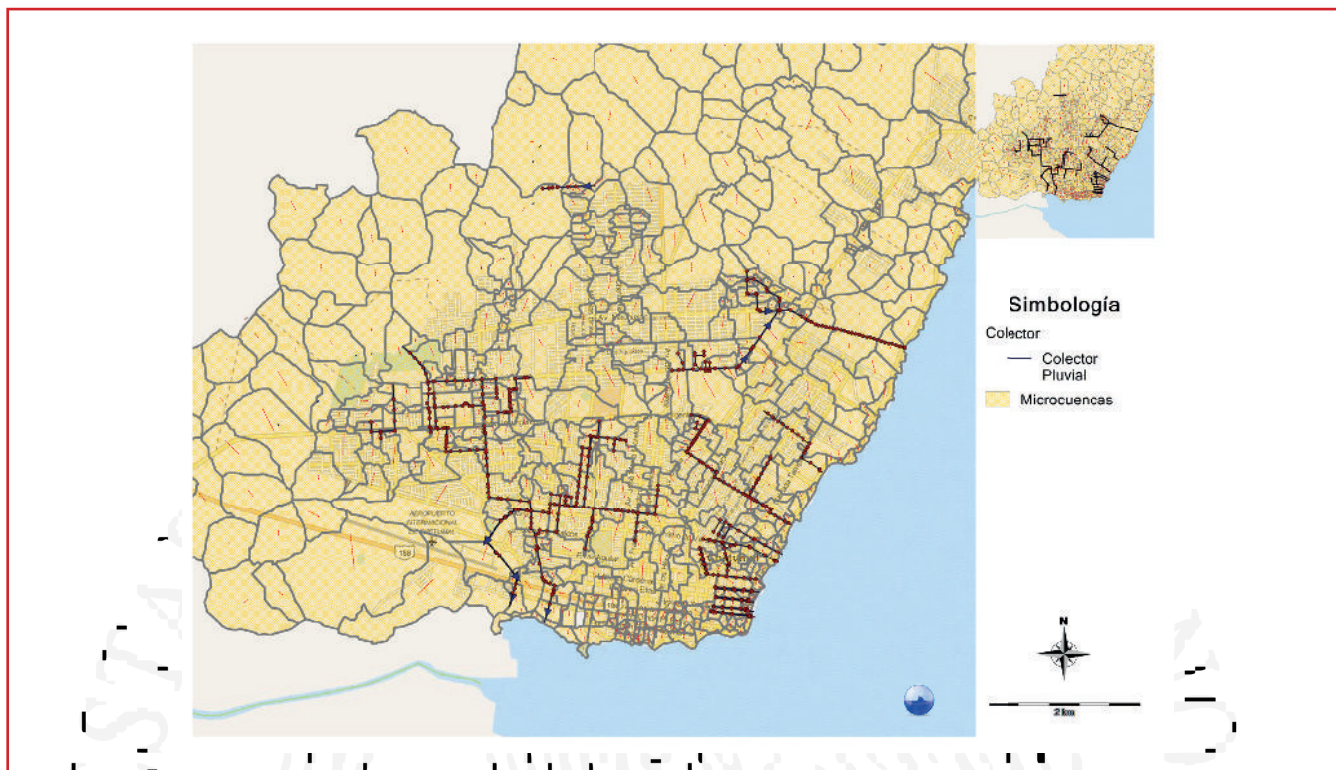
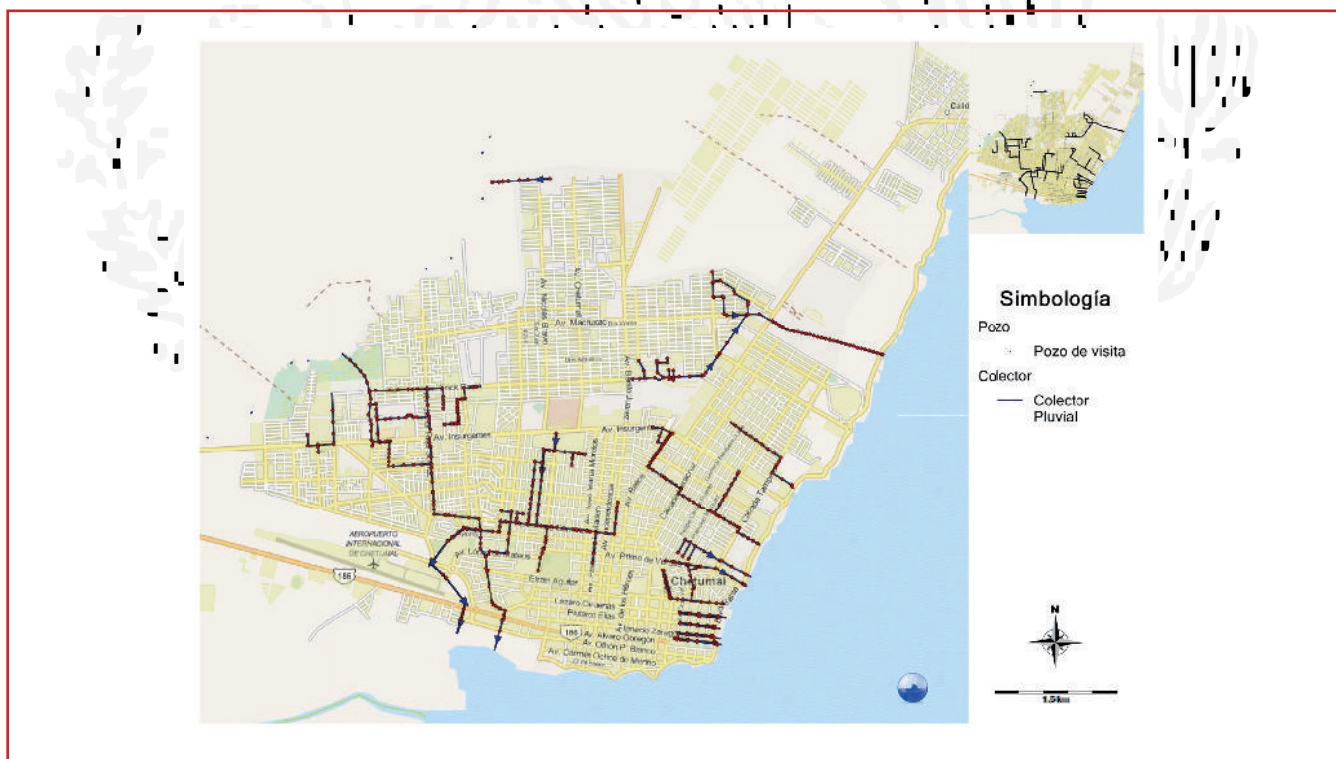
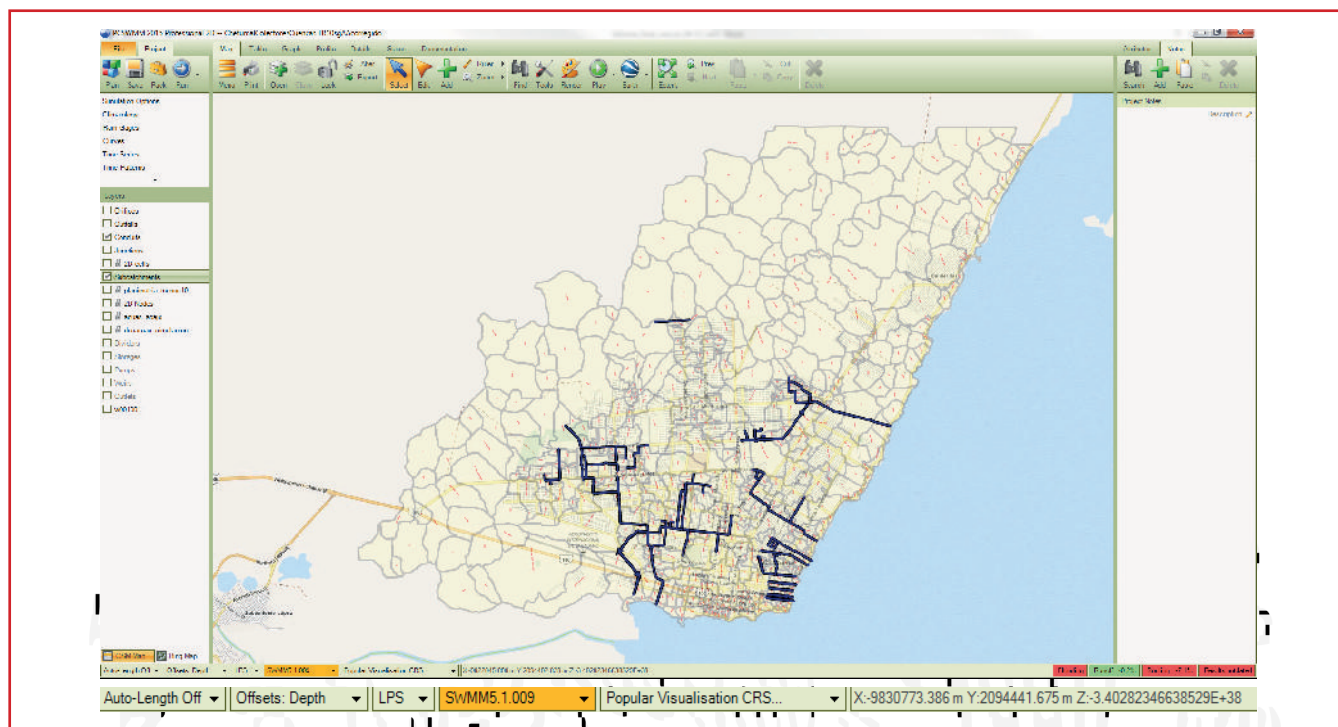


Ilustración 8.34 Pozo de visita y colectores pluviales en la plataforma de PCSWMM 2D



Para iniciar el proyecto se establecen los parámetros de cálculo: a) el análisis de los escurrimientos estará en unidades de l/s, no se activará el cálculo de la longitud automática de las tuberías y el análisis del tirante iniciará a partir de la profundidad inicial, ver Ilustración 8.35.

Ilustración 8.35 Parámetros del cálculo del programa 2D



Las opciones seleccionadas para la simulación serán: como método de infiltración el método de Horton, el método de cálculo hidráulico se realizará por medio de la onda cinemática, esta opción contribuirá a conocer el comportamiento del fluido con remansos.

El tiempo de análisis de la simulación se establece en una duración que dependerá el tiempo de lluvia introducido al programa.

Para el proceso de integración del modelo bidimensional, se comenzará por incorporar la lluvia, por ejemplo para un periodo de retorno determinado y utilizando una distribución predeterminada del programa la distribución sería como en la Ilustración 8.36.

Los datos que se introducirán son: la precipitación total (mm), la distribución de la lluvia (con un intervalo de 5 min para lluvia tipo y 10 minutos de los datos obtenidos por las EMAS), ver Ilustración 8.37.

Ilustración 8.36 Distribución de la lluvia con el método SUCS.

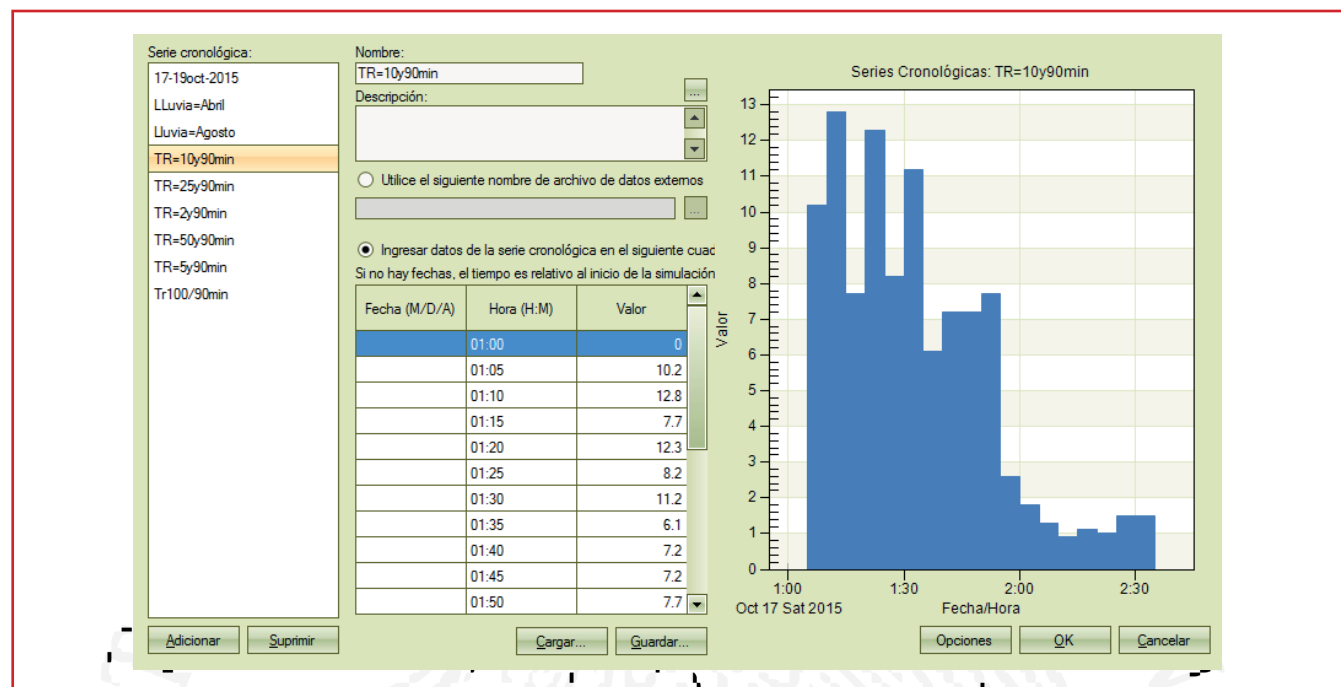
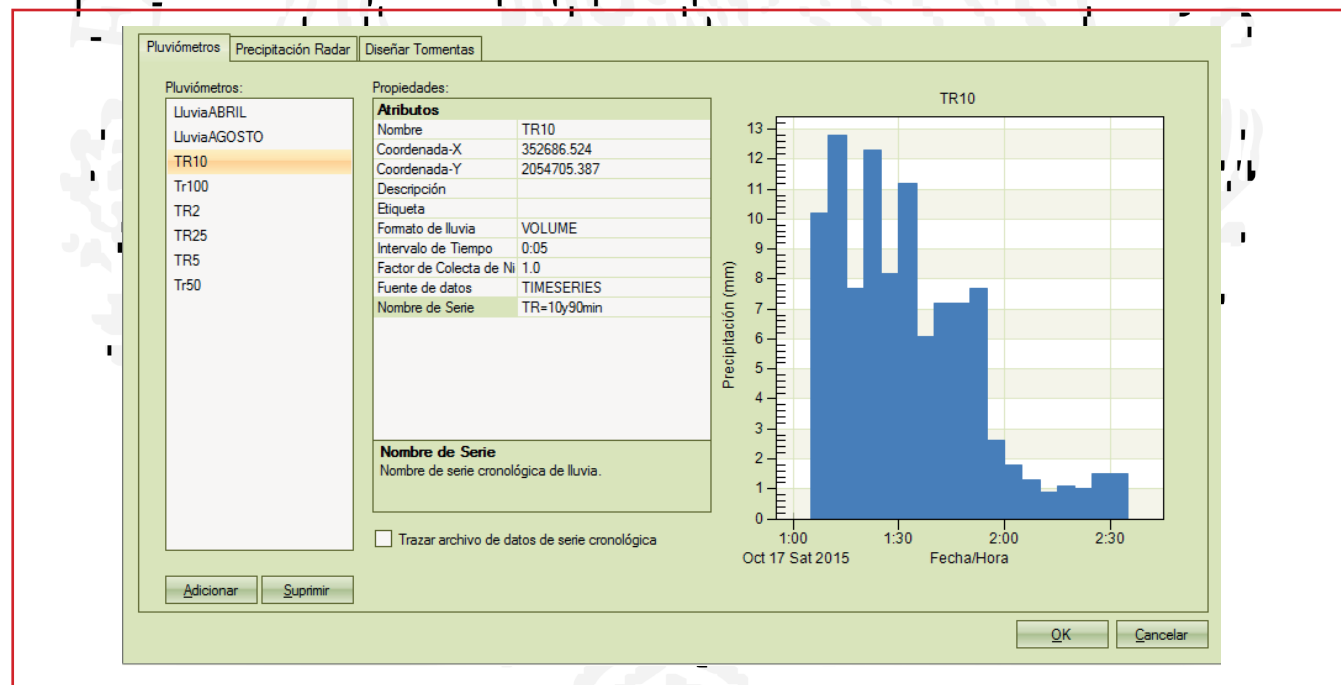
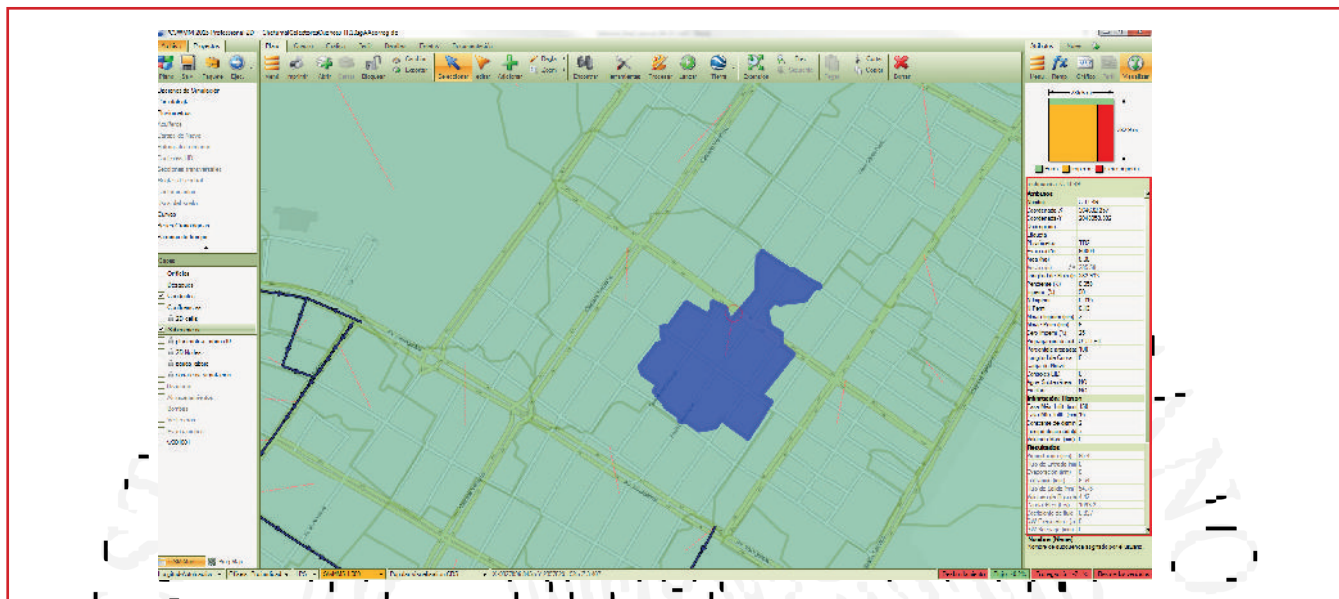


Ilustración 8.37 Cuadro de datos principales del histograma de precipitación



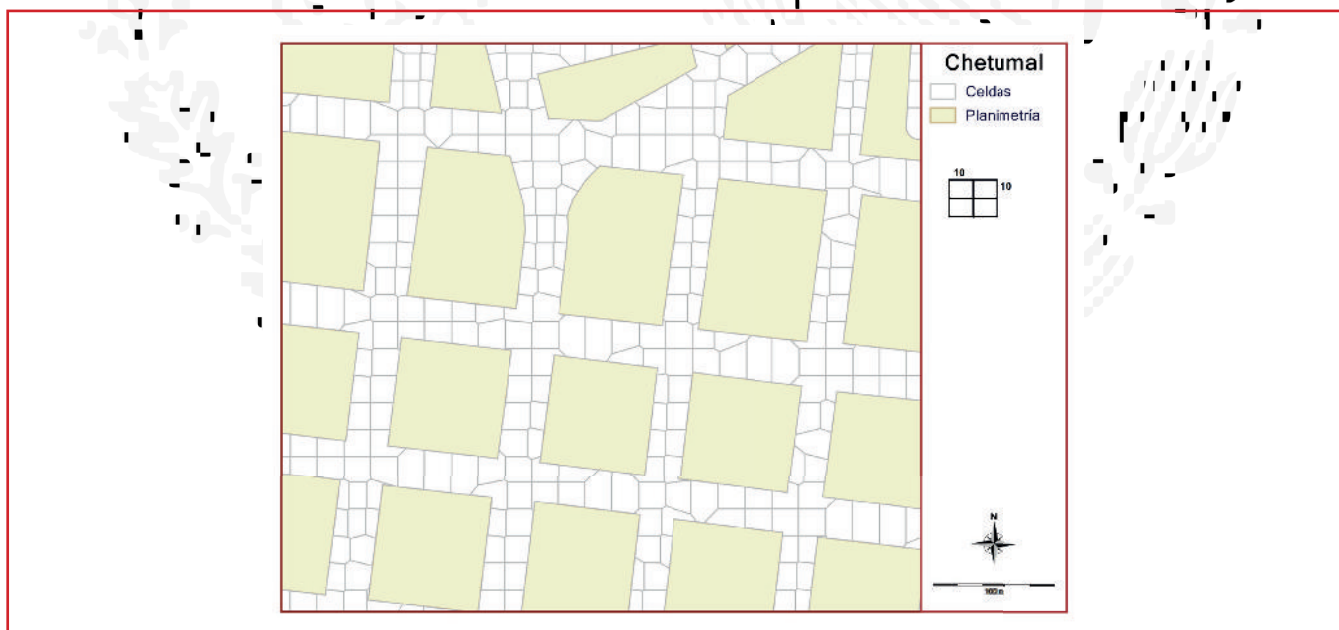
Para las subcuencas y microcuencas, el programa requiere de los parámetros geomorfológicos (área, pendiente de la cuenca, porcentaje impermeable, coeficientes de rugosidad y de almacenamiento), por lo que por medio de la base de datos generada en arcgis, el programa puede obtener los valores requeridos, ver Ilustración 8.38.

Ilustración 8.38 Parámetros geomorfológicos de la cuenca



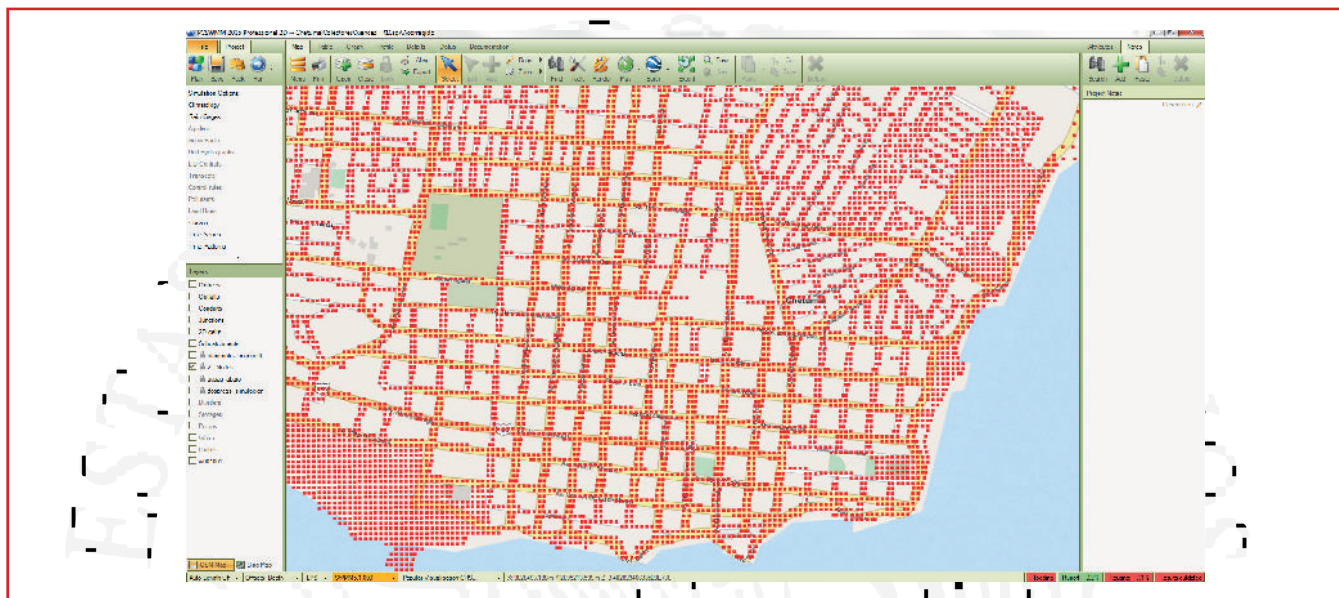
Para la malla de análisis del escurrimiento, se generó con retícula cuadrangular de 20 x 20 m, con la cual se realizaron los cálculos para conocer los sentidos del flujo, ver Ilustración 8.39.

Ilustración 8.39 Dimesnionamiento de la malla de cálculo.



