



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE OBRAS PARA MITIGAR LAS INUNDACIONES EN LA CIUDAD
DE TAPACHULA, CHIAPAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LILIANA ERNESTINA CRUZ GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANIS
FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ	
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA	INSTITUTO DE INGENIERÍA
M. I. VÍCTOR FRANCO	INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ	INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES	INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, DICIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES
Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
1^{er}. Vocal: DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANIS
2^{do}. Vocal: M. I. VÍCTOR FRANCO
3^{er}. Vocal: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM. CAMPUS C.U.

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANIS



FIRMA

A mi madre, Gloria, que gracias a usted mis sueños se hicieron realidad, gracias por todo el apoyo incondicional, por sus consejos, por creer en mí y por su infinito amor, te amo.

A mi padre, Mauro, por los valores que me ha inculcado, por apoyarme a lo largo de mi vida, por creer en mí y por su infinito amor, te amo.

A mis hermanas, Jazmín e Italy, por formar parte importante de mi vida y por estar ahí cuando las necesito, las quiero y las amo.

A mis dos sobrinitos, Santiago y Jazmín, porque desde su llegada han hecho de mi vida la más plena y feliz.

Agradecimientos

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos más difíciles y por brindarme salud para lograr mis objetivos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas para realizar el posgrado en ingeniería, un sueño hecho realidad.

Al Dr. José Luis Herrera Alanís por compartir su conocimiento y apoyarme en las dudas que surgieron a lo largo de esta tesis, muchas gracias.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora por todo el apoyo brindado desde que llegue al Instituto de Ingeniería, por compartir su conocimiento y por ser una excelente persona, infinitas gracias.

A la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez por todo el apoyo brindado durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería, por su tiempo y dedicación a cada uno de sus alumnos, muchas gracias.

Al Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles y al M. I. Víctor Franco por la revisión y aportaciones a esta tesis.

A mi amigo Mario Roldan porque desde el primer día en que nos conocimos me brindo su ayuda y con el paso de los días su amistad, gracias por todos esos días de risas y enseñanzas nuevas a tu lado.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería: Daniel, Josué, Brenda, Luis Enrique (Quiquis) y Rolando, porque con ustedes tuve una estancia muy divertida y feliz en el cubículo. Nunca olvidare todos esos días de risas y diversiones que pasamos juntos, muchas gracias por todos esos momentos.

Al Instituto de Ingeniería por ser parte de mi formación profesional, por el apoyo técnico y económico proporcionado durante mi estancia.

Al CONACyT por el apoyo económico proporcionado durante mis estudios de maestría.



RESUMEN

Debido a sus condiciones geográficas, México experimenta el embate de una gran variedad de fenómenos naturales, entre ellos los de tipo hidrometeorológicos, tales como ciclones tropicales, frentes fríos, entrada de aire húmedo. Estos últimos, ocasionan lluvias intensas que pueden provocar inundaciones, deslaves u otros de esta naturaleza.

La ciudad de Tapachula es la segunda en importancia del estado de Chiapas, por su tamaño de población, economía y ubicación en la frontera sur de México. Esta ciudad se ve sujeta a procesos recurrentes de inundaciones provocadas por el desbordamiento de ríos, que han causado pérdidas de vidas humanas y materiales. Es por ello que en este análisis se pretende estudiar los niveles de peligro por inundación y analizar obras de mitigación para el control de inundaciones debido al desbordamiento del río Coatán.

Para llevarlo a cabo se necesita de un estudio hidrológico e hidráulico. En el primero se obtienen las avenidas asociadas a distintos periodos de retorno y en el segundo, se requiere de la simulación del comportamiento del cauce para obtener las áreas susceptibles a ser inundadas, para esta parte se utilizó el Software HecRAS.

Palabras clave: inundaciones, Software HecRAS, río Coatán, estudio hidrológico y estudio hidráulico.



Abstract

Due to its geographical conditions, Mexico experiences the onslaught of a wide variety of natural phenomena, including hydrometeorological phenomenon, such as tropical cyclones, cold fronts, humid air entry. The latter cause heavy rains that can cause floods, landslides or others effects of this nature.

The city of Tapachula is the second largest in the state of Chiapas, due to its population size, economy and location on the southern border of Mexico. This city is subject to recurring flooding processes caused by the overflow of rivers, which have caused human and economic loss. For this reasons this analysis aims to study flood hazard levels and analyze mitigation works for flood control due to the overflow of the Coatán River.

In order to carry out it needed a hydrologic and hydraulic study. In the first one, the avenues associated with different return periods are obtained and in the second, the simulation of the channel behavior is required to delimit the areas susceptible to flooding with the HecRAS Software.

Keywords: floods, HecRAS Software, Coatán River, hydrological study and hydraulic study.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1. ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES	4
1.1.1. Clasificación de las inundaciones de acuerdo con su origen	4
1.1.2. Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de la cuenca ..	7
1.2. CONSECUENCIAS DE LAS INUNDACIONES	8
2. ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	10
2.1. CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS DE LA CUENCA.....	10
2.1.1. Área de la cuenca (AC).....	11
2.1.2. Corriente principal y corrientes tributarias	11
2.1.3. Orden de corrientes.....	11
2.1.4. Longitud y pendiente media del cauce principal.....	11
2.1.5. Tiempo de concentración	12
2.2. PERIODO DE RETORNO.....	12
2.3. AVENIDAS DE DISEÑO.....	13
2.3.1. Manejo de datos hidrométricos	14
2.3.2. Análisis de eventos hidrológicos	15
2.3.2.1. Técnica de mayoración de la avenida más adversa.....	15
3. ESTUDIO HIDRÁULICO	17
3.1. MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	17
3.1.1. Modelación unidimensional (1D).....	17
3.1.2. Modelación bidimensional (2D)	18
3.1.3. Modelación tridimensional (3D).....	18
3.2. HEC - RAS.....	19
3.2.1. Capacidades y ventajas de la modelación de flujo 2D con HEC-RAS	22
3.2.2. Limitaciones de la modelación de flujo 2D con HEC-RAS.....	23
4. PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO	24
4.1. PELIGRO	24
4.1.1. Criterio del Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Government	24
4.2. VULNERABILIDAD	25
4.2.1. Tipología de la vivienda	25
4.2.2. Índice de vulnerabilidad.....	28



4.2.3.	Tipificación del menaje y funciones de vulnerabilidad.....	29
4.3.	RIESGO	34
5.	OBRAS DE PROTECCIÓN PARA CONTROL DE INUNDACIONES.....	37
5.1.	CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE OBRA.....	37
6.	ZONA DE ESTUDIO	40
6.1.	ANTECEDENTES	40
6.1.1.	Huracán STAN, 2005.....	43
6.1.1.1.	Daños ocasionados por el huracán Stan en Chiapas.....	45
6.2.	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	46
6.2.1.	Información fisiográfica.....	47
6.2.2.	Información hidrométrica	50
6.3.	ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	54
6.3.1.	Fisiografía de la cuenca	55
6.3.2.	Pruebas de homogeneidad	58
6.3.2.1.	Prueba estadística de Helmer.....	58
6.3.2.2.	Prueba estadística t de Student	58
6.3.2.3.	Prueba estadística de Cramer	60
6.3.3.	Prueba de Independencia	61
6.3.4.	Análisis de frecuencias de avenidas	63
6.3.5.	Hidrogramas de avenidas históricas en la estación hidrométrica Mal Paso .	66
6.3.6.	Método de Mayoración	68
6.4.	ANÁLISIS HIDRÁULICO	69
6.4.1.	Desarrollo de un modelo de terreno	69
6.4.2.	Desarrollo de la Malla computacional 2D	71
6.4.3.	Creación de la capa de rugosidad de Manning espacialmente variada	71
6.4.4.	Condiciones de frontera del área de flujo 2D.....	72
6.4.5.	Ejecución del modelo 2D.....	74
6.4.6.	Resultados.....	75
6.5.	PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO	80
6.5.1.	Determinación del Peligro	80
6.5.2.	Evaluación de la vulnerabilidad física	85
6.5.3.	Evaluación del riesgo.....	94
6.6.	ANÁLIS DE OBRA DE PROTECCIÓN	98



6.6.1.	Laguna de regulación	98
6.6.2.	Bordos de protección	102
6.6.3.	Alternativas de obras no estructurales.....	107
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Inundación pluvial causada por intensas lluvias en agosto de 2018. 5

Figura 1.2 Inundación fluvial en Huixtla, Guerrero por el desbordamiento del río Huixtla en 2005. 5

Figura 1.3 Inundación lacustre en Tixtla de Guerrero, Guerrero. Fuente: Google Earth, 2019. 6

Figura 1.4 Incremento del nivel medio del mar en Yucatán causado por el huracán Isidore en 2002. 6

Figura 1.5 Colapso del río de la Piedad en 2011..... 7

Figura 2.1 Ejemplos de cuencas endorreicas y exorreicas. 10

Figura 2.2 Estaciones hidrométricas en 2017. Fuente: CONAGUA, 2018..... 14

Figura 3.1 Esquema de modelos hidráulicos 1D (x), 2D (x, y) y 3D (x, y, z). Fuente: Vázquez, 2003. 19

Figura 4.1 Menaje para la vivienda tipo I (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006. 30

Figura 4.2 Menaje para la vivienda tipo II (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006. 31

Figura 4.3 Menaje para la vivienda tipo III (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006. 31

Figura 4.4 Menaje para la vivienda tipo IV (dos plantas). Fuente: CENAPRED, 2006. 32

Figura 4.5 Menaje para la vivienda tipo V (dos plantas). Fuente: CENAPRED, 2006. 33

Figura 4.6 Curva de daños asociada a diferentes probabilidades de excedencia. Fuente: Solís et al., 2014. .. 36

Figura 6.1 Ubicación de la ciudad de Tapachula de Córdoba y Ordóñez. Elaboración propia. 40

Figura 6.2 Trayectorias de ciclones en la zona de estudio. Fuente: CENAPRED, 2018..... 42

Figura 6.3 Trayectoria del Huracán Stan del 1 al 5 de octubre de 2005. Elaboración propia. 43

Figura 6.4 Antes y después del desbordamiento del río Coatán, Chiapas. Fuente Google Earth, 2018. 44

Figura 6.5 Topografía en la zona de estudio..... 47

Figura 6.6 Red hidrográfica y cuerpos de agua en Tapachula. 47

Figura 6.7 Uso y cobertura vegetal del suelo 48

Figura 6.8 Tipo de suelo en Tapachula 48

Figura 6.9 Modelo Digital de Elevación con resolución de 15x15 metros..... 48

Figura 6.10 Modelo Digital de Terreno LiDAR con resolución de 5x5 metros..... 49

Figura 6.11 Cuenca del río Coatán. Elaboración propia. 50

Figura 6.12 Localización de la estación hidrométrica “Malpaso”. Elaboración propia. 51

Figura 6.13 Cuencas hidrológicas de la RH 23 Costa de Chiapas. Elaboración propia..... 54

Figura 6.14 Delimitación de la cuenca hidrológica a la estación hidrométrica Mal Paso. Elaboración propia. 55

Figura 6.15 Configuración del sistema de referencia espacial del proyecto. 70

Figura 6.16 Modelo de terreno para la ciudad de Tapachula, Chiapas. 70

Figura 6.17 Área 2D para simular el río Coatán en la ciudad de Tapachula, Chiapas..... 71

Figura 6.18 Uso de suelo y valores de rugosidad n de Manning en la ciudad de Tapachula, Chis. 72

Figura 6.19 Determinación de las condiciones de frontera en la zona de estudio. 73

Figura 6.20 Condiciones de frontera para el río Coatán..... 74

Figura 6.21 Ventana de análisis de flujo inestable para el área 2D. 75

Figura 6.22 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 5 años..... 76

Figura 6.23 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 5 años. 76

Figura 6.24 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 10 años..... 76

Figura 6.25 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 10 años. 77

Figura 6.26 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 50 años..... 77

Figura 6.27 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 50 años. 77

Figura 6.28 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 100 años..... 78

Figura 6.29 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 100 años. 78

Figura 6.30 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 500 años..... 78

Figura 6.31 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 500 años. 79

Figura 6.32 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 1000 años..... 79

Figura 6.33 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 1000 años. 79



Figura 6.34 Conversión del raster de tirante a un shape de puntos para el $Tr = 100$	80
Figura 6.35 Conversión del raster de velocidad a un shape de puntos para el $Tr = 100$	80
Figura 6.36 Extracción de los datos de la tabla de atributos a Excel.	81
Figura 6.37 Pareja de puntos (Tirantes, Velocidades) para cada punto de extracción.	82
Figura 6.38 Combinaciones de puntos de tirantes y velocidades sobre el Nomograma de Dorrigo.	82
Figura 6.39 Clasificación de los niveles de peligro para el periodo de retorno de 100 años.	83
Figura 6.40 Mapa de peligro por inundación en la ciudad de Tapachula para un $Tr = 100$ años.	84
Figura 6.41 Peligro por inundación en las casas aledañas al río Coatán.	84
Figura 6.42 Cobertura de imágenes panorámicas a lo largo de las calles. Fuente: Google Earth, 2019.	85
Figura 6.43 Cobertura de casas levantadas con Street View de Google Earth.	87
Figura 6.44 Formato de la información contenida en la base de datos del Censo de población y vivienda para Tapachula, Chiapas.	88
Figura 6.45 Base de datos sobre materiales de construcción para Tapachula, Chiapas.	89
Figura 6.46 Tipo de material para paredes asociado a un número.	90
Figura 6.47 Tipo de material para techos asociado a un número.	90
Figura 6.48 Shapefile de manzanas para la ciudad de Tapachula.	91
Figura 6.49 Identificación de la vulnerabilidad por manzana.	91
Figura 6.50 Mapa de vulnerabilidad en la ciudad de Tapachula, Chiapas.	92
Figura 6.51 Índice de vulnerabilidad para cada tipo de manzana con base en el tirante.	94
Figura 6.52 Excel donde se muestra el cálculo del porcentaje de área inundada para un $Tr=100$ años.	95
Figura 6.53 Ubicación de la zona en donde se pondrá la laguna de regulación.	99
Figura 6.54 Laguna de regulación con la herramienta HecRAS.	100
Figura 6.55 Tirantes de inundación para un $Tr = 100$ años con laguna de regulación.	100
Figura 6.56 Ubicación del muro de protección sobre la margen izquierda del río Coatán.	103
Figura 6.57 Bordo de protección en la margen izquierda del río con HecRAS.	104
Figura 6.58 Simulación hidráulica para un $Tr = 100$ años considerando bordo de protección.	104
Figura 6.59 Comparación de la simulación hidráulica con $Tr=100$ años en la condición actual y con bordo de protección.	105
Figura 6.60 Combinación de puntos de tirantes y velocidades sobre el Nomograma de Dorrigo para un $Tr = 100$ años.	106



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Relación de los niveles de peligro en función de la profundidad y la velocidad en el caso de estudio de Dorrigo	25
Gráfica 4.2 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo I. Fuente: CENAPRED, 2006.	30
Gráfica 4.3 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo II. Fuente: CENAPRED, 2006.	31
Gráfica 4.4 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo III. Fuente: CENAPRED, 2006.	32
Gráfica 4.5 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo IV. Fuente: CENAPRED, 2006.	33
Gráfica 4.6 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo V. Fuente: CENAPRED, 2006.	34
Gráfica 6.1 Perfil del río Coatán hasta la estación hidrométrica Mal Paso. Elaboración propia.	57
Gráfica 6.2 Correlograma de la estación hidrométrica Mal Paso.	63
Gráfica 6.3 Comparación entre los valores medidos y los calculados con la función Doble Gumbel.	65
Gráfica 6.4 Avenida junio de 1954	66
Gráfica 6.5 Avenida septiembre de 1955	66
Gráfica 6.6 Avenida septiembre de 1956	66
Gráfica 6.7 Avenida octubre de 1960	66
Gráfica 6.8 Avenida noviembre de 1961	66
Gráfica 6.9 Avenida junio de 1962	66
Gráfica 6.10 Avenida septiembre de 1963	67
Gráfica 6.11 Avenida junio de 1966	67
Gráfica 6.12 Avenida agosto de 1973	67
Gráfica 6.13 Avenida junio de 1975	67
Gráfica 6.14 Avenida agosto de 1989	67
Gráfica 6.15 Avenida octubre de 1999	67
Gráfica 6.16 Avenida octubre de 2005	67
Gráfica 6.17 Avenida junio de 2014	67
Gráfica 6.18 Hidrograma adimensional obtenido a partir de la avenida de septiembre de 1963.	68
Gráfica 6.19 Avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno en la estación Mal Paso.	69
Gráfica 6.20 Curva de daños a diferente probabilidad de excedencia.	97
Gráfica 6.21 Tirantes vs tiempo de zona inundable	101
Gráfica 6.22 Tirantes vs tiempo de zona inundable	102
Gráfica 6.23 Comparación de profundidad vs tiempo de zona inundable en un punto.	106



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Periodo de retorno en función de la zona a proteger	13
Tabla 4.1 Material en muros de viviendas.....	26
Tabla 4.2 Materiales en el techo de las viviendas.	26
Tabla 4.3 Combinaciones posibles entre el material para el techo y muros.	27
Tabla 4.4 Combinaciones para un tipo de vivienda, según el material usado en techo y muros.	27
Tabla 4.5 Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.	28
Tabla 4.6 Discretización del tipo de vivienda según el material usado en techo y muros.	28
Tabla 4.7 Menaje expuesto de acuerdo al tipo de vivienda en 2006 y 2019.	34
Tabla 5.1 Clasificación de las obras de protección contra inundaciones más comunes, por tipo.....	38
Tabla 6.1 Escala Saffir-Simpson.	41
Tabla 6.2 Huracanes que han afectado la costa de Chiapas.....	42
Tabla 6.3 Monto de daños para las viviendas rurales y urbanas.....	45
Tabla 6.4 Estación hidrométrica Mal Paso en Tapachula, Chiapas.....	51
Tabla 6.5 Registro de gastos máximos instantáneos para la estación hidrométrica Mal Paso.	52
Tabla 6.6 Registro de gastos medios diarios para la estación hidrométrica Mal Paso.....	53
Tabla 6.7 Características fisiográficas de la cuenca Mal Paso.	55
Tabla 6.8 Características fisiográficas de la red de ríos de la cuenca Mal Paso.	56
Tabla 6.9 Elevación y cadenamamiento del río Coatán.....	57
Tabla 6.10 Resultado de la prueba estadística de Helmert.	58
Tabla 6.11 Grados de Libertad de la prueba t de Student.....	59
Tabla 6.12 Resultado de la prueba estadística t de Student.	60
Tabla 6.13 Resultado de la prueba estadística de Cramer.	61
Tabla 6.14 Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad.	61
Tabla 6.15 Error Estándar de Ajuste para las diferentes distribuciones de probabilidad en la estación Mal Paso.	64
Tabla 6.16 Resultados de los parámetros de la función Doble Gumbel.....	64
Tabla 6.17 Gastos asociados a diferentes periodos de retorno.	65
Tabla 6.18 Características de las viviendas levantadas por medio del Street View en la ciudad de Tapachula, Chis.	86
Tabla 6.19 Menaje expuesto según el tipo de vulnerabilidad para 2019.....	93
Tabla 6.20 Menaje expuesto según el tipo de vulnerabilidad en caso de inundarse toda la zona urbana.	93
Tabla 6.21 Estimación de los daños para el periodo de retorno de 100 años.	95
Tabla 6.22 Estimación de los daños totales por inundación para diferentes periodos de retorno.....	96
Tabla 6.23 Calculo del daño anual esperado máximo para la ciudad de Tapachula.	97
Tabla 6.24 Daño por inundación para un $T_r=100$ años con la laguna de regulación.....	102
Tabla 6.25 Daño por inundación para un $T_r=100$ años con bordo de protección.	107
Tabla 7.1 Estimación de los daños por inundación a las viviendas en la ciudad de Tapachula, Chiapas.	109



INTRODUCCIÓN

Los desastres por fenómenos naturales son uno de los problemas inherentes al desarrollo de las civilizaciones aún sin resolver. En el caso de los de tipo hidrometeorológico (que están relacionados con el agua), los patrones de desarrollo que ignoran estos fenómenos están exponiendo a las comunidades a mayores riesgos de inundaciones y sequías. Mientras las sequías se colocan en primer lugar, en cuanto a muertes humanas se refiere, las inundaciones son la amenaza más frecuente y ocasionan mayores pérdidas económicas. Más aún, pocos países logran evitarlas. En África, por ejemplo, la sequía es el desastre más frecuente, pero las inundaciones y catástrofes relacionadas con fuertes vientos ocupan el segundo lugar (Salas, 1999).

En épocas recientes, en México se han presentado fenómenos meteorológicos con una intensidad aparentemente inusual, que han dejado huella en aquellos que lo han vivido de cerca, por los destrozos provocados. Un caso de ello es el huracán Gilberto que con intensas lluvias generó grandes avenidas en la zona Noroeste del país, principalmente en el estado de Nuevo León; otro fue Pauline que descargó más de 400 mm en unas cuantas horas, en la Costa Grande de Guerrero y parte de Oaxaca, o las inundaciones que en el año 2007 provocaron una gran inundación en el estado de Tabasco.

Estas experiencias han dejado en claro que, a pesar de los esfuerzos realizados a la fecha para enfrentar de una manera ventajosa a fenómenos de esta naturaleza, es necesario trabajar arduamente en las actividades de prevención para que los fenómenos mencionados provoquen los menores daños posibles (CONAGUA, 2013).

Para mitigar las inundaciones se realizan obras y estudios, lográndose con ayuda de la predicción de avenidas por medio de modelos físicos y matemáticos. En el caso de los modelos físicos, se tienen resultados visibles, pero requieren de un costo elevado y tiempo; los modelos matemáticos (computacionales) cada vez son más usados ya que se consideran directos y su escala es real.

En el mercado de modelos matemáticos, hay Software comercial, pero existen otros que son de uso libre, bien respaldados técnicamente y cada vez son más usados.

La ciudad de Tapachula se ve sujeta a procesos recurrentes de inundaciones por estar ubicada sobre un abanico aluvial, hacia donde concurren las aguas superficiales provenientes de los ríos Coatán y Coatancito que nacen en Guatemala. Es por esto que se considera necesario estimar y analizar el riesgo de daño ante las inundaciones provocadas, principalmente, por el desbordamiento del río (inundaciones fluviales).

El área de estudio de Tapachula fue analizada desde la perspectiva de las afectaciones causadas por el huracán Stan en octubre de 2005. Por lo que este



trabajo presenta el análisis de flujos de inundación del río Coatán con ayuda de modelos matemáticos computacionales y para su realización se hizo lo siguiente:

- Obtención de las avenidas de diseño con ayuda de los datos medidos en la estación hidrométrica de la zona de estudio y el Software AX para ajustar los parámetros de funciones de distribución.
- Análisis del funcionamiento hidráulico del río Coatán, el cual se modeló bidimensionalmente con ayuda del Software libre HecRAS.
- Generación de mapas de peligro por inundación con ayuda de los Sistemas de información Geográfica ArcGIS y QGIS.

El objetivo principal de este trabajo es analizar los efectos de posibles obras de mitigación para el control de inundaciones en la ciudad de Tapachula y así reducir el riesgo de daño a las viviendas de dicha ciudad.

Este trabajo se divide en siete partes, las cuales se mencionan a continuación:

En el capítulo 1. Estado del arte. Se menciona el significado de inundación, su clasificación de acuerdo con su origen y por el tiempo de respuesta de la cuenca, así como, las consecuencias que traen consigo, tanto beneficios como daños.

En el capítulo 2. Estudio hidrológico. Se describen los conceptos básicos para el análisis hidrológico usados en este trabajo, como la descripción de las características fisiográficas de la cuenca, periodo de retorno y las avenidas de diseño.

En el capítulo 3. Estudio hidráulico. Se describe lo que es la modelación numérica (matemáticos) unidimensional, bidimensional y tridimensional; también una breve introducción al Software libre HecRAS, mismo que se usó para este trabajo.

En el capítulo 4. Peligro, vulnerabilidad y riesgo. Se da la definición del peligro a inundaciones; la vulnerabilidad en función de la tipología de las viviendas, así como sus funciones de vulnerabilidad. También se menciona el concepto de riesgo en función del peligro y la vulnerabilidad.

En el capítulo 5. Obras de protección para control de inundaciones. En este apartado se detallan los tipos de obras y su clasificación para mitigar las inundaciones.

En el capítulo 6. Zona de estudio. Se desarrolla toda la metodología que se usó para cumplir con el objetivo de este trabajo, se divide en varias partes: recopilación de la información; realización del estudio hidrológico e hidráulico; determinación del peligro con base en la simulación hidráulica hecha con HecRAS, obtención de la vulnerabilidad física de las viviendas y evaluación del riesgo por inundación; así como el análisis de propuestas de la obra de protección para mitigar las inundaciones en Tapachula.



En el capítulo 7. Análisis de resultados. Se muestra la comparación de los daños ocasionados por el desbordamiento del río Coatán en condiciones actuales, con la propuesta de una laguna de regulación y con un bordo de protección.

Por ultimo las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó en este estudio.