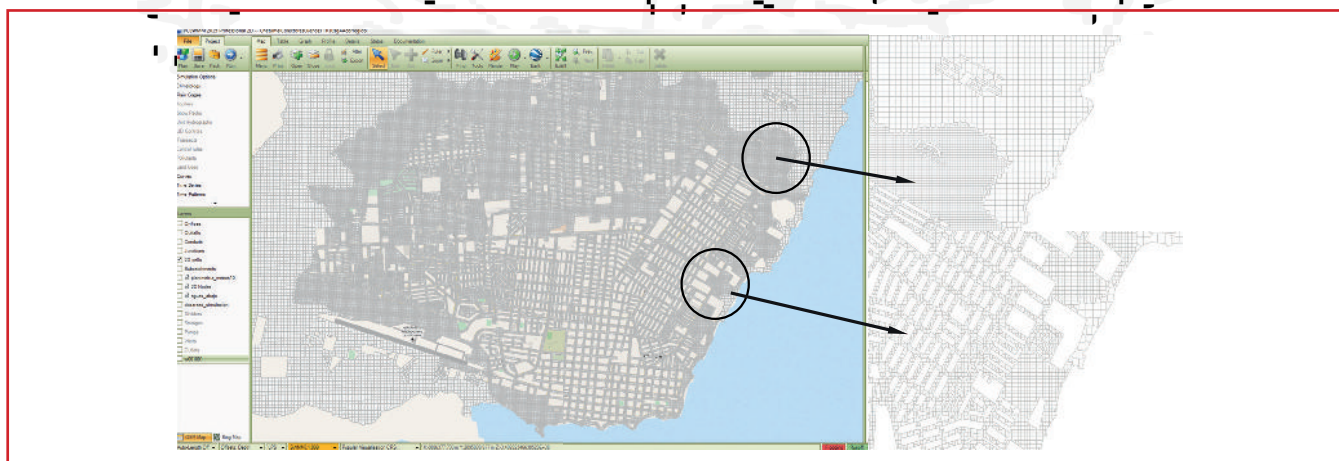
Parte de los procesos realizados es la obtención de los nodos para la generación de la malla de cálculo, se decidió utilizar una malla de cálculo irregular que no ayudara a reducir los tiempo de procesamiento en lugares donde no se requieran un detalle específico (fuera del área del estudio), se tomaron en cuenta las obstrucciones (manzanas), para la zona urbana se ubicaron nodos a una distancia de 15 metros, en las lagunas se colocaron nodos a 50 y 100 metros de distancia. El resultado de los nodos obtenidos se presenta en la Ilustración 8.40:

Ilustración 8.40 Nodos de cálculo del programa 2D



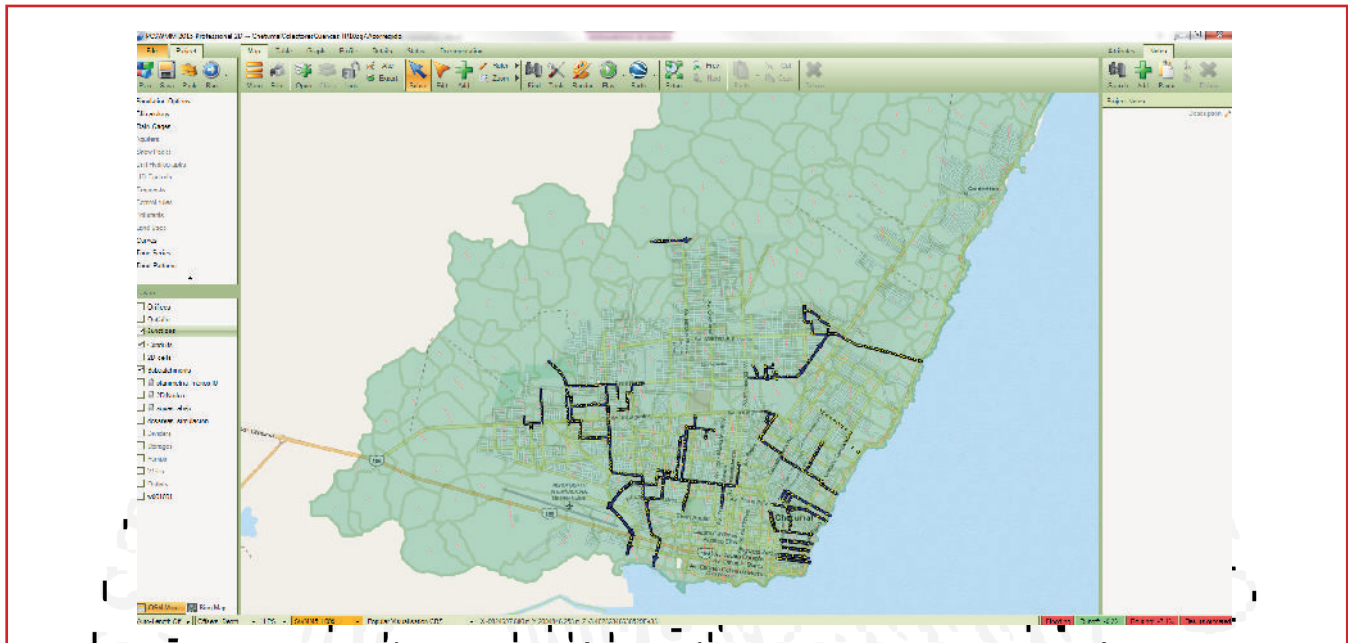
El proceso continúa con la generación de la malla de cálculo, con las diferentes distancias de los nodos se construyó una malla irregular, que en la zona urbana contara con celdas rectangulares y en la zona de las lagunas forma hexagonal, con esto se considera una mayor resolución en la parte de las colonias de estudio, ver Ilustración 8.41.

Ilustración 8.41 Formas de la celda utilizadas en el modelo matemático



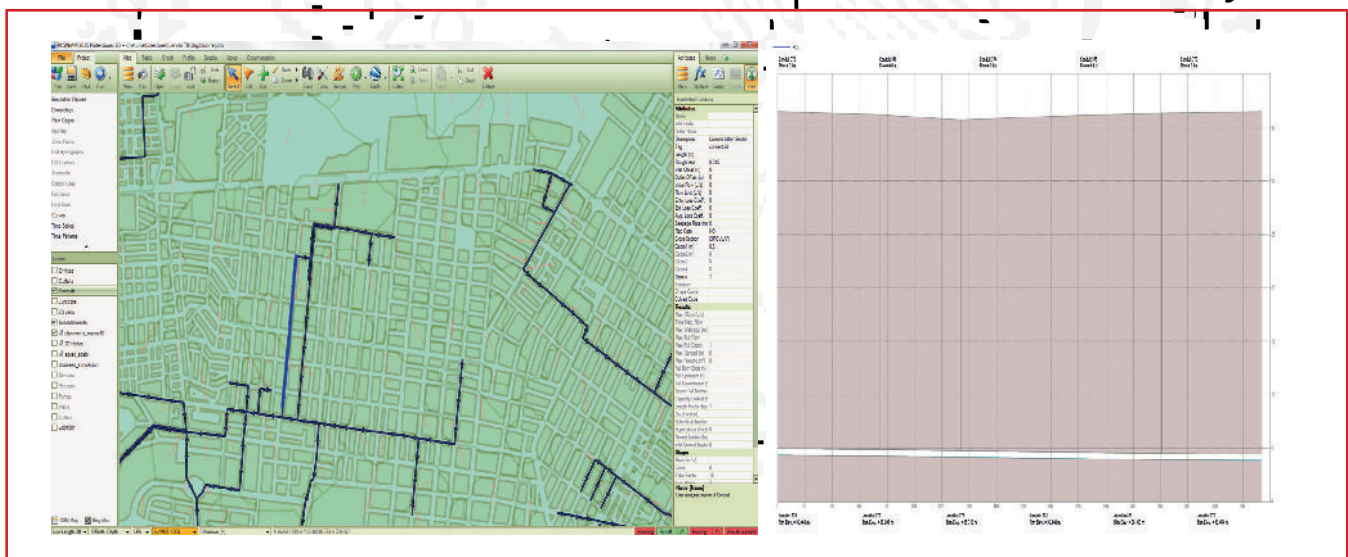
La Ilustración 8.42 presenta la interfaz del programa PCSWMM, en donde se tiene de color azul los conductos, como puntos los cruces de las calles y de color verde las subcuencas y microcuencas de aportación.

Ilustración 8.42 Interfaz del programa PCSWMM 2D



Ademas, se considero el realizar secciones de control, para conocer el comportamiento del flujo en diferentes intervalos de tiempo (ver Ilustración 8.43).

Ilustración 8.43 Sección transversal de una calle



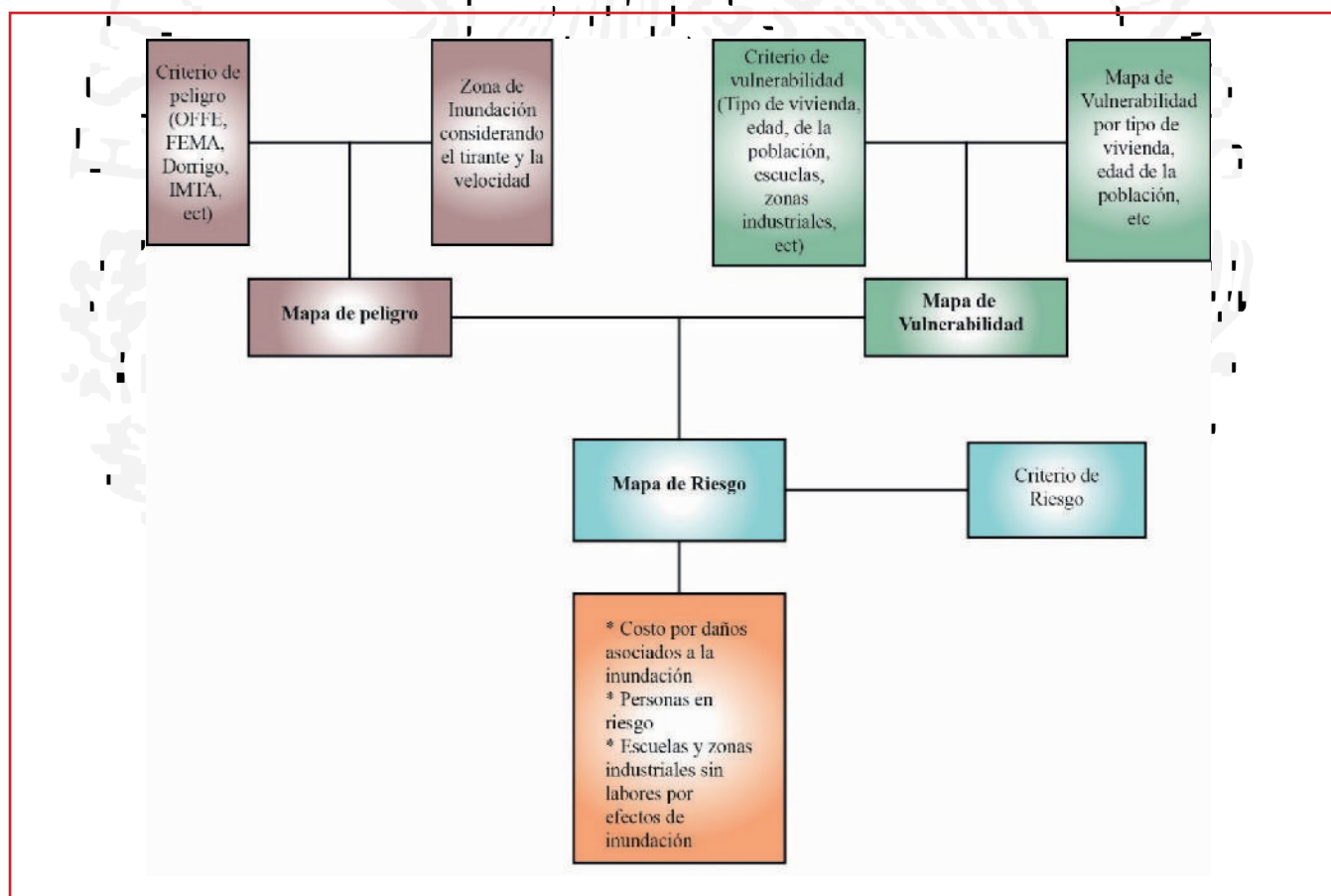
8.5. MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA ZONA URBANA DE CHETUMAL

Los mapas de riesgo se definen de acuerdo con lo descrito por Rodríguez et al (2015), donde en la Ilustración 8.44 primero se determinan los mapas de peligro a partir de un criterio definido y con base en el análisis hidráulico realizado con el modelo en dos dimensiones, en el que se calculan los tirantes y velocidades a lo largo de la ciudad, esto para las lluvias con diferentes periodos de retorno.

Asimismo se obtienen los mapas de vulnerabilidad, de acuerdo a un criterio definido, éste puede calcularse con base en el tipo de vivienda, edad de las personas, zonas escolares, zonas industriales, etc.

La unión del mapa de peligro y el mapa de vulnerabilidad y con base en un criterio de riesgo permite calcular los mapas de riesgo, de los cuales se obtienen los costos por daños generados por la inundación para diferentes periodos de retorno.

Ilustración 8.44 Metodología para definir los mapas de riesgo (Rodríguez et al, 2015)



8.5.1. METODOLOGÍA PARA LOS MAPAS DE VULNERABILIDAD Y SU APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE CHETUMAL

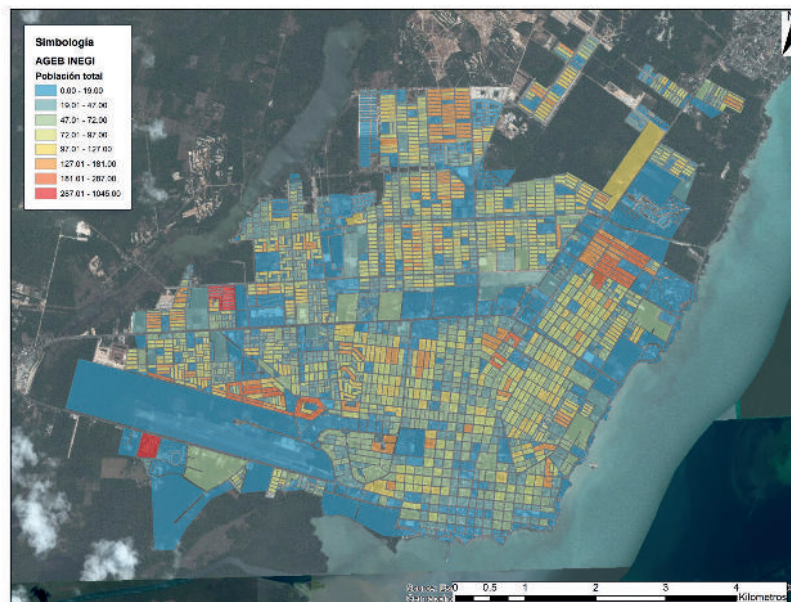
La metodología propuesta por Rodríguez et al (2015), toma como referencia información que previamente ya ha sido levantada en campo por el INEGI y que es de utilidad para la generación de los mapas de vulnerabilidad a un costo mínimo.

Para obtener los mapas de vulnerabilidad se considera la información contenida en las Áreas Geoestadística Básica (AGEB) que genera el INEGI, la información está contenida en archivos shape file y en éstos se puede encontrar información referente al nivel socioeconómico de la población, población económicamente activa, tipo de vivienda y número de habitantes, entre otros. En total el AGEB contiene 190 variables analizadas por manzana, pero varía dependiendo de lugar en el cual se llevó a cabo el censo.

8.5.1.1. Población afectada

Con los datos del AGEB, también es posible conocer la población afectada por manzana, en la Ilustración 8.45, se presenta en tonos rojos las manzanas que tienen una mayor población por manzanas (hasta 1 045 habitantes), caso contrario en color azul se tiene las manzanas con unas menores residentes (teniendo casos menores a 10 habitantes).

Ilustración 8.45 Población por manzanas de la ciudad de Chetumal por el AGEB



8.5.1.2. Rangos de vulnerabilidad y tipos de daños

De acuerdo a una recopilación histórica de eventos extremos realizada por CENAPRED – SEGOB, en la cual trataron de estimar la vulnerabilidad de cada municipio que componen el país, en la cual se tomó en cuenta la ocurrencia de decesos y monto en daños generados por algún evento hidrometeorológico, se elaboró la clasificación de la vulnerabilidad (ver Tabla 8.4) en donde se establecen tres rangos:

Vulnerabilidad Alta, en el que se presentan decesos, daños extraordinarios a las edificaciones y en el cual se ubicaron asentamientos irregulares dentro de los cauces de ríos y arroyos, así como en planicies de inundación o comunidades localizadas aguas abajo de obras hidráulicas como presas o bordos.

Vulnerabilidad Media, no se presentan decesos y los daños a la infraestructura de la ciudad son moderados.

Vulnerabilidad Baja, no se presentan asentamientos irregulares y el sistema de drenaje es eficiente

Tabla 8.4 Clasificación de la vulnerabilidad (CENAPRED – SEGOB, 2013)

Vulnerabilidad	Efectos
Alta	Decesos
	Daños Extraordinarios
	Asentamientos irregulares en cauces, planicies de inundación o agua abajo de presas o bordos
Media	Sin Decesos
	Daño moderado
Baja	No hay asentamientos irregulares
	Sistema de drenaje eficiente
	Daños mínimos

8.5.1.3. Mapas de vulnerabilidad de la población

De acuerdo con Rodríguez et al (2015), de la información contenida en el AGEB se seleccionan las variables que involucran a la población más vulnerable, para esto se eligen la población mayor a 60 años y la población menor a cinco años. Ya que en caso de tener una emergencia de tipo hidrometeorológica son los más vulnerables. Con esta información se calcula el Índice de población vulnerable por manzana con la ecuación siguiente.

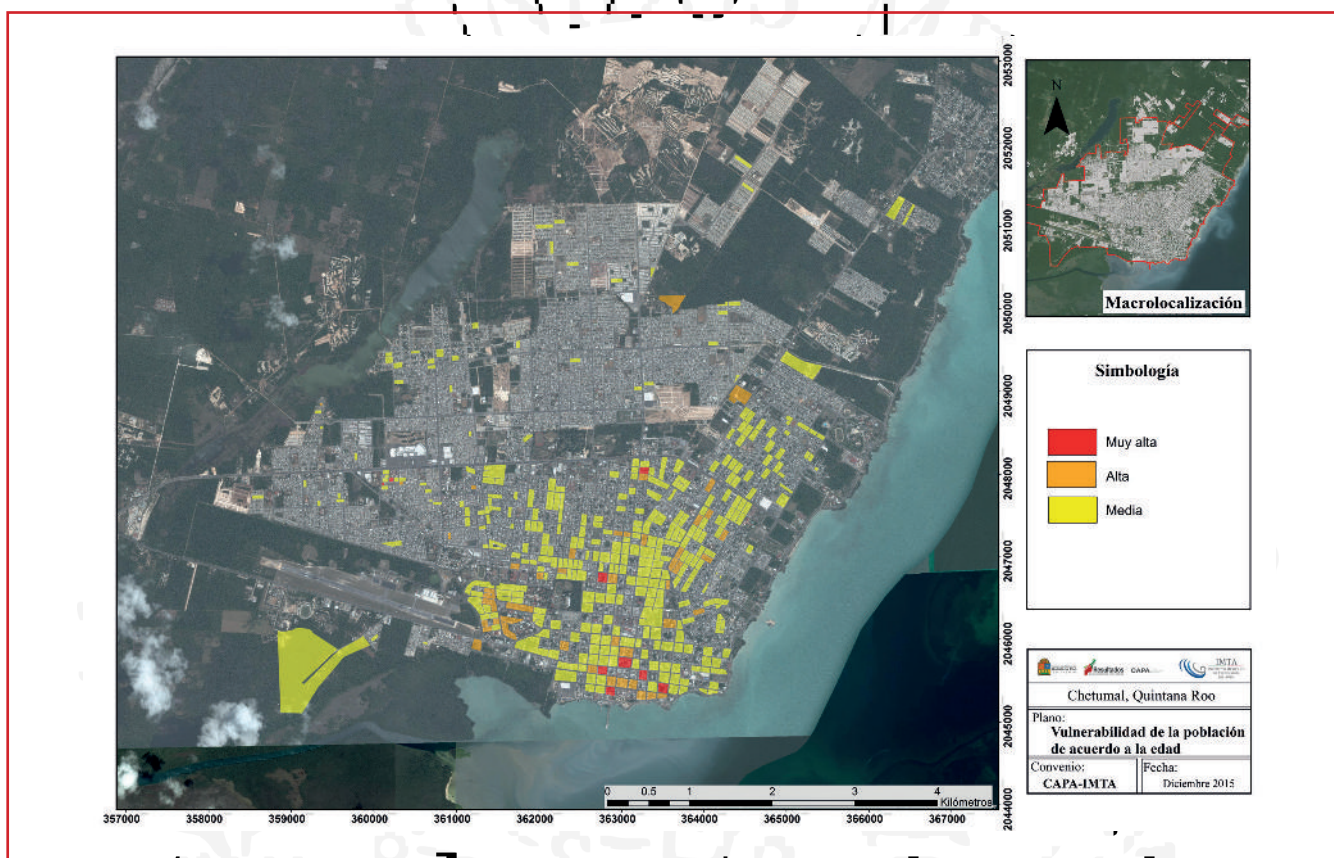
$$\text{Índice población vulnerable} = \frac{(\text{Población} > a 60 \text{ años} + \text{población} < a 5 \text{ años})}{(\text{Población Total})} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

En la Tabla 8.5, se muestra el rango de vulnerabilidad de la población de acuerdo a la edad calculado con el índice de población vulnerable. En la Ilustración 8.46, se muestran las manzanas más vulnerables de acuerdo a la edad de la población.

Tabla 8.5 Rango de Vulnerabilidad de la Población de acuerdo la edad (Rodríguez et. al, 2015)

Vulnerabilidad	Índice de Población
Muy Alta	> 0.40
Alta	0.31-0.40
Media	0.21-0.30
Baja	0.01-0.20
Muy baja	0.0-0.01

Ilustración 8.46 Vulnerabilidad de la población por manzana de acuerdo a la edad



8.5.1.4. Mapa de vulnerabilidad considerando las viviendas con piso de tierra

En la parte de la vulnerabilidad de la infraestructura se determinó con base en un estudio de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2013) que permite estimar las viviendas en pobreza. La SEDESOL especifica el Índice de Vivienda vulnerable en el cual se consideran las viviendas con piso de tierra o viviendas sin electricidad. El índice se calcula por manzana de acuerdo a la ecuación siguiente.

$$\text{Índice de vivienda vulnerable} = \frac{\text{Vivienda con piso de tierra}}{\text{Viviendas totales}}$$

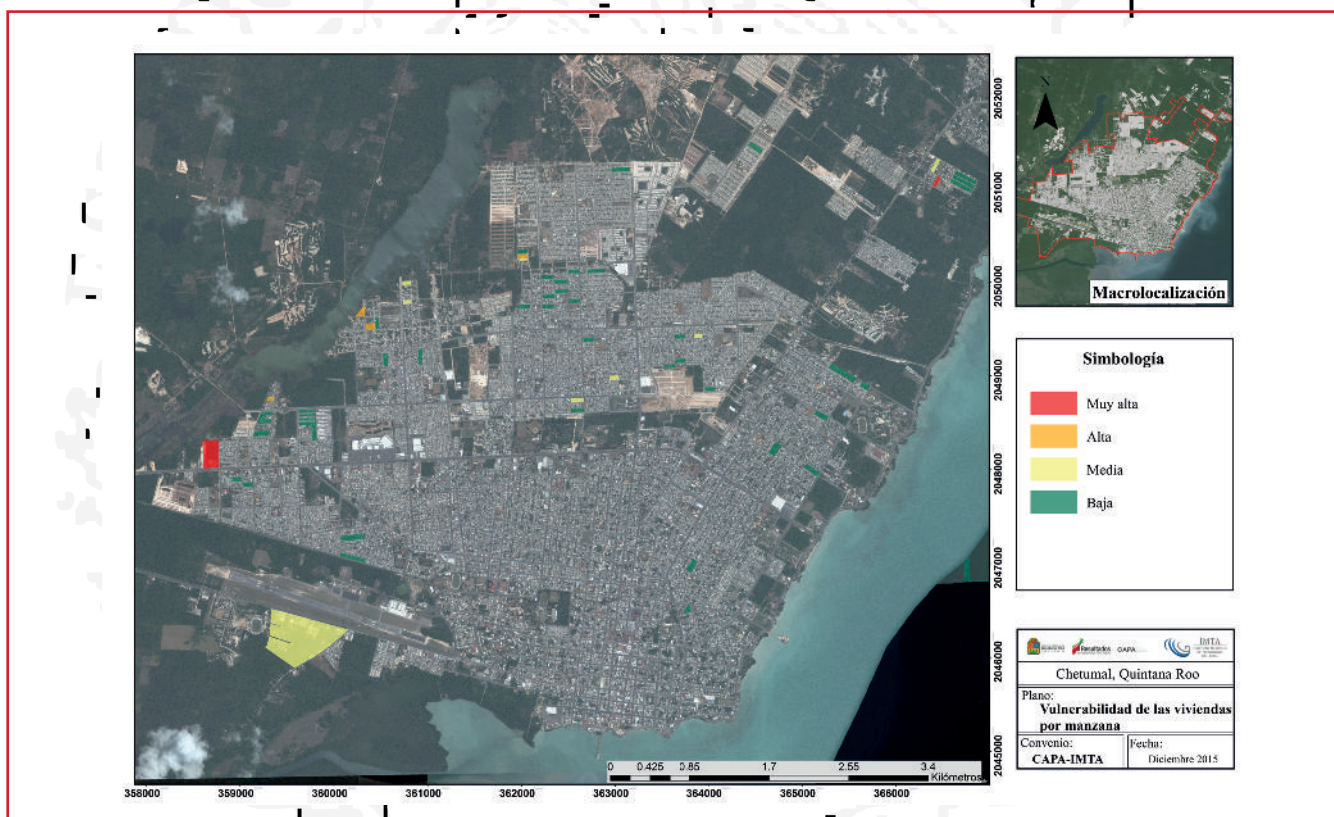
Ecuación 8.3

En la Tabla 8.6, se muestran los rangos de vulnerabilidad de las viviendas considerados para la generación del mapa de vulnerabilidad mostrado en la Ilustración 8.47, las zonas más desprotegidas se ubican en la parte norte de la ciudad y en la zona sur este de la misma.