1. ESTADO DEL ARTE

En el pasado, la gente vivía cerca de los ríos para aprovecharlos como medio de transporte y fuente de abastecimiento de agua para su consumo y el cultivo de sus fértiles llanuras de inundación, los hogares eran construidos en terrenos altos, para evitar afectaciones debidas a las inundaciones (CENAPRED, 2004).

El aumento de la población y la falta de prevención al establecer nuevos asentamientos, obligó a la gente a vivir en las propias llanuras de inundación, lo que a su vez provocó que los ingenieros construyeran obras de aprovechamiento o canales para desviar las aguas de los centros de población. Conforme crecía la población y sus necesidades, la infraestructura desarrollada en las partes aledañas a los cuerpos de agua también iba en aumento, lo que generaba como consecuencia el desarrollo de la comunidad. Dicha ocupación de las zonas cercanas a los ríos es uno de los principales factores que acrecienta el riesgo de inundaciones por lo que hay inversiones en todo el mundo para la construcción de diques para el control de crecidas, canales de desviación y, en general, obras de protección contra inundaciones (Salas, 1999).

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974), la definición oficial de inundación es: aumento temporal del agua por arriba del nivel normal del cauce. En este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación fuera de lo habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas de vida y materiales.

1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES

Las inundaciones se clasifican con base a su origen o al tiempo que tardan en presentarse sus efectos (CENAPRED; 2004).

1.1.1. Clasificación de las inundaciones de acuerdo con su origen

Para esta clasificación se identifican las causas de la inundación, los cuales pueden ser (CENAPRED, 2004):

Inundaciones pluviales. Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse y puede permanecer horas o días. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna

otra parte. En la Figura 1.1, se muestra la inundación en Picacho Ajusco en agosto de 2018 causada por las intensas lluvias.



Figura 1.1 Inundación pluvial causada por intensas lluvias en agosto de 2018.

Inundaciones fluviales. Se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. El agua que se desborda de los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. En la Figura 1.2 se muestra el desbordamiento del río Huixtla en 2005.



a) Localidad de Huixtla en 2018

b) Localidad de Huixtla en 2005

Figura 1.2 Inundación fluvial en Huixtla, Guerrero por el desbordamiento del río Huixtla en 2005.

Inundaciones lacustres. Es el incremento del nivel medio de un cuerpo de agua (humedales, lagos, lagunas, entre otros). Un ejemplo de este tipo de inundaciones



es la ocurrida en Tixtla, Guerrero en 2013 debido al desbordamiento de la laguna de Tixtla, Figura 1.3.



a) Tixtla de Guerrero en 2012

b) Tixtla de Guerrero en 2013

Figura 1.3 Inundación lacustre en Tixtla de Guerrero, Guerrero. Fuente: Google Earth, 2019.

Inundaciones costeras. Se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo sobre el incremento del nivel medio del mar.



Figura 1.4 Incremento del nivel medio del mar en Yucatán causado por el huracán Isidore en 2002.

Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica. Cuando la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran obras. En la Figura 1.5, se muestra la inundación provocada por el colapso del río de la Piedad (Viaducto Miguel Alemán) en 2011.



Figura 1.5 Colapso del río de la Piedad en 2011.

1.1.2. Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de la cuenca

La respuesta hidrológica de la cuenca depende de sus características fisiográficas. Se han definido dos grupos: inundaciones lentas e inundaciones rápidas. Esto significa que en cuencas cuya respuesta hidrológica es lenta se generan avenidas en un tiempo relativamente largo (de horas o días) y ocurren principalmente daños materiales. Cuando la inundación se forma en poco tiempo (desde unos cuantos minutos, hasta un par de horas) se llama inundación súbita, causando, principalmente, la pérdida de vidas humanas en zonas pobladas (CENAPRED, 2004).

Inundaciones lentas. Se presentan comúnmente en zonas donde la pendiente del cauce es pequeña o cuando la capacidad de los ríos disminuye considerablemente provocando desbordamientos que generan inundaciones en las partes aledañas.

Inundaciones súbitas. Son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Las zonas urbanas son usualmente sitios donde se presenta este tipo de avenidas, como consecuencia de la cubierta impermeable formada artificialmente por los edificios y calles.

La diferencia entre inundaciones lentas e inundaciones súbitas es el tiempo que tarda en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. Una manera de caracterizar este tiempo es mediante el *tiempo de concentración* (es igual al tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que avanza sobre la superficie desde el punto más distante de la cuenca hasta la salida de ella).



1.2. CONSECUENCIAS DE LAS INUNDACIONES

Se ha mencionado que las inundaciones pueden ocasionar tanto beneficios como daños, a continuación, se describen ambos conceptos (Maza y Franco, 1997):

a) Beneficios esperados

- Humedecen y fertilizan los terrenos. Debido a que los ríos, además de agua, transportan grandes cantidades de materia orgánica, limos y arcillas.
- Recargan los acuíferos, sobre todo si los suelos son permeables y con poca pendiente.
- Contribuyen a la supervivencia de la fauna debido al agua almacenada en las partes bajas que forman pequeñas lagunas.
- Un desbordamiento puede evitar o reducir la inundación en zonas aguas abajo que podrían estar más pobladas o tener mayor riqueza agrícola, ganadera, industrial o de servicios. Cada vez que se produce un desbordamiento del río, cierto volumen de agua se descuenta del hidrograma de la avenida que escurre a lo largo del río.

b) Daños probables

Algunos de los daños que produce una inundación tanto por el nivel que alcanza el agua como por las fuertes velocidades que ésta llegue a tener, son las siguientes:

- Pérdida de vidas humanas
- Pérdida de ganado y animales en general
- Destrucción de cultivos
- Deterioro y destrucción de bienes materiales
- Interrupción y destrucción de vías de comunicación
- Interrupción de servicios (eléctrico, telefónico, de agua potable y drenaje)
- Propagación de enfermedades

Con relación a la economía y magnitud de los daños señalados conviene distinguir tres situaciones:

1. Cuando el río se desborda anualmente o con mucha frecuencia.



2. Cuando el río se desborda con escasa frecuencia, pero conduce agua casi todo el año.
3. Cuando el río se desborda con escasa frecuencia, pero casi nunca llevan agua, excepto cuando hay avenidas.

A medida que se desarrolla una región, los daños causados por las inundaciones llegan a ser mayores que los beneficios, por lo tanto, se procura evitarlas y/o reducirlas. Al evitar las inundaciones, desaparecen las ventajas que traen consigo; sin embargo, con obras adecuadas se pueden lograr los beneficios descritos anteriormente.



2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Este análisis sirve para determinar los caudales máximos para los periodos de retorno considerados. Cuando no se cuenta con estaciones hidrométricas, el escurrimiento se obtiene a partir de las características fisiográficas de la cuenca.

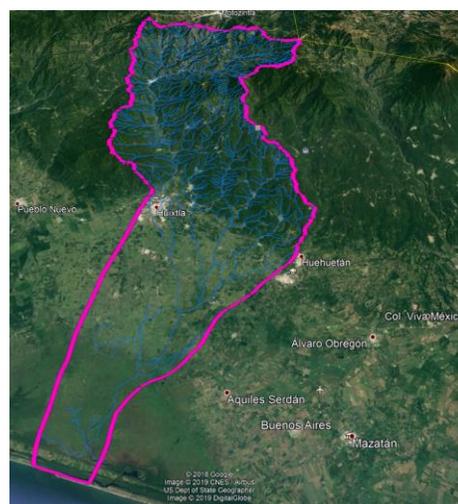
2.1. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LA CUENCA

La cuenca es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas o finalmente al océano.

Desde el punto de vista de su salida existen dos tipos de cuencas: endorreicas (cerradas) y exorreicas (abiertas). Para las cuencas endorreicas, el punto de salida se ubica dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago. El punto de salida, para las cuencas exorreicas, se localiza en los límites de la cuenca y a la vez la descarga se vierte en una corriente, lago o en el mar (Breña, 2016). En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo del tipo de cuenca.



a) Cuenca endorreica de Tixtla, Guerrero



b) Cuenca exorreica del río Huixtla

Figura 2.1 Ejemplos de cuencas endorreicas y exorreicas.

Las características fisiográficas de la cuenca se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan la precipitación y el escurrimiento: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo; y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. (Aparicio, 1992). A continuación, se describen las características de la cuenca y de los cauces más importantes.



2.1.1. Área de la cuenca (A_C)

Es la superficie medida y delimitada en proyección horizontal por el parteaguas, y tiene como punto de salida una estación de aforo o un sitio de interés.

2.1.2. Corriente principal y corrientes tributarias

Es la corriente de mayor longitud que pasa por la salida de la cuenca hidrológica. Las demás corrientes de una cuenca se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y solo una corriente principal. Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca más rápida será su respuesta a la precipitación.

2.1.3. Orden de corrientes

Se determina a partir del grado de bifurcación de las corrientes tributarias.

- a) Corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones;
- b) Corriente de orden 2 solo tiene corrientes de orden uno;
- c) Y así sucesivamente dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 2 forman una de orden 3, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc.

2.1.4. Longitud y pendiente media del cauce principal

La longitud del cauce principal se mide en km y se estima para la corriente de mayor orden de la cuenca.

La pendiente de un tramo de río es la relación que existe entre los extremos inicial y final y la distancia horizontal de dicho tramo. La pendiente de la corriente principal, representa un valor medio, ya que cada tramo de río tiene una pendiente propia. Entonces, la pendiente media del cauce principal se aproximará más al real, mientras mayor sea el número de tramos seleccionados a lo largo del cauce.

De acuerdo con el criterio de Taylor y Schwarz, se considera que el río puede estar formado por una serie de tramos de igual longitud o bien por tramos de longitud variable.

La pendiente media para tramos de igual longitud se determina con la expresión:



$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (2-1)$$

Donde S es la pendiente media del cauce adimensional; n es el número de tramos de igual longitud; y S_n es la pendiente del tramo n , adimensional.

La pendiente media para tramos de longitud variable se calcula con la ecuación:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (2-2)$$

Donde S es la pendiente media del cauce adimensional; L es la longitud total del río, en metros; l_n es la longitud del tramo n , en metros; y S_n es la pendiente del tramo n , adimensional.

2.1.5. Tiempo de concentración

Se define como la diferencia temporal entre el inicio de la lluvia hasta el momento en que se establece el gasto de equilibrio. Es igual al tiempo de viaje de una onda que avanza desde el punto más distante de la cuenca hasta su salida.

Kirpich encontró que el tiempo de concentración es una función que depende básicamente de dos variables L_{CP} y S_{CP} .

$$t_c = 0.0003455 \left(\frac{L_{CP}}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (2-3)$$

Donde t_c es el tiempo de concentración en horas; L_{CP} es la longitud del cauce principal en metros; y S es la pendiente del cauce principal adimensional.

2.2. PERIODO DE RETORNO

Se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. El periodo de retorno se reporta en años y se considera como el inverso de la probabilidad del m -ésimo evento máximo anual de los n años de registro.



El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($hp_{m\acute{a}x}$ o $Q_{m\acute{a}x}$) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor con un periodo de retorno asignado con la ecuación de Weibull:

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \tag{2-4}$$

Y una probabilidad de no excedencia:

$$p = 1 - \frac{1}{T} \tag{2-5}$$

Donde n es la longitud en años del registro analizado; m es el número de orden del registro; y m el número de parámetros de la distribución ajustada.

El periodo de retorno con el cual debe calcularse la avenida de diseño para una estructura se selecciona con ayuda de la Tabla 2.1 en función del tipo de zona a proteger.

Tabla 2.1 Periodo de retorno en función de la zona a proteger

Características de la zona por proteger	Tr en años
Parcelas agrícolas aisladas, sin posible pérdida de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riesgo de pérdida de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	1000

Fuente: CONAGUA, 2011

Para la selección de la avenida de diseño, se requiere del análisis hidrológico que lo fundamente y con base en éste hacer el análisis económico del problema. Conforme se incrementa el tamaño de la avenida de diseño, el costo de la obra aumenta y al mismo tiempo, la probabilidad de exceder la avenida disminuye.

2.3. AVENIDAS DE DISEÑO

Para determinar teóricamente la avenida de diseño, existen diferentes métodos propuestos por investigadores que pueden estimarse con base en información fisiográfica disponible de la cuenca. En este sentido, si existen registros de hidrogramas en el punto de estudio, entonces bastaría con un estudio del análisis estadístico hidrológico de gastos y volúmenes de los hidrogramas. Si no se cuenta con la información hidrométrica en el sitio del proyecto o en otro sitio dentro de la cuenca, se procede a la aplicación de un modelo lluvia-escorrentamiento, en el cual, se determinan los valores de lluvias de diseño y se consideran las condiciones



fisiográficas de la cuenca hidrológica, para determinar los hidrogramas de diseño; es decir, la avenida de diseño, caracterizada por su volumen, su tiempo y gasto pico.

2.3.1. Manejo de datos hidrométricos

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana (CONAGUA, 2019).

Las estaciones hidrométricas son las encargadas de medir la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal es generado originalmente por la precipitación pluvial (CONAGUA, 2018).

Al 31 de diciembre de 2017, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) opera 855 estaciones hidrométricas, en la Figura 2.2 se muestra la distribución de todas estas.



Figura 2.2 Estaciones hidrométricas en 2017. Fuente: CONAGUA, 2018.



La información que se puede encontrar en cada estación hidrométrica es:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) del día 1 al día 29-31.
- Valores mensuales: se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y volumen medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Incluye el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).
- Hidrograma: incluye la fecha y hora en que ocurre el gasto, así como el gasto instantáneo (m^3/s).
- Limnigrama: muestra la fecha, hora y lectura de la elevación del agua sobre una escala (m).
- Sedimentos: se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

2.3.2. Análisis de eventos hidrológicos

Las características de los gastos máximos anuales se utilizan en el diseño de presas, redes de alcantarillado, carreteras, puentes, sistemas para el control de inundaciones y en el diseño de las plantas hidroeléctricas.

La práctica hidráulica se ha basado en el ajuste de funciones de probabilidad para las series de máximos o mínimos anuales. Sin embargo, algunos problemas hidrológicos involucran la ocurrencia simultánea de eventos. Por ejemplo, en el diseño de una presa, la descarga máxima sobre el vertedor no solo depende del gasto de pico de entrada a la presa, sino también del volumen, la duración y la forma del hidrograma de entrada.

2.3.2.1. Técnica de mayoración de la avenida más adversa

El primer paso de esta técnica consiste en seleccionar la avenida máxima registrada, la cual puede considerarse bajo cierto criterio como la más adversa.

Una vez elegida, se debe construir un hidrograma adimensional, donde cada ordenada se obtiene como Q_i/Q_p para $i = 1$ hasta la duración d (horas o días).



Posteriormente, con el objetivo de estimar los eventos de diseño Q_T para diferentes periodos de retorno T en años, se debe realizar un análisis de frecuencia de los gastos máximos anuales y, mediante un criterio de bondad de ajuste, seleccionar aquella distribución de probabilidad que mejor describa el comportamiento de la muestra analizada.

Finalmente, para obtener la avenida de diseño solo se requiere multiplicar las ordenadas Q_i/Q_p del hidrograma adimensional por el valor estimado de Q_T , obteniendo así una avenida con las mismas características de la más adversa registrada, solo que más grande.

El problema principal de este método es la correcta determinación de la avenida más adversa ya que existen tres posibilidades para seleccionarla: el valor registrado más grande de Q_p , de V_t o una combinación de ambos; por lo que se tienen que analizar minuciosamente los gastos medios diarios de cada gasto instantáneo anual 10 días antes y 10 días después para cada máximo instantáneo registrado, o se puede amplificar el volumen a una cantidad mayor a la que podría ocurrir.



3. ESTUDIO HIDRÁULICO

El estudio hidráulico tiene como objetivo, determinar el perfil hidráulico de los cauces de interés, que consiste en realizar el tránsito hidráulico del punto de inicio hasta la salida de la corriente en el tramo de estudio, tomando en cuenta todas las aportaciones en el cauce, con ello se determina el nivel que alcanza la corriente en cada tramo del mismo.

Este estudio se realiza para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad del agua, velocidad de la corriente, zona inundada, duración, entre otros) durante el paso de una avenida, lo que lleva a realizar a cabo el tránsito de la misma.

El modelo hidráulico propuesto para este análisis es el programa HECRAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, 2016).

3.1. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para conocer la evolución espacial y temporal de las variables hidráulicas del flujo de agua sobre la superficie, se han desarrollado modelos numéricos que permiten representar la realidad de forma simplificada empleando ecuaciones con aproximación en una dimensión (1D), dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D) (Aragón et al., 2016).

Dado que los modelos numéricos son una representación simplificada de la realidad, un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos es la representación adecuada de la topografía del cauce y llanuras de inundación (Ochoa et al., 2016).

3.1.1. Modelación unidimensional (1D)

En los modelos unidimensionales se supone que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, no considera variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como vertical.



Suponen por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a 20 veces el ancho y cuando se busca principalmente determinar el máximo nivel de agua.

3.1.2. Modelación bidimensional (2D)

Los modelos bidimensionales consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor.

Por otro lado, el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular (Ochoa et al., 2016).

Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos (como estuarios, lagos, etc.) donde la variación vertical de velocidad es pequeña. Estrictamente no son aplicables a casos en que la variación vertical de la velocidad es apreciable, como por ejemplo el flujo sobre un vertedor o a través de un orificio sumergido.

3.1.3. Modelación tridimensional (3D)

Los modelos tridimensionales representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de las diferentes dimensiones de modelación numérica.

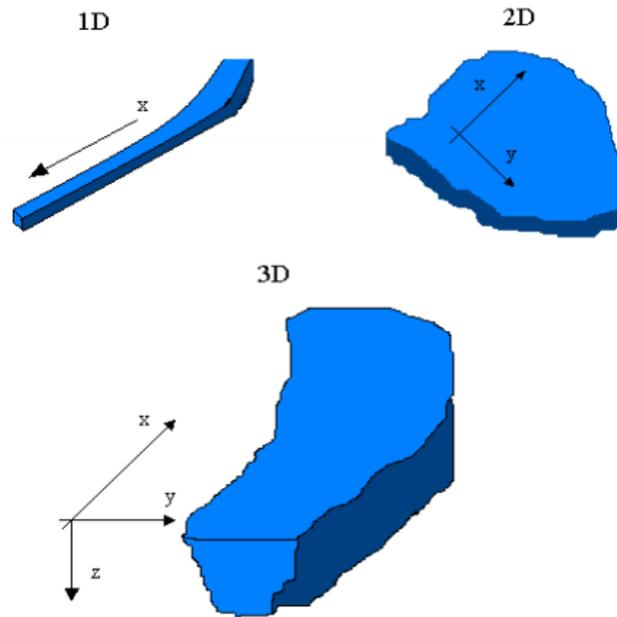


Figura 3.1 Esquema de modelos hidráulicos 1D (x), 2D (x, y) y 3D (x, y, z). Fuente: Vázquez, 2003.

3.2. HEC - RAS

HEC – RAS es un Software de uso libre, cuyo proceso evolutivo ha venido desarrollando nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde las versiones 2.2, la cual analiza el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta la actual versión 5.0.7, que permite la modelación en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes (Lluén, 2015).

Con HEC-RAS se puede realizar el modelado unidimensional (1D) y bidimensional (2D) de flujo transitorio, así como una combinación de ambos.

Las ecuaciones que rigen al modelamiento con HEC-RAS son las ecuaciones de Saint-Venant y ecuaciones de onda de difusión en las dos direcciones horizontales.

Modelo de Saint-Venant:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta(hu)}{\delta x} + \frac{\delta(hv)}{\delta y} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\delta(hu)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\delta(huv)}{\delta y} = Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t1} \quad (3-2)$$



$$\frac{\delta(hv)}{\delta t} + \frac{\delta(huv)}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = -Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t2} \quad (3-3)$$

Donde h es el calado o la profundidad del fluido, u y v son los componentes del vector velocidad en las direcciones x y y respectivamente, en cada punto del terreno, g es la aceleración de la gravedad, C refleja el efecto de la fuerza de Coriolis, τ_{sx} y τ_{sy} están asociados con el efecto del viento en la superficie del fluido. Los términos $S_{0x} = -\delta z / \delta x$ y $S_{0y} = -\delta z / \delta y$ miden la pendiente del terreno en las direcciones x y y respectivamente, si z es una función que describe el fondo o terreno.

Las expresiones

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3-4)$$

Y

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3-5)$$

reflejan el efecto de fricción del fluido con el terreno, donde n es el coeficiente de Manning, y

$$S_{t1} = \frac{\delta}{\delta x} \left(2v_t h \frac{\delta u}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(v_t h \left[\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right] \right) \quad (3-6)$$

$$S_{t2} = \frac{\delta}{\delta x} \left(v_t h \left[\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right] \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(2v_t h \frac{\delta v}{\delta y} \right) \quad (3-7)$$

representan los efectos turbulentos del flujo, siendo v_t la viscosidad turbulenta.

Ecuaciones de Onda de Difusión:

$$\frac{dh}{dt} + \nabla(uh) = R \quad (3-8)$$

$$\frac{du}{dt} + (u\nabla)u + \frac{v_t}{h} (h\nabla)u + g\nabla(h+z) = gS_f \quad (3-9)$$



Donde h es la profundidad del agua; $u = \begin{bmatrix} u_x & u_y \end{bmatrix}^T$ es el vector de velocidad de flujo promediada en profundidad; g es la aceleración debida a la gravedad; z es la elevación del terreno; ν_t es la viscosidad turbulenta; R es el término fuente/sumidero (por ejemplo, lluvia o entrada); y $S_f = \begin{bmatrix} S_{fx} & S_{fy} \end{bmatrix}^T$ es el vector de fricción del terreno.

El modelo de onda difusa omite todas las fuerzas en las ecuaciones de momento excepto el término de gravedad $g\nabla(h + z)$ y la fricción del terreno S_f . la ecuación de impulso se simplifica a:

$$g\nabla(h + z) = gS_f \quad (3-10)$$

La fricción de terreno se puede aproximar usando la fórmula de Manning:

$$\begin{bmatrix} S_{fx} \\ S_{fy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n^2 |u| u_x}{h^{4/3}} \\ \frac{n^2 |u| u_y}{h^{4/3}} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Las áreas de flujo 2D en HEC-RAS se pueden usar de varias maneras (USACE, 2016):

- Modelación detallada de canales en 2D.
- Modelación detallada de canales en 2D y planicies de inundación.
- Modelación de canales 1D combinados con áreas inundables en 2D.
- Conectar directamente un área de flujo 2D al área de almacenamiento 1D con una estructura hidráulica.
- Varias áreas de flujo 2D en la misma geometría.
- Conectar directamente múltiples áreas de flujo 2D con estructuras hidráulicas.
- Para regímenes de flujo mixto. La capacidad de modelación en 2D y 1D, se pueden manejar en flujo supercrítico y subcrítico, así como las transiciones de flujo subcrítico a supercrítico y de supercríticos a subcríticos (saltos hidráulicos).



3.2.1. Capacidades y ventajas de la modelación de flujo 2D con HEC-RAS

Las capacidades del modelado del flujo bidimensional en HEC-RAS se han desarrollado para permitir realizar simulaciones en 1D, 2D o la combinación de ambos. El algoritmo de modelado de flujo 2D tiene las siguientes capacidades y ventajas (USACE, 2016):

- 1) Puede realizar modelaciones en 1D, 2D o una combinación de ambos.
- 2) Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y difusión de onda en 2D. el programa resuelve las ecuaciones 2D de Saint-Venant (con adiciones opcionales de impulso para los efectos de turbulencia y Coriolis) o las ecuaciones 2D de onda de difusión. En general, las ecuaciones de onda de difusión 2D permiten que el Software se ejecute más rápido y tienen propiedades de mayor estabilidad. Las ecuaciones 2D de Saint-Venant son aplicables a una amplia gama de problemas. Sin embargo, muchas situaciones de modelado se pueden simular con precisión con las ecuaciones de difusión de onda 2D.
- 3) Se basa en el algoritmo de solución de volumen finito implícito. El método de volumen finito proporciona un incremento de estabilidad y robustez mejoradas en comparación con las técnicas tradicionales de diferencias finitas y elemento finitos; pudiendo manejar adecuadamente situaciones de flujo en regímenes subcrítico, supercrítico y mixto.
- 4) Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos 1D y 2D.
- 5) Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas. Las celdas computacionales de una determinada malla pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o incluso elementos de cinco y seis lados (el modelo está limitado a elementos de hasta ocho lados). La malla puede ser una mezcla de formas y tamaños de celdas.
- 6) Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computacionales 2D. Cada celda y contorno de celda es pre-procesada con la finalidad de obtener tablas de propiedades hidráulicas basadas en el terreno subyacente empleado en la modelación. Básicamente el pre-proceso, calcula una relación detallada de Elevación-Volumen para cada celda y para cada contorno de celda calcula la relación Elevación-Perímetro mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad y demás propiedades hidráulicas.
- 7) Mapas detallados de inundaciones y animación de los mismos. HEC-RAS, a través de su herramienta RAS Mapper, ofrece la posibilidad de visualizar mapas de zonas inundadas, así como la animación del flujo de agua cuando ocurre la inundación.