Tabla 8.6 Rango de Vulnerabilidad de las viviendas (Rodríguez, 2015)

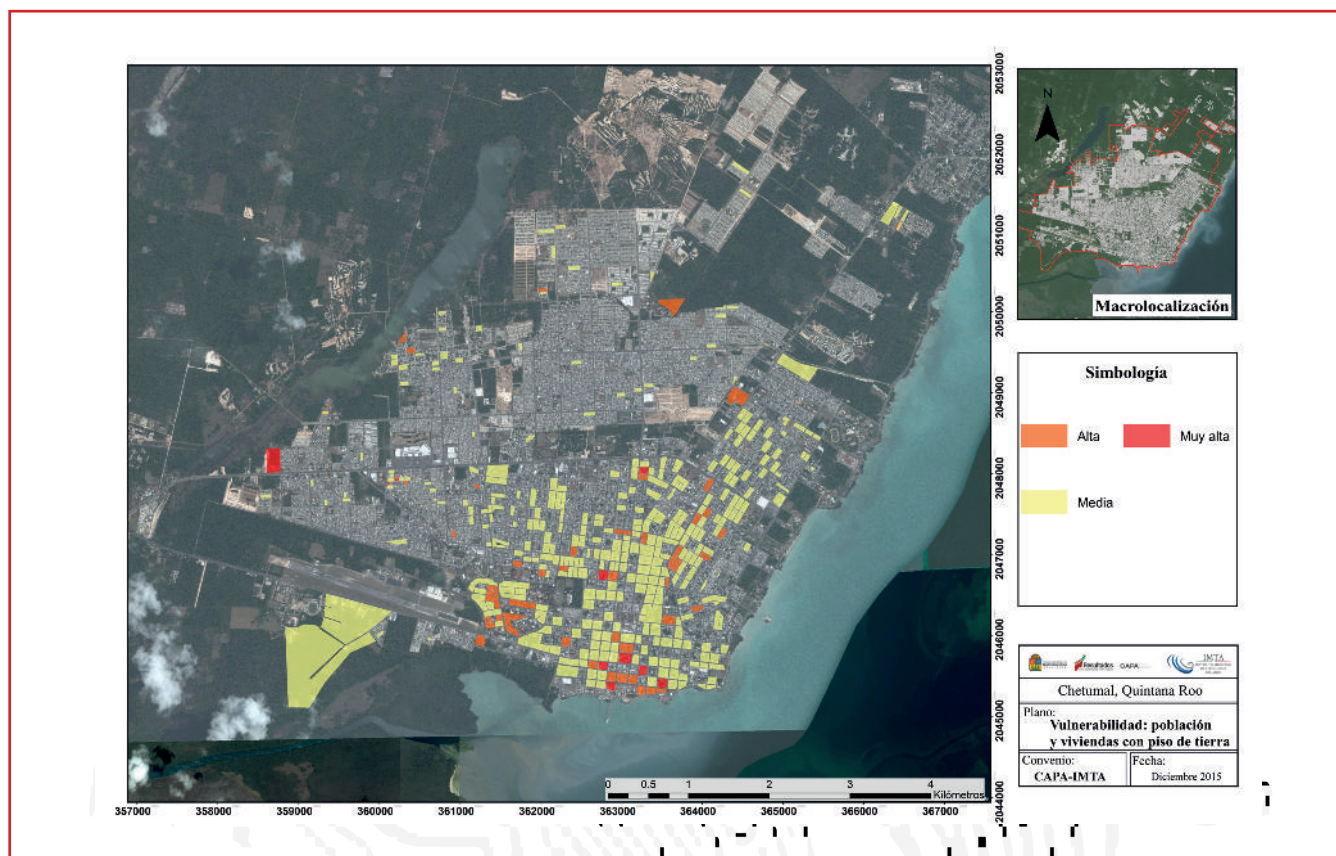
Vulnerabilidad	Índice de viviendas con piso de tierra
Muy Alta	> 0.40
Alta	0.31-0.40
Media	0.21-0.30
Baja	0.01-0.20
Muy baja	0.0-0.01

Ilustración 8.47 Vulnerabilidad de las viviendas por manzana



Para obtener el mapa de vulnerabilidad de la ciudad se considera la unión entre el mapa de vulnerabilidad de la población más el mapa de vulnerabilidad de las viviendas (ver Ilustración 8.48), en este se considera la población, así como las viviendas vulnerables.

Ilustración 8.48 Mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Chetumal, considerando la población y las viviendas con piso de tierra



8.5.1.5. Mapa de vulnerabilidad por tipo de vivienda

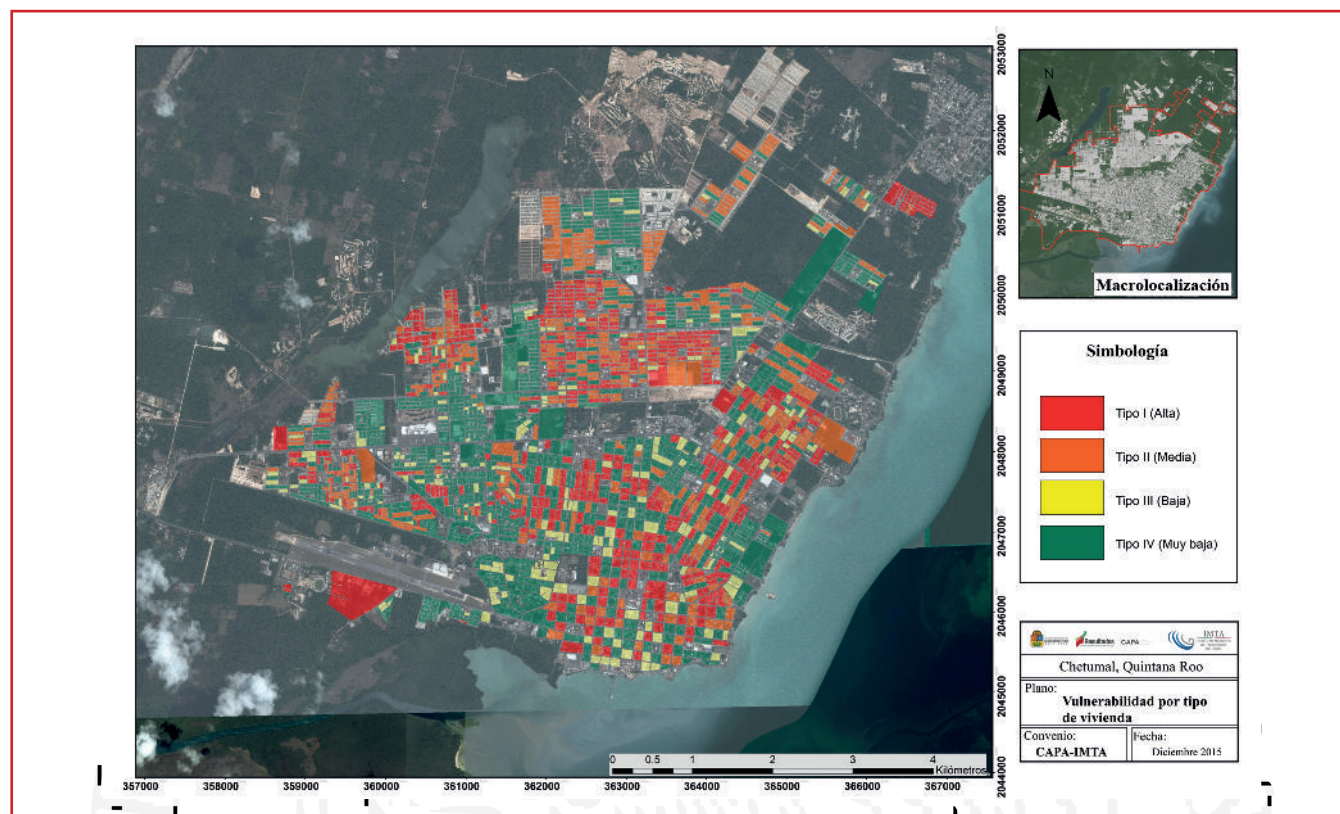
La metodología propuesta por Rodríguez et al (2015), utiliza los datos por manzana, el número de viviendas particulares habitadas con un solo cuarto, viviendas particulares habitadas con dos cuartos, viviendas particulares habitadas con 3 cuartos y más, además de la población económicamente activa, con esta información se puede determinar los tipos de vivienda y por tanto el grado de vulnerabilidad de las construcciones para la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, como se indica en la Tabla 8.7 y con base en las características encontradas se genera el mapa de vulnerabilidad de la ciudad, ver Ilustración 8.49

Tabla 8.7 Vulnerabilidad por tipo de vivienda obtenida del análisis de información contenida en la AGEB (IMTA, 2015)

Tabla 8.7 Vulnerabilidad por tipo de vivienda obtenida del análisis de información contenida en la AGEB (IMTA, 2015)

Construcción de viviendas en la manzana	Color	Descripción	Vulnerabilidad	Costo del menaje
Tipo I	Rojo	Para este rubro se consideró como indicador la relación entre el número de viviendas particulares habitadas con un solo cuarto entre el total de viviendas, si la relación por manzana es mayor a 0.20 entonces las construcciones de la manzana se considera que es del Tipo I	Alta	\$12,500.00
Tipo II	Naranja	Para este tipo se consideró la relación de viviendas particulares habitadas con dos cuartos entre el Total de viviendas, si la relación es mayor a 0.20 y no está en el Tipo I se considera que las construcciones de viviendas en la manzana son del Tipo II.	Media	\$ 50,000.00
Tipo III	Amarillo	En este caso se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas si el valor es mayor a 0.5 se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser menor a 0.4, se deberán descartar las manzanas que caen en el Tipo I y II.	Baja	Menaje para casa de dos pisos \$ 150,500.00 Para el daño en menaje se considera la mitad de este costo, ya que las casas se consideran de dos pisos
Tipo IV	Verde	Se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas si el valor es mayor a 0.5 se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser mayor 0.4, se deberán descartar las manzanas que están en los tipos anteriores.	Muy Baja	Menaje para casa de dos pisos \$ 300,000.00 Para el daño se considera la mitad de este costo ya que las casas se consideran de dos pisos

Ilustración 8.49 Mapa de vulnerabilidad por tipo de vivienda



8.5.1.6. Mapas de Peligro

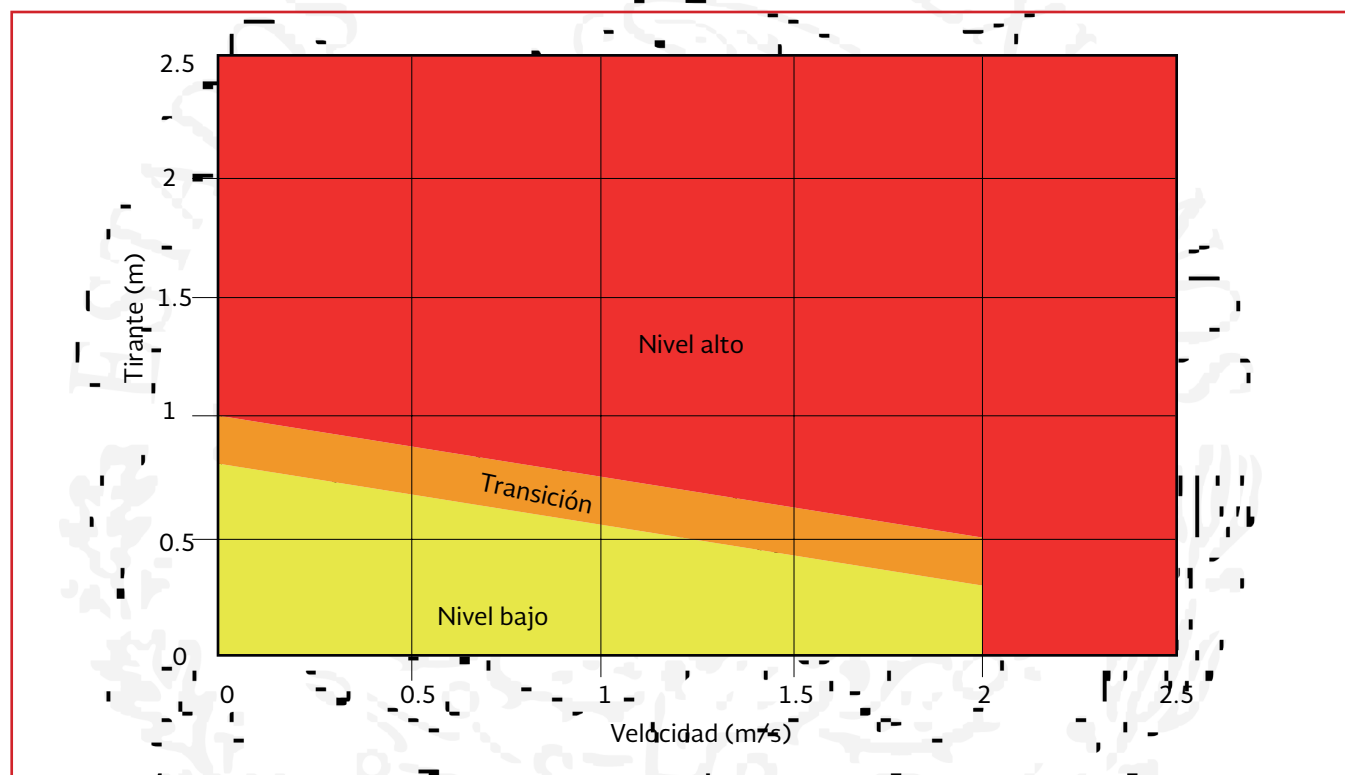
El peligro de inundación se puede definir con base en ciertos criterios, éstos pueden ser el tirante y la velocidad del agua alcanzada en las calles, ríos o arroyos. Al desbordamiento del cauce natural de los ríos se le conoce como inundación fluvial. Cuando se debe a un escurrimiento de lluvias dentro de una zona urbana y después de saturarse el suelo su agua excedente dura horas o días se le denomina inundación pluvial. Existen otros fenómenos que pueden provocar una inundación, como las mareas altas que deriva que el nivel medio del mar sea rebasado provocando inundaciones costeras, otro fenómeno que puede provocar una inundación son los tsunamis, o la falla de una obra hidráulica (CENAPRED, 2006).

El criterio utilizado para la generación de mapas de peligro es el denominado Dórrigo, debido a que de una evaluación realizada por Rodríguez et al (2015), determina que este método genera un valor máximo en los factores de peligro medio y alto, esto corresponder a tener una mayor prevención en la vulnerabilidad de la población y sus bienes.

8.5.1.7. Criterio de peligro del gobierno de Gales del Sur; New South Wales Government

El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia, donde se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua como el mostrado en la Figura 3, en el que se definen tres rangos de peligro (NSW, 2005). En el nivel alto se especifica que la evacuación por vehículos es difícil, además los adultos tienen dificultad para cruzar las calles con seguridad y existe un potencial daño estructural a las construcciones, en la zona de transición se menciona depende de las condiciones del lugar; y en el nivel bajo, se establece en caso necesario, que los vehículos pueden evacuar a las personas y sus posesiones, los adultos pueden tener una pequeña dificultad para cruzar las avenidas con seguridad, ver Ilustración 8.50

Ilustración 8.50 Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005)



A partir del modelo de simulación ID-2D generado y de acuerdo al criterio Dórrigo se generaron los mapas de peligro por inundación en la ciudad de Chetumal. De la Ilustración 8.51 a la Ilustración 8.56 se aprecian para las diferentes precipitaciones que corresponden a un periodo de retorno de 2, 5, 10, 15, 50 y 100 años