- 8) Algoritmo de solución basado en multiprocesador (computación paralela). La solución obtenida de la modelación, ha sido programada para que aproveche los procesadores que tiene el ordenador, lo que permite que se ejecute más rápido que si solo se emplease uno.
- 9) Permite trabajar con procesadores de 64-Bit y 32-Bit

3.2.2. Limitaciones de la modelación de flujo 2D con HEC-RAS

- 1) Ofrece poca flexibilidad para añadir estructuras hidráulicas dentro de un área 2D.
- 2) Actualmente no se puede realizar la erosión/deposición del transporte de sedimentos en áreas de flujo 2D.
- 3) No se puede realizar el modelado de la calidad del agua en áreas de flujo 2D.
- 4) No se puede utilizar las capacidades de modelación de puentes de HEC-RAS dentro de un área 2D. Se pueden modelar alcantarillas, vertedores y rupturas usando la herramienta SA/2D Area Conn (Área de almacenamiento/Área de conexión 2D).



4. PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO

El riesgo de desastres, entendido como la probabilidad de pérdida, depende de dos factores fundamentales que son el peligro y la vulnerabilidad. Comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer los niveles de riesgo, es sin duda el paso decisivo para establecer procedimientos y medidas eficaces de mitigación para reducir sus efectos (CENAPRED, 2006).

4.1. PELIGRO

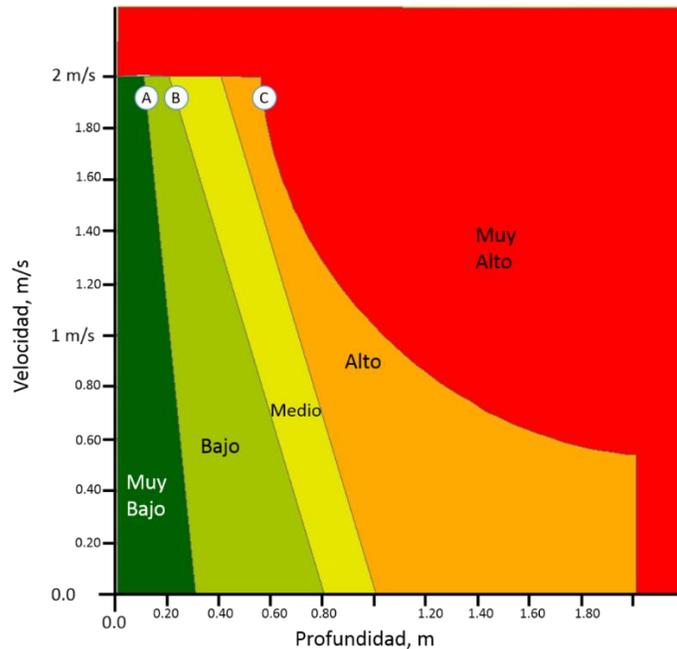
El peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad en un determinado lugar (CENAPRED, 2006).

El peligro de inundación se puede definir con base en ciertos criterios, que pueden ser tirante y velocidad del agua alcanzada en las calles, ríos o arroyos (Alcocer Yamanaka et al., 2016). El criterio de peligro usado para la metodología fue el del Gobierno de Gales del Sur.

4.1.1. Criterio del Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Government

En diciembre de 2007 el gobierno de Nueva Gales del Sur (Australia), solicitó realizar el estudio del río Bielsdown, el cual atraviesa la localidad llamada Dorrigo con el fin de determinar una adecuada gestión de riesgos en la llanura de inundación (Fuentes et al., 2013). Se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua, donde se definen cinco rangos de peligro, Gráfica 4.1.

En esta gráfica, del punto **A** hacia la derecha, se presenta inestabilidad en automóviles; del punto **B** hacia la derecha, es inseguro caminar sobre el agua; y del punto **C** hacia la derecha, hay posibles daños estructurales en construcciones ligeras.



Gráfica 4.1 Relación de los niveles de peligro en función de la profundidad y la velocidad en el caso de estudio de Dorrigo

4.2. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador; es decir el grado de pérdidas esperadas. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse en términos físicos; la segunda puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas (CENAPRED, 2006).

El tipo de vulnerabilidad por inundaciones que se analiza en este trabajo es física, es decir, la investigación de las viviendas en la localidad y los bienes que tiene la población dentro de sus viviendas, conocida como menaje o enseres.

4.2.1. Tipología de la vivienda

Los materiales usados para la construcción de una vivienda representan una variable importante en la estimación de la vulnerabilidad de ésta. En este subcapítulo se enlistan los diferentes tipos de materiales que se utilizan en el país y, posteriormente, las combinaciones que resultan entre los materiales de



construcción usados en los muros y en los techos de la vivienda serán tipificadas y evaluadas en función de su comportamiento ante una inundación.

Materiales en muros y techos

De acuerdo con datos del Censo General de Población y Vivienda del 2010 (INEGI, 2010), los materiales más usados en los muros de la vivienda en México son ocho, Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Material en muros de viviendas.

Tipo	Material
M1	Material de desecho
M2	Láminas de cartón
M3	Lámina de asbesto o metálica
M4	Carrizo, bambú o palma
M5	Embarro o bajareque
M6	Madera
M7	Adobe
M8	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto

Los materiales más usados para el techo de las viviendas son los mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Materiales en el techo de las viviendas.

Tipo	Material
T1	Material de desecho
T2	Láminas de cartón
T3	Lámina de asbesto o metálica
T4	Palma, tejamanil o madera
T5	Teja
T6	Losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería

En general, un gran porcentaje de la vivienda en el país es el resultado de alguna de las combinaciones entre las tablas 4.1 y 4.2; sin embargo, no se descarta la posibilidad de encontrar otros materiales. En la Tabla 4.3 se presentan las posibles combinaciones para generar el tipo de vivienda.



Tabla 4.3 Combinaciones posibles entre el material para el techo y muros.

		MUROS							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
T E C H O	T1	1	X	X	X	X	X	X	X
	T2	X	2	4	5	7	10	12	16
	T3	X	3	X	6	8	11	13	17
	T4	X	X	X	X	9	X	14	18
	T5	X	X	X	X	X	X	15	19
	T6	X	X	X	X	X	X	X	20

Cada cuadro, representado por la combinación de muro (M1, M2, M3, ..., M8) y techo (T1, T2, T3, ..., T6), corresponde a un posible arreglo que define un tipo de vivienda.

El total de combinaciones son 48, pero varias de ellas no son posibles; por ejemplo, el caso extremo corresponde a una vivienda con muros tipo M1, material de desecho, con techo tipo T6, losa de concreto). Por lo anterior, el número de combinaciones se reduce quedando solo las 20 que se presentan en la tabla anterior. En la Tabla 4.4 se presenta la descripción de cada una de ellas.

Tabla 4.4 Combinaciones para un tipo de vivienda, según el material usado en techo y muros.

Combinación	Combinaciones del tipo de material para el techo y para los muros
1	Vivienda con muros y techo de material de desecho.
2	Vivienda con muros y techo de lámina de cartón.
3	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica.
4	Vivienda con muros de lámina de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón.
5	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón.
6	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica.
7	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de cartón.
8	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de asbesto o metálica.
9	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de palma, tejamanil o madera.
10	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón.
11	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica.
12	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón.
13	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica.
14	Vivienda con muros de adobe y techo de palma, tejamanil o madera.
15	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja.



16	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón.
17	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica.
18	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera.
19	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja.
20	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería.

4.2.2. Índice de vulnerabilidad

Las viviendas podrán clasificarse en cinco niveles de vulnerabilidad de acuerdo con el material y tipo de construcción, para inferir su capacidad de respuesta ante una inundación, Tabla 4.5. El tipo de vivienda, que tiene valores de I a V, se puede ver en la Tabla 4.6.

Tabla 4.5 Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

Tipo	Color	Vulnerabilidad
I	Rojo	Muy Alta
II	Naranja	Alta
III	Amarillo	Media
IV	Verde	Baja
V	Verde	Muy Baja

Tabla 4.6 Discretización del tipo de vivienda según el material usado en techo y muros.

Combinación	Tipo de vivienda	Combinaciones del tipo de material para el techo y para los muros
1	I	Vivienda con muros y techo de material de desecho.
2	I	Vivienda con muros y techo de lámina de cartón.
3	I	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica.
4	II	Vivienda con muros de lámina de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón.
5	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón.
6	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica.
7	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de cartón.
8	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de asbesto o metálica.



9	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de palma, tejamanil o madera.
10	II	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón.
11	III	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica.
12	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón.
13	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica.
14	III	Vivienda con muros de adobe y techo de palma, tejamanil o madera.
15	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja.
16	II	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón.
17	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica.
18	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera.
19	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja.
20	IV	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería.

4.2.3. Tipificación del menaje y funciones de vulnerabilidad

Para estimar la función de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, el CENAPRED propone una serie de muebles y enseres menores para después llevar a cabo una cuantificación del porcentaje de los daños ocasionados en cada caso, en función del nivel que alcance el agua que entra en la casa (CENAPRED, 2011).

Vivienda tipo I

Las viviendas tipo I consta de un solo cuarto multifuncional, construido con material de desecho; el menaje es el mínimo indispensable como el que se muestra en la Figura 4.1. En la Gráfica 4.2 se muestra la función del índice de vulnerabilidad para una vivienda tipo I.

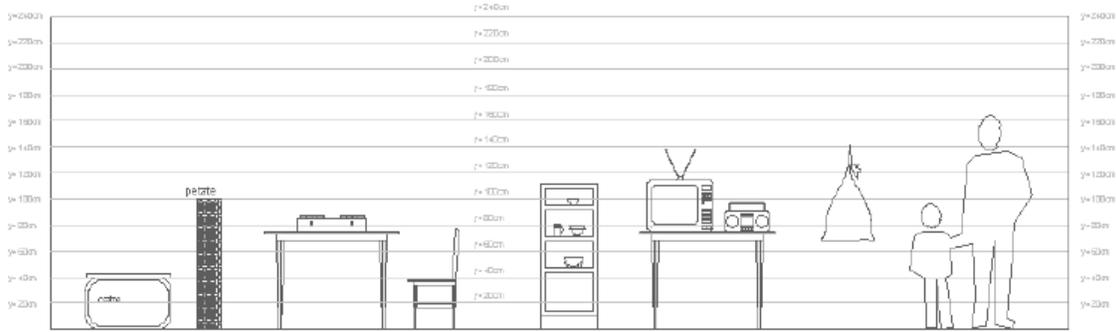
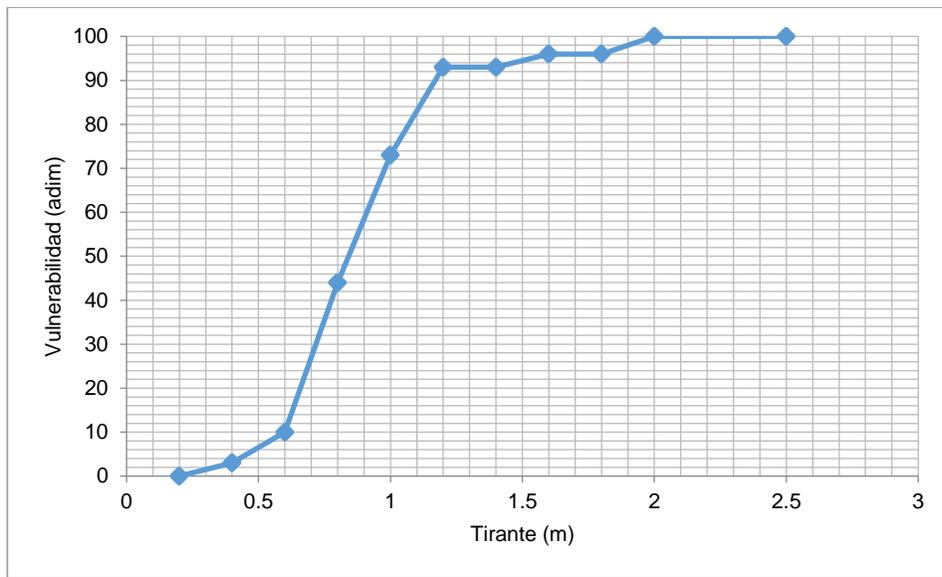


Figura 4.1 Menaje para la vivienda tipo I (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006.



Gráfica 4.2 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo I. Fuente: CENAPRED, 2006.

Vivienda tipo II

El segundo tipo corresponde a hogares que pueden ser clasificadas como de clase baja, donde la vivienda puede ser descrita como una vivienda de autoconstrucción o viviendas construidas con materiales de la zona, la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Con respecto al menaje, la hipótesis es que las diferentes habitaciones cuentan con sus propios muebles y están más o menos definidas (CENAPRED, 2006).

En la Figura 4.2 se observa el menaje que considero el CENAPRED para elaborar la función del índice de vulnerabilidad, Gráfica 4.3, de una vivienda tipo II.

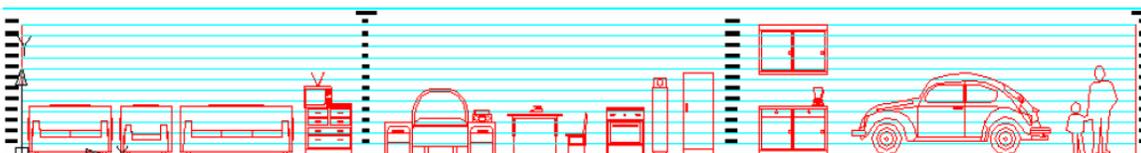
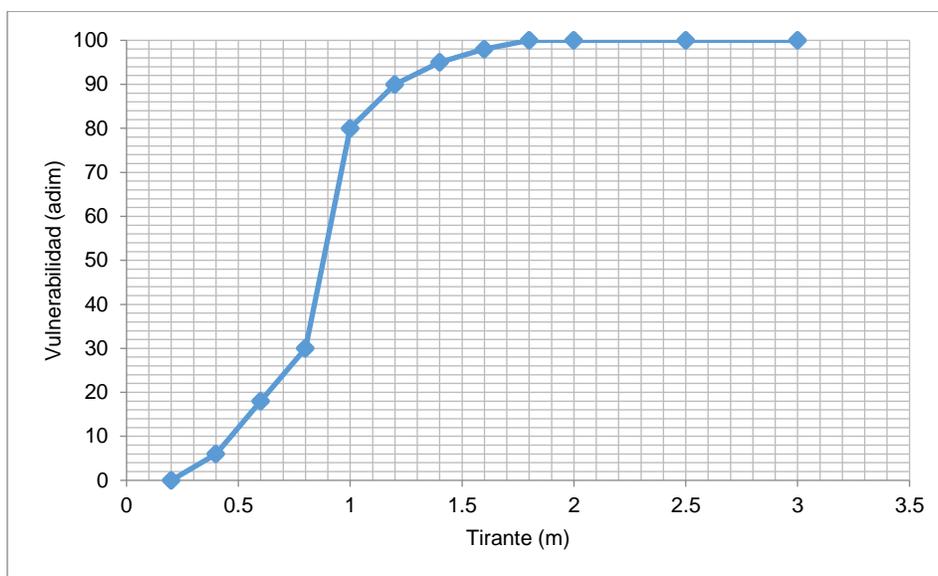


Figura 4.2 Menaje para la vivienda tipo II (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006.



Gráfica 4.3 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo II. Fuente: CENAPRED, 2006.

Vivienda tipo III

El tercer tipo de viviendas también puede ser clasificado como clase baja, pero con techos más resistentes, construida la mayoría de las veces sin elementos estructurales (CENAPRED, 2006). El menaje corresponde al necesario para las diferentes habitaciones, como en el anterior nivel; sin embargo, se considera de mayor calidad.

En la Figura 4.3 se muestra el menaje considerado por el CENAPRED para elaborar la función del índice de vulnerabilidad de una vivienda tipo III, Gráfica 4.4.

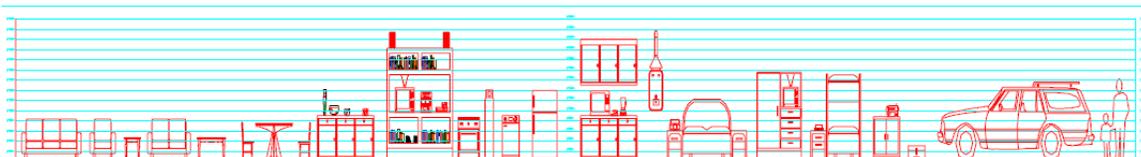
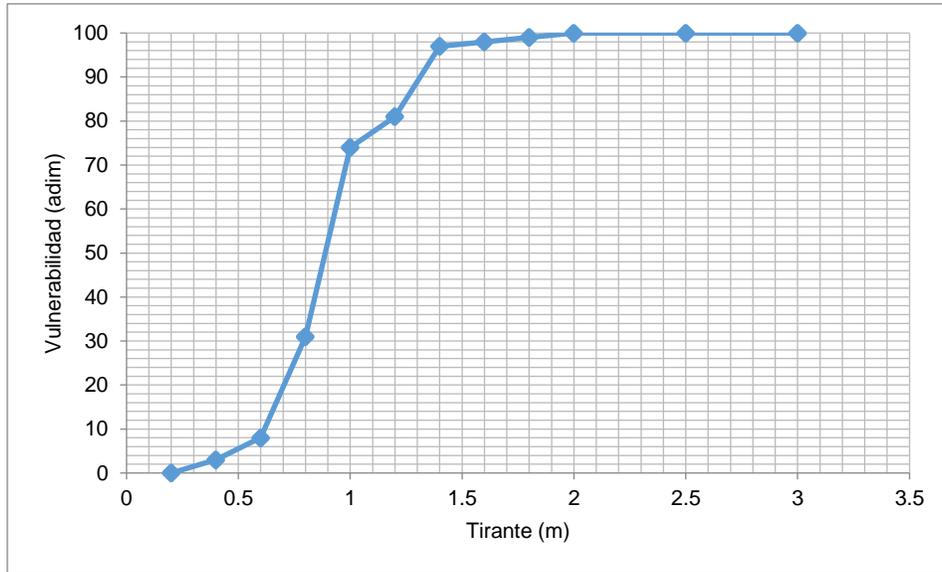


Figura 4.3 Menaje para la vivienda tipo III (una sola planta). Fuente: CENAPRED, 2006.



Gráfica 4.4 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo III. Fuente: CENAPRED, 2006.

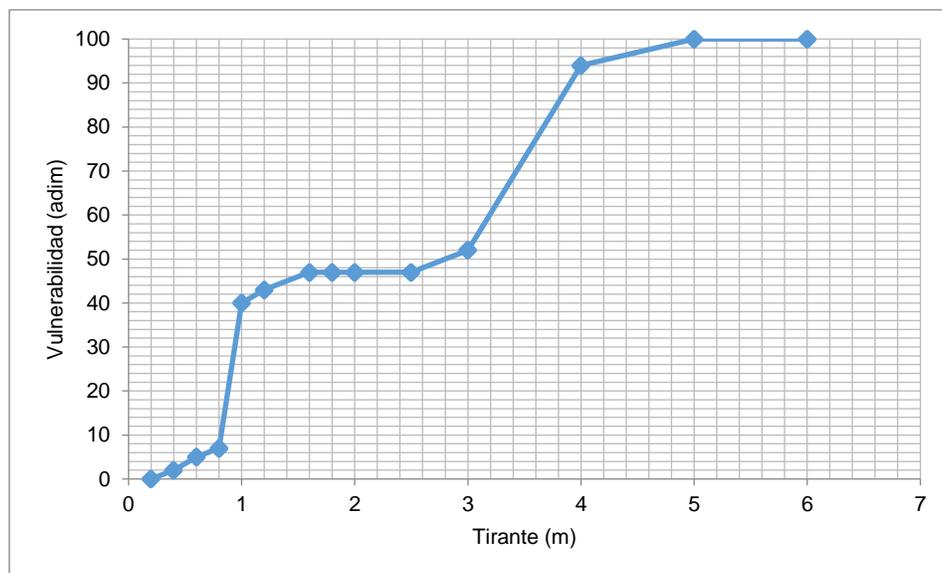
Vivienda tipo IV

El cuarto tipo de viviendas se identifica como la típica para la clase media, es decir, que puede ser equiparada con una vivienda de interés social, construida la mayoría de las veces con elementos estructurales (CENAPRED, 2006). El menaje que se ha seleccionado corresponde con el de una casa típica de una familia de profesionistas que ejercen su carrera y viven sin complicaciones económicas.

En la Figura 4.4 se muestra el ejemplo del menaje que el CENAPRED consideró para elaborar la función del índice de vulnerabilidad, Gráfica 4.5, de una vivienda tipo IV.



Figura 4.4 Menaje para la vivienda tipo IV (dos plantas). Fuente: CENAPRED, 2006.



Gráfica 4.5 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo IV. Fuente: CENAPRED, 2006.

Vivienda tipo V

Finalmente, las viviendas tipo V corresponde al tipo residencial, construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor (CENAPRED, 2006). El menaje está formado por artículos de buena calidad y con muchos elementos de comodidad.

En la Figura 4.5 se presenta el ejemplo del menaje considerado por el CENAPRED para elaborar la función del índice de vulnerabilidad, Gráfica 4.6, de una vivienda tipo V.

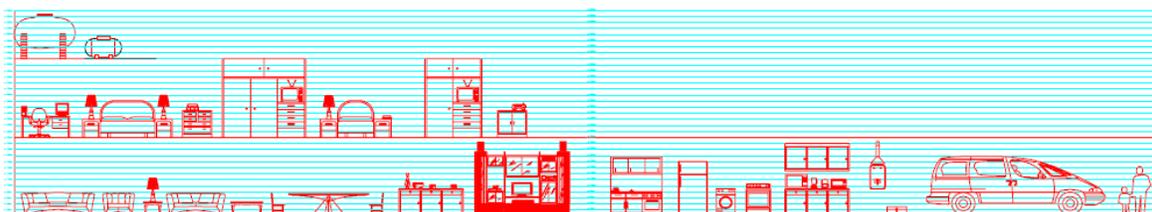
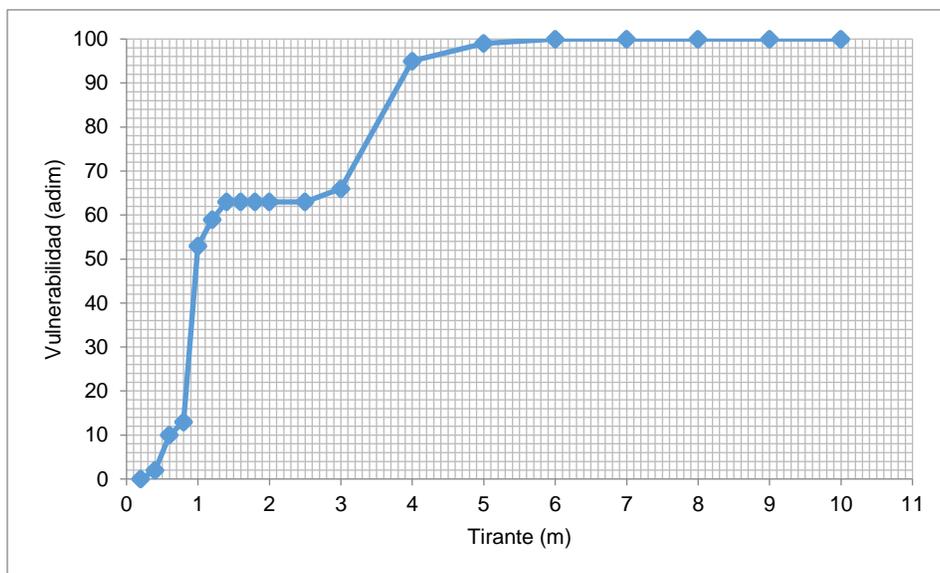


Figura 4.5 Menaje para la vivienda tipo V (dos plantas). Fuente: CENAPRED, 2006.



Gráfica 4.6 Función de vulnerabilidad para la vivienda tipo V. Fuente: CENAPRED, 2006.

La cuantificación del menaje para cada tipo de vivienda se muestra en la Tabla 4.7 con base en el costo que el CENAPRED obtuvo en 2006 pero actualizados a los costos de 2019.

Tabla 4.7 Menaje expuesto de acuerdo con el tipo de vivienda en 2006 y 2019.

Tipo	Índice de Vulnerabilidad	Valor máximo de los daños en 2006, \$	Valor máximo de los daños en 2019, \$
I	Muy Alta	12,500	20,395.46
II	Alta	50,000	81,581.85
III	Media	150,500	245,561.36
IV	Baja	300,000	489,491.08
V	Muy Baja	450,000	734,236.62

4.3. RIESGO

En términos cualitativos, el riesgo es el valor esperado (esperanza matemática) de daños, pérdidas o efectos indeseables de sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. El riesgo está en función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino; es decir el peligro, el índice de vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos (CENAPRED, 2006).

$$R = f(P, V, E) \quad (4-1)$$



Donde:

- P* Es el peligro o la probabilidad de que ocurra un hecho potencialmente dañino.
- V* Es el índice de vulnerabilidad o el porcentaje de daños de una vivienda por efecto de una inundación.
- E* Es el valor de los bienes expuestos.