Ilustración 8.51 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 2 años

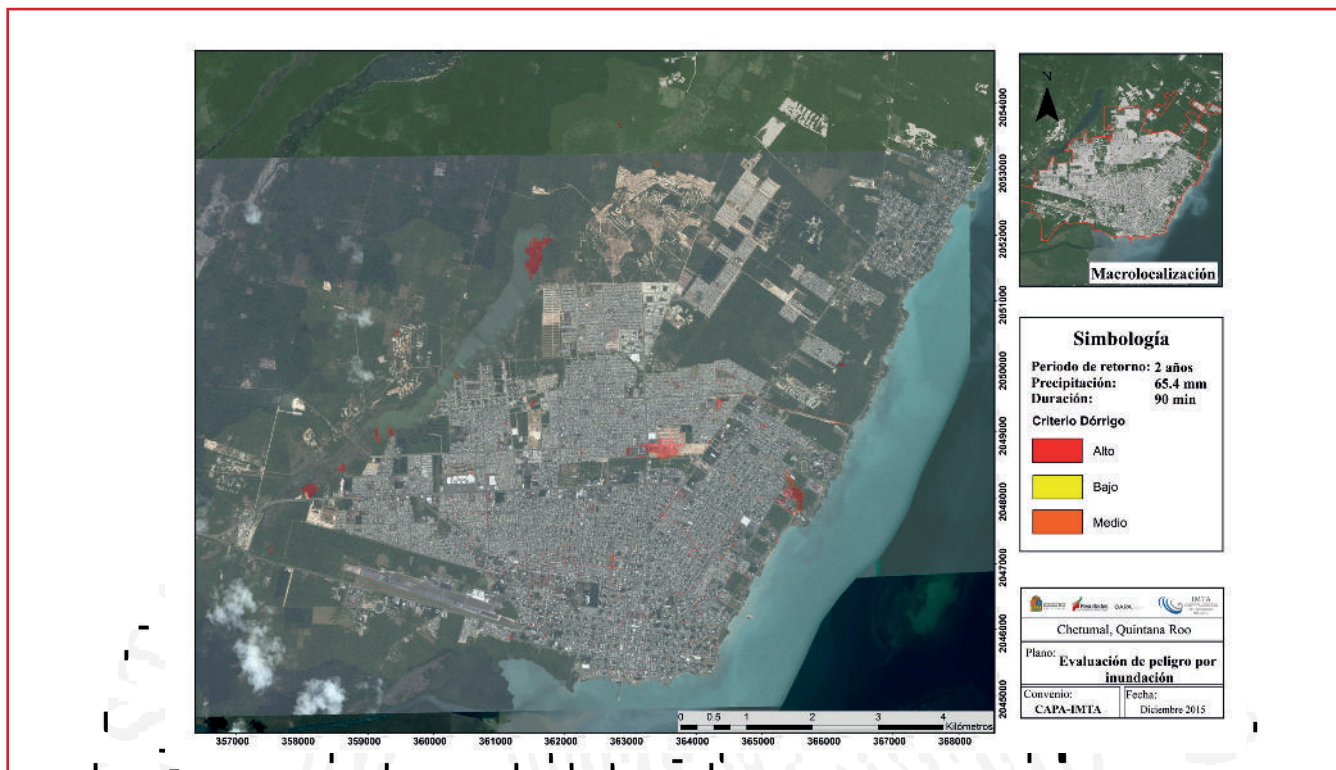


Ilustración 8.52 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 5 años

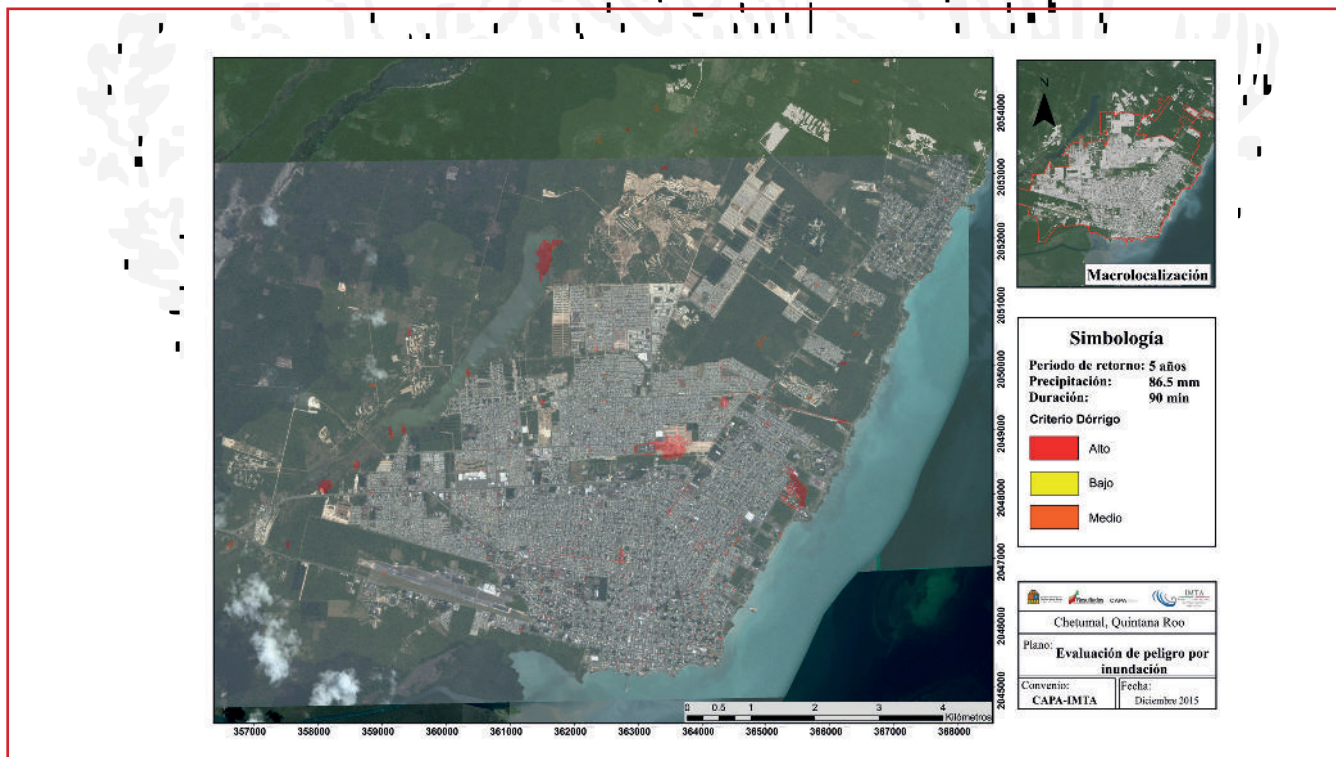


Ilustración 8.53 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 10 años

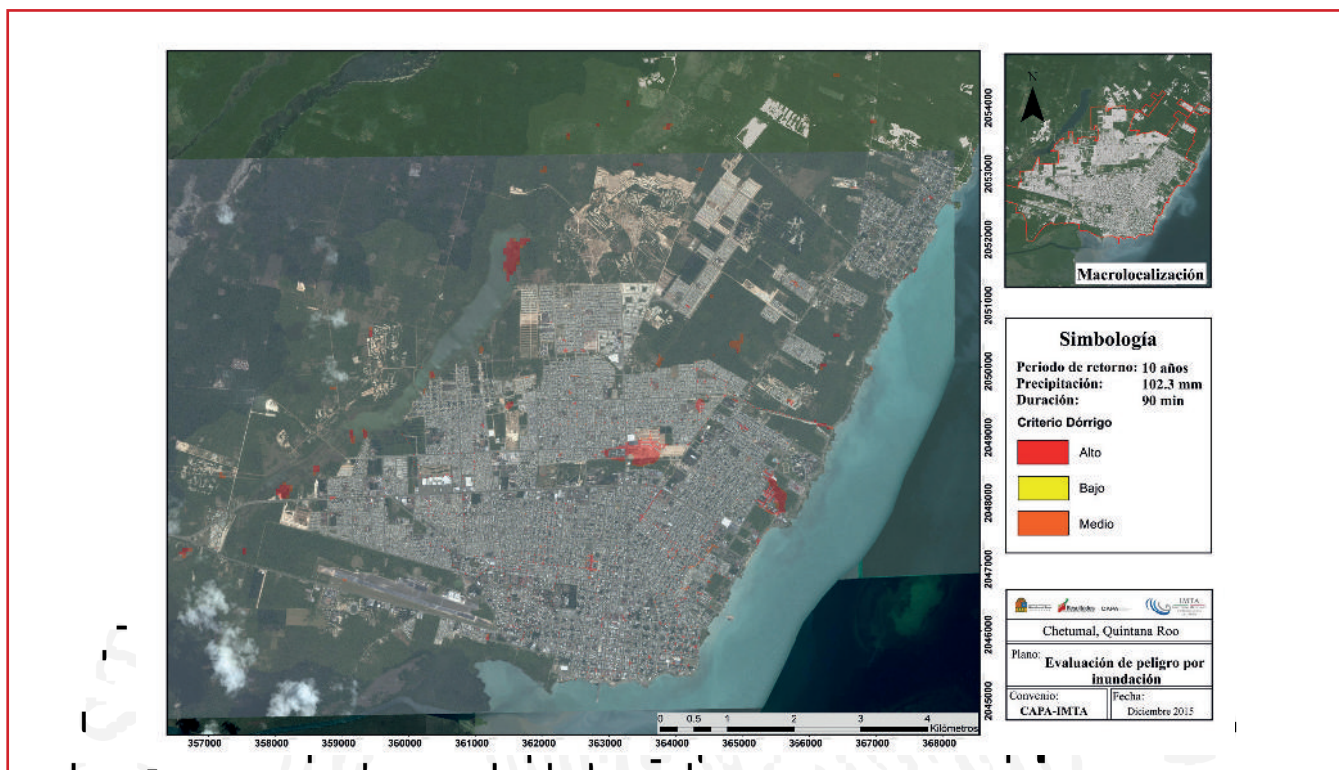


Ilustración 8.54 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 25 años

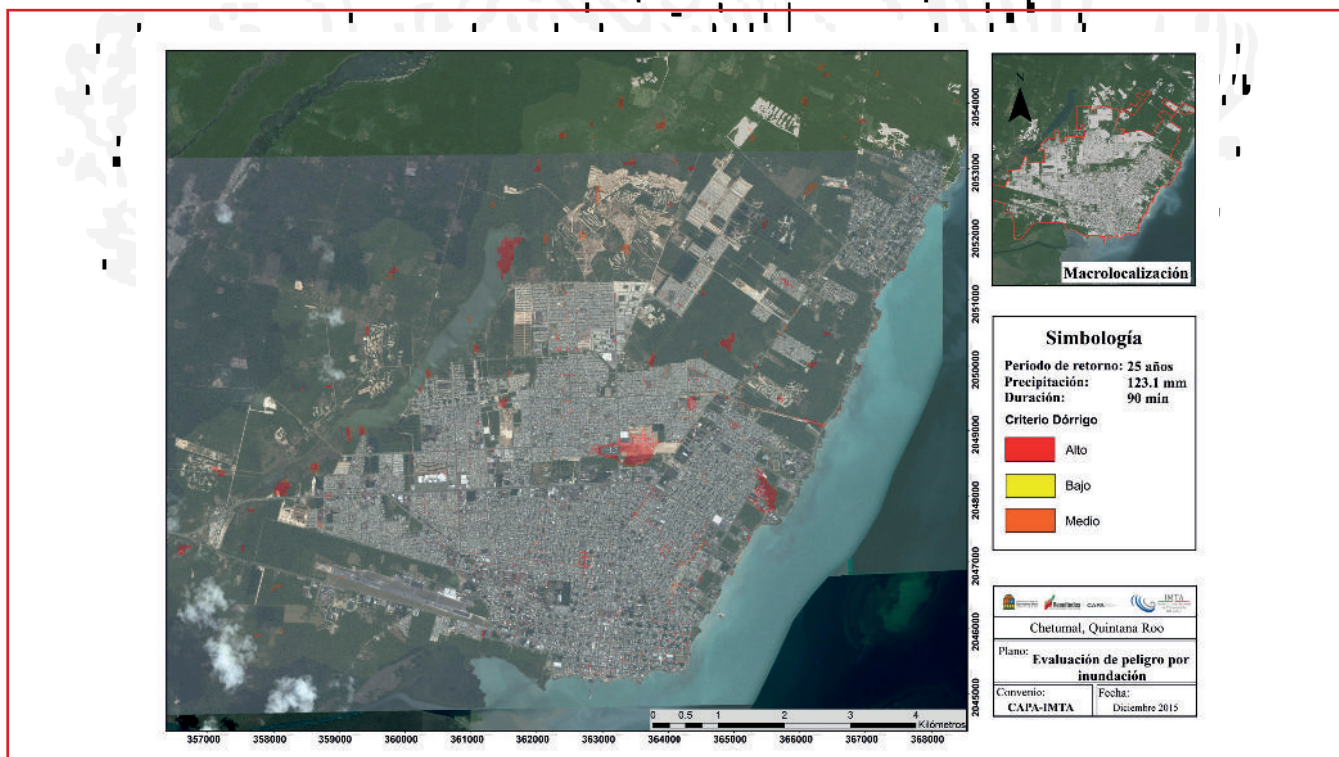


Ilustración 8.55 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 50 años

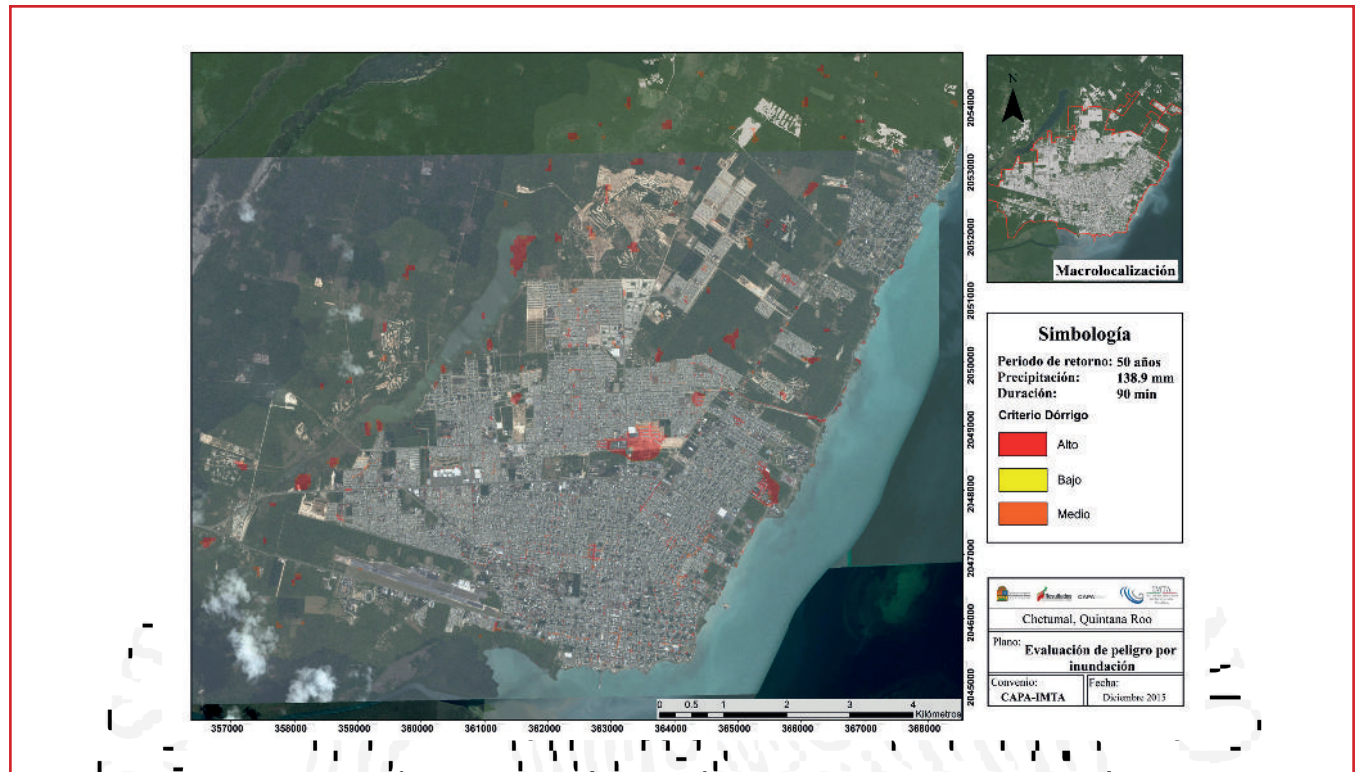
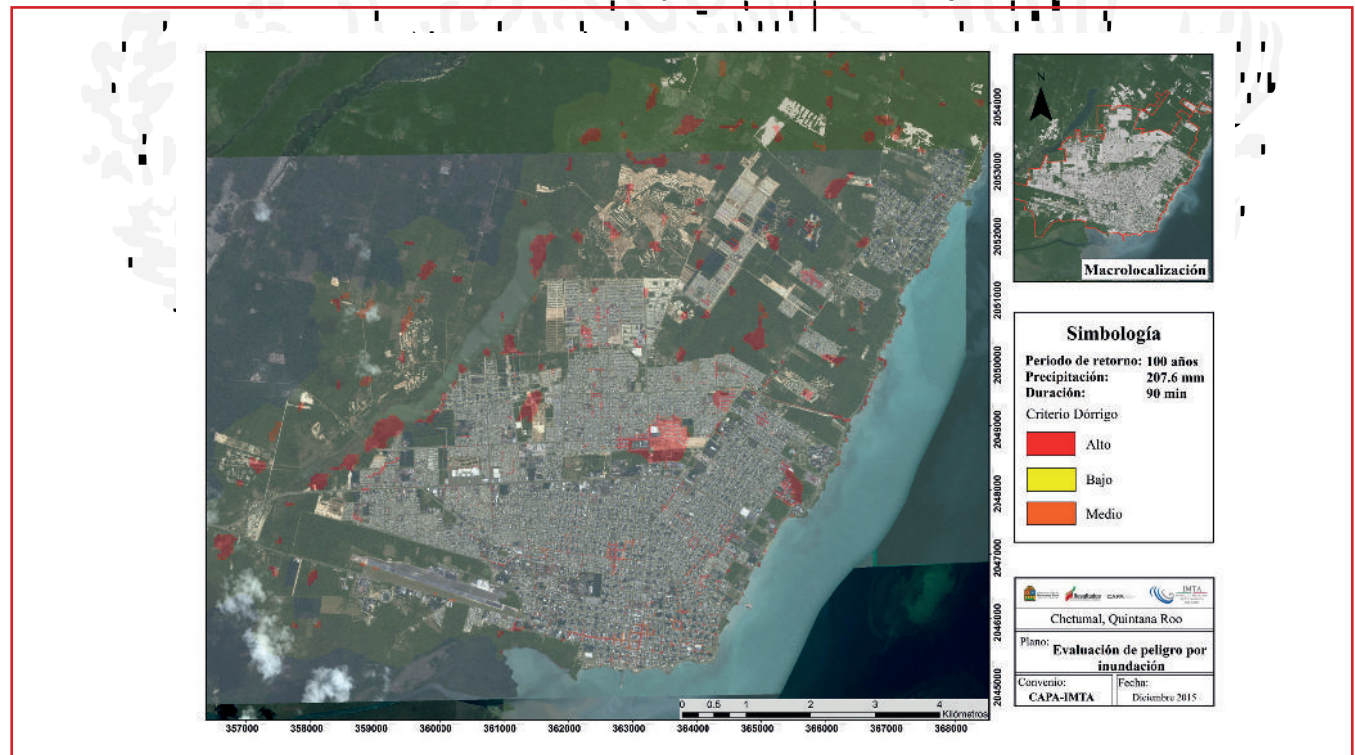


Ilustración 8.56 Evaluación de peligro para un periodo de retorno de 100 años



8.5.1.8. Generación de mapas de tirantes para diferentes periodos de retorno

De la Ilustración 8.57 a la Ilustración 8.62 se observan los tirantes mayores a 0.25 m para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En ellos se muestran las zonas más vulnerables de la ciudad de Chetumal.

Ilustración 8.57 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 2 años

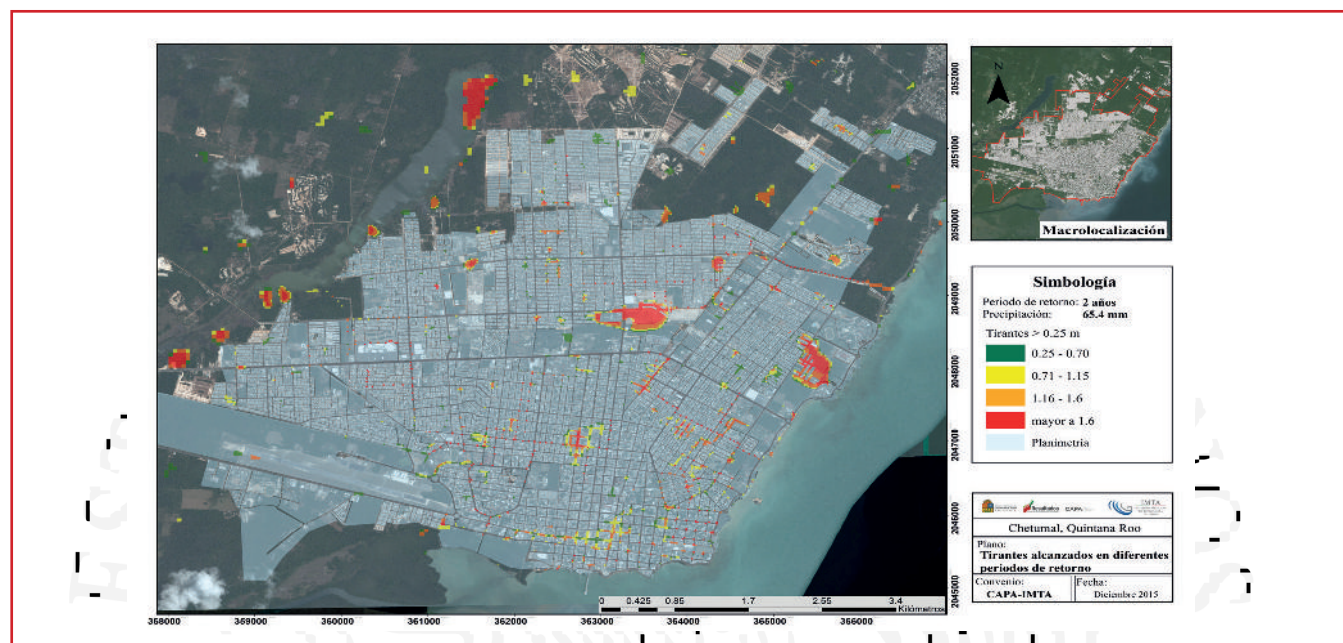


Ilustración 8.58 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 5 años

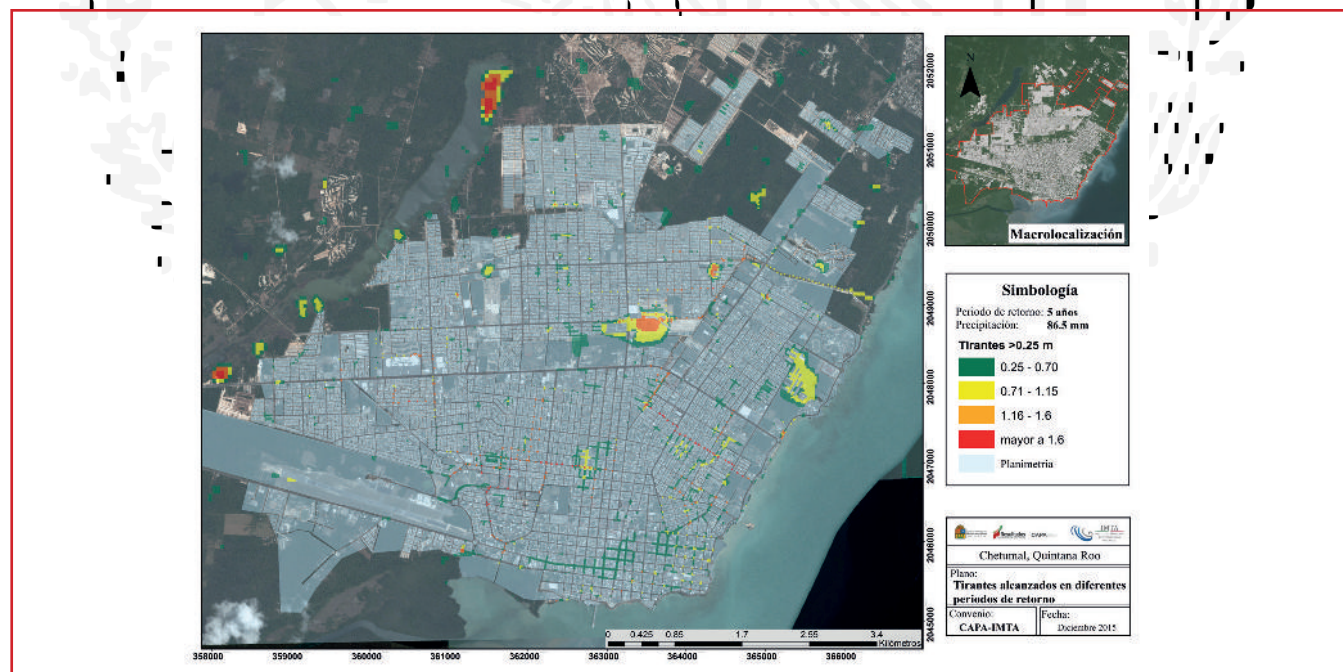


Ilustración 8.59 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 10 años

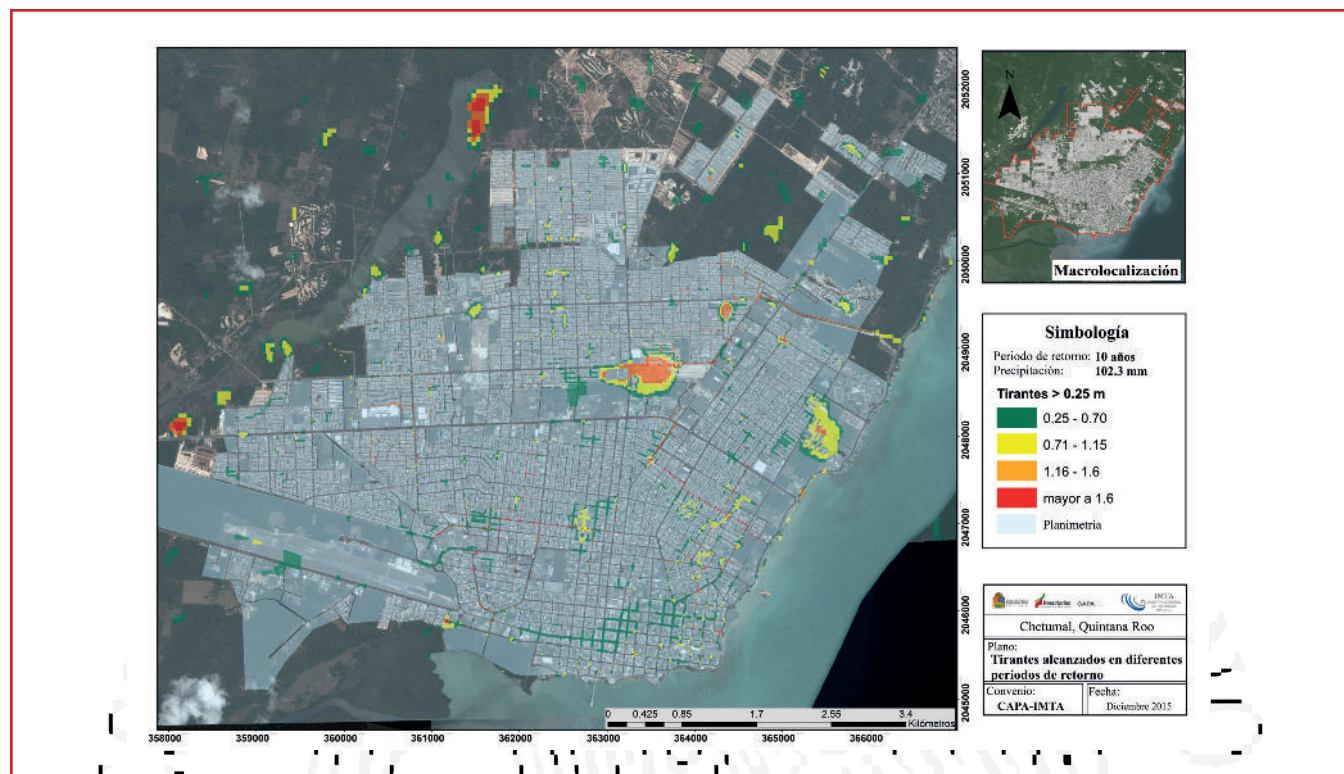


Ilustración 8.60 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 25 años

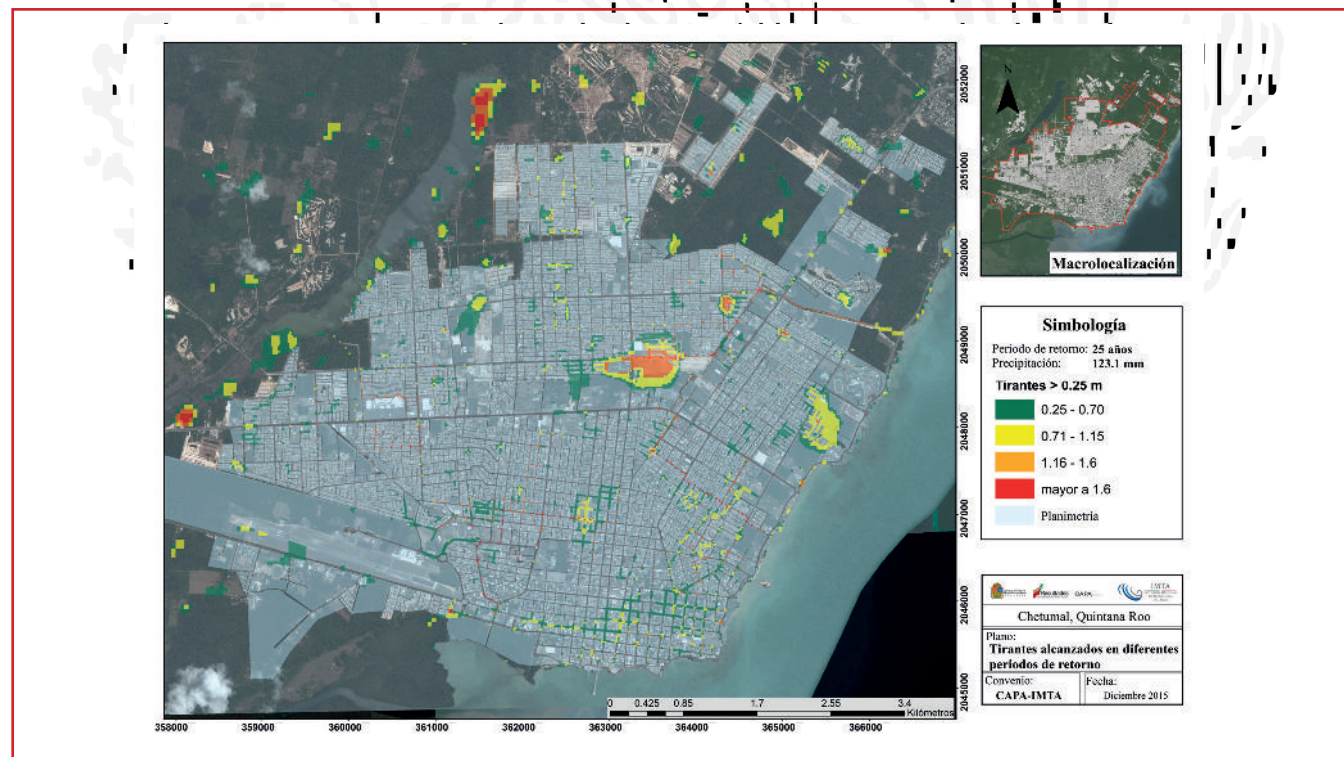


Ilustración 8.61 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 50 años

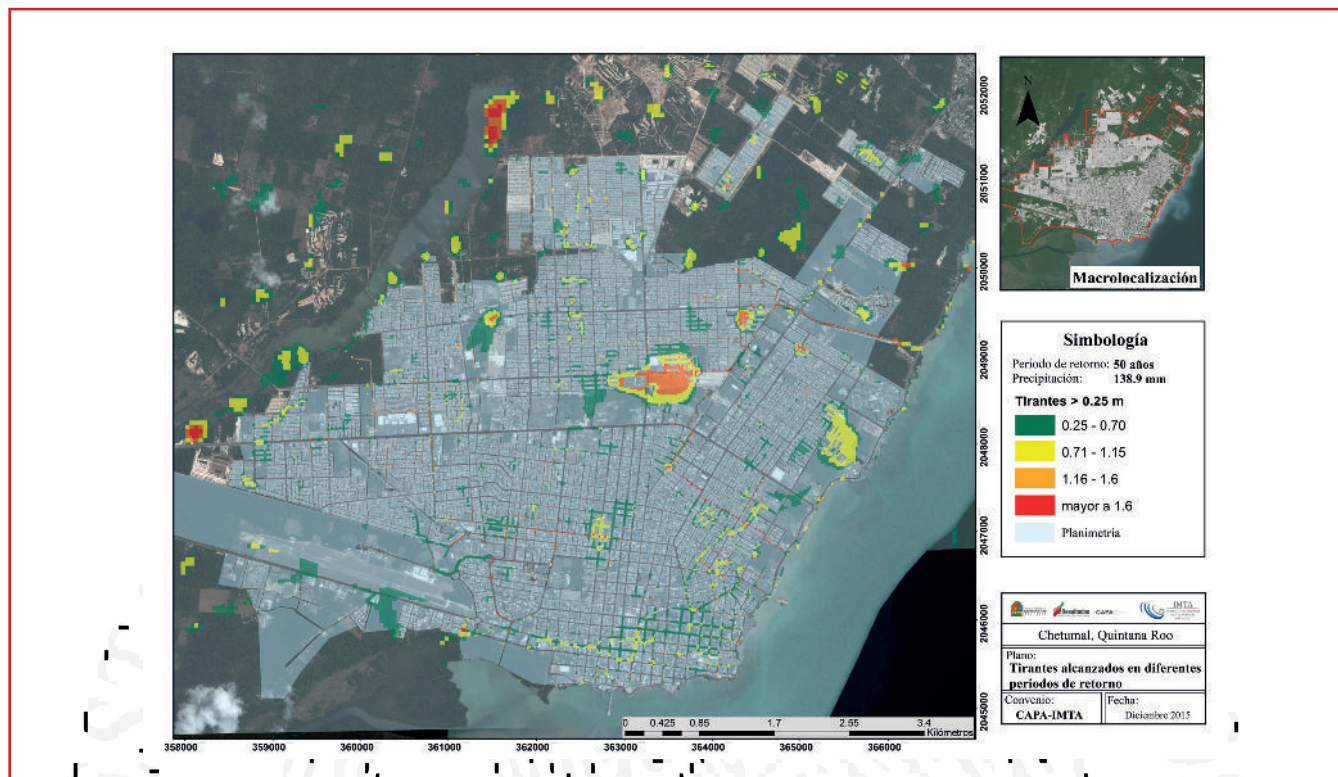
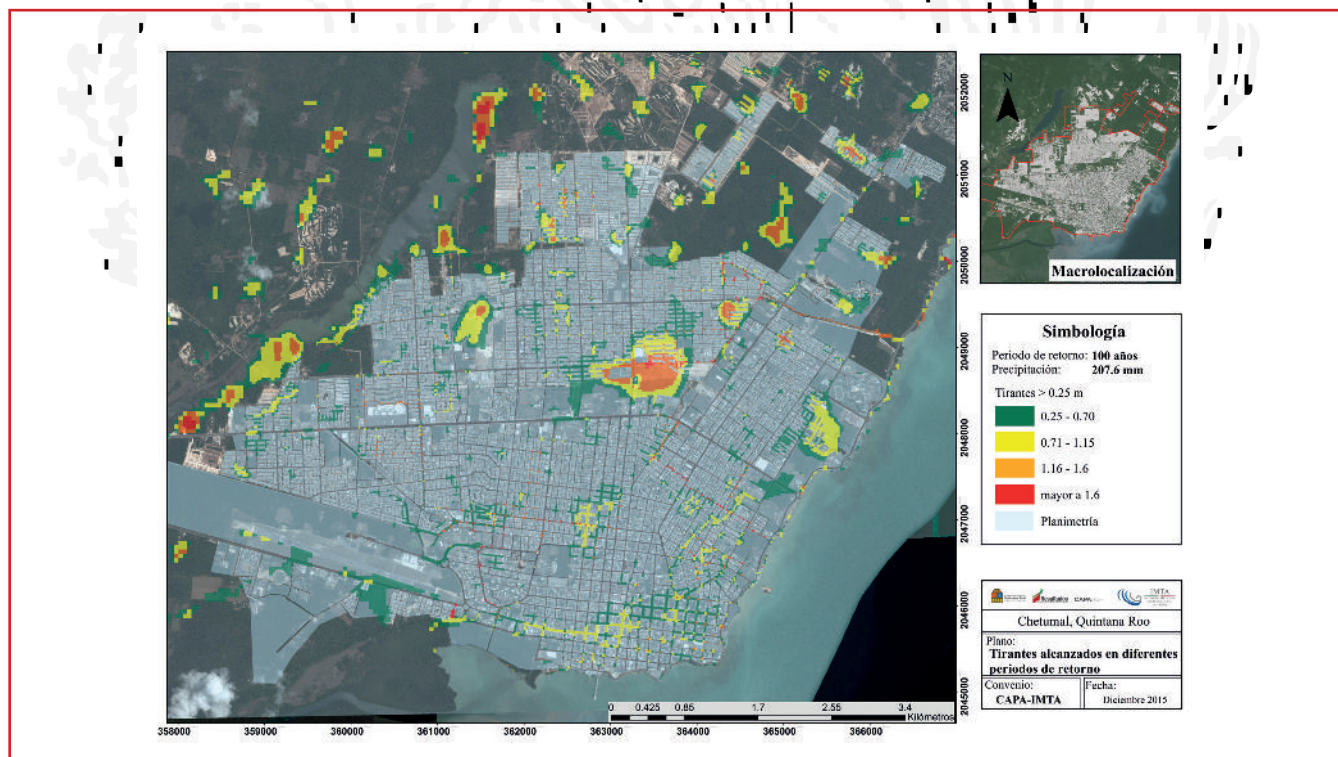


Ilustración 8.62 Tirantes mayores a 0.25 m para el periodo de retorno de 100 años



8.6. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN VIVIENDA POR EFECTOS DE INUNDACIÓN

Para la evaluación del daño considerando, el daño estructural que puede generarse una casa de acuerdo al análisis realizado por Rodríguez et al (2015), donde se especifica que a partir de una altura de 1.599 m de agua se puede presentar daños por el efecto del cortante en las paredes de la vivienda, ver Tabla 8.8.

Tabla 8.8 Criterio de riesgo para determinar el posible daño estructural en función de la vulnerabilidad de las viviendas de acuerdo a los datos manejados por la Tabla 5.7 del estudio de riesgo de inundaciones en zonas urbanas de la república mexicana (IMTA, 2015)

Vulnerabilidad por tipo de vivienda	Daño estructural	
	Corte Tirante máximo (m)	Vuelco Tirante máximo (m)
Muy Baja (Tipo IV)	1.559	4.29
Baja (Tipo III)	1.559	4.29
Media (Tipo II)	1.559	1.39
Alta (Tipo I)	1.513	1.37

Esto reflejaría un costo por reparaciones, por lo que de acuerdo Vélez et al., (2014) genera una curva de daño a la infraestructura con respecto al tirante, donde toma un valor de \$85 000 pesos, para el tipo de vivienda I. La Tabla 8.9 contiene los valores debido al daño estructural, dependiendo al tipo de vivienda y vulnerabilidad.