Debido a que el peligro, así como la vulnerabilidad son variables adimensionales, las unidades del riesgo serán las mismas que las del valor de los bienes expuestos, que generalmente están dadas en unidades monetarias.

De acuerdo con Bladé, 2014, los pasos necesarios para la evaluación del riesgo por inundación considerando daños materiales y pérdidas de vidas humanas son:

- Generación de mapas de peligro para los periodos de retorno a analizar. Estos mapas de peligro muestran resultados de profundidad, velocidad, caudal específico o algún índice deducido a partir de los valores de una o varias de estas variables.
- Inventario y valoración de los bienes, infraestructuras y equipos existentes que se pueden ver afectados. El inventario se puede realizar a partir de los usos del suelo. En la valoración se considerará el grado de afección, que puede incluir la exposición y la vulnerabilidad.
- Obtención de curvas de daño que permitan conocer el porcentaje de pérdidas respecto a los bienes afectados que supone una peligrosidad determinada.
- Evaluación, para cada periodo de retorno, de los mapas de daños, cruzando los mapas de peligro con las curvas de daño.

Con estos pasos se obtendrá un daño para cada periodo de retorno expresado en un valor por unidad de superficie, o bien un valor total en la zona. Se puede realizar un proceso similar para evaluar los daños sobre personas, con resultados expresados en número de afectados o víctimas (totales o por unidad de área) o incluso transformarlos a una valoración económica (Bladé et al., 2014).

Una vez estimado el daño para los distintos periodos de retorno a analizar, teniendo en cuenta que el periodo de retorno expresado en años es el inverso de la probabilidad anual de que se exceda un determinado nivel de inundación, se pueden combinar los distintos periodos de retorno y obtener un resultado global de Daño Anual Esperado (DAE) (Bladé et al., 2014). Se ha establecido que la evaluación del riesgo sigue principalmente una perspectiva de evaluación económica. Usando esta idea del riesgo para estimar el DAE por inundación, se tiene que este se calcula con



la integración del área bajo la curva que se forma al graficar la probabilidad de excedencia del daño respecto del monto económico de daños (Solís et al., 2014), Figura 4.6, mediante la aplicación de la siguiente ecuación (Meyer et al, 2012):

$$\overline{DAE} = \sum_{i=1}^k D[i] * \Delta P_i \tag{4-2}$$

Donde:

$$D[i] = \frac{D(P_i - 1) + D(P_i)}{2} \tag{4-3}$$

$D[i]$ Es la media del daño de dos eventos de daño $D(P_i - 1)$ y $D(P_i)$

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}| \tag{4-4}$$

ΔP_i Es el intervalo de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos.

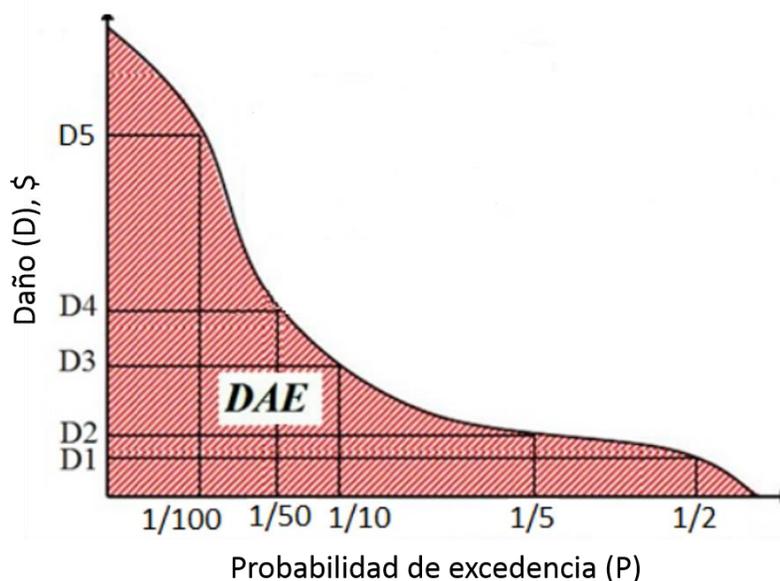


Figura 4.6 Curva de daños asociada a diferentes probabilidades de excedencia. Fuente: Solís et al., 2014.

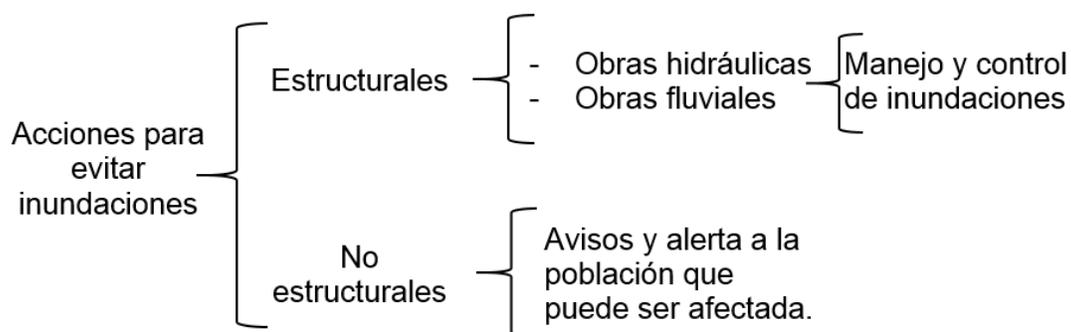
El valor del Daño Anual Esperado representa el promedio en un año del valor total de pérdidas en la zona de estudio.



5. OBRAS DE PROTECCIÓN PARA CONTROL DE INUNDACIONES

Las obras para el control de avenidas, son construidas en los cauces o en las cuencas para encauzar, derivar, confinar, retener o almacenar los escurrimientos. Con ellas, se logra disminuir los gastos de las avenidas, facilitar el paso libre del agua; y proteger a poblaciones y zonas más o menos extensas, del efecto de los escurrimientos (CONAGUA, 2013).

Para evitar o reducir las inundaciones o sus efectos perjudiciales se pueden tomar acciones de dos tipos: las primeras se conocen como medidas estructurales (construcción de obras), y las segundas son las no estructurales (indirectas o institucionales) (Salas, 1999).



El objetivo de las estructurales es evitar y/o reducir los daños provocados por una inundación, mediante la construcción de obras que pueden ser planeadas y diseñadas cuidadosamente.

Las no estructurales son aquellas que no están relacionadas con la construcción directa de obras y tienen la finalidad de informar oportunamente a las poblaciones ribereñas de la ocurrencia de una posible avenida, para que los daños sean mínimos. Se basan en la planeación, organización, coordinación y ejecución de una serie de ejercicios de Protección Civil que busca evitar o disminuir los daños causados por las inundaciones y pueden ser de carácter permanente o aplicable sólo durante la contingencia.

5.1. CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE OBRA

En función de la manera en que es manejada la corriente, se pueden definir tres grandes grupos de obras (Salas, 1999):

- Obras de regulación. Estas acciones consisten en la construcción de obras que intercepten directamente el agua de lluvia o la que escurre por los cauces



para almacenarla en un área previamente seleccionada. Este grupo de estructuras está integrado fundamentalmente por presas (de almacenamiento, rompe-picos, etc.) y cauces de alivio (permanentes o temporales) que permiten almacenar temporalmente toda, o al menos una parte, de la creciente generada en la parte alta de la cuenca tributaria y, posteriormente, descargarlas en forma controlada.

- Obras de rectificación. Su función es facilitar la conducción rápida del agua por su cauce, dragando los ríos para conservar o incrementar su capacidad, algunas de las estructuras que forman parte de este grupo de obras son: la rectificación de los cauces (por medio de la canalización o el entubamiento de los ríos), o bien, el incremento de la pendiente (mediante el corte de meandros).
- Obras de protección. Confinan el agua dentro del cauce del río (bordos longitudinales a lo largo del río) o bien evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de importancia (bordos perimetrales).

De acuerdo con lo anterior, una clasificación de las obras de protección contra inundaciones, atendiendo al manejo de la avenida, se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Clasificación de las obras de protección contra inundaciones más comunes, por tipo.

Obras de regulación	Obras de rectificación	Obras de protección
- Presas de almacenamiento	- Canalización del cauce	- Bordos longitudinales
- Presas rompe-picos	- Entubamiento del cauce	- Bordos perimetrales
- Presas para retener azolves	- Corte de meandros	- Muros de encauzamiento
- Desvío permanente	- Rectificación de la corriente	
- Desvío temporal		

Las obras más utilizadas en México, son las pertenecientes a los grupos uno y tres, específicamente: bordos tanto perimetrales como longitudinales, muros de encauzamiento, desvíos permanentes y presas de almacenamiento.

Las acciones estructurales pueden llegar a evitar totalmente los desbordamientos de un río, e igualmente evitar que la zona protegida se inunde por lluvia, al construir un buen drenaje. La principal desventaja de este tipo de acciones es su costo, el que por ser elevado no puede siempre ser cubierto en la medida necesaria, aun cuando el beneficio que se logra sobrepase el costo de las obras de protección. El costo inicial de las medidas estructurales depende de muchos factores entre los que destacan: el tipo de obra, las condiciones geográficas y topográficas de la zona de



construcción y el periodo de retorno de la avenida para la que se desea proteger un área determinada.



6. ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Tapachula se ubica en la Región Socioeconómica X Soconusco. Limita al norte con Motozintla y la República de Guatemala, al este con Cacaohatán, Tuxtla Chico, Frontera Hidalgo y Suchiate, al sur con el océano Pacífico y al oeste con Huehuetán, Tuzantán y Mazatán (Tapachula, 2016). La ciudad de Tapachula de Córdoba y Ordóñez es la cabecera municipal y se ubica en la parte central, al pie de la Sierra Madre, donde se inicia la llanura costera del Pacífico, Figura 6.1. Las coordenadas geográficas son 14°54'19.81" latitud norte y 92°15'48.06" longitud oeste y se ubica a una altitud de 177 metros sobre el nivel del mar. Con una superficie territorial de 44.93 km² ocupa el 4.59% del territorio municipal.

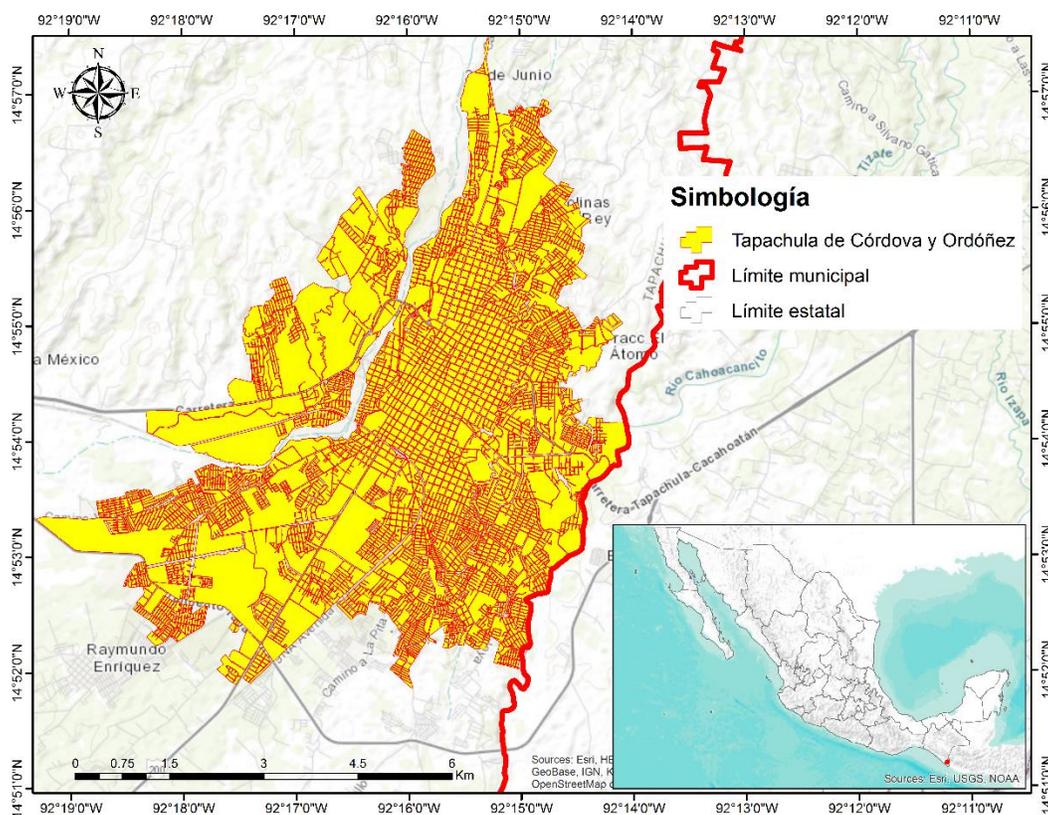


Figura 6.1 Ubicación de la ciudad de Tapachula de Córdoba y Ordóñez. Elaboración propia.

6.1. ANTECEDENTES

Los ciclones tropicales, como se conoce a los fenómenos tropicales que se caracterizan por producir vientos fuertes, oleaje elevado, una sobre elevación del mar y lluvia abundante, tienen un impacto económico importante a escala mundial. Y, aunque actualmente se les da seguimiento mediante satélites, radares



meteorológicos, aviones caza huracanes y un ejército de personas en tierra, todavía cobran víctimas humanas.

En México se han presentado ciclones devastadores, como el caso de Gilberto, en el golfo de México en 1988, el cual provocó muertes principalmente en la ciudad de Monterrey y pérdidas económicas considerables en la zona de Cancún, Quintana Roo. Otro caso importante fue en 1997 cuando apareció en el océano Pacífico el huracán Pauline, que provocó la muerte de cientos de personas en la costa de los estados de Oaxaca y Guerrero.

Los ciclones tropicales se clasifican de acuerdo con la presión que existe en su centro o a la velocidad de sus vientos. En la Tabla 6.1 se muestra la clasificación de huracanes, según Saffir-Simpson, y algunos de sus efectos. En la Tabla 6.2 se presentan los huracanes que han afectado al estado de Chiapas y en la Figura 6.2 se muestra algunas trayectorias de ciclones que han pasado cerca de la costa de Chiapas en un radio de 100 km.

Tabla 6.1 Escala Saffir-Simpson.

Número de escala (categoría)	Presión central, milibarios	Vientos, km/h	Marea de tormenta, m	Daños materiales potenciales
1	Mayor a 980	119-153	1.2 – 1.5	- Daños a casas, árboles y arbustos. Algunos daños a señalizaciones. - Daños menores por inundaciones en carreteras costeras. - Daños leves en muelles e insignificantes en edificios.
2	968 – 979	154-177	1.6 – 2.4	- Daños a puertas, ventanas y algunos techos de construcciones. - Daño considerable a arbustos y árboles. - Daño considerable a casas, a señalizaciones y a muelles. Las zonas costeras se pueden inundar de 2 a 4 horas antes de la llegada del centro del ciclón. - Las embarcaciones menores pueden romper sus amarras.
3	945 – 964	178-209	2.5 – 3.6	- Se puede presentar daño estructural a construcciones. - Daño a árboles y arbustos con árboles grandes caídos. - Señalizaciones destruidas. - Las zonas costeras se pueden inundar de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del fenómeno. - Las inundaciones costeras destruyen estructuras pequeñas y las estructuras grandes son dañadas por el oleaje. - Zonas costeras que están hasta 1.5 msnm pueden ser inundadas hasta 13 km o más tierra adentro.
4	920 – 944	210-249	3.7 – 5.5	- Daño estructural más extenso a construcciones, con techos completamente dañados. - Arbustos, árboles y señalizaciones totalmente arrancados. - Daño extenso en puertas y ventanas. - Zonas costeras inundadas de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del ciclón. - Daño mayor a los pisos bajos de construcciones cercanas a la costa. - Zonas costeras que están hasta 3.0 msnmm inundadas, por lo que se requiere una evacuación mayor de áreas residenciales hasta 10 km tierra adentro.
5	Menor a 920	Mayores a 249	Mayor a 5.5	- Daño total a techos de construcciones. - Fallas totales en los suministros de energía. - Todos los árboles, arbustos y señalizaciones arrancadas. - Daño severo a puertas y ventanas. - Zonas costeras pueden ser inundadas de 3 a 5 h antes de la llegada del centro del ciclón. - Daños mayores a los pisos de construcciones que estén hasta 500 metros de la costa, por lo que se requiere una evacuación mayor de áreas residenciales hasta 16 km tierra adentro.

Tabla 6.2 Huracanes que han afectado la costa de Chiapas.

Huracán	Mes	Año
Adriana		1960
Gilberto		1988
Diana		1990
Roxana		1994
César-Douglas	Julio y Agosto	1996
Paulina y Rick	Octubre	1997
Mitch	Octubre	1998
Keith	Octubre	2000
Iris y Dalila	Octubre y Julio	2001
Isidoro		2003
Stan	Octubre	2005
Bárbara	Junio	2007
Agatha	Mayo	2010

Fuente: Vázquez et al., 2007



Figura 6.2 Trayectorias de ciclones en la zona de estudio. Fuente: CENAPRED, 2018.

De la Tabla 6.2 destacan los eventos de 1998 y 2005 que causaron graves daños en la entidad, ocasionando la pérdida de infraestructura como puentes y carreteras o peor aún, la destrucción de viviendas como fue el caso del huracán Stan en octubre de 2005. Es por ello que este trabajo se enfoca en los daños que ocasionó Stan a las viviendas.



6.1.1. Huracán STAN, 2005

El día 1° de octubre de 2005 por la mañana se generó la Depresión Tropical (DT) No. 20 del océano Atlántico; se inició a una distancia aproximada de 180 km al Sureste de Cozumel, Q. R., con vientos máximos sostenidos de 45 km/hr, rachas de 65 km/hr, presión mínima de 1007 hPa y desplazamiento hacia el Oeste-Noroeste a 9 km/hr. Durante el transcurso del día 2 Stan cruzó la península de Yucatán con trayectoria hacia el Oeste-Noroeste; al avanzar sobre tierra empezó a perder fuerza por lo que al final del día, se encontraba a 10 km al Sureste de la población de Celestún, Yuc., como DT con vientos máximos sostenidos de 55 km/hr.

En las primeras horas del día 3, la DT Stan salió al golfo de México y a las 04:00 horas ya se encontraba como Tormenta Tropical (TT), con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/hr. En la madrugada del día 4, cuando se encontraba a 75 km al Norte de Coatzacoalcos, Ver., el avión caza huracanes reportó que la TT Stan se había intensificado a Huracán de Categoría 1 (H1), con vientos máximos sostenidos de 130 km/hr y rachas de 155 km/hr.

El huracán Stan siguió su trayectoria con rumbo hacia la costa de Veracruz, y poco antes de las 10:00 hr local, tocó tierra entre Punta Roca Partida y Monte Pío, Ver., a unos 20 km al Noreste de San Andrés Tuxtla, Ver. Al tocar tierra, el huracán Stan empezó a perder fuerza y se degradó a TT. Por la noche del día 4, al cruzar la sierra de la parte Norte de Oaxaca, la tormenta tropical Stan se debilitó a depresión tropical y finalmente en la madrugada del día 5, después de haber avanzado sobre la región montañosa del estado de Oaxaca, la depresión tropical Stan entró en proceso de disipación, a una distancia de 60 km al oeste-suroeste de la ciudad de Oaxaca, Oax (CENAPRED, 2006). En la Figura 6.3 se muestra la trayectoria del Huracán Stan.

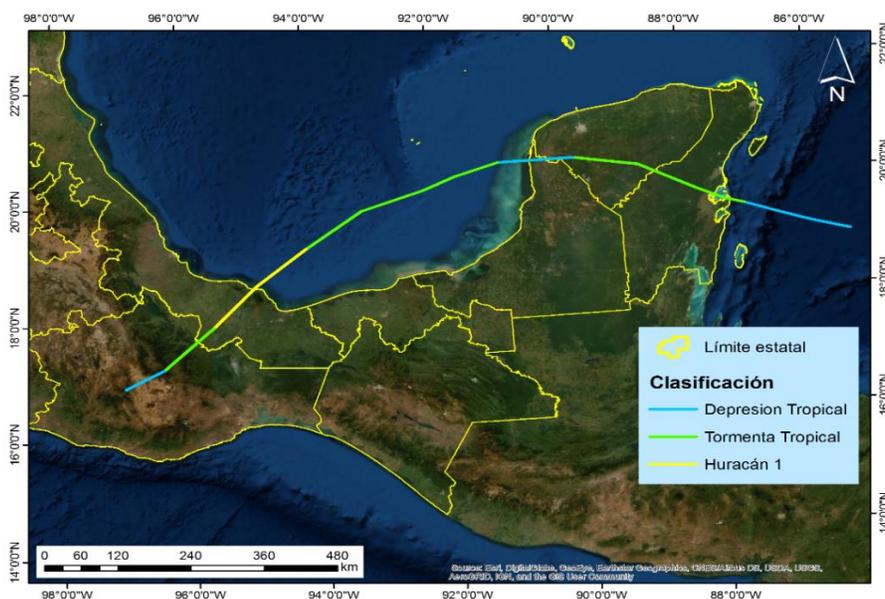
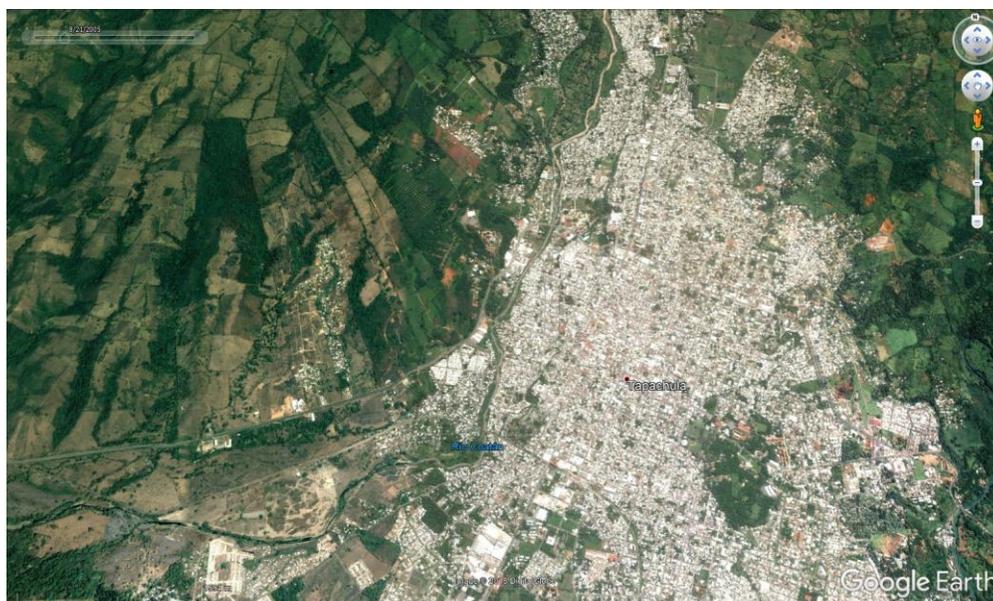


Figura 6.3 Trayectoria del Huracán Stan del 1 al 5 de octubre de 2005. Elaboración propia.

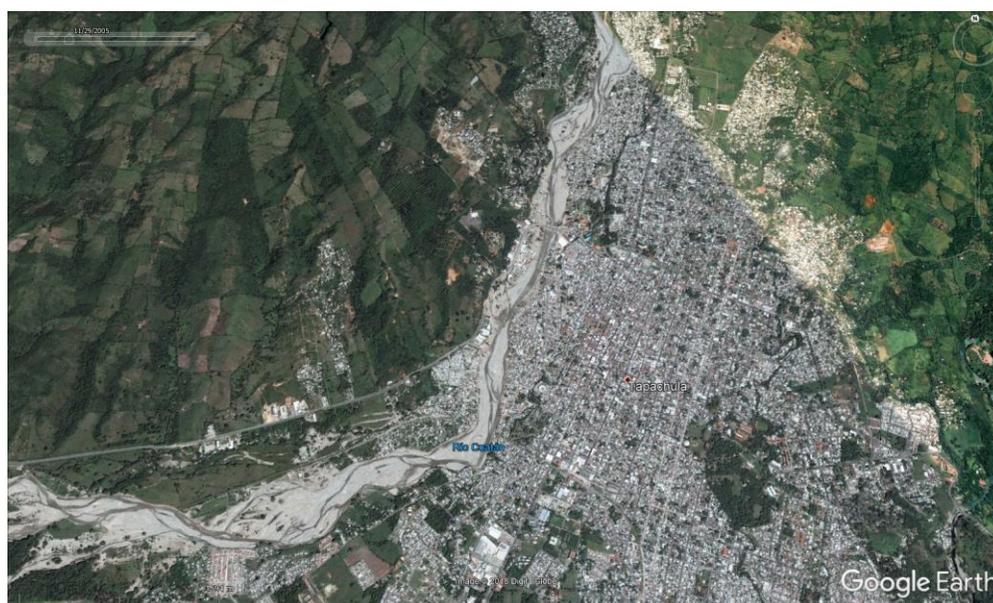


Las bandas nubosas de Stan dieron lugar a lluvias intensas que afectaron con inundaciones, deslaves y daños materiales importantes a los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo y Veracruz (CENAPRED, 2006).

La ciudad de Tapachula fue una de las más afectadas por inundaciones debido al desbordamiento del río Coatán. Fueron más de 12 colonias las que desaparecieron al ser arrastradas en pocos minutos por el río, en la Figura 6.4 se muestra un antes y después de dicha ciudad.



a) Tapachula antes del desbordamiento del río Coatán, imagen del 21/08/2005



b) Tapachula después del desbordamiento del río Coatán, imagen de noviembre de 2005

Figura 6.4 Antes y después del desbordamiento del río Coatán, Chiapas. Fuente Google Earth, 2018.



6.1.1.1. Daños ocasionados por el huracán Stan en Chiapas

Los efectos del huracán Stan se comenzaron a sentir en el estado de Chiapas el día 3 de octubre, la gran cantidad de lluvia que trajo consigo el fenómeno causó cuantiosas afectaciones en diferentes sectores.

El torrente causado por el huracán Stan provocó el desbordamiento de 98 ríos, que afectaron a 800 localidades de 41 municipios; se registraron 86 decesos; y a diferencia de los daños causados por el mismo fenómeno en otros estados (Puebla, Hidalgo, Oaxaca y Veracruz), en donde la magnitud de las afectaciones fue principalmente en la infraestructura económica, en el estado de Chiapas el impacto del fenómeno causó mayores perjuicios en la infraestructura social, en donde se encuentran los daños en vivienda, educación, salud e infraestructura hidráulica (CENAPRED, 2006).

Las afectaciones que sufrieron las viviendas fueron diversas. Las más graves fueron aquellas que fueron arrasadas en su totalidad por los ríos. También sufrieron daños casas que estaban ubicadas fuera de la zona considerada como zona de riesgo y en menor escala daños parciales en su infraestructura. En total fueron dañadas 32,514 viviendas; la mayor proporción de pérdidas estuvo en el rubro de viviendas ubicadas en localidades rurales con más de 22 mil, lo que significó el 68.4% del total de unidades afectadas y las viviendas afectadas en zonas urbanas fueron más de 10 mil, que corresponde al 31.6% del total, en éstas, el daño más recurrente fueron las inundaciones (CENAPRED, 2006). En la Tabla 6.3 se muestra el monto de los daños para las viviendas.

Tabla 6.3 Monto de daños para las viviendas rurales y urbanas.

Tipo de vivienda	Miles de pesos				
	Menor	Parcial	Total	Reubicación	Total de daños
Rural	34,007.10	50,620.90	185,955.60	489,501.30	760,085.00
Urbana	2,609.00	9,820.00	40,333.30	595,760.00	648,521.00
Total	36,616.10	60,441.00	226,288.00	1,085,261.00	1,486,606.00

Fuente: CENAPRED, 2006

Respecto al sector salud, tuvo grandes perjuicios, ya que fueron afectadas 114 unidades médicas; de las cuales 108 sufrieron daños menores y parciales, y seis centros de salud rural sufrieron la pérdida total de sus unidades. El monto total de los daños en el sector salud se estimó por un total de 72.6 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

Las afectaciones a la infraestructura educativa se presentaron dos casos que dificultaban la vuelta a la normalidad de las actividades escolares, por una parte, los daños directos que hayan sufrido los espacios educativos y por otro derivado de la atención de la emergencia, la ocupación de las escuelas como refugios temporales. Fueron utilizadas un total de 119 escuelas como refugios temporales y fueron



dañadas un total de 305 escuelas a cargo de niveles federal y estatal; de las cuales 176 tuvieron daños menores, 18 daños parciales y 111 se perdieron totalmente. Los daños en el sector educativo ascendieron a un monto total de 245.5 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

Los daños en la infraestructura hidráulica y los efectos indirectos ocasionados por el desastre en este sector se estimaron en cerca de 4 mil millones de pesos. Este sector fue el más afectado por el desastre en el estado de Chiapas (CENAPRED, 2006).

Los daños en comunicaciones y transportes se resumen en afectaciones a los caminos y puentes alimentadores y/o rurales, la extracción de derrumbes, la renta de maquinaria y el costo de los estudios y proyectos para las nuevas obras; se estimaron en 3,756 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

El costo de los daños en el sector eléctrico se dividió en cuatro rubros: los daños a la infraestructura eléctrica, la rehabilitación de acometidas, la inversión para la relocalización de algunas líneas de distribución y las redes para los nuevos asentamientos. En suma, los daños en el sector eléctrico se estimaron en 254.8 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

Los daños en el sector de obras públicas e infraestructura urbana se calcularon en 682.3 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

Para el sector agropecuario, fueron dañadas más de 208 mil hectáreas de diferentes tipos de cultivos, afectando a más de cien mil productores. Las afectaciones en el sector ganadero y apicultor fueron provocadas por las intensas lluvias que ocasionaron el ahogo y arrastre de varias cabezas de diversos tipos de ganado, así como la destrucción total de más de seis mil colmenas. Para el sector pesquero, el fenómeno causó la destrucción de 827 embarcaciones en 12 municipios. En resumen, las afectaciones en el sector primario (agricultura, ganadería y pesca) sumaron más de 3 mil millones de pesos (CENAPRED, 2006).

Los daños en el sector turismo fueron leves y la mayoría de las afectaciones causadas por las inundaciones fueron atendidas de forma inmediata. En total, los daños que pudieron ser evaluados en el sector turismo se estimaron por 3.7 millones de pesos (CENAPRED, 2006).

6.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Con la finalidad de llevar a cabo la caracterización de la zona de estudio se procedió a realizar la recopilación de información fisiográfica e hidrométrica.

6.2.1. Información fisiográfica

Dentro de la información fisiográfica se procedió a recopilar información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que corresponde a archivos en formato vectorizado, la información fue:

- Información topográfica,
- Red hidrográfica y cuerpos de agua,
- Uso y cobertura vegetal del suelo,
- Tipo de suelo,
- Modelo digital de elevación,
- Cuenca hidrológica

Para la información topográfica, se obtuvieron las curvas de nivel con intervalo a cada 10 metros, Figura 6.5; la red hidrográfica que existe en la zona de estudio se muestra en la Figura 6.6, así como los cuerpos de agua existentes.

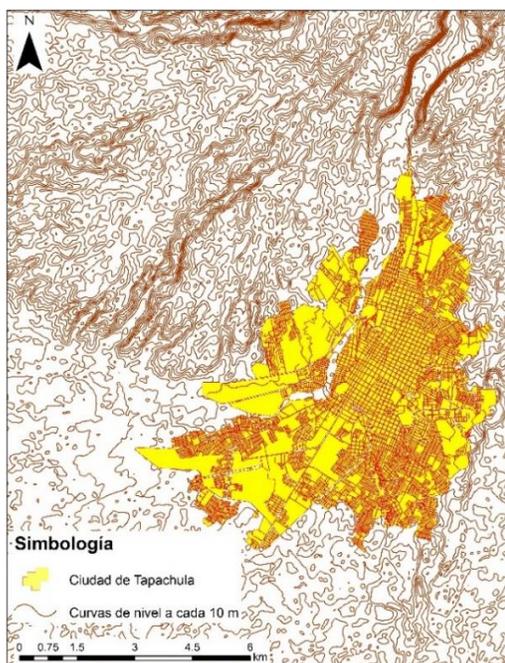


Figura 6.5 Topografía en la zona de estudio.

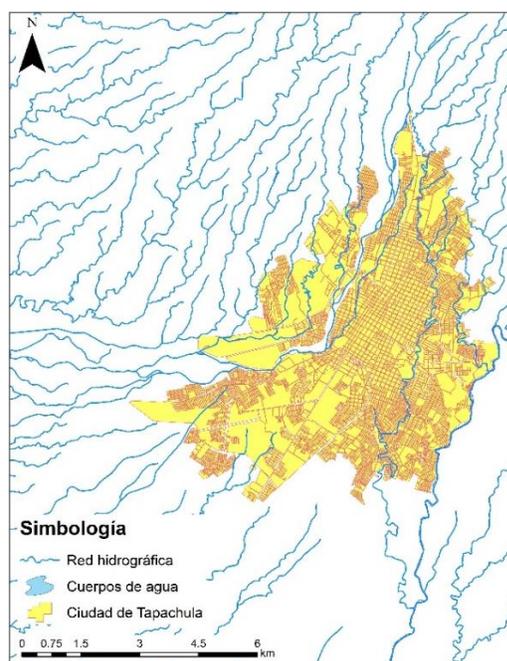


Figura 6.6 Red hidrográfica y cuerpos de agua en Tapachula.

En la zona de estudio, de acuerdo con la información de INEGI, predomina la agricultura y los pastizales como se muestra en la Figura 6.7. Respecto al tipo de suelo, el Luvisol es el tipo que más predomina debido a que este suelo se produce en regiones más lluviosas, Figura 6.8.

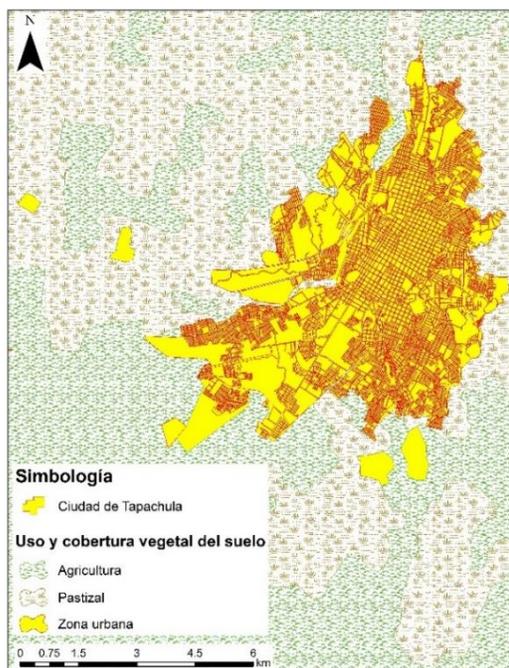


Figura 6.7 Uso y cobertura vegetal del suelo

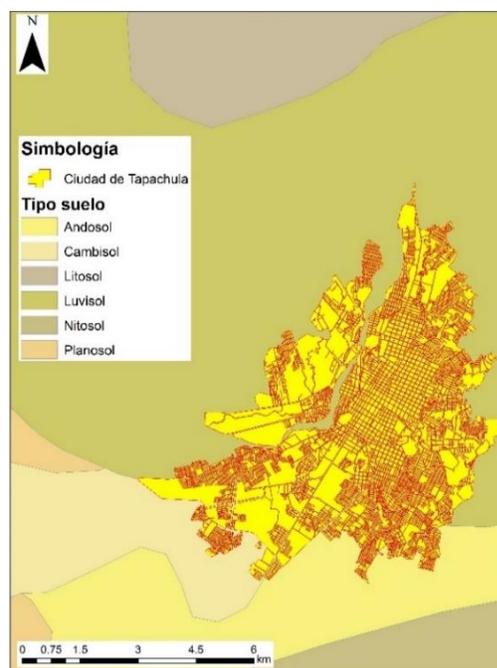


Figura 6.8 Tipo de suelo en Tapachula

El 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. Para trazar la cuenca hidrológica en la zona de estudio se descargó el MDE de INEGI cuya resolución es de 15x15 metros, Figura 6.9.

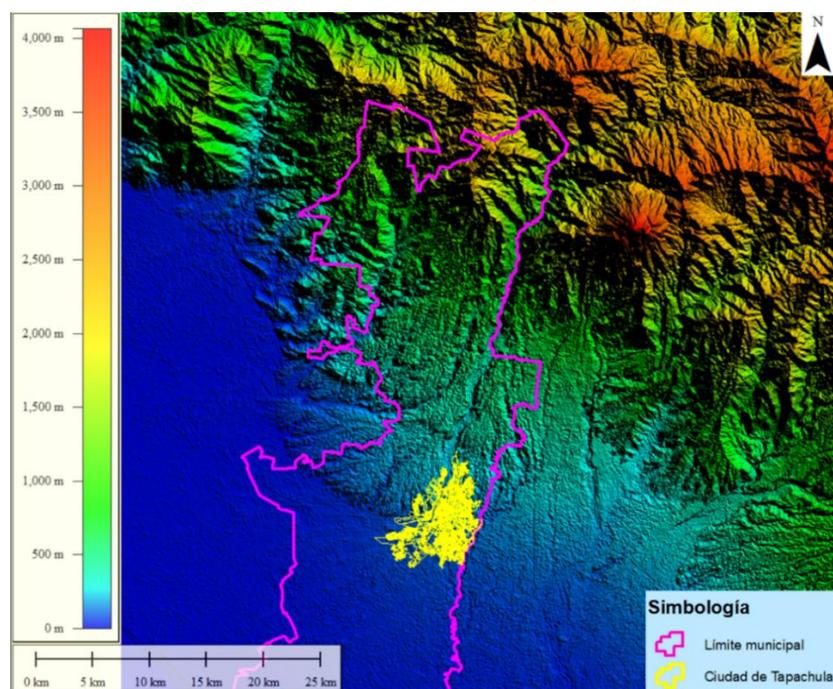


Figura 6.9 Modelo Digital de Elevación con resolución de 15x15 metros.



Dentro de la página de INEGI, se investigó si existía un MDE con resolución más detallada que el de 15x15 metros y se encontró que la ciudad de Tapachula contaba con tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés), pues son modelos de alta resolución y gran exactitud. Los modelos digitales de superficie (MDS) y los modelos digitales de terreno (MDT) LiDAR, resultan particularmente útiles en el análisis de las áreas susceptibles a inundarse, en virtud del gran nivel de detalle que ofrecen.

En la Figura 6.10 se muestra el MDT LiDAR para la ciudad de Tapachula con resolución de 5x5 metros.

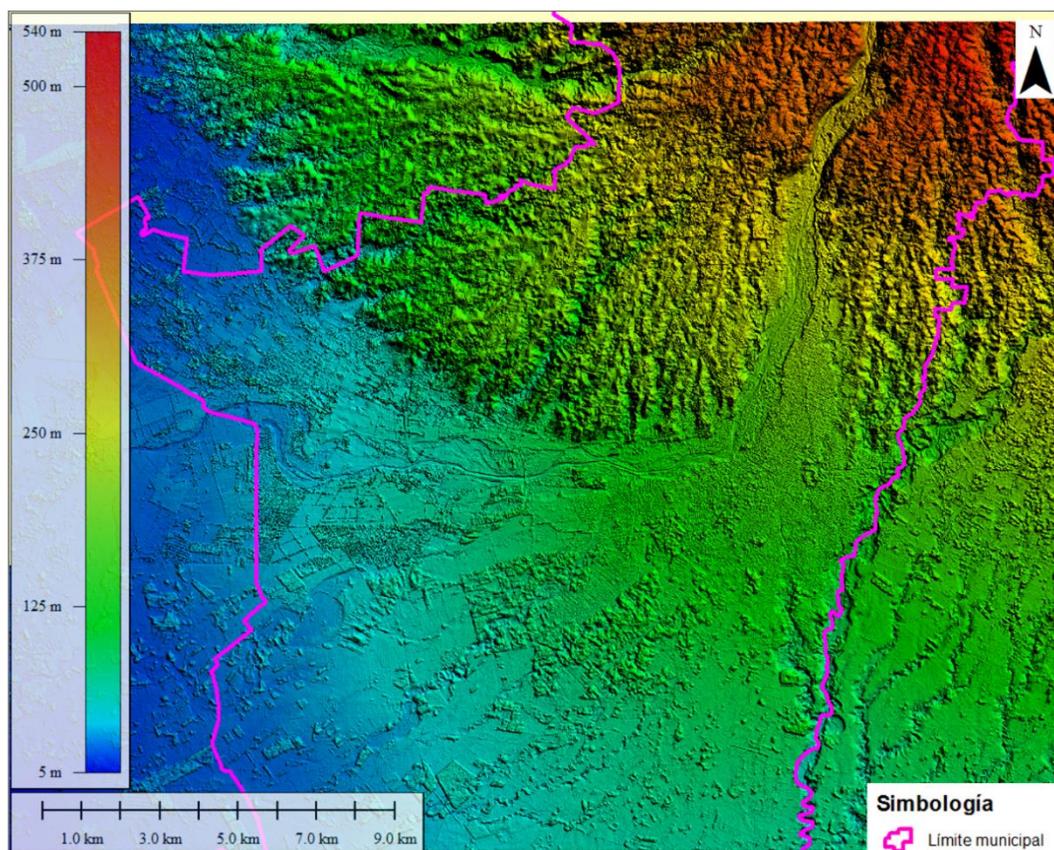


Figura 6.10 Modelo Digital de Terreno LiDAR con resolución de 5x5 metros.

La cuenca hidrológica que tiene influencia sobre la ciudad de Tapachula es la cuenca del río Coatán, esta cuenca es la más pequeña de las seis cuencas transfronterizas que México y Guatemala comparten en su frontera común y su río principal es el río Coatán. Abarca los municipios de Tapachula, Cacahoatán y Motozintla; el 60% de la cuenca se encuentra en territorio mexicano y el 40% restante está en Guatemala, Figura 6.11.



Debido a que una parte de la cuenca se encuentra en Guatemala, para delimitar el parteaguas se hizo con ayuda del MDE de 15x15 metros y con el Software libre GRASS GIS que es un Sistema de Información Geográfica (SIG).

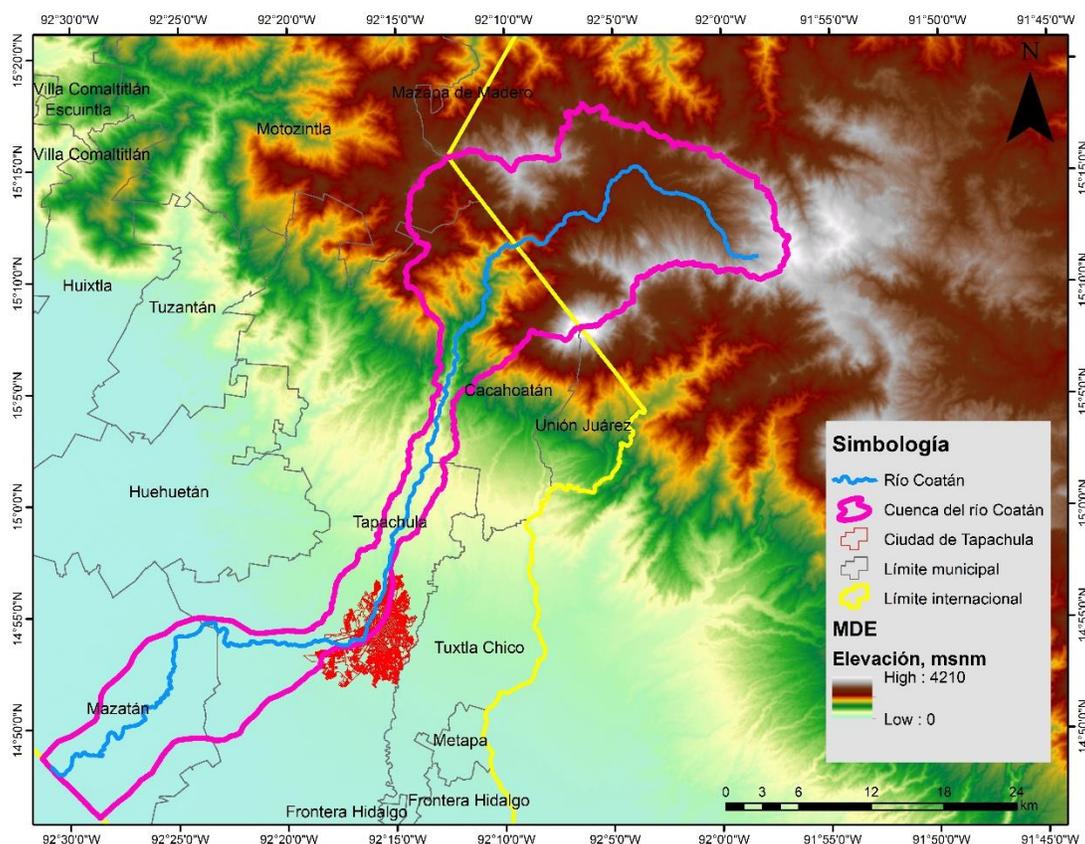


Figura 6.11 Cuenca del río Coatán. Elaboración propia.

6.2.2. Información hidrométrica

Para realizar el análisis de la información hidrométrica con métodos estadísticos, se procedió a recopilar la información de las estaciones hidrométricas que pertenecen a la zona de estudio.

Después de realizar el análisis de la información del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) se ubicó una estación hidrométrica en la zona de estudio, Mal Paso, la cual mide el caudal del río Coatán, Figura 6.12.

La estación hidrométrica 23006 - Mal Paso se ubica aguas arriba de la ciudad de Tapachula, sus coordenadas son 14°59'23.58" de latitud norte y 92°14'38.52" de longitud oeste.

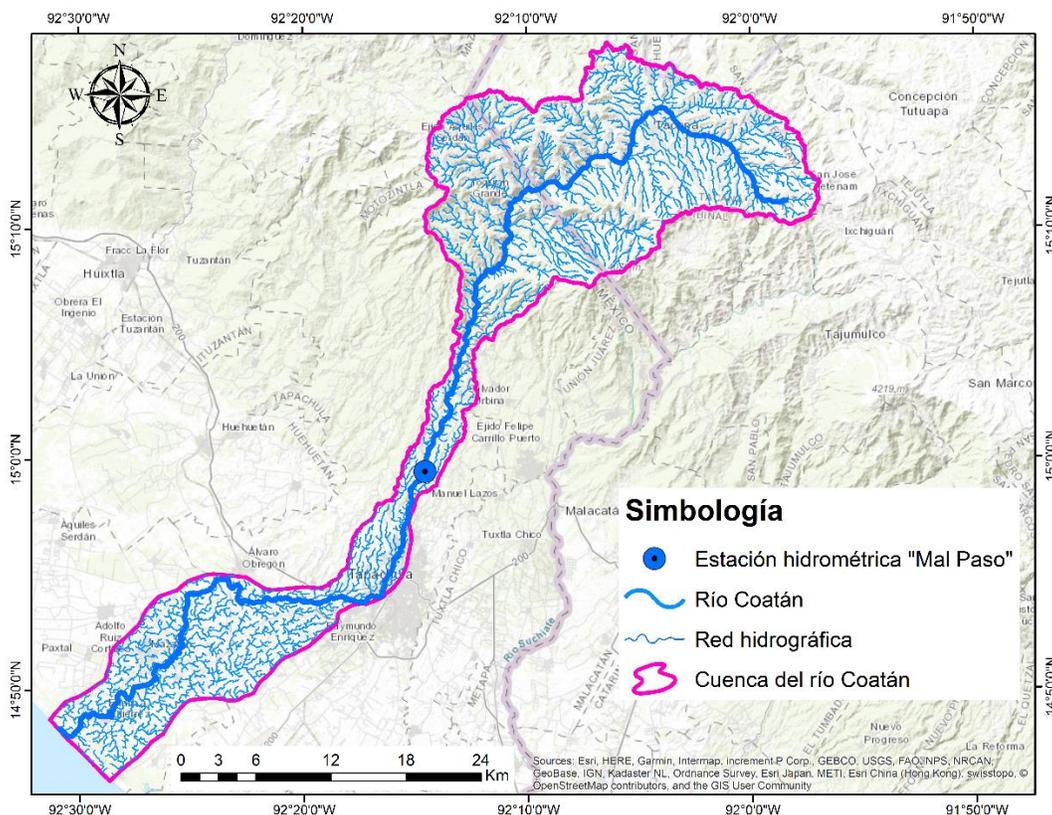


Figura 6.12 Localización de la estación hidrométrica "Mal Paso". Elaboración propia.

La estación Mal Paso cuenta con registros de 1954-1956, 1960-1978, 1988-1989, 1992-1993, 1997, 1999, 2001-2005, 2008-2009 y 2011-2014, Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Estación hidrométrica Mal Paso en Tapachula, Chiapas.

Clave	Nombre	Periodo de registro	Años completos
23006	Mal Paso	1954-1956, 1960-1978, 1988-1989, 1992-1993, 1997, 1999, 2001-2005, 2008-2009 y 2011-2014	39

Elaboración propia

De la estación Mal Paso se extrajeron los datos de gastos máximos instantáneos anuales (Q_M) a partir de los archivos DA (Datos hidrométricos anuales) del BANDAS. Debido a que la información contenida en esta base de datos carece de registros de años en los que se tiene conocimiento de la ocurrencia de eventos extraordinarios como fue el de 2005, se optó por utilizar el gasto que estimó en 2007 Carlos Echeverri. Echeverri, utilizó dos métodos para la estimación del gasto del evento citado, el primero fue el denominado método de Curva Elevaciones - Gasto que consiste en ajustar una curva a una nube de puntos ubicados en un plano cartesiano de elevaciones contra sus respectivos gastos y el segundo método fue



el denominado Relación pendiente – n de Manning y fue aplicado a aquellas estaciones para las que se contaba con registros de aforos. En la Tabla 6.5 se muestran los registros de gastos máximos instantáneos incluyendo el calculado por Echeverri para el evento de 2005.