Tabla 8.9 Costo del daño estructural por tipo de vivienda (Vélez 2014)

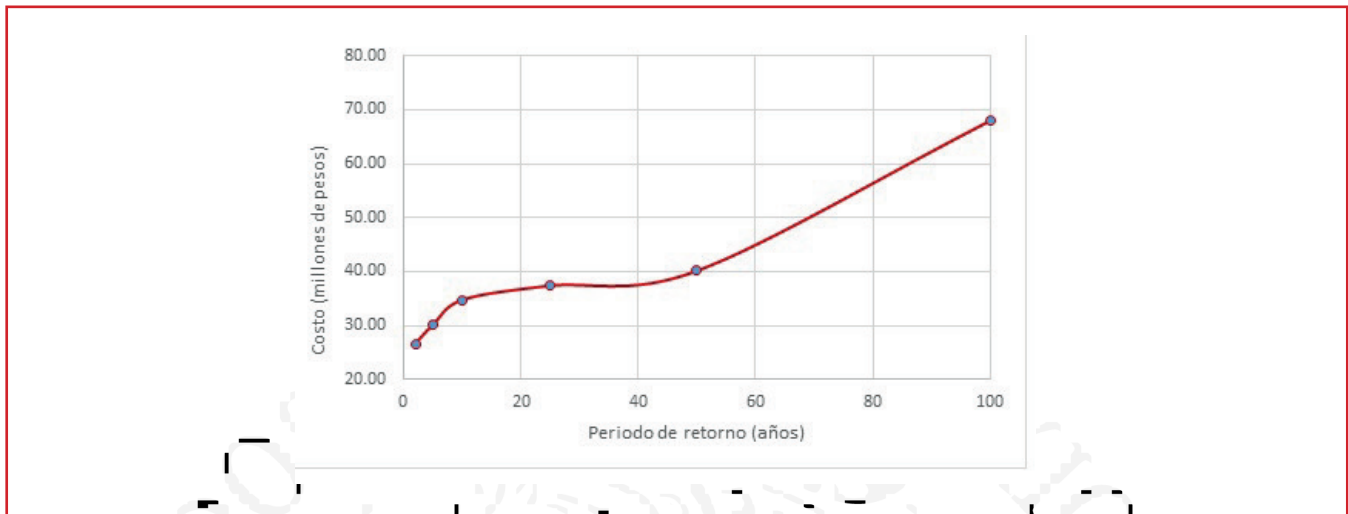
Vulnerabilidad	Tipo de vivienda	Costo por daño estructural
Muy Alta	I	\$ 85 000
Alta	II	\$ 77 000
Media	III	\$ 69 000
Baja	IV	\$ 61 000
Muy Baja	V	\$ 53 000

Sobreponiendo el mapa de peligro con lluvia vinculada a un periodo de retorno que va desde los 2 hasta los 100 años, se puede establecer el costo total de daño por falla estructural, que puede generarse (Tabla 8.10 e Ilustración 8.63).

Tabla 8.10 Costo por daño estructural para los diferentes escenarios analizados

Periodo de retorno (años)	Costo por daño estructural (pesos)
2	\$26,659,050.00
5	\$30,156,950.00
10	\$34,767,060.00
25	\$37,412,900.00
50	\$40,141,370.00
100	\$67,990,250.00

Ilustración 8.63 Curva daños estructurales en viviendas-periodo de retorno



8.7. GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL EN VIVIENDA EN LA CIUDAD DE CHETUMAL PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

De la Ilustración 8.64 a la Ilustración 8.69, se presentan los mapas con clasificaciones de los costos asociados al daño estructural por riesgo de inundación.

Ilustración 8.64 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 2 años

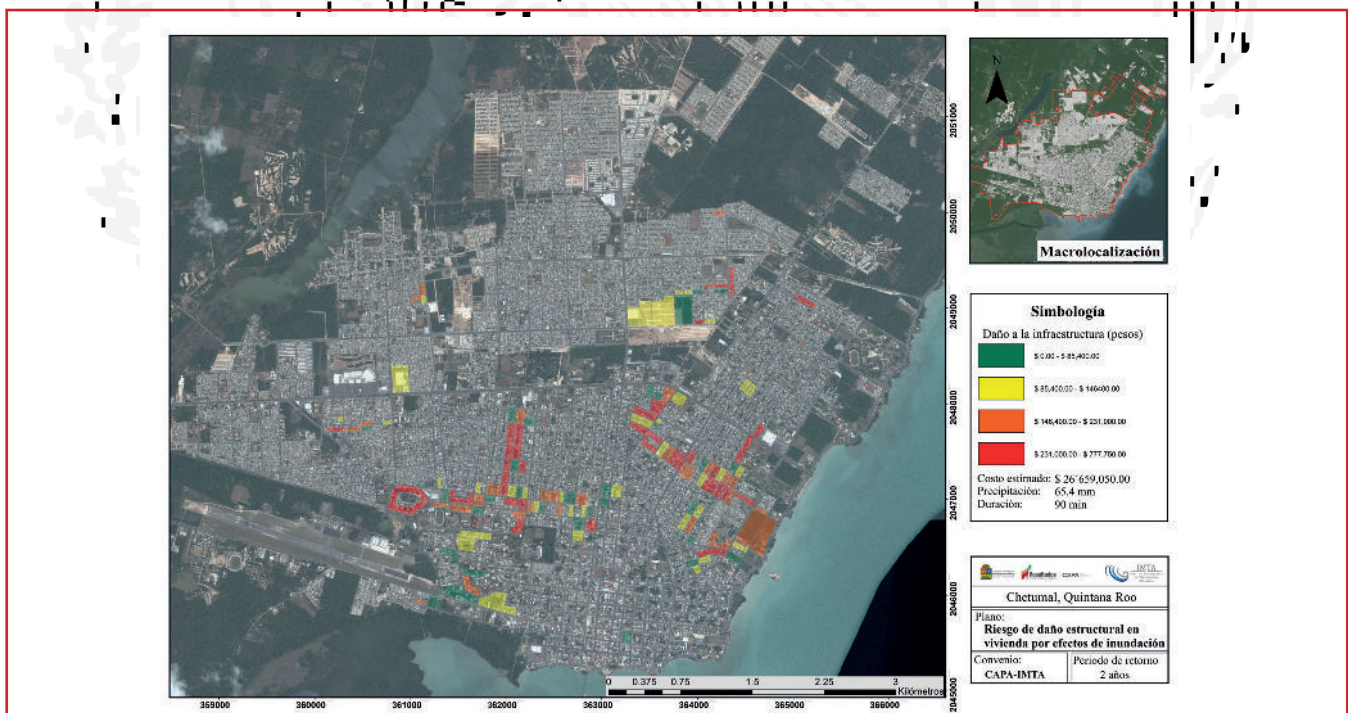


Ilustración 8.65 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 5 años

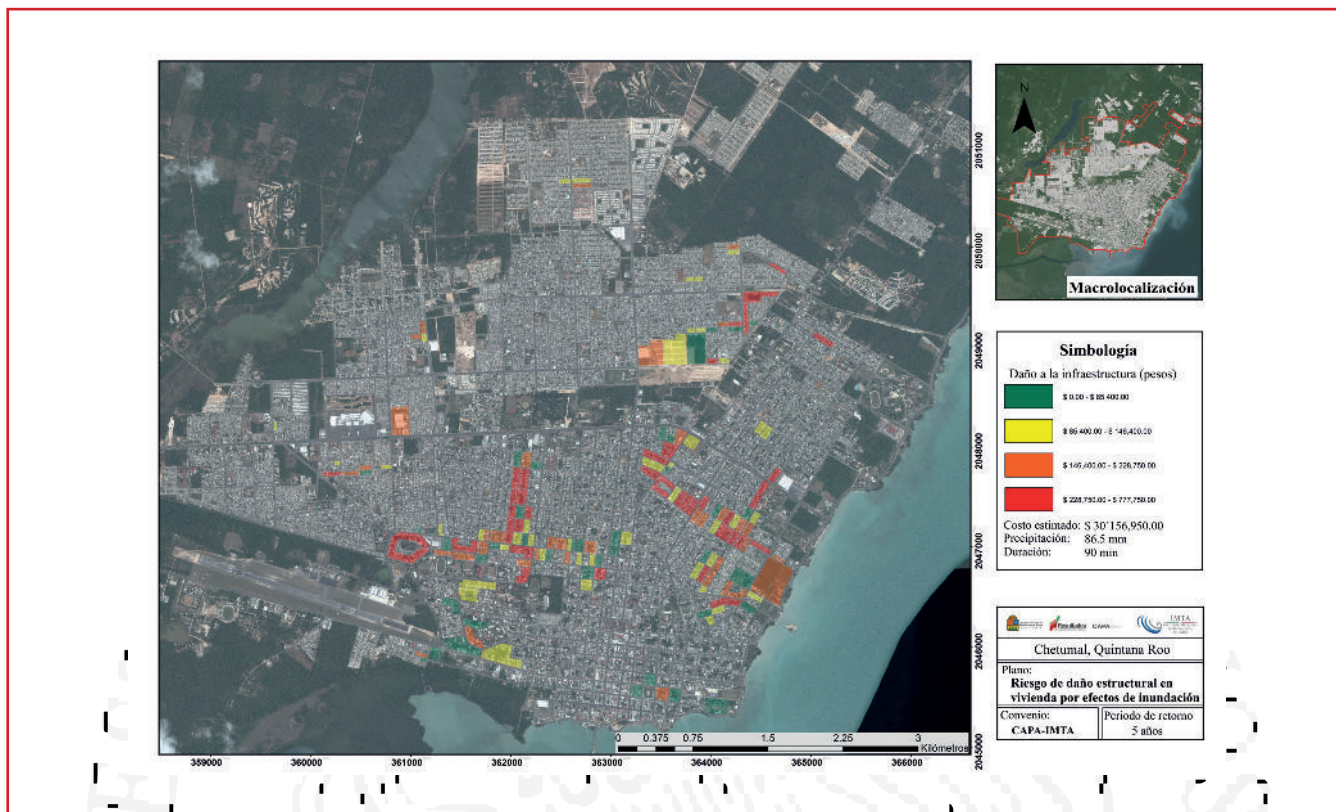


Ilustración 8.66 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 10 años

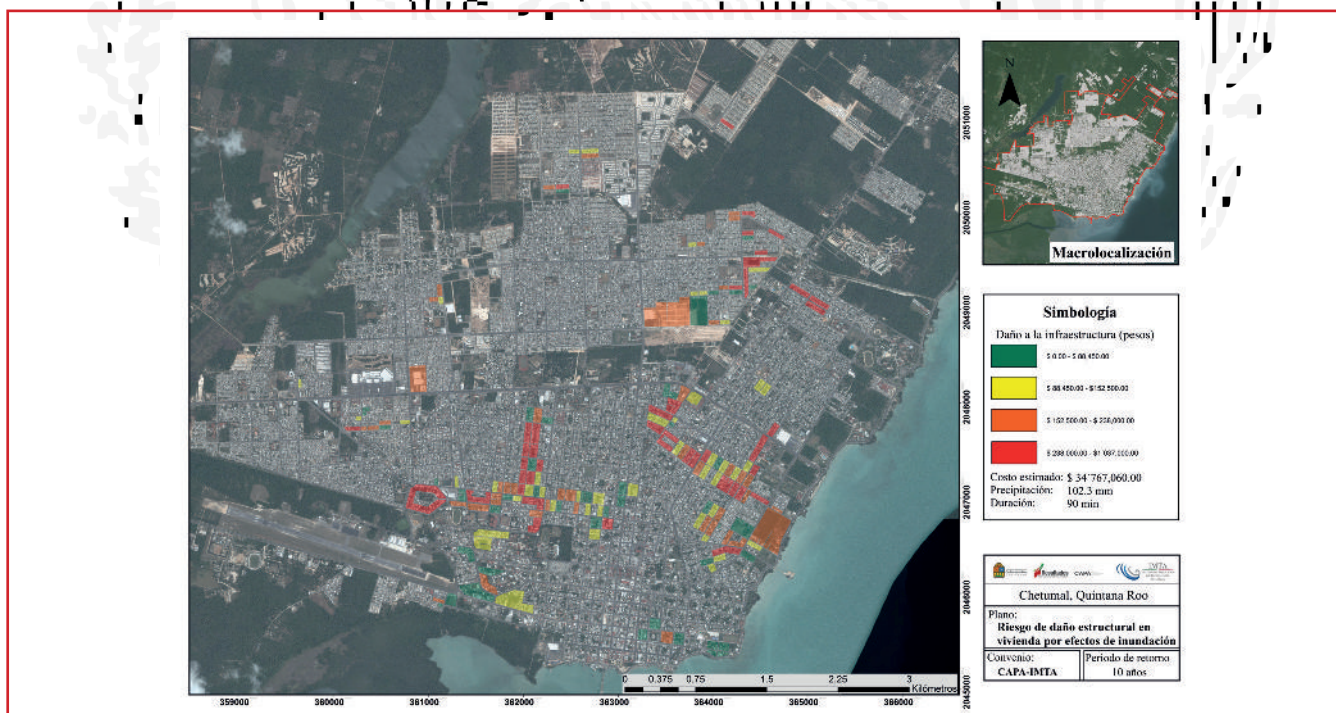


Ilustración 8.67 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 25 años

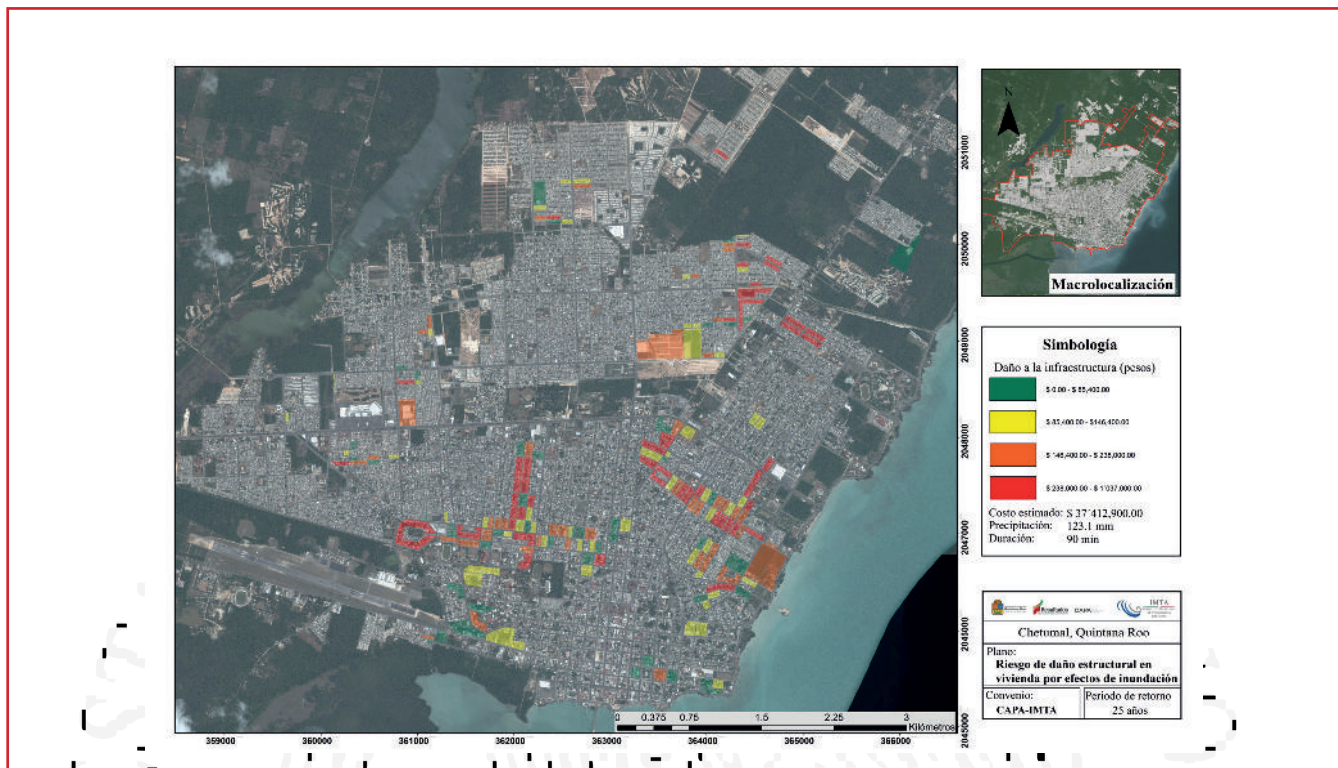


Ilustración 8.68 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 50 años

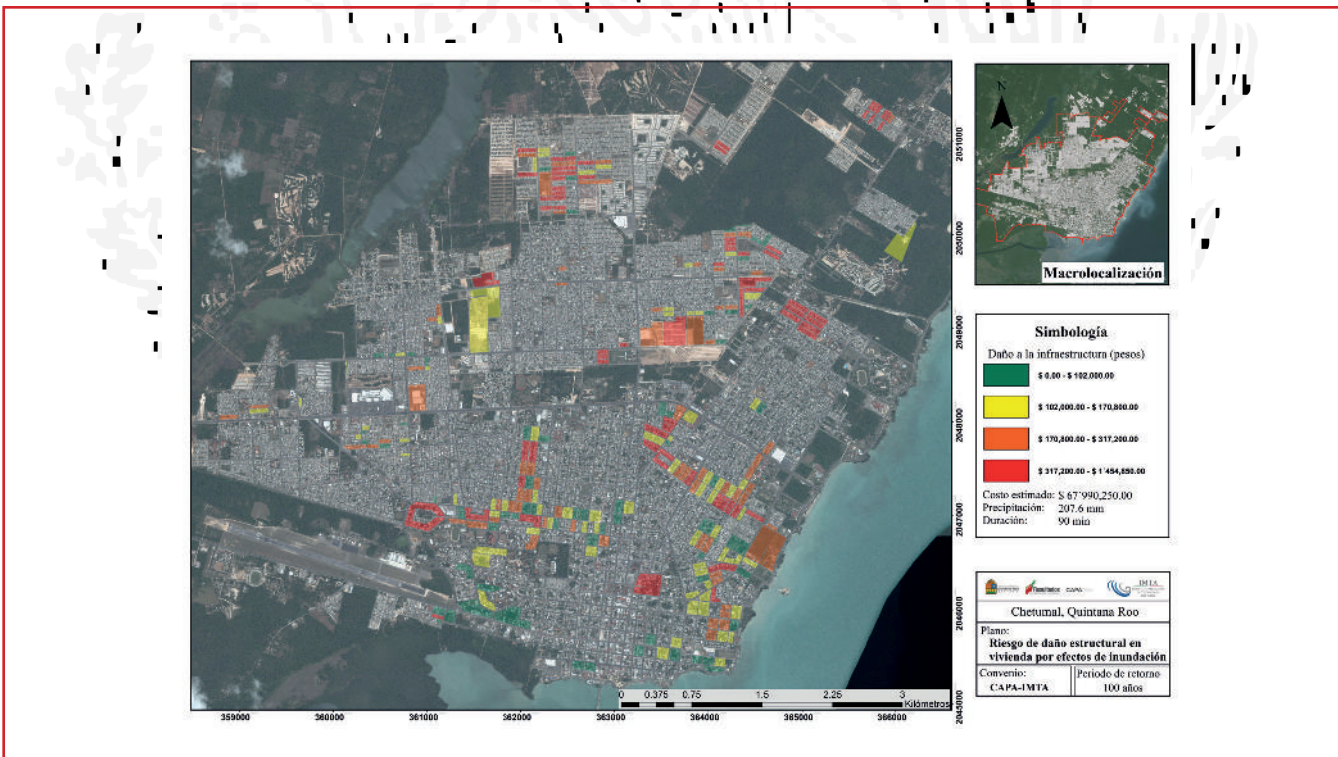
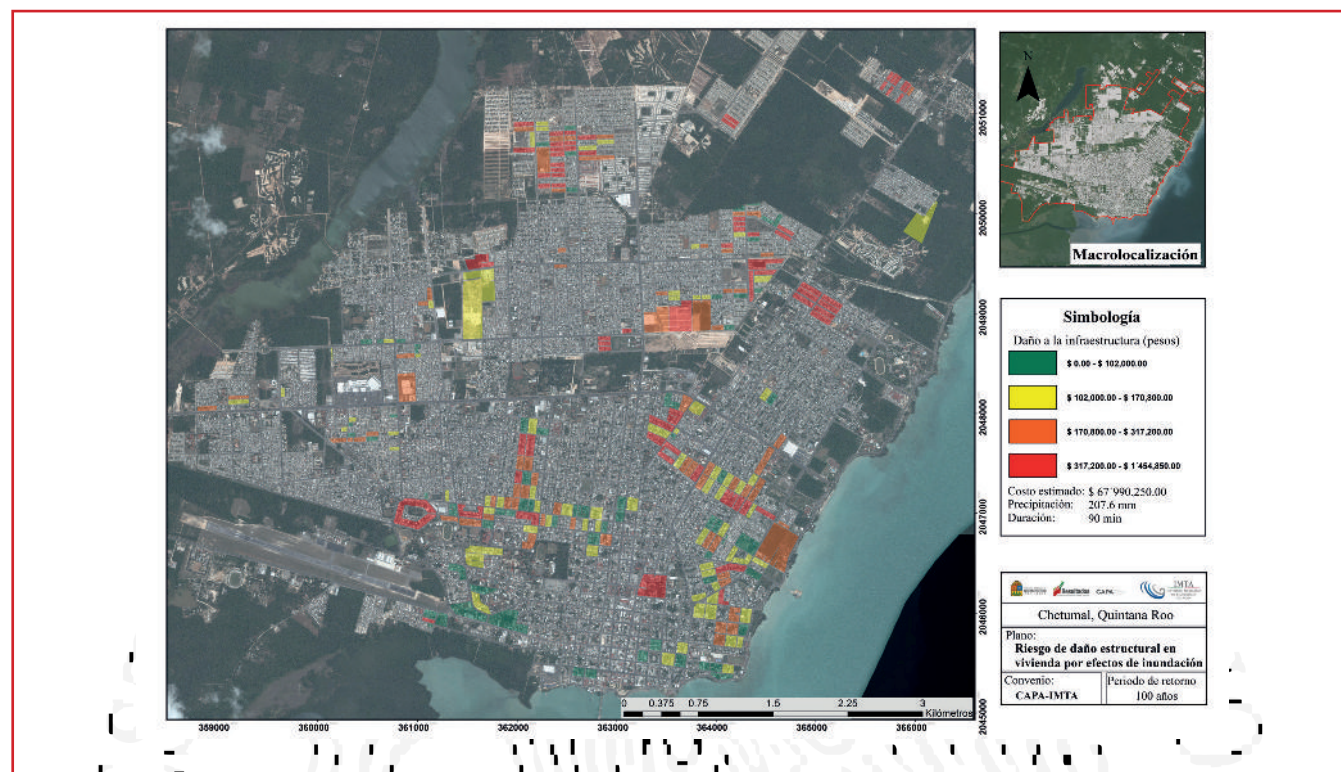


Ilustración 8.69 Costo de daños generados a la infraestructura de las viviendas, periodo de retorno 100 años



8.8. CÁLCULO DEL ÍNDICE CONTRA INUNDACIONES (ICI)

A partir de los mapas de las zonas inundables de acuerdo a la topografía de la ciudad se realizó el cálculo del índice contra inundaciones obteniéndose de la siguiente expresión:

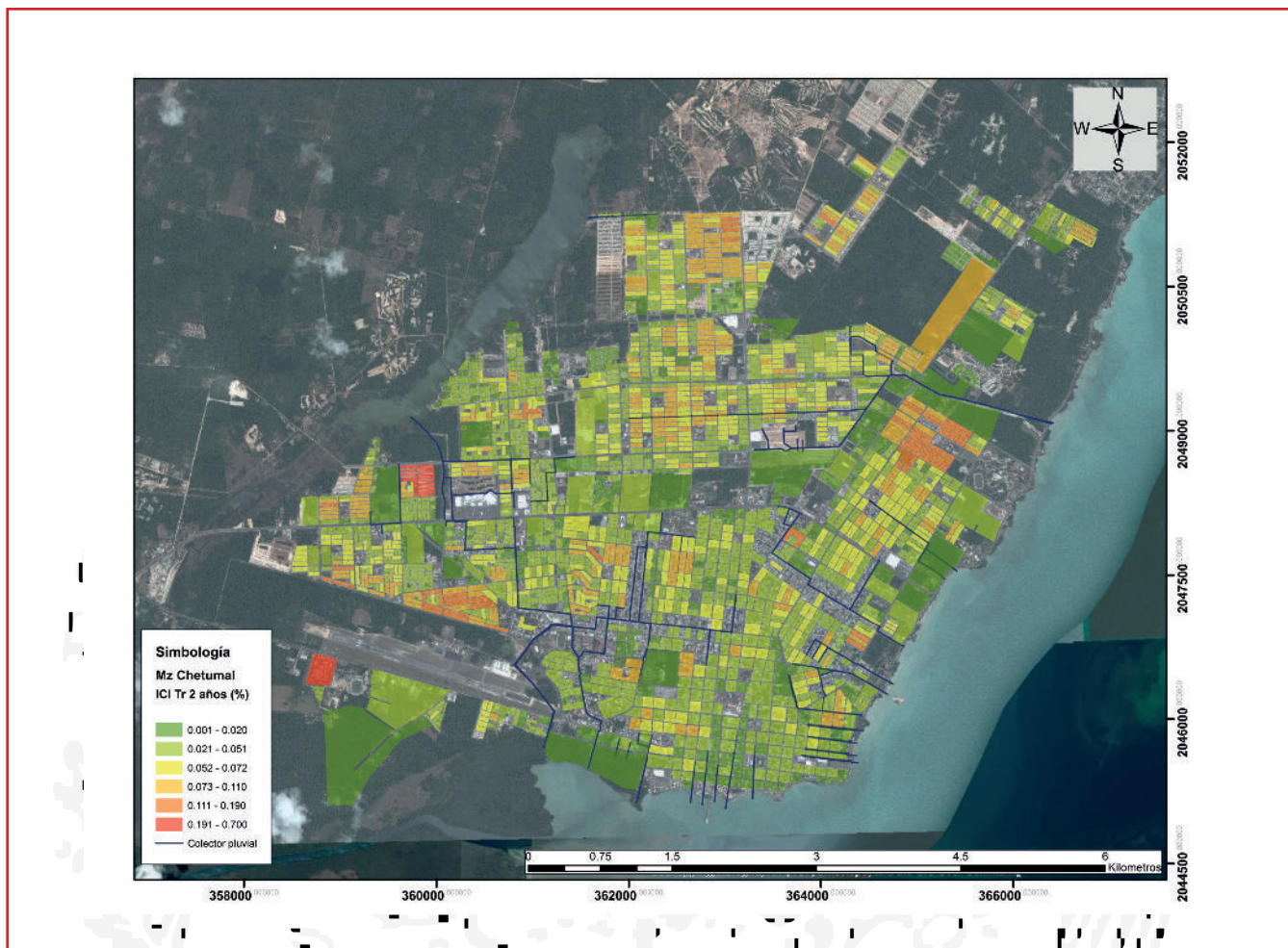
$$ICI(\%) = \left(\frac{\text{Población urbana sin o con bajo riesgo de sufrir inundaciones en época de lluvias}}{\text{Población total de la localidad (habitantes)}} \right) (100) \quad \text{Ecuación 8.4}$$

Entendiéndose que la población urbana sin o con bajo riesgo de sufrir inundaciones en época de lluvias, se refiere a lo siguiente:

Los habitantes que por estar asentados en zonas topográficamente “altas”, prácticamente, no corren riesgo de inundaciones. Disponen de la infraestructura de captación, conducción, protección y control o regulación del agua pluvial; que sólo presentándose una lluvia extraordinaria que rebase la tormenta de diseño de dicha infraestructura podría afectarlos.

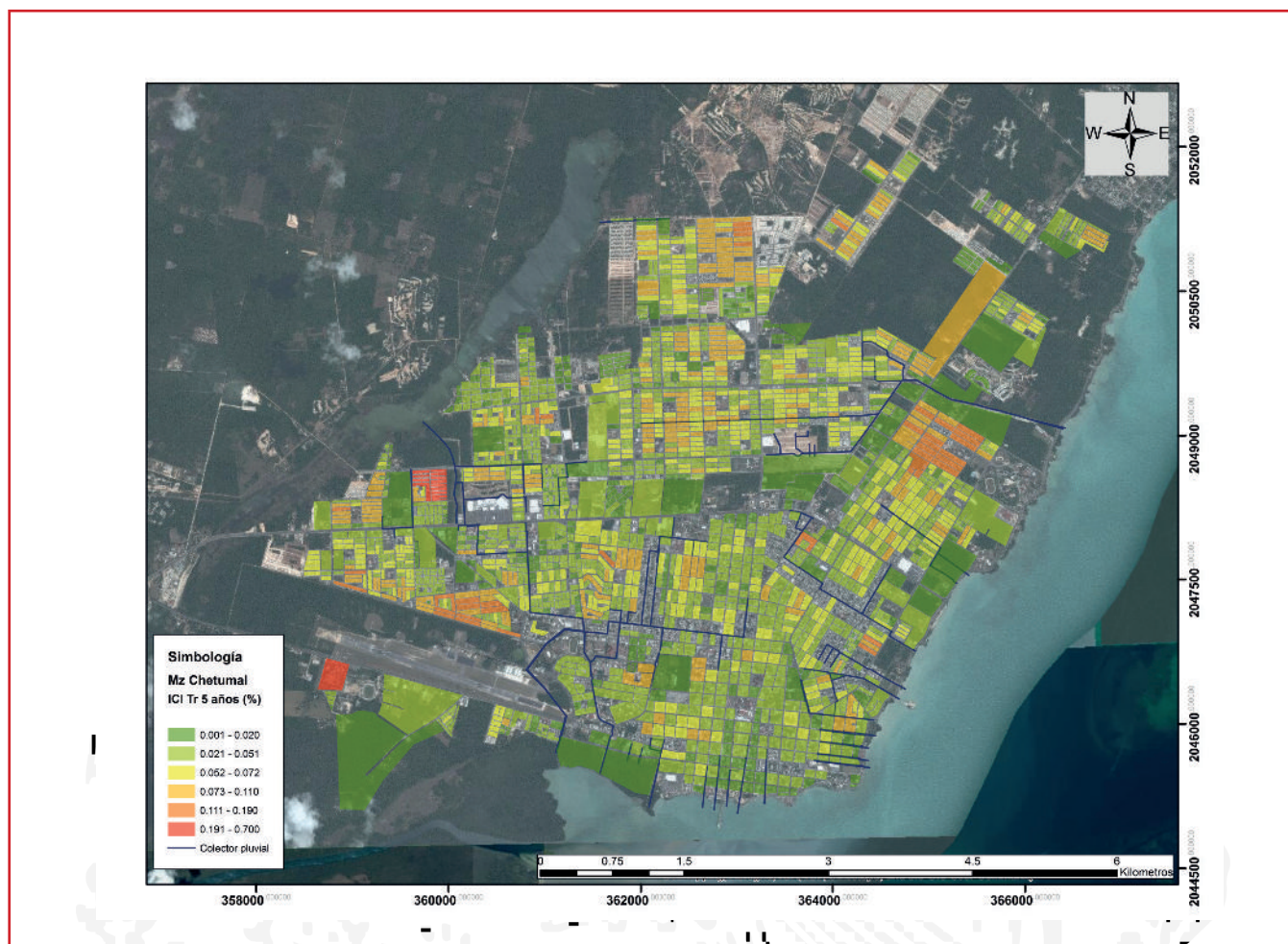
De la Ilustración 8.70 a la Ilustración 8.75 se muestran los diferentes índices contra inundaciones para los diferentes periodos de retorno.

Ilustración 8.70 ICI para el periodo de retorno de 2 años



La Ilustración 8.70 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 2 años en el cual se puede apreciar que se abarca un rango en porcentaje de 0.001 a 0.70 % para cada manzana generada a partir de la información proporcionada del AGEB. En conjunto para la ciudad de Chetumal se presenta un 7.27 % de la población la cual puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 65.4 mm, con una duración de 90 min. Asimismo en la ilustración se plasman los colectores pluviales existentes, con los resultados presentados se entiende que la obra de desalojo existente es ineficiente, con lo cual se necesita una extensión de la misma y un adecuado mantenimiento para su correcto funcionamiento.

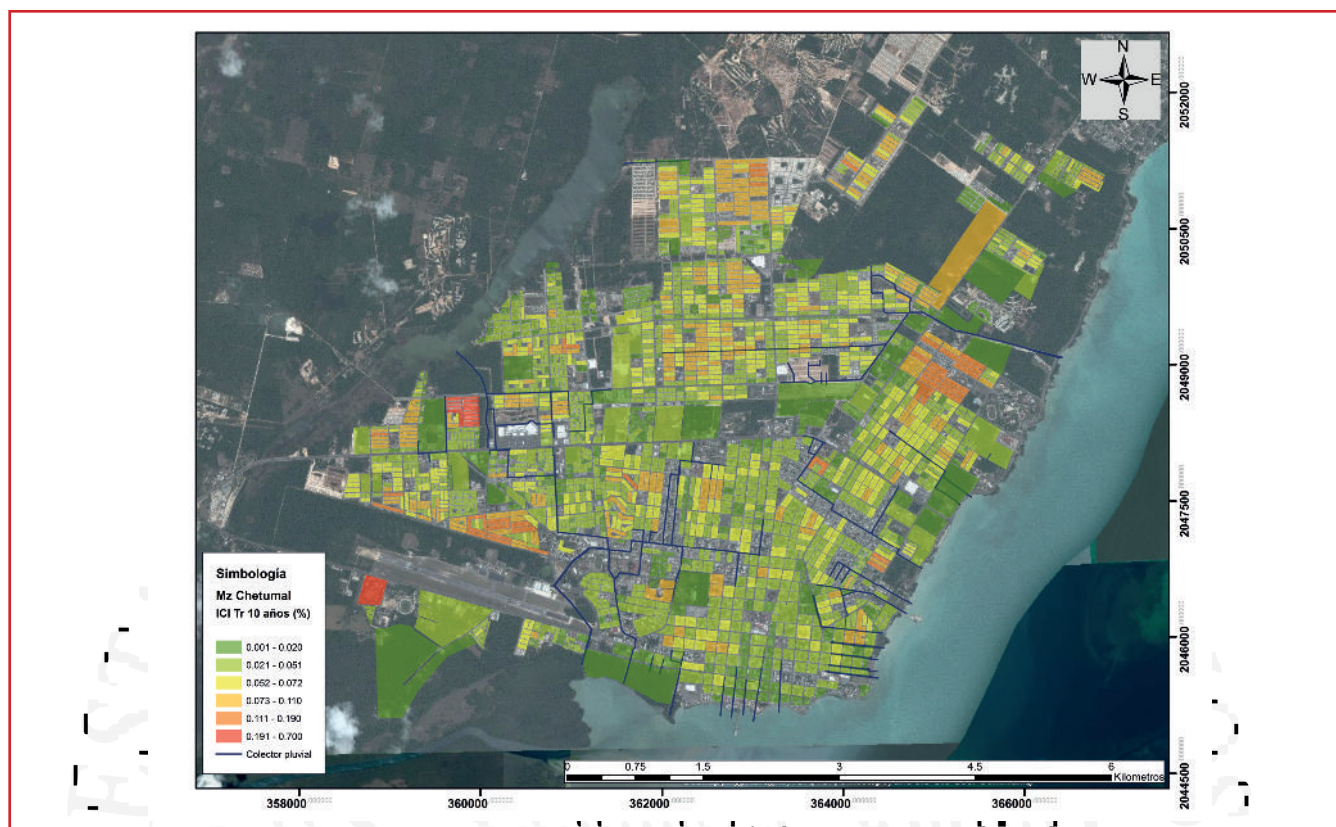
Ilustración 8.71 ICI para el periodo de retorno de 5 años



La Ilustración 8.71 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 5 años maneja un rango en porcentaje similar al periodo de retorno anterior. En conjunto para la ciudad de Chetumal se presenta un 8.09 % de la población la cual puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 86.5 mm, con una duración de 90 min.

La Ilustración 8.72 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 10 años maneja un rango en porcentaje similar al periodo de retorno anterior. El 91.20 % de la población se encuentra con bajo riesgo de sufrir inundaciones, con lo cual el 8.80 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 102.3 mm, con una duración de 90 min.

Ilustración 8.72 ICI para el periodo de retorno de 10 años



La Ilustración 8.73 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 25 años el cual maneja un rango en porcentaje similar al periodo de retorno anterior. El 90.57 % de la población se encuentra con bajo riesgo de sufrir inundaciones, con lo cual el 9.43 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 123.1 mm, con una duración de 90 min.

La Ilustración 8.74 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 50 años el cual maneja un rango en porcentaje de 0.001 a 0.700. Para este periodo en la ciudad de Chetumal el 89.94 % de la población se encuentra con bajo riesgo de sufrir inundaciones, con lo cual el 10.06 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 138.9 mm, con una duración de 90 min.

La Ilustración 8.75 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 100 años el cual maneja un rango en porcentaje de 0.001 a 0.700. Para este periodo en la ciudad de Chetumal el 86.17 % de la población se encuentra con bajo riesgo de sufrir inundaciones, con lo cual el 13.83 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 207.6 mm, con una duración de 90 min.

Ilustración 8.73 ICI para el periodo de retorno de 25 años

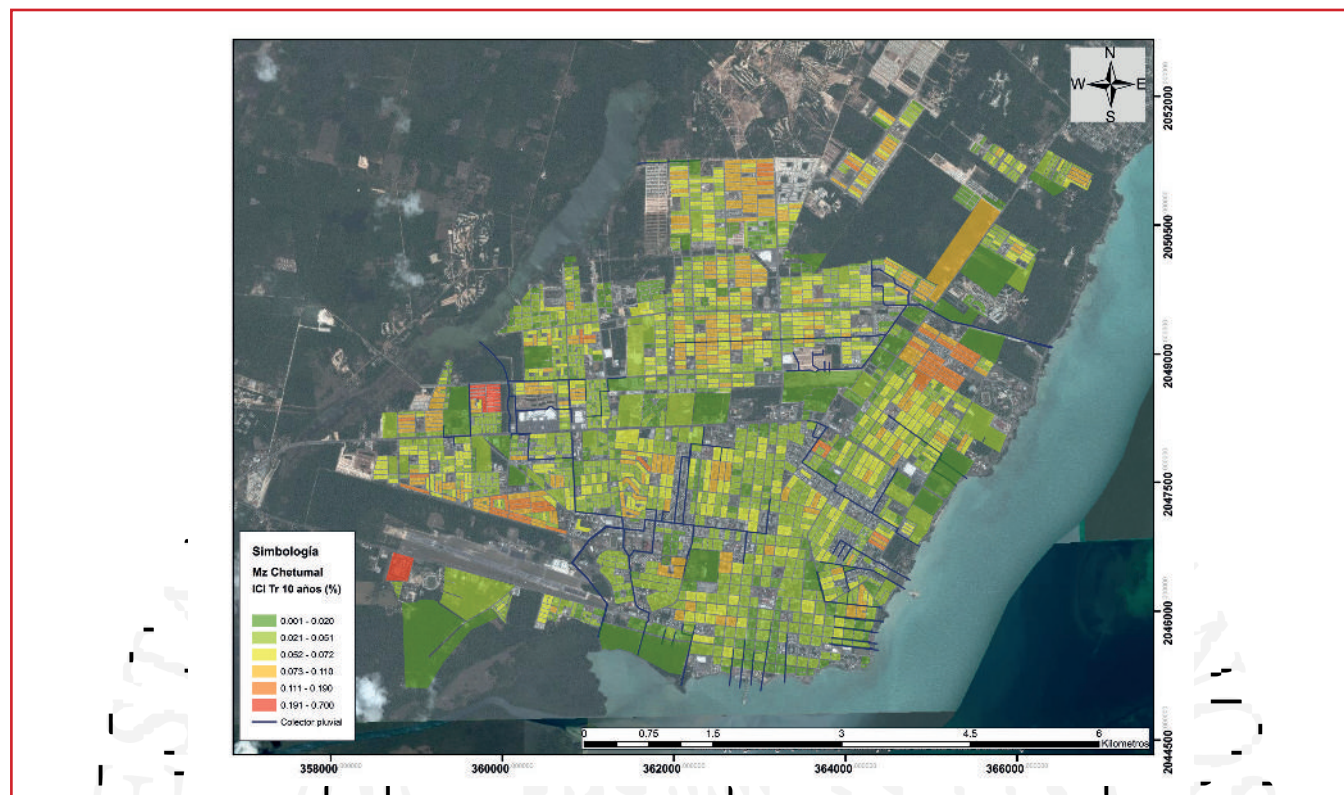


Ilustración 8.74 ICI para el periodo de retorno de 50 años

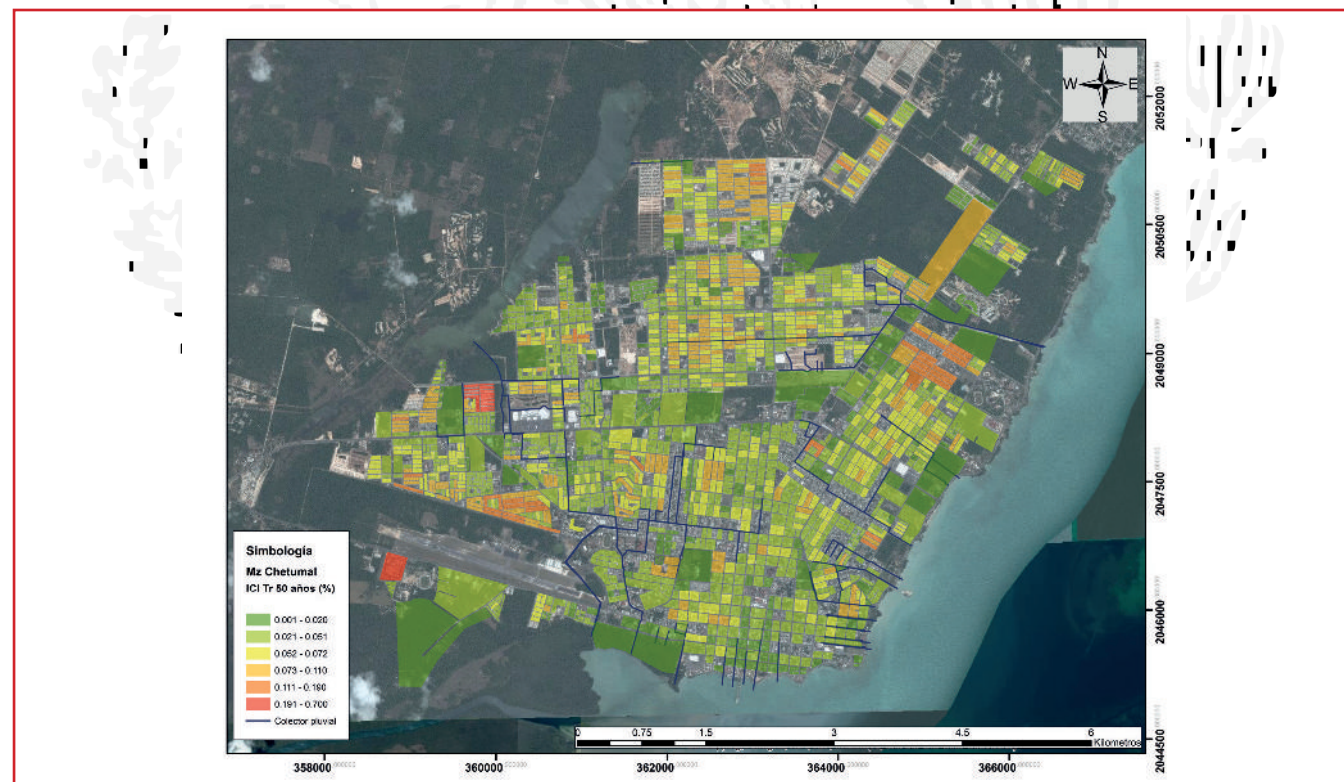
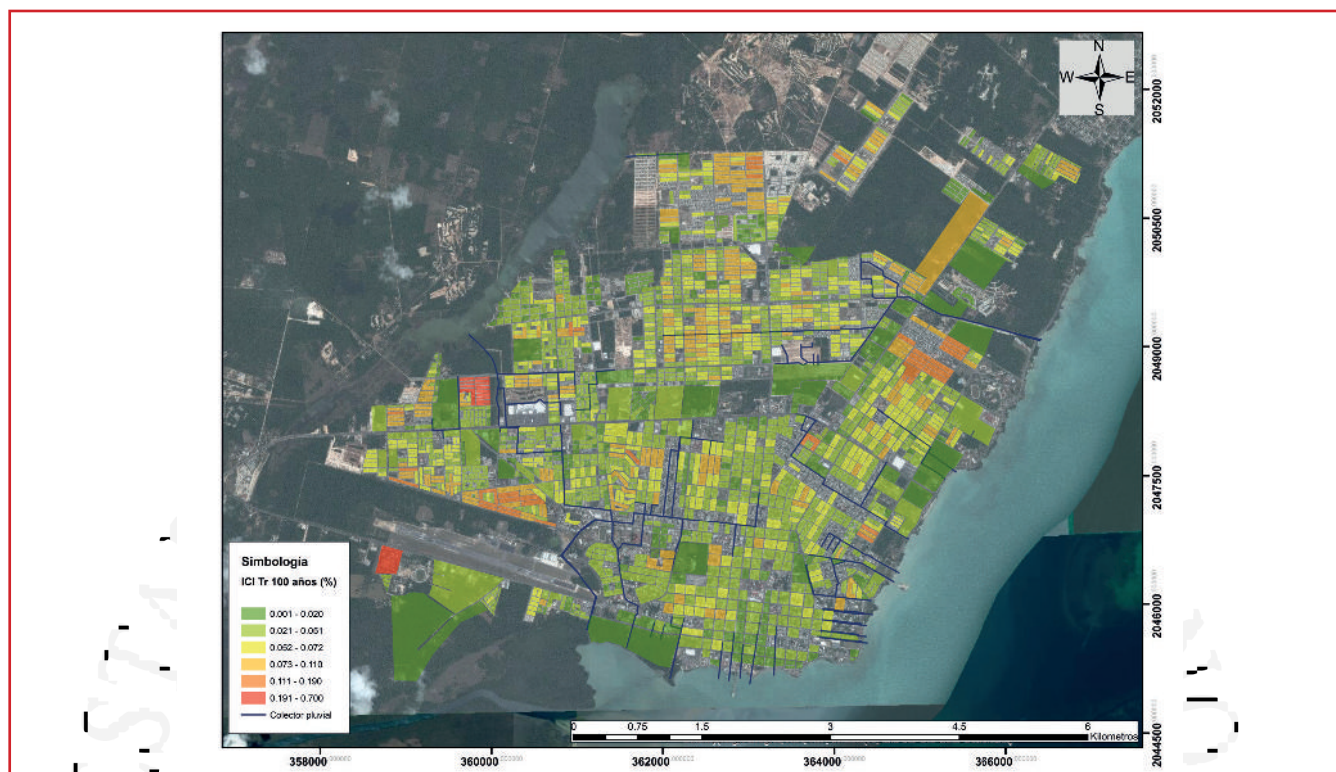


Ilustración 8.75 ICI para el periodo de retorno de 100 años



8.9. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE INUNDACIONES (IDI)

A partir de los mapas de las zonas inundables de acuerdo a la topografía de la ciudad se realizó el cálculo del índice contra inundaciones obteniéndose de la siguiente expresión:

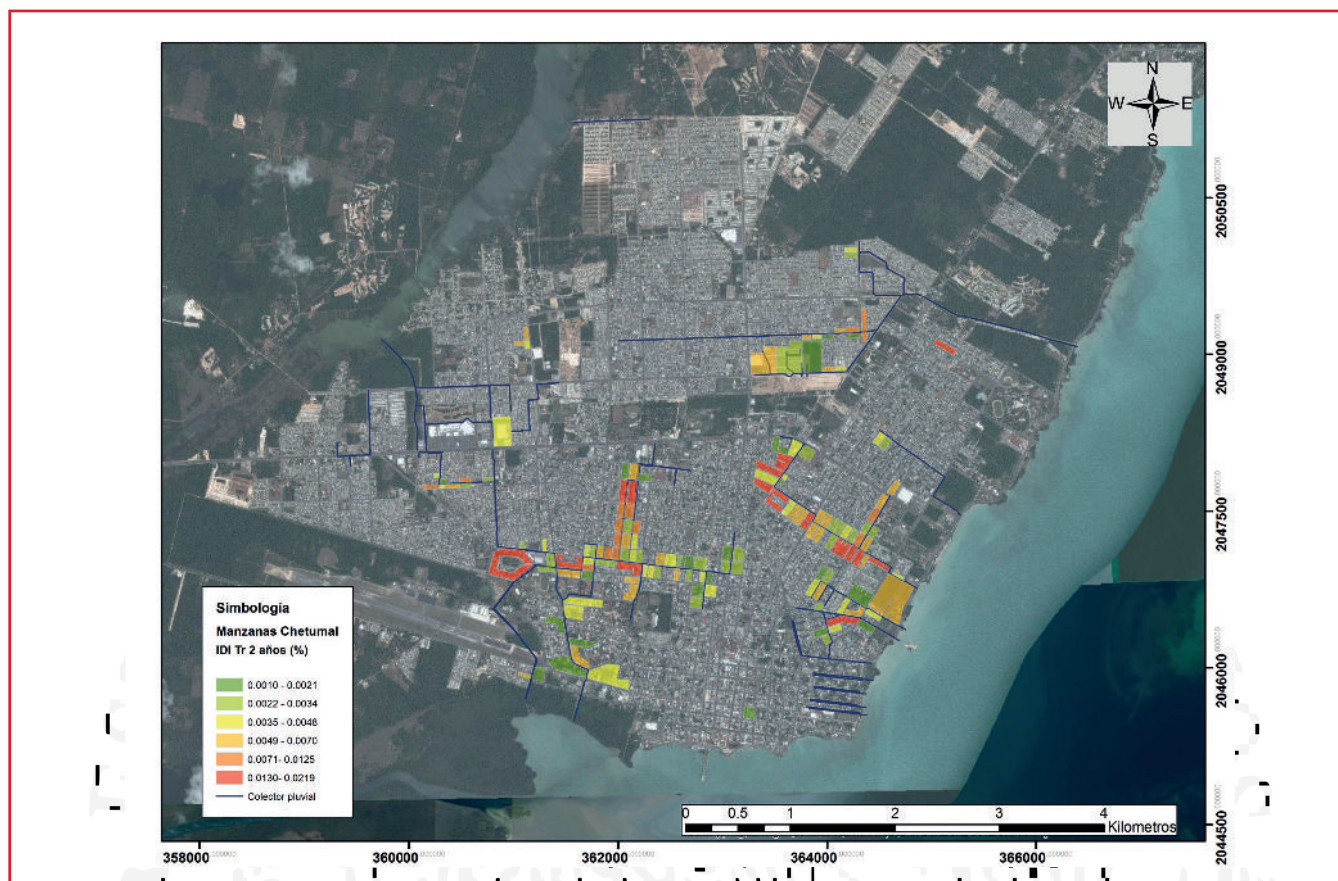
$$ICI(\%) = \left(\frac{\text{Población urbana con riesgo medio o alto de sufrir inundaciones en época de lluvias}}{\text{Población total de la localidad (habitantes)}} \right) (100) \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Entendiéndose que la población urbana con riesgo medio o alto de sufrir inundaciones en época de lluvias, se refiere a lo siguiente:

Los habitantes que por estar asentados en zonas topográficamente “medias o altas”, prácticamente, corren riesgo de inundaciones. Los habitantes que no disponen de una infraestructura de captación, conducción, protección y control o regulación del agua pluvial, ya que al presentarse una lluvia extraordinaria que rebase la tormenta de diseño de dicha infraestructura los afectaría de gran manera.

De la Ilustración 8.76 a la Ilustración 8.81 se muestran los diferentes índices de inundaciones para los diferentes periodos de retorno.