Tabla 6.5 Registro de gastos máximos instantáneos para la estación hidrométrica Mal Paso.

Nombre	Mal Paso				
Estación	23006				
Año	Q[m³/s]	Año	Q[m³/s]	Año	Q[m³/s]
1955	167.00	1975	597.00	1995	
1956	196.00	1976	141.00	1996	
1957		1977	111.00	1997	487.47
1958		1978	276.00	1998	
1959		1979		1999	90.69
1960	221.24	1980		2000	
1961	376.00	1981		2001	56.03
1962	534.00	1982		2002	55.41
1963	770.00	1983		2003	96.90
1964	151.00	1984		2004	94.35
1965	153.00	1985		2005	1959.80
1966	113.00	1986		2006	
1967	209.00	1987	119.00	2007	
1968	196.00	1988	144.71	2008	69.57
1969	358.00	1989	118.96	2009	56.77
1970	328.00	1990		2010	
1971	190.00	1991		2011	26.99
1972	507.00	1992	144.71	2012	5.41
1973	1327.00	1993	144.96	2013	7.31
1974	769.00	1994		2014	111.02

De igual manera, se extrajo la información de los gastos medios diarios (Q_{MD}) de la estación Mal Paso a partir de los archivos DD (Datos hidrométricos diarios), en la Tabla 6.6, se observan algunos de ellos.



Tabla 6.6 Registro de gastos medios diarios para la estación hidrométrica Mal Paso.

Año	Mes	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	.	.	.	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30	Día 31
1954	1					.	.	.	6.71	6.78	7.04	7.17	7.12
1954	2	7.05	6.99	6.95	6.92	.	.	.	5.48	5.42			
1954	3	5.34	5.27	5.19	5.12	.	.	.	5.38	5.30	5.20	5.13	5.25
1954	4	5.39	5.39	5.39	5.37	.	.	.	6.84	10.24	9.18	8.25	
1954	5	7.89	10.61	12.93	15.43	.	.	.	26.29	35.18	26.96	23.89	18.84
1954	6	25.01	19.88	27.45	30.06	.	.	.	39.64	41.49	44.66	45.22	
1954	7	45.40	44.36	38.09	35.52	.	.	.	31.55	36.77	40.11	39.04	36.62
1954	8	33.50	34.15	32.20	27.86	.	.	.	26.91	28.94	26.40	25.69	26.61
1954	9	29.17	30.99	31.95	46.56	.	.	.	58.64	55.71	66.99	51.16	
1954	10	49.55	46.98	47.51	58.61	.	.	.	31.76	30.03	27.42	26.56	23.68
1954	11	24.99	25.39	25.23	25.19	.	.	.	14.24	13.79	13.21	12.69	
1954	12	12.21	12.40	12.70	12.90	.	.	.	8.05	8.30	8.56	8.62	8.64
1955	1	8.59	8.11	7.62	7.56	.	.	.	7.98	7.75	7.54	7.54	7.62
1955	2	7.88	7.75	7.57	7.38	.	.	.	7.30	7.23			
1955	3	7.21	7.20	7.28	7.37	.	.	.	5.97	5.92	5.87	5.82	5.77
1955	4	5.72	5.67	5.62	5.56	.	.	.	5.34	5.36	5.37	5.38	
1955	5	5.33	5.29	5.39	5.49	.	.	.	7.96	9.35	9.03	7.13	9.22
1955	6	9.02	7.06	6.67	6.46	.	.	.	9.61	9.92	11.07	10.44	
1955	7	11.07	8.89	12.64	31.76	.	.	.	40.57	35.04	32.26	33.51	27.34
1955	8	34.49	36.27	33.43	30.09	.	.	.	35.21	36.46	34.92	34.97	35.79
1955	9	37.88	54.91	146.88	121.56	.	.	.	34.74	33.93	35.03	39.21	
1955	10	39.50	39.50	39.50	39.70	.	.	.	36.69	37.66	39.38	39.50	39.50
1955	11	39.94	40.20	38.61	36.79	.	.	.	17.70	19.29	18.74	16.64	
1955	12	16.40	16.59	16.65	16.39	.	.	.	12.79	13.05	12.99	12.81	12.71
.
.
.
2013	1	2.40	2.40	2.40	2.40	.	.	.	2.43	2.44	2.37	2.36	2.37
2013	2	2.39	2.40	2.37	2.37	.	.	.	2.11	2.06			
2013	3	2.05	2.04	2.05	2.05	.	.	.	2.02	2.03	2.03	1.94	1.98
2013	4	1.99	1.99	1.99	1.98	.	.	.	1.85	1.92	1.93	1.94	
2013	5	1.95	1.93	1.93	1.93	.	.	.	1.94	2.00	2.94	6.86	4.71
2013	6	2.57	2.56	2.58	2.70	.	.	.	1.94	1.94	1.94	1.94	
2013	7	2.04	2.79	2.52	2.47	.	.	.	2.45	2.47	2.46	2.46	2.45
2013	8	2.46	2.42	2.45	2.47	.	.	.	3.53	3.52	3.41	2.94	3.54
2013	9	3.53	3.52	3.52	3.41	.	.	.	2.51	2.49	2.48	2.49	
2013	10	2.51	2.52	2.51	2.50	.	.	.	2.47	2.47	2.48	2.49	2.50
2013	11	2.51	2.49	2.49	2.48	.	.	.	2.46	2.45	2.44	2.46	
2013	12	2.47	2.45	2.46	2.46	.	.	.	2.28	2.28	2.27	2.27	2.27
2014	1	2.27	2.27	2.27	2.27	.	.	.	1.83	1.83	1.82	1.83	1.82
2014	2	1.83	1.84	1.82	1.84	.	.	.	1.87	1.87			
2014	3	1.87	1.87	1.94	1.87	.	.	.	1.54	1.36	1.18	1.01	0.83
2014	4	0.70	0.72	0.59	0.73	.	.	.	3.65	2.65	3.78	3.88	
2014	5	3.91	3.96	3.94	3.96	.	.	.	12.38	12.47	12.86	12.91	12.85
2014	6	23.88	102.03	109.12	69.41	.	.	.	12.51	12.42	12.33	12.23	
2014	7	33.66	36.72	36.72	37.08	.	.	.	30.83	31.49	35.77	31.79	36.43
2014	8	36.72	36.72	36.72	36.72	.	.	.	36.88	37.86	45.20	37.51	40.26
2014	9	43.17	42.22	34.17	33.69	.	.	.	43.30	43.70	47.09	50.40	
2014	10	50.58	50.16	47.04	46.45	.	.	.	46.27	43.47	43.30	43.70	46.27
2014	11	43.47	42.92	40.09	40.30	.	.	.	36.72	36.72	36.72	36.72	
2014	12	36.42	33.93	33.99	36.19	.	.	.	33.69	33.69	33.69	33.69	33.69



6.3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica (RH) 23 Costa de Chiapas, que se localiza en la parte sureste de México, tiene un área aproximada de 11968.08 km² que corresponden al 0.61% del territorio nacional; el 90% de la RH 23 se encuentra en el estado de Chiapas y el 10% restante en Oaxaca. Colinda al norte con la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta, al oeste con la Región Hidrológica 22 Tehuantepec, al sur con el océano Pacífico y al este con Guatemala.

Con base en el estudio de disponibilidad de agua de la RH 23, se divide en cuatro cuencas, Figura 6.13. De acuerdo a la desembocadura de los sistemas de escurrimientos que tienen los 23 ríos principales que se localizan en la Costa de Chiapas:

- Laguna de Mar Muerto
- Río Pijijiapan y otros
- Río Huixtla y otros
- Río Suchiate y otros

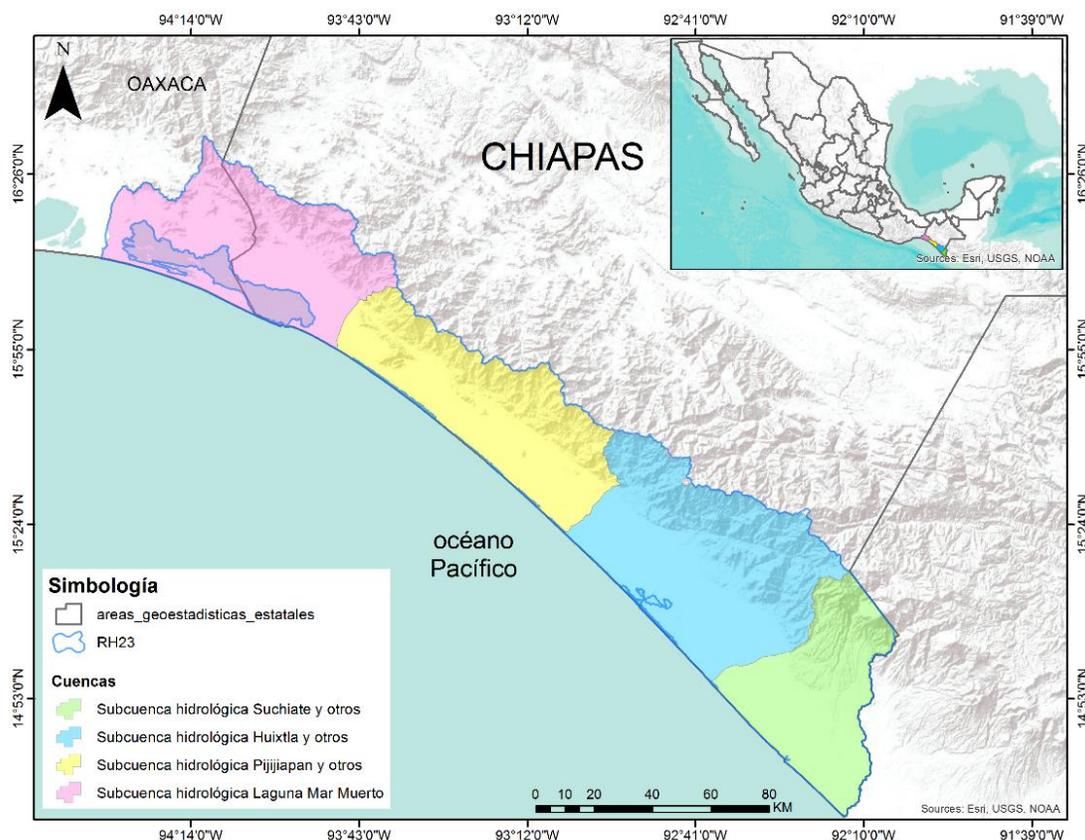


Figura 6.13 Cuencas hidrológicas de la RH 23 Costa de Chiapas. Elaboración propia.

Debido a que se cuenta con la estación hidrométrica Mal Paso, se decidió delimitar la cuenca hasta dicha estación con ayuda del Software libre GRASS GIS, Figura 6.14, con la finalidad de simular el escurrimiento medido en ese punto.

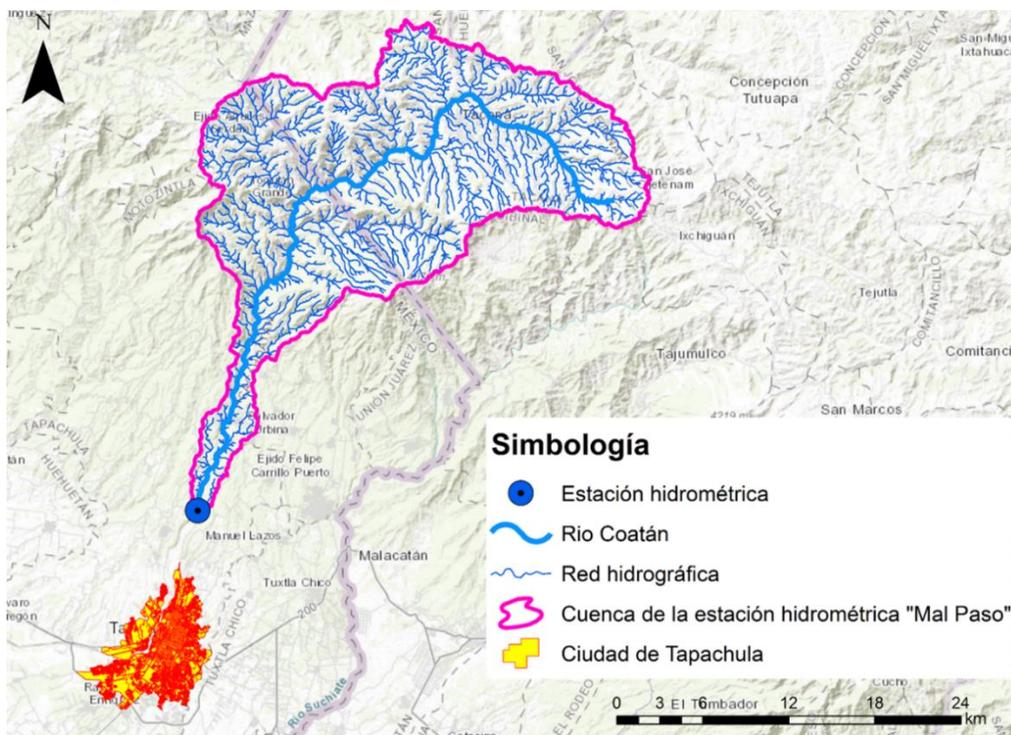


Figura 6.14 Delimitación de la cuenca hidrológica a la estación hidrométrica Mal Paso. Elaboración propia.

6.3.1. Fisiografía de la cuenca

Con base en la información recopilada se determinaron los parámetros fisiográficos principales de la cuenca a la estación hidrométrica Mal Paso, estos se muestran en la Tabla 6.7. En la Tabla 6.8 se mencionan las características principales de las corrientes y del cauce principal, cabe mencionar que el tiempo de concentración fue obtenido con la fórmula de Kirpich.

Tabla 6.7 Características fisiográficas de la cuenca Mal Paso.

Características fisiográficas de las cuencas	Abreviatura	Estación hidrométrica
		Mal Paso
		23006
Área drenada, km ²	A	435.00
Longitud del parteaguas, km	Lp	146.98
Coeficiente de desarrollo de la línea del parteaguas	mp	1.99
Parámetro de forma de la cuenca, 1/km	Pf	0.3379
Coordenadas del centro de gravedad de la cuenca, m	Xc	594475
	Yc	1679725



Longitud de la cuenca, km	Lc	48.894
Ancho máximo de la cuenca, km	Bmáx	19.263
Ancho medio de la cuenca, km	Bmed	8.897
Área izquierda, km	Aizq	193.69
Área derecha, km	Ader	241.31
Coefficiente de asimetría de la cuenca	Cac	-0.219
Pendiente media de la cuenca	Sc	22.16
Elevación media de la cuenca, msnm	Em	2277.135

Tabla 6.8 Características fisiográficas de la red de ríos de la cuenca Mal Paso.

Características fisiográficas de la red de ríos	Abreviatura	Estación hidrométrica
		Mal Paso
		23006
Orden de corrientes		5
Orden de la corriente principal		5
Longitud de tributarios de diferentes ordenes	# de orden	L, km
	1	397.13
	2	175.37
	3	72.84
	4	25.17
5	53.45	
Longitud del cauce principal, km	Lcp	61.15
Longitud del cauce principal en línea recta, km	Ld	36.270
Coefficiente de sinuosidad	Ks	1.686
Número total de corrientes (diferentes ordenes)	NTc	721
Densidad de corriente, 1/km ²	Dc	1.657
Longitud total de todas las corrientes en la red, km	LTC	723.96
Densidad de drenaje, 1/km	Dd	1.664
Pendiente media del cauce principal, %	Scp	3.34
Tiempo de concentración, hr	tc, hr	5.83

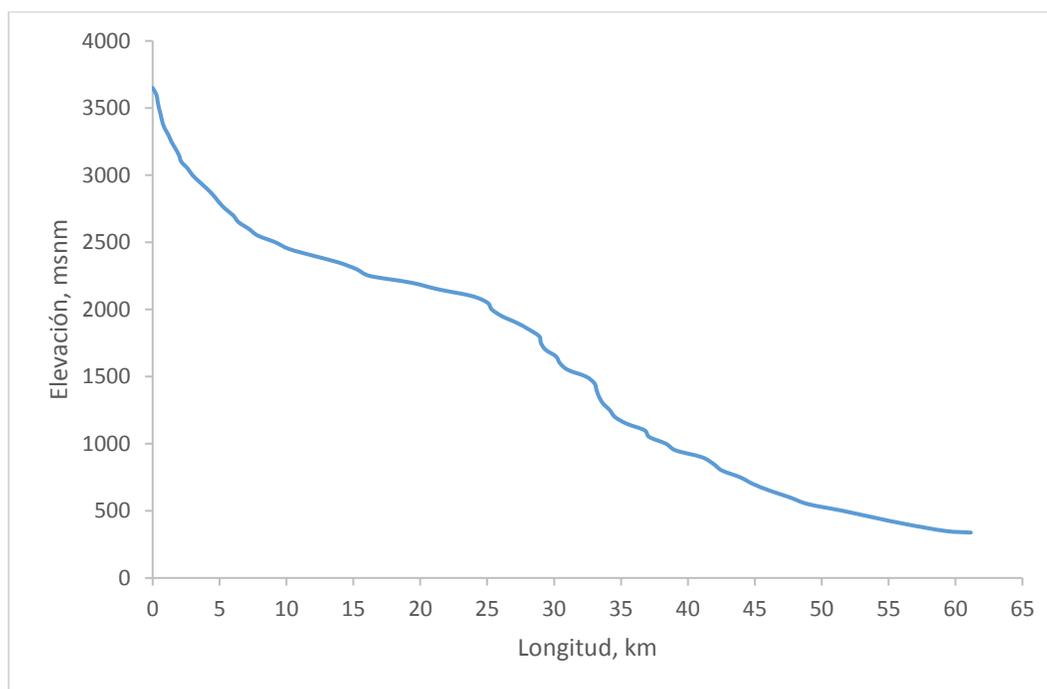
La corriente principal de la zona de estudio es el río Coatán. La pendiente del cauce principal es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta. Es decir, si se tienen dos cuencas con la misma forma y área, pero con diferente pendiente del cauce principal, se producirá una respuesta más rápida y un gasto mayor en aquella cuenca con mayor pendiente ante la tormenta presentada.

Para determinar la pendiente del río Coatán se utilizó el método de Taylor-Schwarz, en la Tabla 6.9 se muestra la elevación y cadenamamiento acumulado del río principal de la cuenca en estudio y en la Gráfica 6.1 se muestra el perfil del río Coatán.



Tabla 6.9 Elevación y cadenamiento del río Coatán.

Cadenamiento, km	Distancia parcial, km	Elevación, msnm	Cadenamiento, km	Distancia parcial, km	Elevación, msnm	Cadenamiento, km	Distancia parcial, km	Elevación, msnm
0.000	0.000	3650	9.171	1.311	2500	33.356	0.184	1350
0.273	0.273	3600	10.202	1.031	2450	33.654	0.298	1300
0.369	0.096	3550	12.001	1.799	2400	34.162	0.508	1250
0.468	0.099	3500	13.888	1.887	2350	34.541	0.379	1200
0.602	0.134	3450	15.236	1.347	2300	35.402	0.861	1150
0.713	0.110	3400	16.212	0.977	2250	36.762	1.361	1100
0.891	0.179	3350	19.288	3.076	2200	37.110	0.347	1050
1.178	0.287	3300	21.339	2.051	2150	38.359	1.250	1000
1.395	0.217	3250	23.850	2.510	2100	39.096	0.736	950
1.689	0.294	3200	25.025	1.175	2050	41.036	1.940	900
1.958	0.268	3150	25.345	0.320	2000	41.904	0.869	850
2.141	0.183	3100	26.096	0.752	1950	42.555	0.651	800
2.612	0.471	3050	27.223	1.126	1900	43.906	1.351	750
2.976	0.363	3000	28.138	0.915	1850	44.868	0.962	700
3.495	0.519	2950	28.890	0.752	1800	46.134	1.266	650
4.046	0.551	2900	29.019	0.129	1750	47.624	1.490	600
4.539	0.493	2850	29.363	0.344	1700	48.988	1.364	550
4.944	0.405	2800	30.141	0.778	1650	51.583	2.595	500
5.418	0.474	2750	30.436	0.295	1600	53.903	2.320	450
6.019	0.601	2700	31.029	0.593	1550	56.331	2.428	400
6.419	0.400	2650	32.383	1.354	1500	59.252	2.922	350
7.185	0.766	2600	33.014	0.631	1450	61.146	1.894	338
7.861	0.675	2550	33.172	0.158	1400			



Gráfica 6.1 Perfil del río Coatán hasta la estación hidrométrica Mal Paso. Elaboración propia.



6.3.2. Pruebas de homogeneidad

Una vez obtenidas las características fisiográficas de la cuenca se procedió a aplicar las pruebas de homogeneidad a la estación hidrométrica Mal Paso. La homogeneidad es vital para un estudio hidrológico ya que permite saber que estaciones tienen mejor correlación entre sí.

Las actividades humanas como la deforestación, aperturas de nuevas áreas de cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación modifican e inducen un cambio significativo en la homogeneidad de una cuenca (Escalante, 2005).

Existen diferentes pruebas de homogeneidad:

- Prueba estadística de Helmert,
- Prueba estadística t de Student,
- Prueba estadística de Cramer

6.3.2.1. Prueba estadística de Helmert

Esta prueba es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento en estudio con respecto a su media. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera como un cambio C.

La serie se considera homogénea si cumple:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1} \quad (6-1)$$

n; tamaño de muestra

En la Tabla 6.10 se muestra el resultado de la prueba estadística de Helmert para la estación Mal Paso.

Tabla 6.10 Resultado de la prueba estadística de Helmert.

Estación	Secuencias (S)	Cambios (C)	(S - C)	n	$\sqrt{n-1}$	$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1}$	Resultado
Mal Paso	28	10	18	39	6.16	$-6.16 \leq 18 \leq 6.16$	No Homogénea

6.3.2.2. Prueba estadística t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil.



Si se considera una serie de tamaño n, la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$ entonces el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (6-2)$$

\bar{X}_1, S_1^2 ; Media y varianza de la primera parte del registro, n_1

\bar{X}_2, S_2^2 ; Media y varianza de la segunda parte del registro, n_2

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, Tabla 6.11, y con $U = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad para un nivel de $\alpha = 0.05$.

Si y sólo si, el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

Tabla 6.11 Grados de Libertad de la prueba t de Student.

Grados de libertad	Una cola 5%	Dos colas 5%
1	6.314	12.706
2	2.92	4.303
3	2.353	3.182
4	2.132	2.776
5	2.015	2.571
6	1.943	2.447
7	1.895	2.365
8	1.86	2.306
9	1.833	2.262
10	1.812	2.228
11	1.796	2.201
12	1.782	2.179
13	1.771	2.16
14	1.761	2.145
15	1.753	2.131
16	1.746	2.12
17	1.74	2.11
18	1.734	2.101
19	1.729	2.093
20	1.725	2.086



21	1.721	2.08
22	1.717	2.074
23	1.714	2.069
24	1.711	2.064
25	1.718	2.06
26	1.706	2.056
27	1.703	2.052
28	1.701	2.048
29	1.699	2.045
30	1.697	2.04
40	1.684	2.021
60	1.671	2
120	1.658	1.98
∞	1.645	1.96

En la Tabla 6.12 se muestran los resultados obtenidos para la prueba de homogeneidad t de Student.

Tabla 6.12 Resultado de la prueba estadística t de Student.

Estación	n	\bar{X}_1	\bar{X}_2	S_1	S_2	t_d	U	t	$t_d < t$	Resultado
Mal Paso	39	19	20	309.66	425.48	1.43	37	2.03	1.43 < 2.03	Homogénea

6.3.2.3. Prueba estadística de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad en el registro Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro.

La prueba compara el valor de \bar{Q}_j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos \bar{Q}_{60} y \bar{Q}_{30} . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media. Se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6-3)$$

$$S_x = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (6-4)$$

$$\bar{X}_{60} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n_{60}} \quad (6-5)$$

$$\bar{X}_{30} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n_{30}} \quad (6-6)$$



$$\tau_{60} = \frac{\bar{X}_{60} - \bar{X}}{S_x} \quad (6-7)$$

$$\tau_{30} = \frac{\bar{X}_{30} - \bar{X}}{S_x} \quad (6-8)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n-2)}{n - n_w[1 + (\tau_w)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w| \quad (6-9)$$

Para $w = 60$ y $w = 30$

El estadístico t_w tiene distribución t de Student de dos colas con $U = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$. La muestra se considera homogénea si τ_{60} y τ_{30} son menores a t de Student. En la Tabla 6.13 se muestran los resultados de esta prueba.

Tabla 6.13 Resultado de la prueba estadística de Cramer.

Estación	n1	n2	\bar{X}_{60}	\bar{X}_{30}	S_1	S_2	t_{60}	t_{30}	U	t	$t_{60} < t$	$t_{30} < t$	Resultado
Mal Paso	23	12	247.13	219.19	419.69	549.23	0.92	0.81	33	2.03	$0.92 < 2.03$	$0.81 < 2.03$	Homogénea

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los tres métodos estadísticos de homogeneidad y con base en los resultados la muestra es homogénea.

Tabla 6.14 Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad.

Estación	Mal Paso
Helmert	NO HOMOGENEA
t - Student	HOMOGENEA
Cramer	HOMOGENEA
Resultado final	HOMOGENEA

6.3.3. Prueba de Independencia

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, este compuesta por variables aleatorias. Para aprobarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace usos del coeficiente de correlación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k (Escalante, 2005).

La expresión para obtener el coeficiente de auto correlación serial de retraso k es:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (6-10)$$



$$\text{para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3}$$

Donde

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{X_t}{n} \quad (6-11)$$

X_t Serie de tiempo (gastos máximos anuales)

k Tiempo de retraso

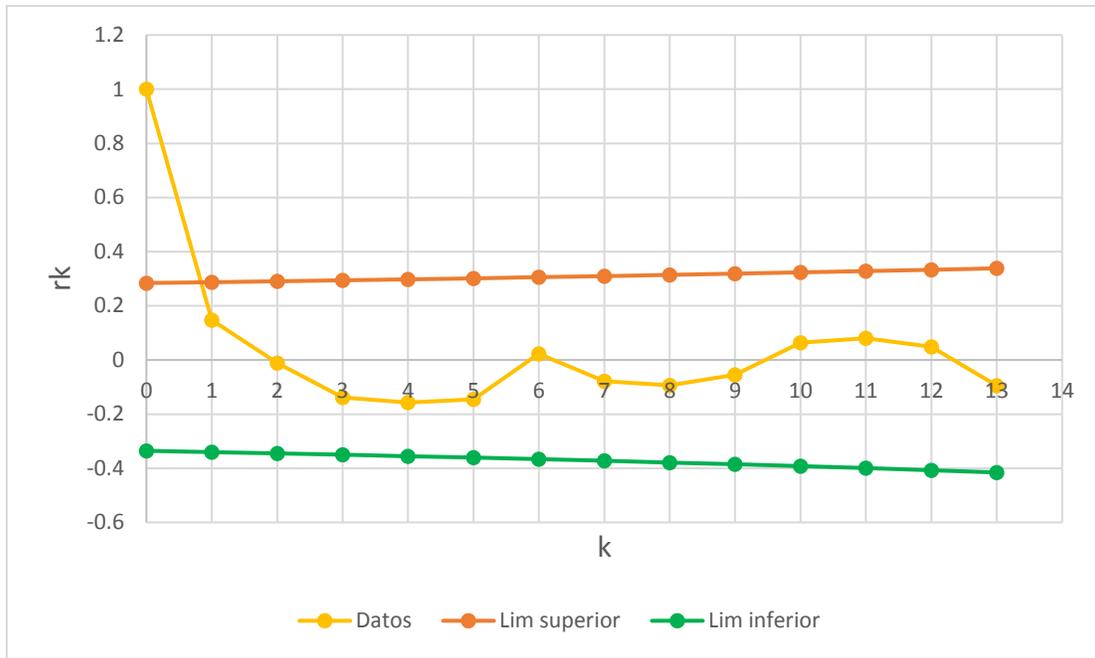
Además, tomando en cuenta los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como:

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad (6-12)$$

A la gráfica de los valores estimados para r_k^j contra los tiempos de retraso k junto con sus correspondientes límites de confianza, se le denomina correlograma.

Si el 90% de los tiempos de retraso quedan dentro de los límites de confianza en el correlograma se dice que la muestra es independiente y por lo tanto sigue las leyes de la probabilidad.

En la Gráfica 6.2 se presenta el correlograma de la estación hidrométrica Mal Paso, donde se observa que la muestra es independiente pues los tiempos de retraso quedan dentro de los límites de confianza.



Gráfica 6.2 Correlograma de la estación hidrométrica Mal Paso.

6.3.4. Análisis de frecuencias de avenidas

El análisis de frecuencias de los gastos máximos instantáneos anuales de la estación hidrométrica Mal Paso se realizó con ayuda del Software AX, desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el cual ajusta las siguientes funciones de probabilidad:

- Distribución Normal Estandarizada
- Distribución Log Normal
- Distribución Gumbel
- Distribución Exponencial
- Distribución Gamma
- Distribución Doble Gumbel

El AX realiza el cálculo de los estimadores por dos momentos: el método de los momentos y el método de Máxima Verosimilitud.

En la Tabla 6.15 se muestra los resultados del error estándar de ajuste (EEA) para las diferentes distribuciones.



Tabla 6.15 Error Estándar de Ajuste para las diferentes distribuciones de probabilidad en la estación Mal Paso.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	242.207	-	242.207	-
Lognormal	140.522	137.614	73.489	67.749
Gumbel	181.175	-	224.854	-
Exponencial	137.709	-	168.064	-
Gamma	134.077	134.042	174.093	11111.000
Doble Gumbel	92.963			
Mínimo error estándar:			67.749	
calculado por la función:			Log Normal (Max. Ver.) 3P	

Como se observa en la tabla anterior, la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusto es la Log Normal de tres parámetros por Máxima Verosimilitud, sin embargo, debido a la situación geográfica de la República Mexicana, las distribuciones de probabilidad de los gastos máximos anuales de muchas corrientes se apegan al comportamiento de las funciones Gumbel (Fuentes et al., 2015); en muchos otros casos en los que los gastos máximos anuales son resultado tanto de eventos de tipo ciclónico como no ciclónico, la función Doble Gumbel o Gumbel de dos poblaciones constituye una mejor alternativa (González, 1970).

Es por ello que tras varias revisiones de los parámetros p, α y β para la función Doble Gumbel y haciendo las adecuaciones en las funciones obtenidas con la optimización del Software AX se realizó el ajuste automático en los casos en que se propusieron cambios del parámetro p . Para comprobar que la función Doble Gumbel, ya con la optimización del parámetro p , efectivamente representará el comportamiento natural real de los eventos presentados en la estación Mal Paso, se realizó la Gráfica 6.3. En ella se observa que el ajuste empleado por esta función tiene una gran correspondencia tanto en la primera población como en la segunda población, que representa los eventos extremos y define los eventos para periodos de retorno grandes.

La Tabla 6.16 presenta los resultados obtenidos al estimar los parámetros de la función Doble Gumbel, así como el error estándar de ajuste (EEA), observándose que dicho error es menor que el ajustado por la función Log Normal.

Tabla 6.16 Resultados de los parámetros de la función Doble Gumbel.

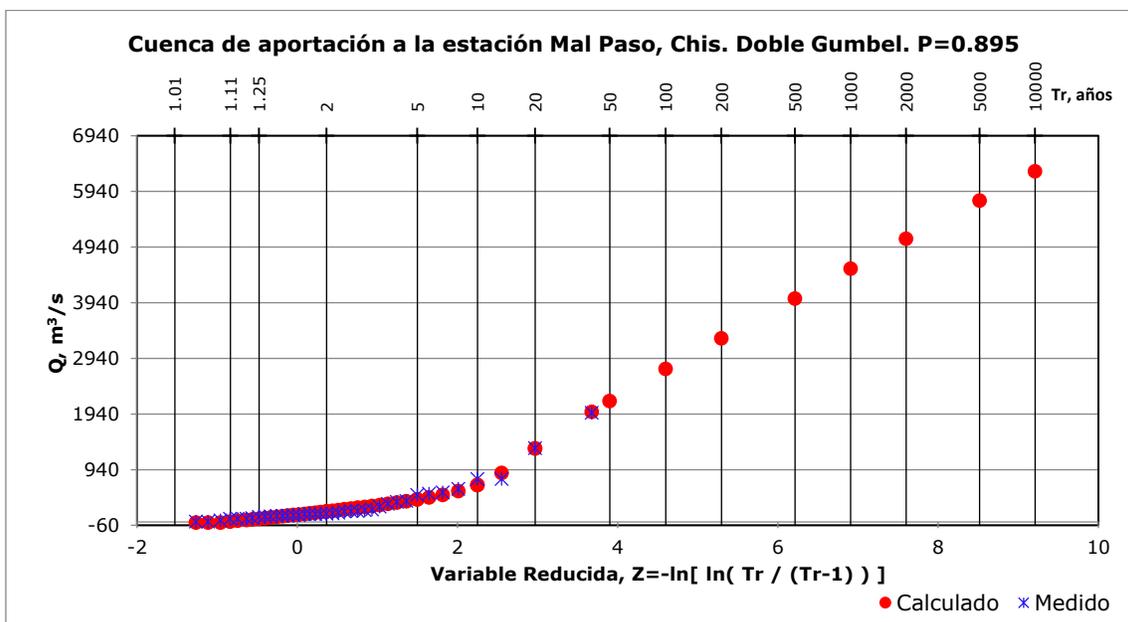
Función	β_1	α_1	β_2	α_2	P	EEA
Doble Gumbel	116.58	0.00715	980.20	0.00130	0.895	46.401



Finalmente, con los valores de los parámetros obtenidos en la tabla anterior, se procedió a extrapolar la función Doble Gumbel para obtener los gastos de diseño (Q_T), en la Tabla 6.17 se muestran los Q_T asociados a diferentes periodos de retorno.

Tabla 6.17 Gastos asociados a diferentes periodos de retorno.

Tr años	Q_T m ³ /s
2	189.22
5	404.12
10	661.18
20	1318.68
50	2174.22
100	2748.1
200	3299.88
500	4015.04
1000	4551.41
2000	5085.73
5000	5776.23
10000	6302.32



Gráfica 6.3 Comparación entre los valores medidos y los calculados con la función Doble Gumbel.



6.3.5. Hidrogramas de avenidas históricas en la estación hidrométrica Mal Paso

La estimación de la avenida se hizo con la técnica de mayoración del hidrograma que presenta el gasto máximo y de esta manera reconstruir el hidrograma asociado a la avenida más adversa, así como el volumen que se produce para ser transitado en el río con el objetivo de calcular el riesgo a inundar la ciudad de Tapachula.

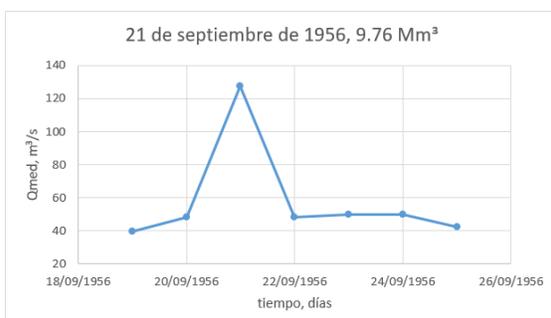
Para llevar a cabo dicha técnica se procedió a identificar las fechas en que se presentaron los gastos máximos instantáneos y con ayuda de los gastos medios diarios se definió la avenida. En las siguientes gráficas se muestran algunas avenidas y el volumen que estas aportaron en distintos años.



Gráfica 6.4 Avenida junio de 1954



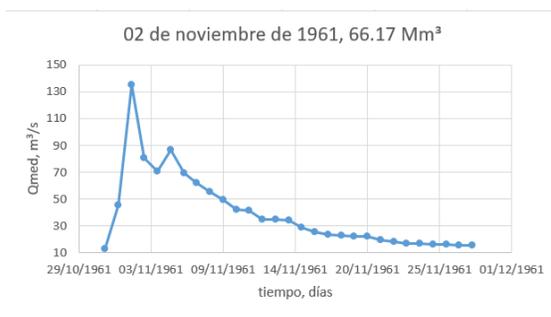
Gráfica 6.5 Avenida septiembre de 1955



Gráfica 6.6 Avenida septiembre de 1956



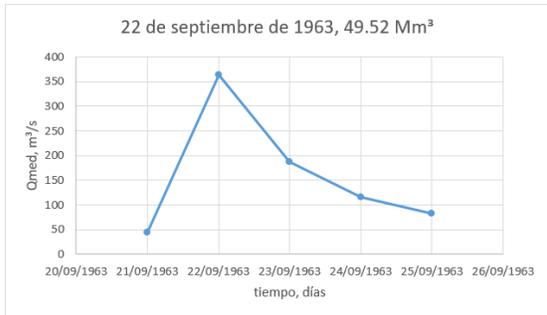
Gráfica 6.7 Avenida octubre de 1960



Gráfica 6.8 Avenida noviembre de 1961



Gráfica 6.9 Avenida junio de 1962



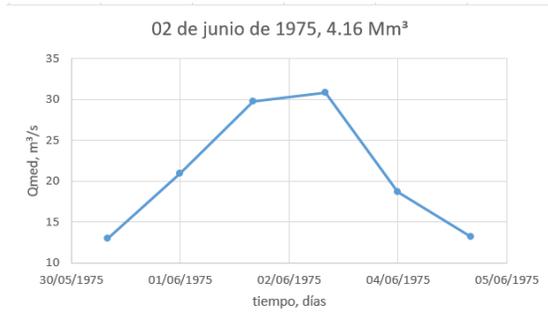
Gráfica 6.10 Avenida septiembre de 1963



Gráfica 6.11 Avenida junio de 1966



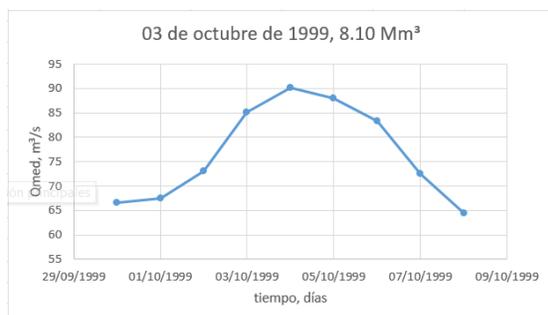
Gráfica 6.12 Avenida agosto de 1973



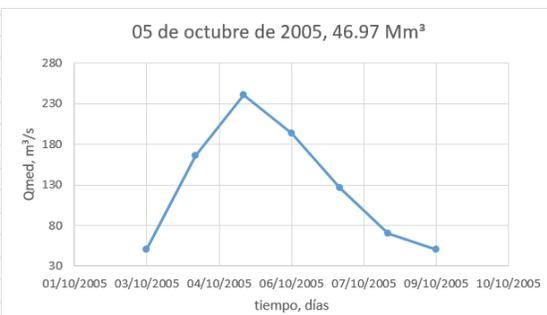
Gráfica 6.13 Avenida junio de 1975



Gráfica 6.14 Avenida agosto de 1989



Gráfica 6.15 Avenida octubre de 1999



Gráfica 6.16 Avenida octubre de 2005



Gráfica 6.17 Avenida junio de 2014

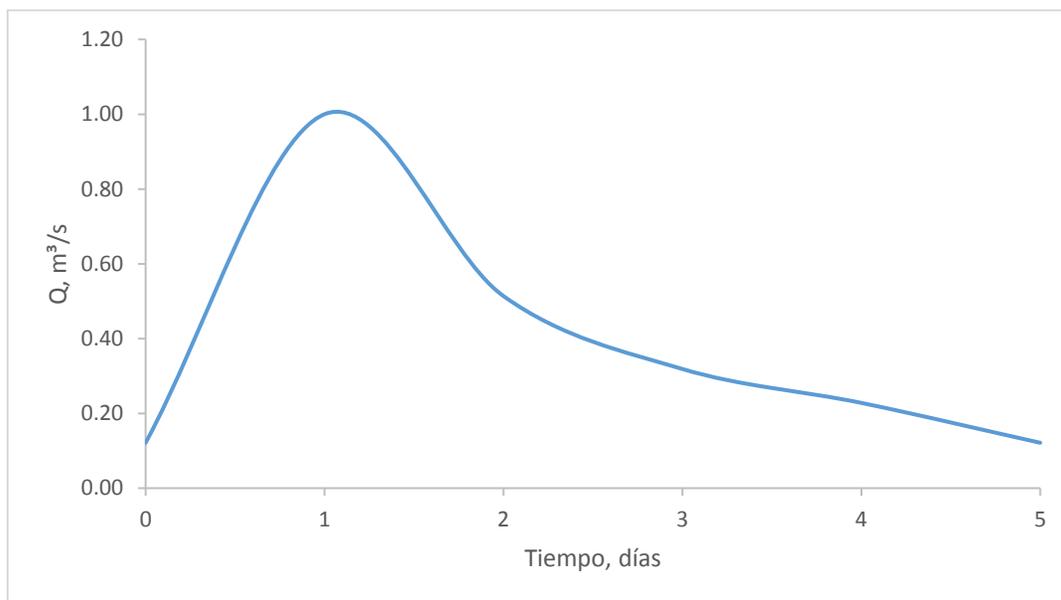


Con base en las avenidas registradas para cada año se pudo observar que el gasto máximo de cada una de ellas no necesariamente corresponde a un hidrograma con el mayor volumen, ya que estos hidrogramas son originados por la influencia o remanentes de ciclones tropicales por lo que presentan distintas formas y picos.

Los escurrimientos históricos más grandes que ha registrado la estación hidrométrica Mal Paso han sido de 1959.80 m³/s, 1327 m³/s y 770 m³/s correspondientes a 2005, 1973 y 1963, respectivamente. Para seleccionar la avenida más adversa se utilizaron las tres avenidas mencionadas anteriormente y con base al escurrimiento generado se seleccionó la avenida de 1963 cuyo volumen fue de 49.52 Mm³.

6.3.6. Método de Mayoración

Una vez elegida la avenida más adversa se procede a construir el hidrograma adimensional, donde cada ordenada se obtuvo como Q_i/Q_p para $i = 1$ hasta la duración d (horas o días), en la Gráfica 6.18 se presenta el hidrograma adimensional.

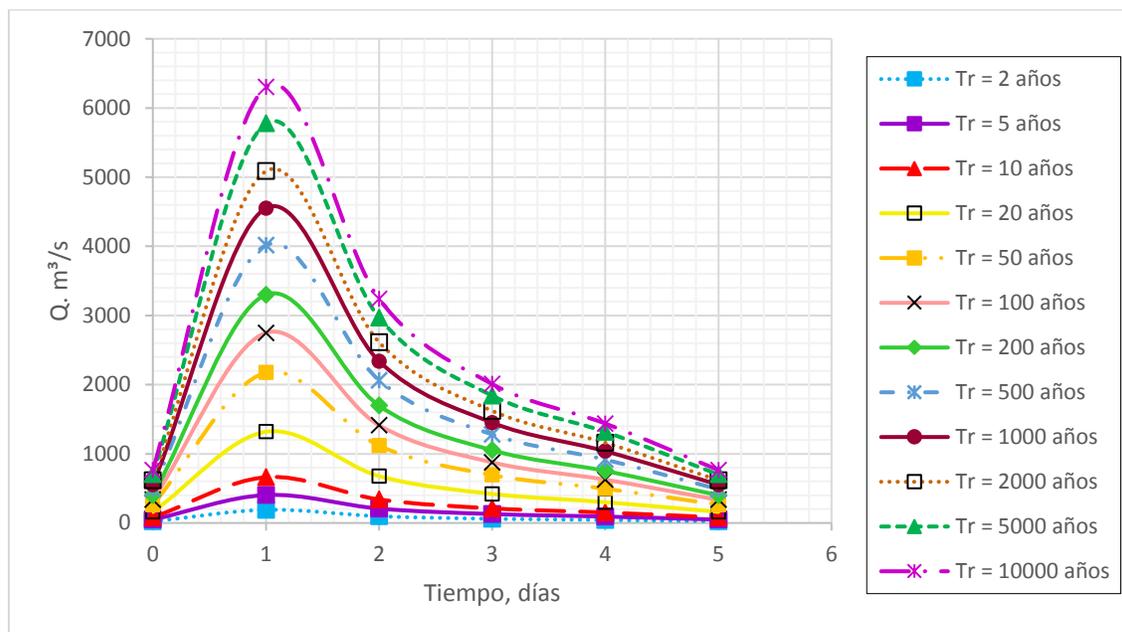


Gráfica 6.18 Hidrograma adimensional obtenido a partir de la avenida de septiembre de 1963.

Con el hidrograma adimensional se realizó la mayoración para obtener las avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno, se multiplicó cada ordenada del hidrograma adimensional por el valor estimado de Q_T , obteniendo así avenidas con las mismas características de la más adversa registrada, solo que más grande.



En la Gráfica 6.19 se muestran las avenidas de diseño a diferentes periodos de retorno.



Gráfica 6.19 Avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno en la estación Mal Paso.

6.4. ANÁLISIS HIDRÁULICO

Para determinar las áreas propensas a inundarse o las llanuras de inundación en la zona de estudio se utilizó el Software de uso libre HecRAS 5.0.1, a partir de 2016 el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos ha añadido la capacidad de realizar el análisis del flujo bidimensional (2D) dentro de la parte de análisis de flujo en estado transitorio.

Para realizar la simulación 2D en estado transitorio del río Coatán se llevó a cabo la siguiente metodología.

6.4.1. Desarrollo de un modelo de terreno

Es necesario crear un modelo de terreno en HecRAS dentro de la plataforma RAS Mapper  antes de realizar cualquier cálculo que contenga áreas de flujo bidimensionales, para ello, la ciudad de Tapachula cuenta con LiDAR cuya resolución es de 5x5 metros. Entonces, como primer paso, se le asigna la proyección de referencia espacial a la ventana de RAS Mapper, Figura 6.15.

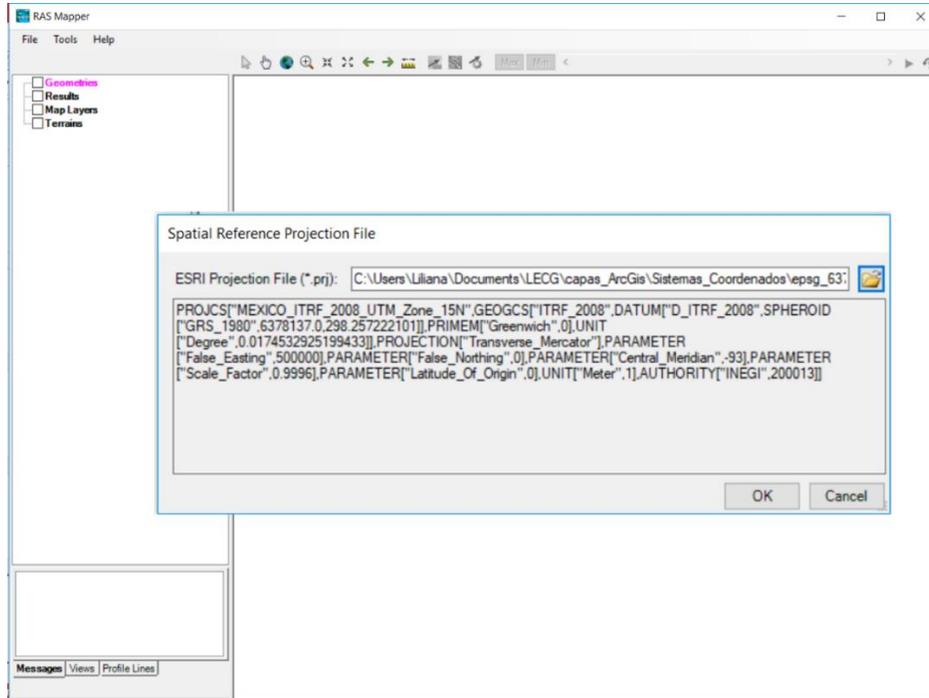


Figura 6.15 Configuración del sistema de referencia espacial del proyecto.

Una vez configurado el sistema de referencia espacial, se procedió a cargar el modelo digital de elevaciones LiDAR de la ciudad de Tapachula, en formato de punto flotante (.flt), Figura 6.16.

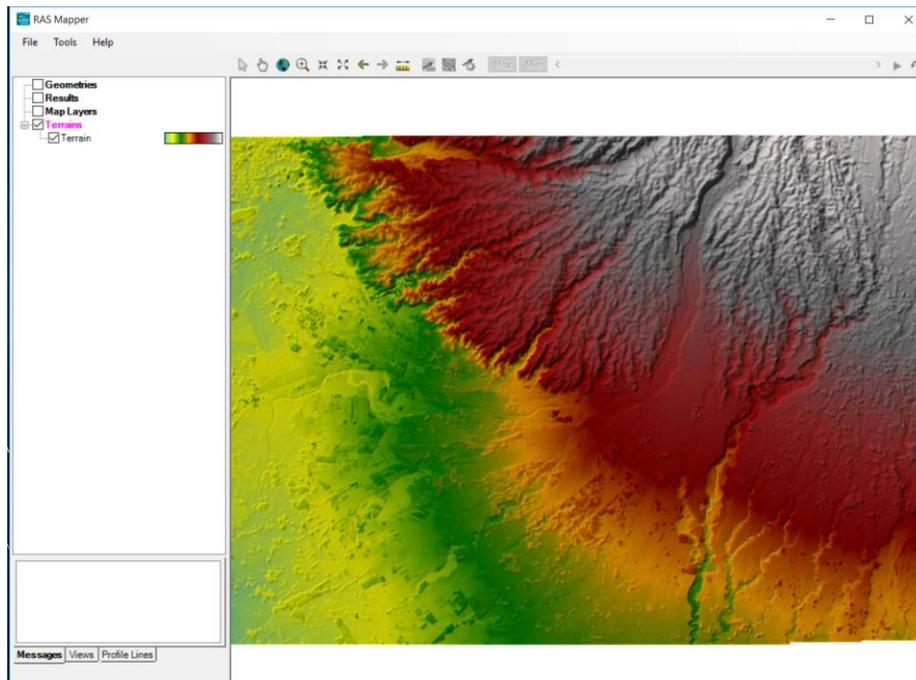


Figura 6.16 Modelo de terreno para la ciudad de Tapachula, Chiapas.