Ilustración 8.76 ICI para el periodo de retorno de 2 años

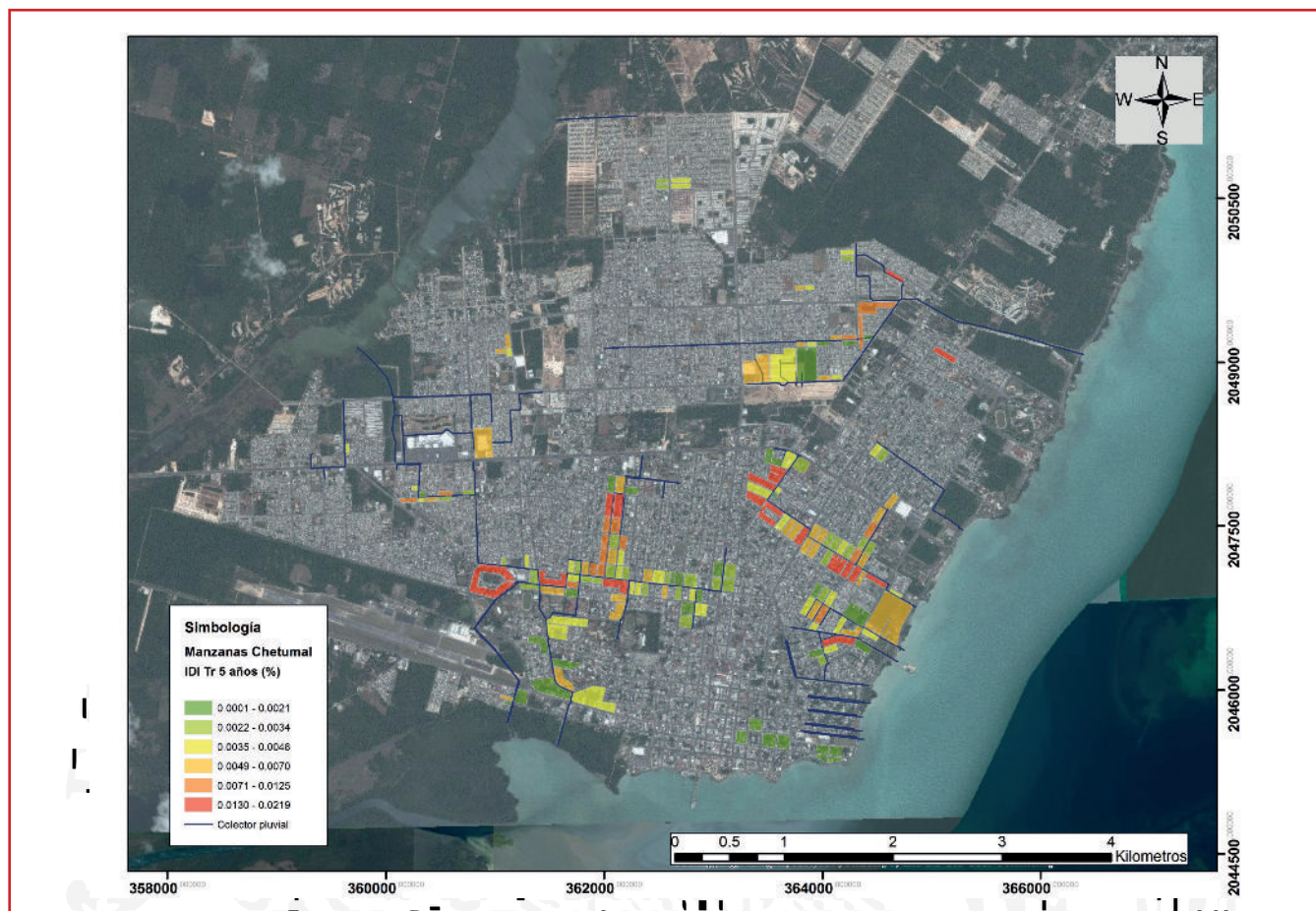


La Ilustración 8.76 muestra el índice de inundaciones para el periodo de retorno de 2 años en el cual se puede apreciar que se abarca un rango en porcentaje de 0.001 a 0.02 % para cada manzana generada a partir de la información proporcionada del AGEB. Tal como se mencionó anteriormente el 7.27 % de la población presenta el riesgo de sufrir daños por las inundaciones en la época de lluvias. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 65.4 mm, con una duración de 90 min

Asimismo en la ilustración se plasman los colectores pluviales existentes, con esto se puede dar una idea de que aunque con la obra de desalojo se le puede atribuir una falta de capacidad de desalojo o mantenimiento.

La Ilustración 8.77 muestra el índice de inundaciones para el periodo de retorno de 5 años maneja un rango en porcentaje similar al periodo de retorno anterior. Para este periodo la ciudad de Chetumal se presenta un 8.09 % de la población la cual puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 86.5 mm, con una duración de 90 min.

Ilustración 8.77 ICI para el periodo de retorno de 5 años

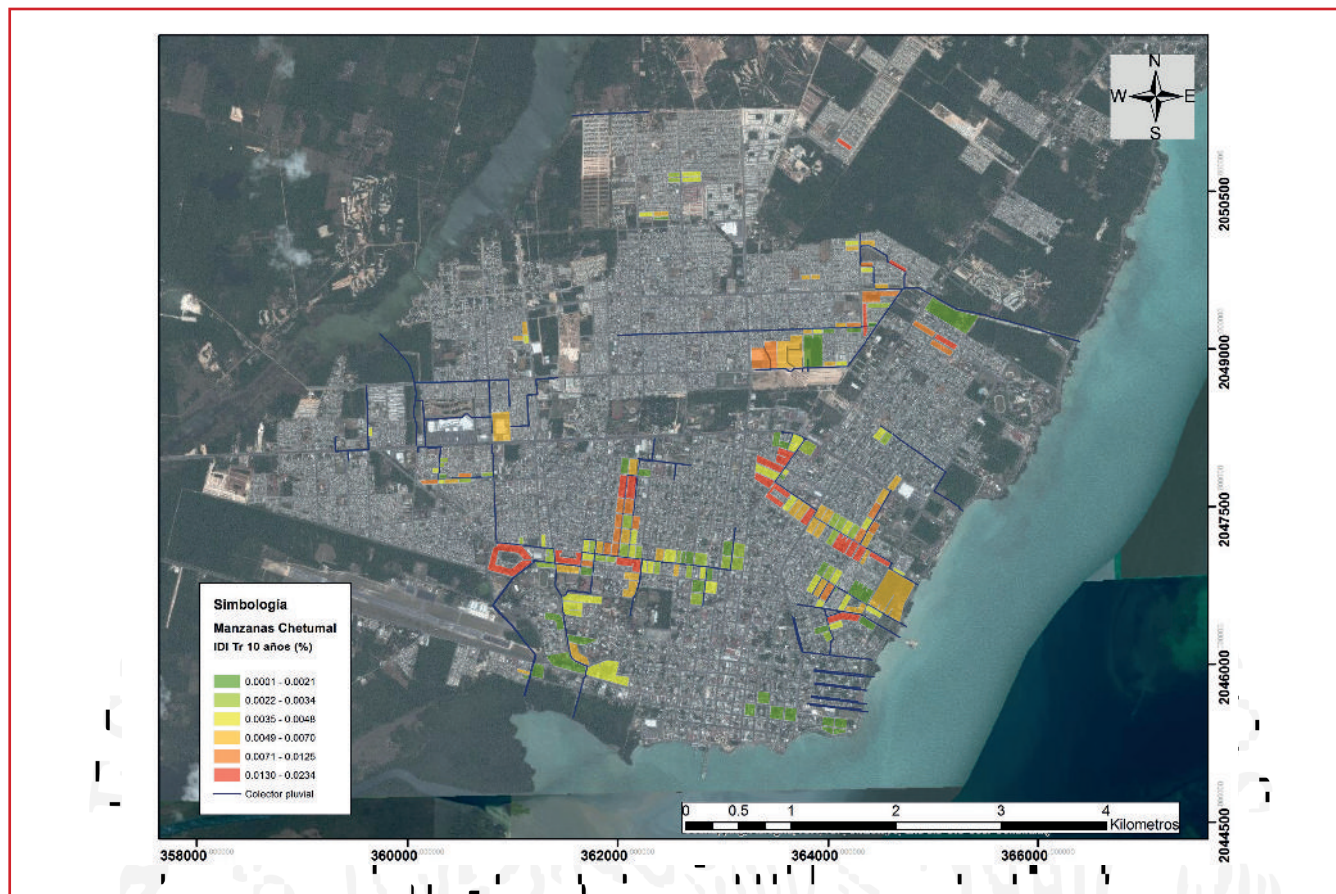


La Ilustración 8.78 muestra el índice de inundaciones para el periodo de retorno de 10 años maneja un rango en porcentaje de 0.001 al 0.023 % con lo cual el 8.80 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 102.3 mm, con una duración de 90 min.

La Ilustración 8.79 muestra el índice de inundaciones para el periodo de retorno de 25 años el cual maneja un rango en porcentaje de 0.001 al 0.028%, con lo cual el 9.43 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 123.1 mm, con una duración de 90 min.

La Ilustración 8.80 muestra el índice contra inundaciones para el periodo de retorno de 50 años el cual maneja un rango en porcentaje de 0.001 a 0.028% similar al periodo anterior, con lo cual el 10.06 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 138.9 mm, con una duración de 90 min.

Ilustración 8.78 ICI para el periodo de retorno de 10 años



La Ilustración 8.81 muestra el índice de inundaciones para el periodo de retorno de 100 años el cual maneja un rango en porcentaje de 0.001 a 0.042%, con lo cual el 13.83 % de la población puede tener algún riesgo de sufrir inundaciones en épocas de lluvia. Cabe mencionar que los datos que se tomaron en cuenta para la generación del escenario son una lluvia de 207.6 mm, con una duración de 90 min.

8.10. CALLES AFECTADAS POR LAS INUNDACIONES

Ante las inundaciones en zonas urbanas, es muy recurrente que las vialidades se vean afectadas por el paso de las precipitaciones intensas dejando problemas de inaccessos de vehículos y personas. Esto afecta todo tipo de actividades dentro de la región y genera, cuando el agua se encuentra anegada problemas de salud.

Considerándose que para la ciudad de Chetumal de acuerdo con los datos del AGEB se tienen 557.96 km de vialidades, se tiene una longitud de afectación vial que va de los 47 a los 124 km (ver Tabla 8.11). Por ejemplo se puede mencionar que para un periodo de retorno de 100 años se tiene un 22.24 % de afectaciones viales en la ciudad de Chetumal. En la página 515 se hace una descripción en extenso de las calles inundadas

Ilustración 8.79 ICI para el periodo de retorno de 25 años

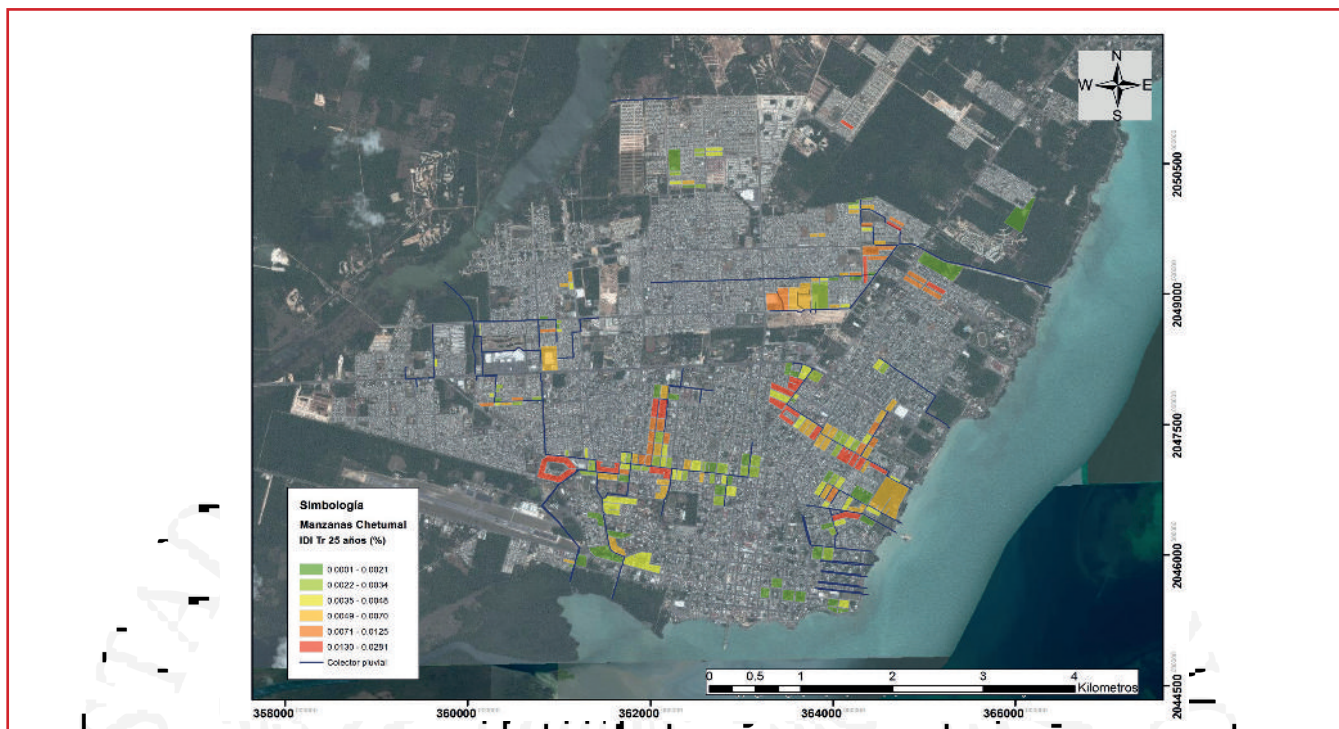


Ilustración 8.80 ICI para el periodo de retorno de 50 años

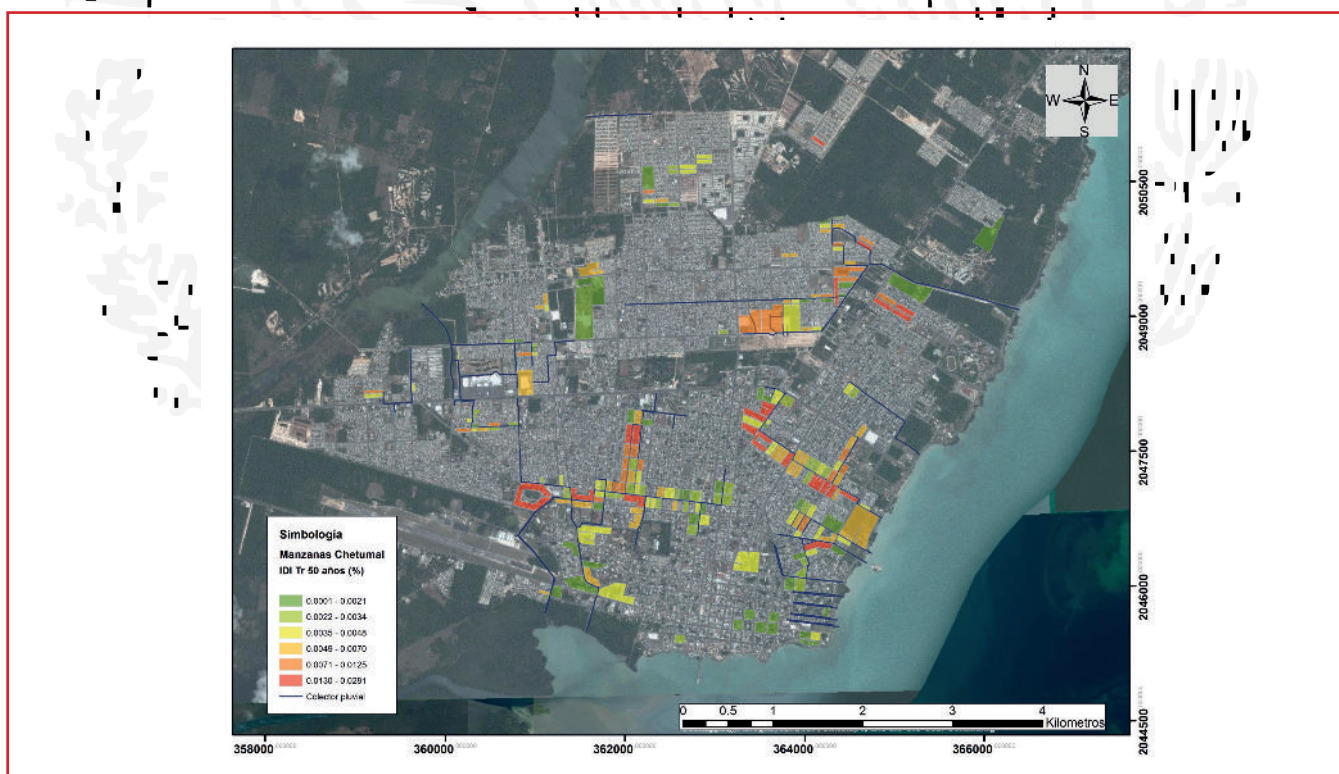


Ilustración 8.81 ICI para el periodo de retorno de 100 años

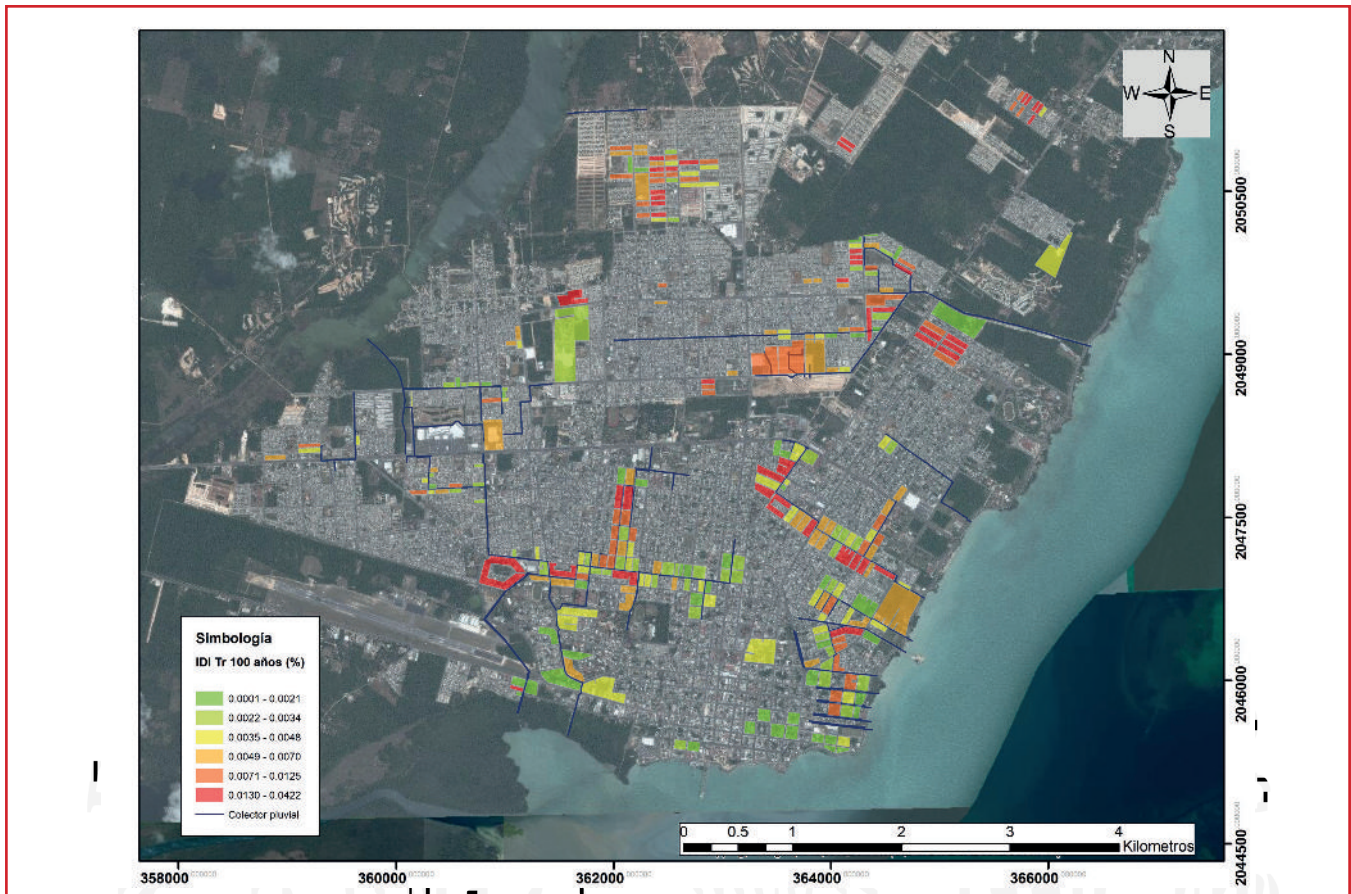


Tabla 8.11 Variables de afectación vial por periodo de retorno

Afectación	Periodo de retorno					
	Tr 2 años	Tr 5 años	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años
Km	47.190	57.774	65.839	78.686	89.314	124.070
Coefficiente Adimensional	0.085	0.104	0.118	0.141	0.160	0.222
Coefficiente Porcentaje (%)	8.46	10.35	11.80	14.10	16.01	22.24

8.11. TIRANTES DE INUNDACIÓN EN DIFERENTES COLONIAS DE CHETUMAL

Bajo los diferentes escenarios generados por el modelo de simulación hidráulica se puede trabajar en generar por colonia los niveles a los que puede llegar una inundación. En la Tabla 8.12 se presenta en las colonias más afectadas ante las precipitaciones intensas, donde se tienen los diferentes tirantes que se puede llegar a presentar para cada periodo de retorno en puntos específicos de algunas colonias.

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
Barrio bravo	Othón P. Blanco	364055.33	2045400.35	1.41	1.63	1.75	1.91	2.03	2.14
	Heroico colegio militar	364077.287	2045491.75	1.15	1.29	1.42	1.6	1.73	1.84
	Lázaro Cárdenas	364121.364	2045906.39	1.26	1.33	1.37	1.43	1.48	1.67
	Héroes de Chapultepec	364011.206	2046082.39	1.15	1.21	1.40	1.56	1.62	1.83
Plutarco Elías calles	16 de septiembre	363308.695	2045510.5	1.58	1.81	1.97	2.09	2.11	2.14
	Álvaro Obregón	363439.346	2045620.41	1.39	1.61	1.82	2.1	2.27	2.45
	Reforma	363593.339	2045598.2	1.15	1.31	1.44	1.61	1.73	1.98
	Ignacio Zaragoza	363307.004	2045752.65	0.57	0.65	0.71	0.78	0.83	1.01
Centro	Francisco I. Madero	362667.958	2045378.13	1.03	1.19	1.31	1.44	1.55	2.01
	Independencia	362801.229	2045378.08	0.96	1.15	1.31	1.47	1.48	1.5
	Álvaro Obregón	362316.528	2045726.44	0.53	0.61	0.67	0.75	0.85	1.11
	Benito Juárez	362931.572	2045532.5	0.51	0.6	0.65	0.73	0.78	0.97
	Ignacio Zaragoza	363043.639	2045776.74	0.52	0.61	0.66	0.74	0.79	0.98
Lomas del Caribe	1	361179.176	2045934.76	0.7	0.76	0.86	1.12	1.3	3.85
	1	361238.889	2046011.65	0.58	0.61	0.67	0.93	1.11	3.69
Villas de Chetumal	Chiapas	361141.126	2045836.19	0.39	0.57	0.69	0.76	0.81	1.08
Fracc. Campestre	Efraín Aguilar	361673.962	2046454.73	0.38	0.41	0.43	0.45	0.47	0.52
	Presa de la amistad	361657.075	2046589.82	0.44	0.47	0.49	0.51	0.52	0.58
	Hidroeléctrica el infernillo	361990.86	2046240.76	0.28	0.3	0.31	0.32	0.33	0.4
	Adolfo López Mateos	361392.524	2046701.44	0.35	0.38	0.4	0.43	0.44	0.51

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno (continuación)

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
Italia	Venustiano Carranza	361680.062	2046935.47	0.37	0.46	0.51	0.57	0.59	0.72
	Sicilia	361655.123	2047006.14	0.5	0.59	0.64	0.69	0.72	0.85
	Bolonia	361680.079	2046988.47	0.41	0.5	0.56	0.61	0.64	0.77
Fracc. Flamboyanes	Venustiano Carranza	361040.814	2046942.55	0.5	0.53	0.54	0.55	0.56	0.6
	San Salvador	361611.339	2047031.72	0.48	0.57	0.62	0.67	0.69	0.82
		361569.384	2047094.39	0.47	0.56	0.62	0.67	0.7	0.83
	Palermo	361392.811	2047204.63	1.28	1.31	1.34	1.37	1.4	1.5
	San Salvador	361547.432	2047118.86	0.31	0.39	0.45	0.5	0.53	0.65
8 de Octubre	Bugambilias	361150.827	2047490.2	0.29	0.32	0.34	0.37	0.38	0.45
	5	361216.956	2047292.15	0.29	0.31	0.34	0.36	0.37	0.42
	7	361195.361	2047205.45	0.25	0.26	0.27	0.29	0.3	0.34
Josefa Ortiz de Domínguez	Sicilia	361741.382	2047776.68	0.79	0.81	0.83	0.84	0.85	0.89
	2	361371.246	2047711.28	0.68	0.71	0.73	0.75	0.76	0.79
	Bugambilias	361657.45	2047468.34	0.42	0.44	0.46	0.47	0.49	0.53
Aserradero	Justo Sierra	361963.593	2047292.47	0.87	0.92	0.94	0.96	0.98	1.04
	Venecia	361963.479	2047226.7	0.72	0.76	0.78	0.8	0.82	0.88
	Génova	361877.804	2047182.54	0.36	0.39	0.4	0.42	0.43	0.48
Venustiano Carranza	José Ma. Morelos	362713.237	2046808.39	0.82	0.9	0.96	1.02	1.07	1.23
	San Salvador	362735.546	2046940.33	1.09	1.17	1.22	1.29	1.33	1.5
	Plan de Guadalupe	362777.157	2046919.29	0.84	0.92	0.98	1.04	1.09	1.25
Leona vicario	Camelias	362712.842	2047073.26	0.91	0.99	1.05	1.11	1.16	1.32
	Emiliano Zapata	362712.954	2047143.55	0.88	0.95	1.01	1.08	1.12	1.29
	Hermenegildo Galeana	362658.815	2047051.41	0.63	0.71	0.77	0.83	0.88	1.04
	Anastasio Guzmán	362779.36	2047974.19	0.5	0.53	0.55	0.58	0.6	0.67
David Gustavo	Camelias	362758.906	2047067.02	0.91	0.99	1.05	1.11	1.16	1.32
	Francisco Madero	362847.264	2046962.19	0.41	0.49	0.54	0.61	0.65	0.81
	Independencia	362999.323	2047182.43	0.42	0.5	0.55	0.62	0.66	0.83
	Benito Juárez	363109.684	2047292.52	0.93	0.98	1.04	1.1	1.15	1.31
Colonia Ley Federal del agua	Juan José Siordia	363482.513	2047754.29	1.16	1.2	1.23	1.26	1.27	1.34
	Anastasio Guzmán	363505.808	2047839.26	0.58	0.62	0.65	0.68	0.69	0.75
	Presa de la angostura	363416.723	2047686.67	0.53	0.57	0.6	0.63	0.64	0.71

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno (continuación)

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
S.A.H.O.P.	Luis E. Bracamontes	363591.458	2047970.07	0.42	0.48	0.51	0.54	0.55	0.62
	Marciano González	363637.467	2048023.71	0.46	0.49	0.51	0.54	0.55	0.59
	Mariano García	363681.262	2048090.6	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.38
Adolfo Lopez Mateos	Caboas	363614.06	2047446.69	0.62	0.64	0.66	0.67	0.68	0.72
	Manuel M. Diéguez	363878.224	2047204.43	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.09
	Felipe Ángeles	363940.517	2047227.35	1.22	1.24	1.27	1.3	1.31	1.36
	Francisco J. Mujica	363991.201	2047203.09	1.16	1.21	1.24	1.26	1.27	1.32
	José Luis Moya	364125.289	2046985.31	1.05	1.12	1.16	1.21	1.24	1.38
	Manuel M. Diéguez	364273.96	2046981.61	0.88	0.95	0.99	1.04	1.08	1.21
	Felipe Carrillo Puerto	363858.585	2046676.49	1.55	1.73	1.77	1.81	1.87	2.06
	Heriberto Frías	364387.18	2047270.22	1.3	1.35	2.02	2.04	2.05	2.08
	Segundo Periférico	364561.757	2047291.75	0.87	0.94	0.98	1.03	1.06	1.19
	Insurgentes	364430.045	2047754.01	0.5	0.52	0.53	0.54	0.55	0.58
Primera Legislatura	Agustín E. Melgar	363988.847	2046388.98	1.1	1.13	1.16	1.19	1.2	1.37
	Heriberto Jara	363703.409	2046566.5	1.37	1.38	1.4	1.41	1.42	1.45
	Josefa Ortiz de Domínguez	363988.968	2046456.03	1.48	1.49	1.5	1.52	1.55	1.68
Aarón Merino Fernández	Lucio Bravo	364320.583	2046588.31	0.51	0.7	1.03	1.09	1.12	1.21
	Futura	364165.232	2046676.26	0.6	0.79	0.92	1	1.04	1.22
	Ruiz Cortínez	364055.914	2046544.39	0.45	0.64	0.77	0.84	0.89	1.06
Frac. Reforma	José Ma. Pino Suárez	364978.134	2047973.86	0.56	0.58	0.59	0.61	0.63	0.66
	José Ma. Izazaga	364911.979	2047862.62	0.5	0.51	0.53	0.54	0.56	0.59
5 de Abril	Aquilés Serdán	365396.284	2048370.44	0.95	1.09	1.13	1.15	1.17	1.21
	Matamoros	365353.353	2048324.16	0.95	1.09	1.13	1.15	1.16	1.22
	Jesús Urueta	365309.325	2048259.14	0.32	0.47	0.51	0.52	0.53	0.59
Del Bosque	Cedro	364978.882	2049119.48	1.28	1.46	1.66	1.95	2.16	2.69
	Almendro	365661.075	2048856.58	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	1
Frac. Club Residencial Andara	Andara	365727.364	2049470.39	0.78	0.91	1.01	1.09	1.16	1.43
	Andara	365683.364	2049536.39	0.5	0.62	0.72	0.8	0.87	1.15
	Xiabre	365639.158	2049490.73	0.72	0.84	0.94	1.03	1.09	1.37
Infonavit Santa Ma.	Pascual Coral Heredia	366128.741	2050035.45	0.31	0.44	0.59	0.86	1.06	1.68

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno (continuación)

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
Antorchista	Centenario	366255.364	2051230.39	0.26	0.33	0.41	0.52	0.55	0.64
		366541.364	2050922.39	0.31	0.38	0.45	0.57	0.66	0.96
Pacto Obrero	2 Norte B	365793.315	2051273.02	0.71	0.83	0.96	1.18	1.39	2.08
	Ernesto Villanueva Madrid	365880.457	2051208.74	0.67	0.79	0.92	1.14	1.35	2.04
	2 Sur A	365813.638	2051230.81	0.83	0.85	0.96	1.18	1.39	2.08
Fracc. Oxtan Kah I y II Etapa	Vinal	365462.264	2050790.39	0.48	0.60	0.66	0.69	0.70	0.73
	J. Canek	365410.171	2050717.6	0.34	0.46	0.53	0.55	0.56	0.59
Fracc. Las Américas I Etapa	Costa Rica	364441.238	2051442.71	0.40	0.58	0.77	1.00	1.18	1.44
	Guatemala	364483.187	2051481.34	0.38	0.39	0.44	0.67	0.86	1.11
	Honduras	364515.123	2051521.4	0.26	0.33	0.34	0.34	0.35	0.57
Arboledas	Cocoyol	364656.59	2049892.55	0.54	0.64	0.82	1.08	1.25	1.3
	Flamboyán	364718.126	2049799.8	0.81	1.06	1.36	1.71	1.89	2.43
	Flamboyán	364407.364	2049976.39	0.88	1.28	1.68	2.35	2.67	3.27
Fracc. Arboledas II Etapa y Sector B	Guanábana	364429.551	2049778.65	1	1.4	1.79	2.47	2.76	3.27
	Machiche	364583.323	2049822.35	1.02	1.42	1.8	2.45	2.73	3.22
	Machuxac	364539.331	2049553.77	0.52	0.64	0.71	0.82	0.89	1.12
	Chicozapote	364319.364	2049404.39	1.29	1.49	1.84	1.84	2.01	2.63
	Arboledas	364385.374	2049382.94	1.18	1.38	1.53	1.73	1.9	2.53
		364407.299	2049429.3	1.01	1.21	1.36	1.56	1.73	2.36
Isabel Tenorio	Chaca	364403.68	2048878.68	1.25	1.26	1.28	1.29	1.3	1.33
	Rafael Donde	364407	2048830.78	0.72	0.74	0.75	0.76	0.77	0.81
Proterritorio	27 de Septiembre	363527.371	2048870.76	1.11	1.4	1.6	1.84	2.01	2.54
	Erick Paolo Martínez	363748.726	2048808.89	1.01	1.3	1.5	1.75	1.91	2.44
	Constituyentes del 74	363263.48	2048810.27	1.15	1.44	1.64	1.89	2.05	2.58
	1º de Mayo	363636.501	2049184.39	1.23	1.24	1.25	1.26	1.33	1.86
	Corozal	363394.842	2049183.81	0.96	0.98	0.99	1	1.2	1.46
	Reforma	363131.352	2049162.38	0.88	0.9	0.91	0.92	0.93	1.14

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno (continuación)

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
Bachilleres II	Constituyentes del 74	363263.443	2048788.47	1.12	1.41	1.61	1.85	2.02	2.55
	Erick Paolo Martínez	363197.29	2048784.46	1.17	1.46	1.66	1.99	2.15	2.68
	Tela	363153.438	2048633.3	1.15	1.17	1.37	1.68	1.85	2.37
	El Naranjal	362955.364	2048700.39	1.12	1.2	1.4	1.65	1.81	2.34
Solidaridad	Alfredo V. Bonfil	362799.477	2048942.43	0.69	0.75	0.77	0.81	0.84	1.13
	Petcabab	362491.669	2049469.5	0.91	1.05	1.14	1.24	1.31	1.59
	Ramonal	362382.995	2049184.84	0.69	0.82	0.91	1.02	1.1	1.27
	Tepich	362514.83	2049295.07	0.59	0.72	0.81	0.92	1	1.14
	Sac-Xan	362142.922	2049008.52	0.27	0.29	0.31	0.34	0.37	0.43
Andrés Quintana Roo	Nicolás Bravo	362252.464	2048678.39	1.07	1.08	1.1	1.11	1.12	1.14
	Valle Hermoso	362537.285	2048656.86	0.52	0.56	0.6	0.63	0.66	0.89
Ampliación Proterritorio	Retorno Polyuc	362407.014	2049624.39	1.03	1.19	1.29	1.42	1.51	1.83
	Alfredo V. Bonfil	362779.364	2049580.39	0.76	0.77	0.78	0.79	0.8	0.81
Fracc. Proterritorio, I, II, III, IV, V, VI, VII y VIII	Guillermo López	363923.306	2049668.37	1.07	1.54	1.83	2.3	2.31	2.34
	Manuel Crescencio Renjón	363724.202	2049602.36	0.26	0.3	0.32	0.36	0.38	0.58
Fracc. Caribe I, II, III, IV, V, VI Etapa	Petcabab	361471.745	2050790.26	0.55	0.66	0.84	1.18	1.41	2.13
	Haití	362316.838	2050415.82	0.87	1.02	1.46	1.73	1.93	2.57
	Polyuc	362338.92	2050262.79	1.32	1.51	1.59	1.62	1.79	2.43
	Petcabab	362493.38	2050262.38	0.56	0.74	0.91	1.14	1.16	1.2
	Naranjal	362955.285	2051164.47	0.31	0.34	0.37	0.4	0.42	0.59
Territorio Federal	Polyuc	362358.897	2049844.31	0.6	0.7	0.78	0.86	0.89	0.96
	Tomás Aznar Barbachano	362471.455	2049868.54	0.77	0.88	0.95	1.03	1.06	1.14
Payo Obispo	Celul	361085.659	2049121.66	1.16	1.2	1.23	1.26	1.3	1.4
	Perdiz	360931.218	2049294.24	0.34	0.35	0.37	0.39	0.41	0.49
Infonavit Fidel Velázquez	Tela	361020.155	2048549.26	0.29	0.32	0.51	0.64	0.67	0.74
	Tabí	361239.628	2048414.63	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35	0.38
	33	360975.387	2048590.49	0.63	1.15	1.42	1.56	1.58	1.66
Jardines de Payo Obispo	Cochuan	359809.636	2048263.85	0.44	0.47	0.58	0.64	0.67	0.76
	Ecab	359632.97	2048172.11	0.9	1.6	1.72	1.78	1.81	1.89

Tabla 8.12 Evolución de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno (continuación)

Colonias	Calles	x	y	Periodo de retorno					
				2	5	10	25	50	100
				Tirante máximo (m)					
Forjadores	Manuel Ríos Norman	359234.956	2047841.64	0.59	0.82	0.83	0.84	0.85	0.87
	Melquiades A. Borges	359457.666	2047950.22	0.29	0.32	0.33	0.34	0.35	0.38
	Darío Guerrero	359303.075	2047556.36	0.29	0.31	0.32	0.34	0.35	0.39
	Santana Hernández	359324.524	2047494.11	0.28	0.3	0.31	0.33	0.34	0.39
Milenio	4	358686.282	2047536.56	0.39	0.49	0.62	0.84	1	1.1
	Siglo XX	358662.268	2047622.38	0.39	0.49	0.62	0.84	1	1.1
Jardines	Claveles	360470.284	2047278.12	0.35	0.37	0.39	0.42	0.44	0.52
	Limonarias	360491.323	2046962.35	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.34
	Tréboles	360692.973	2046944.9	0.4	0.45	0.49	0.53	0.57	0.71

8.12. ÁREAS DE INUNDACIÓN

A fin de establecer las áreas de inundación con el objeto de conocer las colonias con una mayor cobertura de agua de lluvia, se toma como datos de partida los escenarios generados a partir del modelo de simulación hidráulica y se hace el cálculo para un periodo de retorno de 10 años, debido a que es el periodo que recomienda la CONAGUA para el diseño de obras pluviales ver Tabla 8.13.

Tabla 8.13 Áreas de inundación por colonias

No.	Colonia	Área (ha)
1	Zona de Granjas	20.99
2	Col. Adolfo López Mateos	14.85
3	Col. Centro	14.04
4	Col. Proterrito	9.97
5	Col. Barrio Bravo	8.95
6	Col. Plutarco E. Calles	8.32
7	Col. Constituyentes	7.27
8	Aeropuerto	5.24
9	Fracc. Arboledas II Etapa y Sector B	4.96
10	Fracc. Flamboyanes	4.53
11	Col. David Gustavo	4.51
12	Fracc. Caribe I, II, III, IV, V, VI Etapa	4.50
13	Col. Solidaridad	4.49
14	Col. Andrés Quintana Roo	3.32
15	Col. Venustiano Carranza (Las Casitas)	3.03
16	Col. Leona Vicario	2.79

Tabla 8.13 Áreas de inundación por colonias (continuación)

No.	Colonia	Área (ha)
17	Bodega Aurrera Constituyentes	2.59
18	Fracc. Club Residencial Andaras	2.58
19	Col. Industrial	2.43
20	Fracc. Reforma	2.39
21	Col. Del Bosque	2.35
22	Col. 5 de Abril	2.26
23	Col. Pacto Obrero Campesino	2.13
24	Col. Primera Legislatura	1.96
25	Col. Antorchista	1.86
26	Fracc. Campestre	1.86
27	Col. Italia	1.86
28	Bachilleres II	1.85
29	Infonavit Aarón Merino Fernández	1.78
30	Col. Josefina Ortiz de Domínguez	1.38
31	Infonavit Fidel Velázquez	1.37
32	Col. Payo Obispo	1.23
33	Col. S.A.H.O.P.	1.22
34	Fracc. Las Américas I Etapa	1.14
35	Grupo Domos ABC Zona Industrial	1.14
36	Col. Asefradero	1.13
37	Col. Lagunitas	1.12
38	Col. Ley Federal del Agua	1.12
39	Col. Isabel Tenorio	1.07
40	Col. Territorio Federal de Q. R.	0.99
41	Col. Forjadores	0.98
42	Col. Tamañab (NUEVO PROGRESO)	0.87
43	Col. Jardines de Payo Obispo	0.84
44	Fracc. Milenio	0.82
45	Fracc. Sian Kaan I Etapa	0.79
46	Fracc. Proterritorio, I, II, III, IV, V, VI, VII y VIII	0.78
47	SORIANA	0.75
48	Col. Jardines	0.75
49	Col. Fracc. Los Monos	0.74
50	Infonavit Santa María	0.73
51	Fracc. Oxtan Kah I y II Etapa	0.72
52	Col. Ampliación Proterritorio	0.65
53	Col. 8 de Octubre	0.64
54	Col. Francisco J. Mújica	0.63
55	Fracc. Arboledas	0.57
56	Fracc. Villas Universitarias	0.56
57	ZOOLOGICO	0.54

Tabla 8.13 Áreas de inundación por colonias (continuación)

No.	Colonia	Área (ha)
58	Conjunto Habitacional Lomas del Caribe	0.53
59	Fracc. Mediterráneo I, II y III Etapa	0.48
60	Col. Lázaro Cárdenas	0.47
61	Col. Benito Juárez	0.46
62	Fracc. Nueva Generación	0.45
63	Fracc. Sian Kaan II Etapa	0.43
64	Itch	0.42
65	Col. Jesús Martínez Ross	0.39
66	Fracc. Del Mar I y II	0.39
67	Infonavit Villas de Chetumal	0.37
68	Plaza las Américas	0.34
69	Residencial Caribe	0.31
70	Fracc. La Sabana	0.30
71	Col. 20 de Noviembre	0.27
72	Fracc. La Isla	0.26
73	Col. Naval	0.23
74	Fracc. Bahía	0.20
75	Col. Taxistas	0.20
76	Ciudad de los Niños	0.20
77	Fracc. Gonzalo Guerrero	0.19
78	Col. Guadalupe Victoria	0.18
79	Col. ISSSTE	0.18
80	Fracc. Bosques del Lago	0.17
81	Infonavit Enrique Ramírez y Ramírez	0.17
82	Fracc. Bugambilias	0.16
83	SECRETARIA DE MARINA	0.14
84	Col. Miraflores	0.14
85	Parque Ecológico	0.14
86	Infonavit Emancipación	0.13
87	Fracc. Félix González Canto	0.12
88	Fracc. Hacienda Chetumal	0.12
89	PLAZAS COMERCIALES	0.11
90	Col. Nuevo Progreso	0.10
91	Col. López Portillo	0.10
92	Col. Rafael E. Melgar	0.09
93	Fracc. El Encanto	0.08
94	Fracc. Payo Obispo VI Etapa	0.08
95	Fracc. Brisas	0.08
96	Col. FOVISSTE	0.06

Tabla 8.13 Áreas de inundación por colonias (continuación)

No.	Colonia	Área (ha)
97	Fracc. Aeropuerto	0.06
98	Fracc. Cumbres	0.06
99	Fracc. Tampico	0.05
100	Fracc. Payo Obispo III y IV Etapa	0.03
101	Fracc. Rojo Gómez II Etapa	0.03
102	Fracc. Cedros	0.03
103	Fracc. Miraflores	0.03
104	TELMEX	0.03
105	Fracc. Sian Kaan III Etapa	0.02
106	Fracc. Plutarco E. Calles	0.01
107	Fracc. Kinichna	0.01
108	Fracc. Maya Real	0.01
109	Fracc. Rojo Gómez I Etapa	0.01
110	Col. Militar	0.01
111	Multiplaza Chedraui	0.00
112	Fracc. Mediterráneo I, II y III Etapa	0.00

8.13. ACCIONES IDENTIFICADAS

A partir de los datos obtenidos la acción a realizar es diseñar y construir obra pluvial en las zonas más vulnerables de Chetumal, la Tabla 8.13 presenta las 15 colonias que deben ser atendidas con mayor prioridad para poder aminorar las áreas y tirantes de inundación.

Toma en consideración los mapas de tirantes de máximo de inundación se pueden establecer las zonas a las cuales no se deben de realizar construcciones urbanas, debido a su naturaleza de ser zonas de retención del agua de lluvia. Es importante tomar estos mapas en cuenta, para establecer zonas de crecimiento donde se tenga una mayor seguridad en el desplante de nuevos desarrollos urbanos.

Con el estudio del IMTA del año 2012, se propuso un colector denominado Gran Canal, se debe determinar hasta la zona denominada soriana, para desalojar el agua de uno de los puntos más críticos de la ciudad.

8.14. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.

- El modelo de simulación se construyó a base de un MDE, la planimetría de la ciudad, caracterización geomorfológica de las microcuencas y el drenaje pluvial; tomando como condicional inicial lluvias de proyecto que van de los 2 a los 100 años de periodo de retorno, para poder generar el sentido y dirección del flujo superficial de todos los escenarios

- La CONAGUA recomienda para la construcción de obras pluviales el periodo de retorno de 10 años, por lo tanto se requiere de un estudio costo beneficio para conocer que puede resultar viable, construir nueva infraestructura o reparar el daño causado por el fenómeno hidrometeorológico. El daño estructural de viviendas asciende a 34.76 millones de pesos
- Con el análisis del Índice Contra Inundaciones (ICI) se puede establecer que para un periodo de retorno de 10 años (recomendación de la CONAGUA para el diseño de obras pluviales), se presenta una población de 13 309 habitantes con riesgo potencial de sufrir problemas relacionados con las inundaciones en la ciudad de Chetumal
- Uno de los problemas recurrentes al tiempo de las precipitaciones intensas es la afectación vial, de acuerdo con el modelo de simulación hidráulica para un periodo de retorno de 10 años, se tienen problemas en el 11.8 % de total de vialidades de la ciudad, esto puede llegar a acrecentarse casi al doble (Tr 100 años)
- De acuerdo con el mapa de tirantes máximos se presentan para una lluvia vinculada a un periodo de retorno de 10 años, en la ciudad de Chetumal se tiene tirantes del orden de 0.27 a 2.02 m.
- Se calcularon las áreas de inundación para una lluvia vinculada a un periodo de retorno de 10 años, con esto se tienen 15 colonias que requieren ser atendidas mediante obras estructurales que permitan mitigar las inundaciones que se presentan
- A pesar de la infraestructura pluvial que se ha construido, se tienen problemas de inundaciones debidas en gran parte a la configuración topográfica de la ciudad, sin embargo se requiere de más obras estructurales para poder mitigar el problema de las inundaciones.

Se requiere de un plan de rehabilitación de colectores pluviales debido a las obstrucciones por basura o colapso de la tubería que presenta recurrentemente.

8.14.1. RECOMENDACIONES

- Realizar un levantamiento topográfico a detalle de toda la zona urbana para poder detallar zonas más específicas de inundación, ya que se trabaja con un MDE de 20 x 20 m
- Terminar la construcción del canal que va de la Soriana y descargará al mar, que permita desalojar agua que se anega en la zona, mejorando el entorno del agua con la sociedad
- No realizar construcciones donde el mapa de tirantes máximos presentan manchas de inundación en áreas verdes, para evitar que se tengan más problemas urbanos en zonas donde se presentan problemas.
- A partir de los mapas de riesgo por inundación, establecer un plan de emergencias contra inundaciones en la zona urbanas de la ciudad, para poder reducir los problemas de inundación
- Evaluar la factibilidad de apoyo en la operación del canal de desalojo con la construcción de un tanque tormenta equipado con las bombas autocebantes, para amortiguar los volúmenes excedentes que se presentan en la zona de soriana



BIBLIOGRAFÍA

Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A., 2011, Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico: *Geomorphology* 135, 308-321.

Blair, R.W., 1986, Karst Landforms and Lakes (en línea) NASA, *Geomorphology from Space*, Chapter 7, <<http://disc.gsfc.nasa.gov/geomorphology/>>.

Blum J.D., Chamberlain C.P., Hingstone M.P., Koerber C., Marin L.E., Schuraytz B.C., Sharpton V.L., 1993, Isotopic comparison of K/T boundary impact glass with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures. *Nature* 364: 325-327.

Bonet, F., Butterlin, J. 1962, Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula, Guide Book: Field Trip to Peninsula of Yucatan: USA, New Orleans, New Orleans Geological Society, 52-57.

Butterlin, J. (1958). Reconocimiento Geológico Preliminar del Territorio de Quintana Roo. IN SPANISH. Preliminary Geological Reconnaissance of The Quintana Roo Territory.

Campa, M. F., Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.

CAPA (2015A) Información resguardada en el área de planeación, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Quintana Roo.

CAPA (2015B) Información resguardada en la base de datos del área de técnica, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Quintana Roo.

CAPA (2015C) Información resguardada en la base de datos en la dirección de Gestión Ambiental, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Quintana Roo.

Castillo, V (2004). Chetumal: modelo de desarrollo urbano en el trópico húmedo mexicano. *Revista Cesla* 2004. Uniwersytet Warszawski, Polonia.

Cenapred (2004). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Centro Nacional de Prevención de desastres, México D.F. pp. 380-390.

Cenapred (2010) Mapas de precipitación para diferentes duraciones y periodos de retorno. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México DF.

Cisneros, R; García, F; y Lopez, M. (2008). Alcantarillado Sanitario y Pluvial para tuberías corrugadas de polietileno de alta densidad. Primera edición. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México.

COESPO Quintana Roo (2013). Consejo Estatal de Población de Quintana Roo para el 2013. Coespo.qroo.gob.mx/

Covadonga noticias (2012). Fuertes lluvias dejan inundaciones y caos en Chetumal. Recuperado el 16 de agosto del 2012 de covadonganoticias.com

Custodio, E. y M. R., Llamas (1976). "Hidrología Subterránea", Ediciones Omega, Barcelona.

Dengo, G.. 1985, Mid America; Tectonic setting for the pacific margin from southern Mexico to northwestern Colombia; in Nairn, A.E.M, Stehli, F.G.(eds.) The oceanic Basins and Margins, v. 7ª. The Pacific Ocean: New York, Plenum Press, p. 123-180

Driscoll, G.F. (1986). "Groundwater and Wells. Johnson Division, St. Paul, Minn.

El Diario de Yucatán (2013). Inundaciones en Chetumal por la onda tropical 15. Recuperado el 24 de agosto del 2013 de yucatan.com.mx

El informador.mx (2010). Tormenta "Karl" golpea costas mexicanas. Recuperado el 15 de septiembre del 2010 de www.informador.com.mx

El informador.mx (2011). Onda tropical provoca inundaciones en Chetumal. Recuperado el 19 de del 2011 de www.informador.com.mx

El Universal (2012). Chetumal, en riesgo de inundaciones: Conagua. Recuperado el 23 de mayo del 2012 de archivo.eluniversal.com.mx

ERIC II (Extractor rápido de información climatológica v.2.0) (1999), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, versión disco compacto.

Flores, G. (1952). Geology of Northern British Honduras: GEOLOGICAL NOTES. AAPG Bulletin, 36(2), 404-409.

Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., & Pereira, A. (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(1), 127-137.

Freeze, R. A., y J.A. Cherry (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

Gestenhauer, Armin, 1969, Eln Karst morphologischer Vergleich zwischen, Florida and Yucatán: *Verhandlungen der deutschen Geographentages*, v. 36, p. 332-341.

Heath, R.C (1982). *Basic Ground-Water-Hydrology*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2004), extraído de la página web <http://www.inegi.gob.mx>

INEGI. (2015). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Obtenido de <http://www.inegi.gob.mx>

Keppie, J. D., 2004, Terranes of Mexico revisited: 1.3 billion year odyssey: *International Geology Review*, 46, 765-794.

La jornada (2010). Riesgo de inundación en Chetumal. Recuperado el 30 de Septiembre del 2010 de www.jornada.unam.mx

Lugo-Hubp, H.J., Aceves-Quesada, J.F., Espinoza-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, 10(2), 143-150.

MAPAS (2015) *Drenaje pluvial urbano, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua, México D.F.

MAPAS (2015A) *Alcantarillado Sanitario, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 20. Comisión Nacional del Agua, México D.F.

MAPAS (2015B) *Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 4. Comisión Nacional del Agua, México D.F.

Morán-Zenteno, D. J., Cerca, M., & Keppie, J. D. (2005). La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 319-341.

Ortega-Gutiérrez, F., Elies_Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macias-Romo, C., López, R., 1999, Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections: *Geology*. 27(8): p. 719-722.

Ortega-Gutiérrez, F., Solari L.A., Ortega-Obregón C., Elías-Herrera M. Martens U., Morán-Icál S., Chiquín M., Keppie D.J., Torres de León. Y Shaaf P., 2007, The Maya Chortis Boundary: A tectonostratigraphic approach. *International Geology Review*, v. 49, p. 1-29.

PDU (2005) Programa de Desarrollo Urbano del municipio de Othón P. Blanco del estado de Quintana Roo 2005 .México

Ramos, E. L. (1975). Geological summary of the Yucatan Peninsula. In *The Gulf of Mexico and the Caribbean* (pp. 257-282). Springer US.

Ribera, L. R. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Doc. Anál. Geogr.* 43, 18.

Rodríguez V., J. M., Maldonado S., J., Albornoz G., P. M., & Alcocer Y., V. H. (2012). Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Jiutepec, Morelos, clave interna HC1235.3; IMTA

Rodríguez J., Alcocer-Yamanaka V., Albornoz P., Santos R. y Llaguno O. (2015). Estudio de Riesgo de inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana. Jiutepec: Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua, CONAGUA, CONACYT, IMTA

Sapper, R. (1894). Informe sobre la geografía física y la geología de los estados de Chiapas y Tabasco. *Agricultura, Minería e Industria, Boletín*, 3, 187-211.

SARH, (1990) "Sinopsis Geohidrológica del Estado de Quintana Roo", Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión Nacional del Agua; Subdirección General de Administración del Agua; Gerencia de Aguas Subterráneas.

SDP noticias (2011). Reportan inundaciones en Chetumal tras lluvias. Recuperado el 18 de junio del 2001 de www.sdpnoticias.com

SEDUMA (2016) Programa de ordenamiento ecológico local. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, Municipio de Othón P. Blanco, Chetumal.

Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., Speed, C., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 p.

SGM, 2005. Carta geológico-minera E16-4-7 (Chetumal) escala 1:250 000. Geología y Geoquímica del Servicio Geológico Mexicano.