6.4.2. Desarrollo de la Malla computacional 2D

HecRAS permite el uso de una malla computacional estructurada o no estructurada, es decir, la malla computacional puede ser una mezcla de celdas computacionales de hasta ocho lados cada celda, la cual se debe dibujar dentro de los límites del modelo digital de terreno.

Para dibujar la malla se hizo con la herramienta *2D Flow Area*  dentro de la ventana *Geometric Data*, en la Figura 6.17 se muestra el área 2D que se utilizó para simular el río Coatán en la ciudad de Tapachula cuya resolución de la malla computacional fue de 30x30 metros.

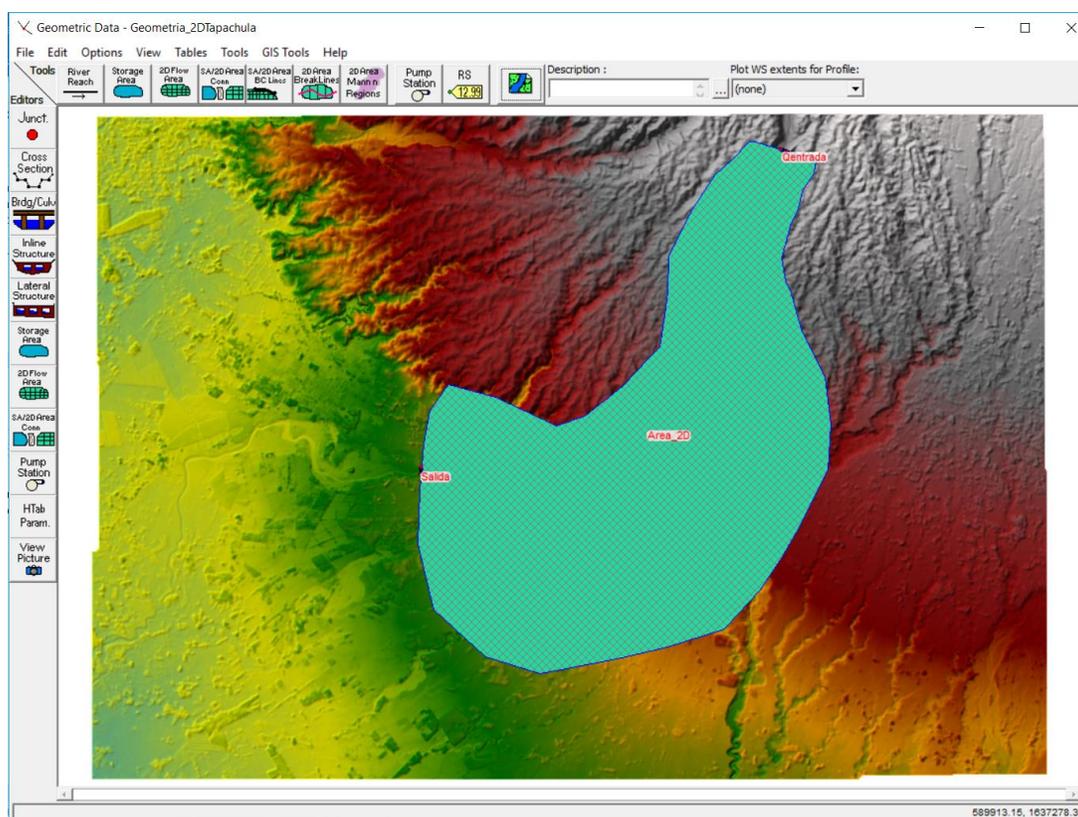


Figura 6.17 Área 2D para simular el río Coatán en la ciudad de Tapachula, Chiapas.

6.4.3. Creación de la capa de rugosidad de Manning espacialmente variada

Dentro de la ventana RAS Mapper se puede crear un conjunto de datos de cobertura de uso de suelo y luego asociarlo con un grupo específico de datos geométricos para asignarle los valores de rugosidad n de Manning.

Con ayuda de la capa en formato shape del uso y cobertura vegetal del suelo, se extrajo únicamente un polígono de dicha capa para la ciudad de Tapachula y se importó a RAS Mapper para asignarle los valores de rugosidad a cada uso del suelo presentes en la zona de estudio. En la Figura 6.18 se muestra la capa de clasificación de uso de suelo en la ciudad de Tapachula y su respectiva tabla de valores de rugosidad n de Manning (Chow, 2004).

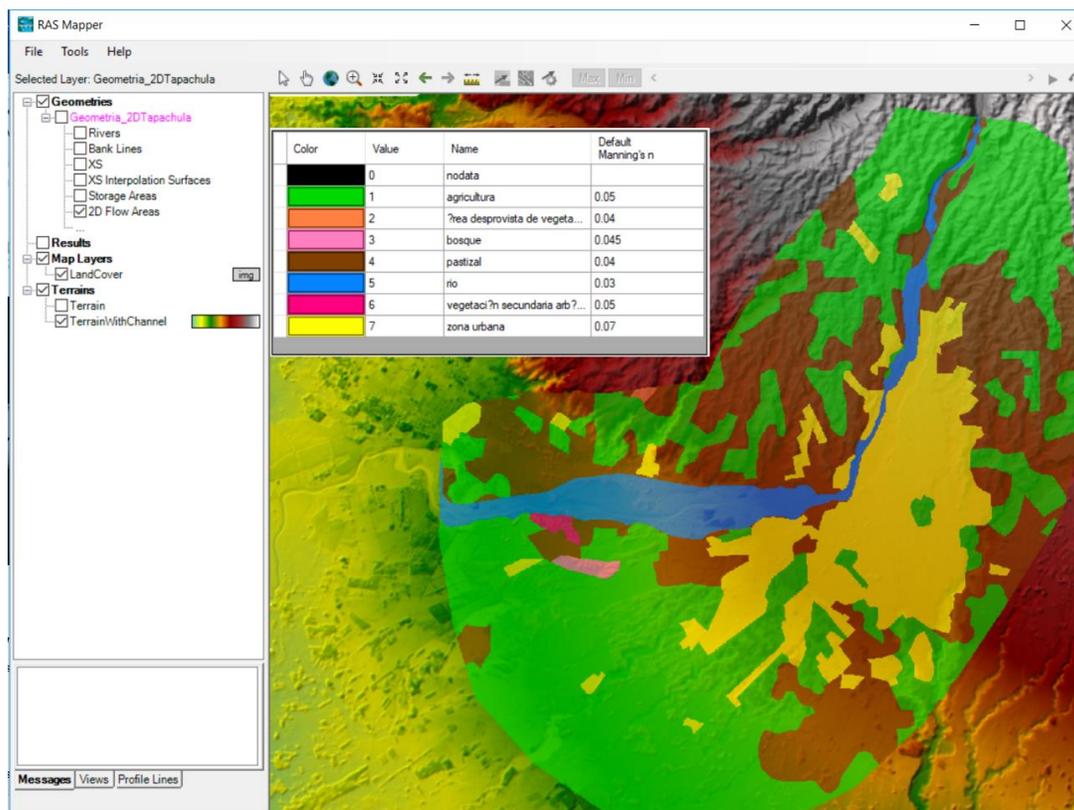


Figura 6.18 Uso de suelo y valores de rugosidad n de Manning en la ciudad de Tapachula, Chis.

Esta capa es importante durante la etapa de pre procesamiento del área de flujo 2D ya que cada celda de la malla computacional se pre-procesa para desarrollar tablas hidráulicas detalladas basadas en el terreno subyacente utilizado en el proceso de modelación.

6.4.4. Condiciones de frontera del área de flujo 2D

Las condiciones de frontera empleadas por el modelo 2D son:

- Flow Hydrograph
- Stage Hydrograph
- Normal Depth
- Rating Curve

Las dos primeras condiciones de frontera se emplean para ingresar flujo al área 2D, y las dos últimas permiten que el flujo abandone dicha área.

Para agregar las Tablas condiciones de frontera al área de flujo 2D se hace en la ventana

de *Geometric Data*, y con ayuda de la herramienta **SA/2D Area BC Lines** se dibujan las condiciones a lo largo del límite exterior del área 2D, principalmente a la entrada y salida del río Coatán. En la Figura 6.19 se presentan las dos condiciones de frontera que se utilizaron para la simulación en 2D.

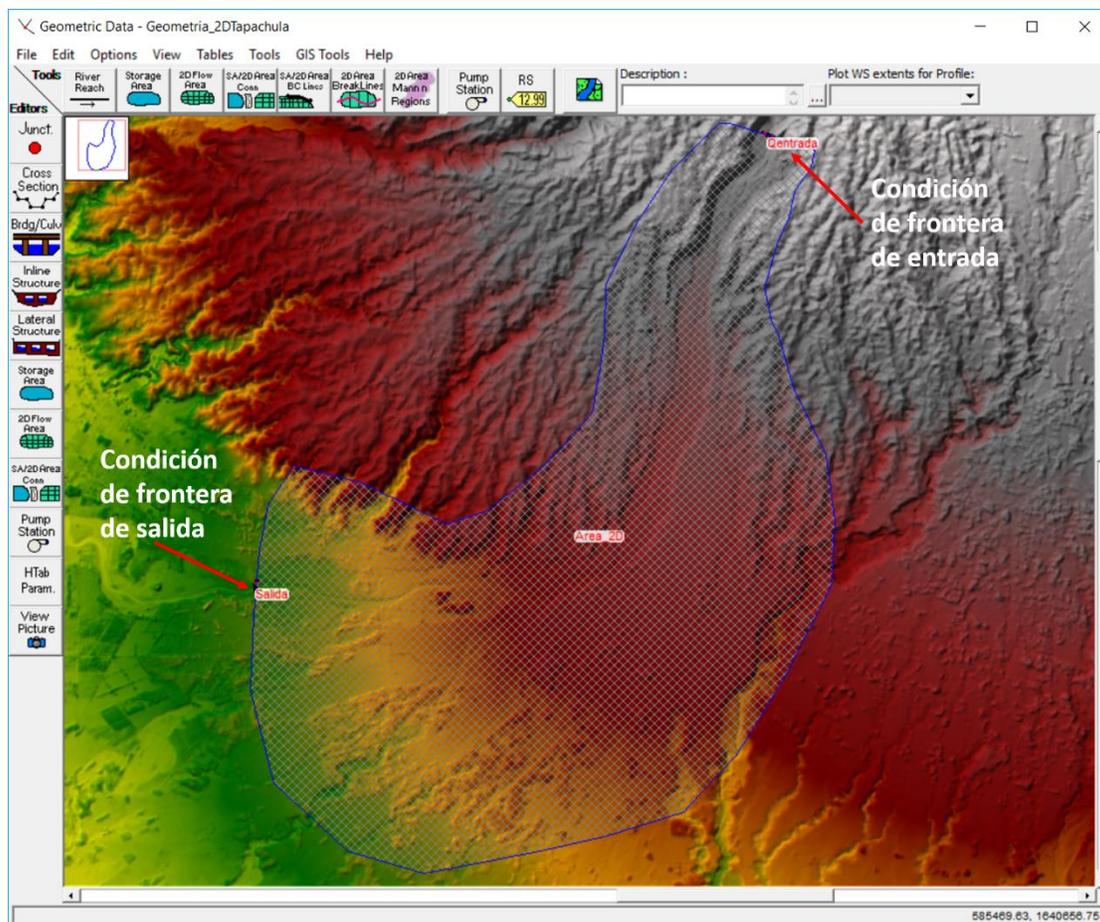


Figura 6.19 Determinación de las condiciones de frontera en la zona de estudio.

Una vez que se dibujaron las condiciones de frontera, se procedió a ingresar el tipo de condición y sus respectivos datos. Como condición de frontera aguas arriba se utilizó el hidrograma de la avenida de diseño asociado a distintos periodos de retorno; para la condición de frontera aguas abajo se utilizó el tirante normal. En la Figura 6.20 se muestra el ingreso de cada condición de frontera para el río Coatán.

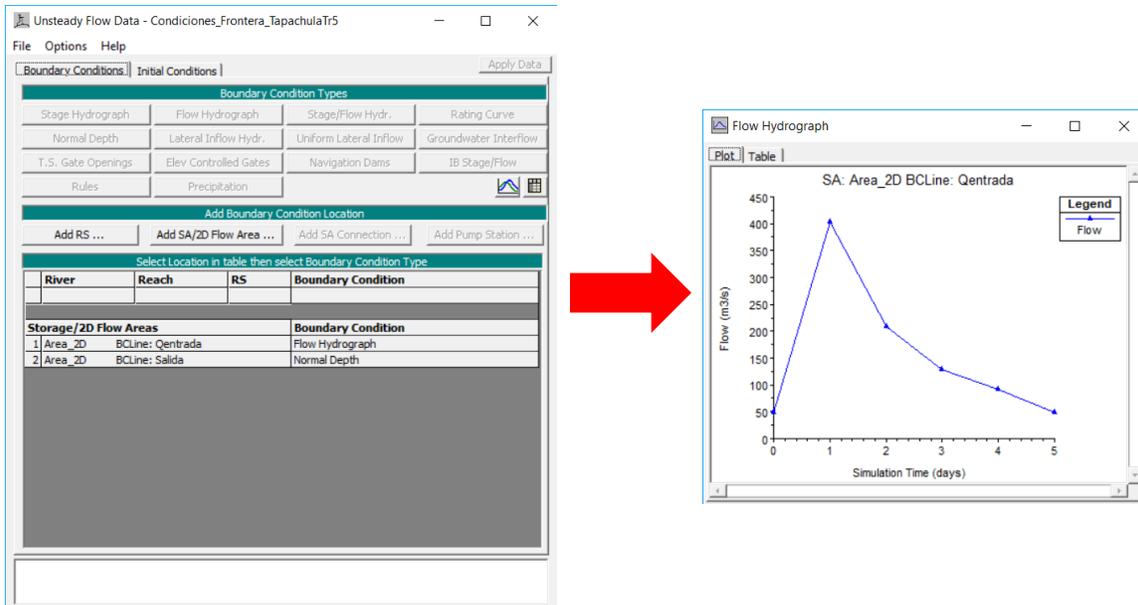


Figura 6.20 Condiciones de frontera para el río Coatán.

6.4.5. Ejecución del modelo 2D

La ejecución del modelo 2D requiere establecer tolerancias de cálculo que permitan obtener resultados coherentes. Los parámetros más importantes para configurar son: el tamaño de malla y el paso de tiempo computacional.

El tamaño de malla (Δx) permite que el modelo se adecue apropiadamente al terreno.

El paso de tiempo de cómputo (Δt) está relacionado con el número de Courant, que se obtiene de la relación entre espacio, velocidad y tiempo, cuyo valor debe ser menor o igual que la unidad.

Entonces, para ejecutar el modelo se hizo con ayuda de la herramienta **Unsteady Flow Analysis** seleccionando un adecuado paso de tiempo computacional. En la Figura 6.21 se muestra la ventana de ejecución y los parámetros que se seleccionaron, así como las configuraciones de computación que se tomaron para la simulación.

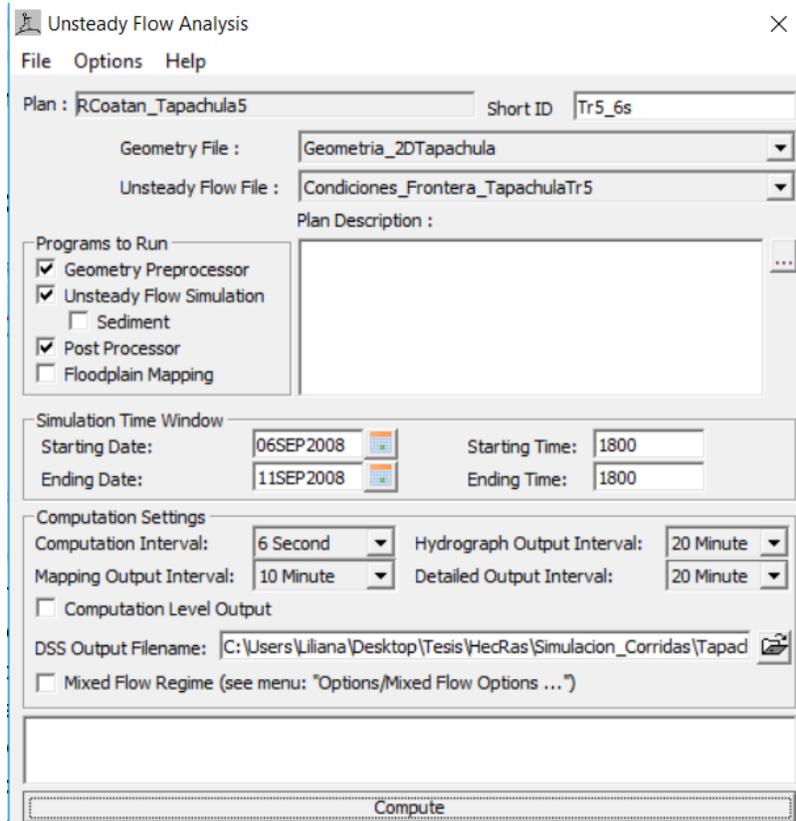


Figura 6.21 Ventana de análisis de flujo inestable para el área 2D.

6.4.6. Resultados

Los resultados de la simulación bidimensional se pueden ver con ayuda de RAS Mapper, una vez ejecutado con éxito el modelo bidimensional del río Coatán en Tapachula, habrá cinco capas de resultados por cada periodo de retorno, las cuales son:

- Geometry
- Depth
- Velocity
- Elevation
- WSE

Estas capas pueden usarse para visualizar los resultados del modelo en forma de mapas de inundación. De la Figura 6.22 a la Figura 6.33 se presentan los raster de tirantes y velocidades máximas de los escenarios asociados a los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 años.

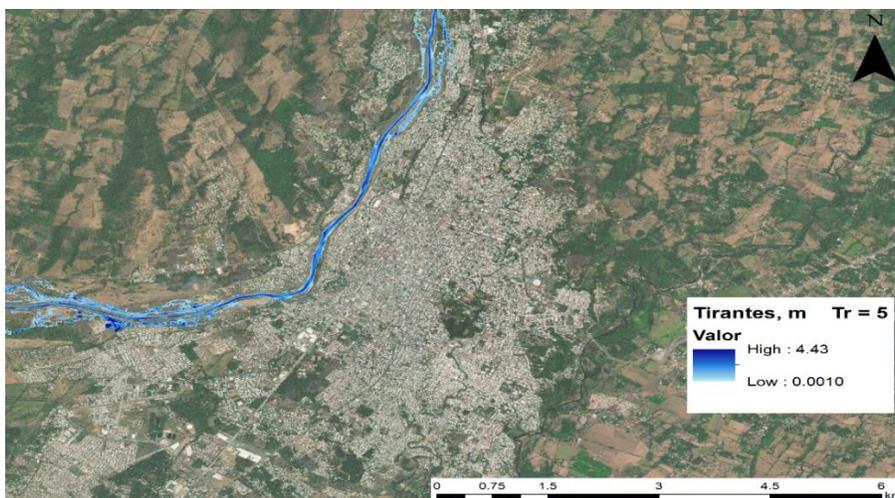


Figura 6.22 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 5 años.

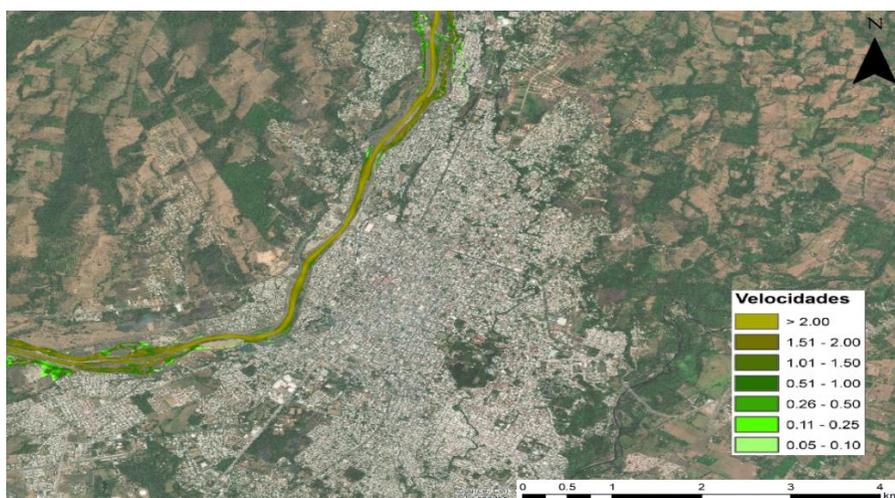


Figura 6.23 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 5 años.

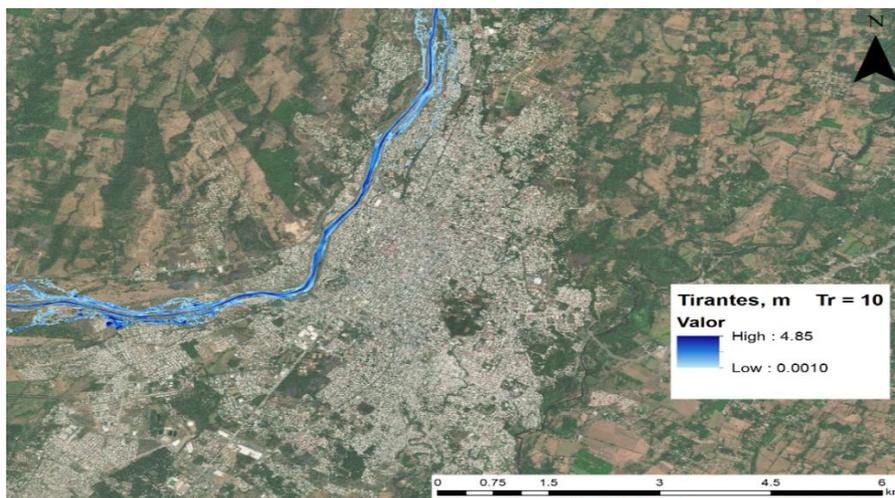


Figura 6.24 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 10 años.

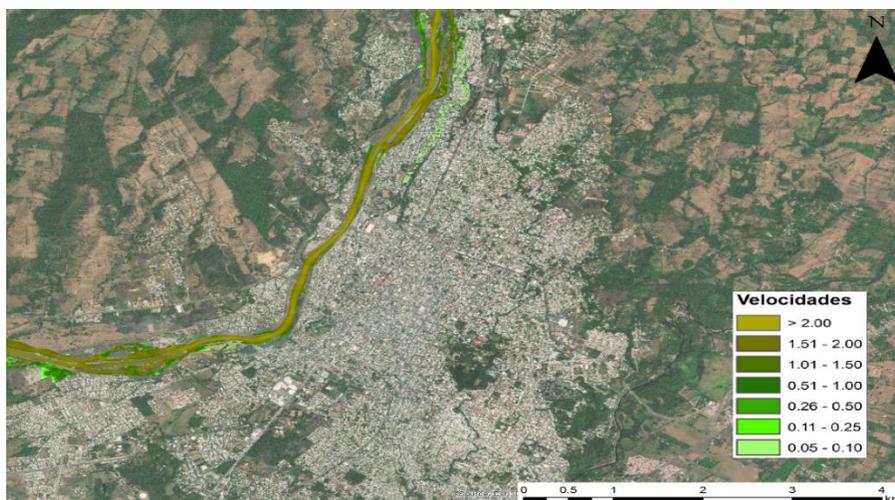


Figura 6.25 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 10 años.

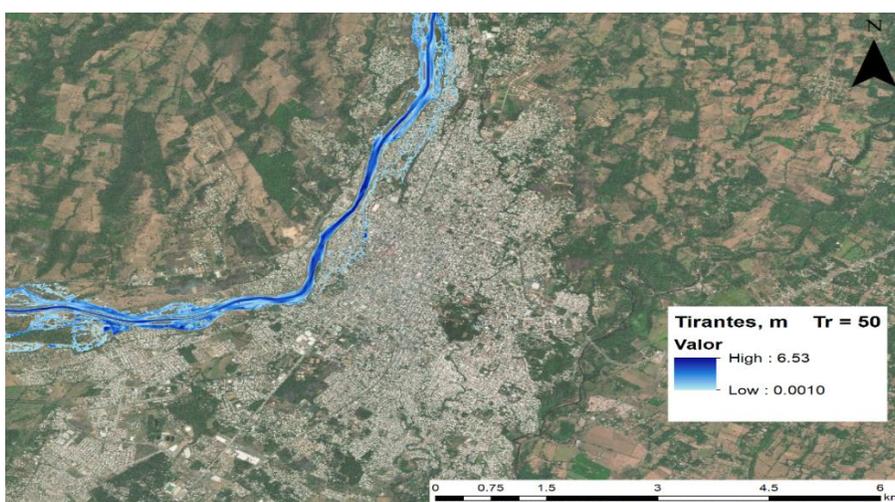


Figura 6.26 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 50 años.

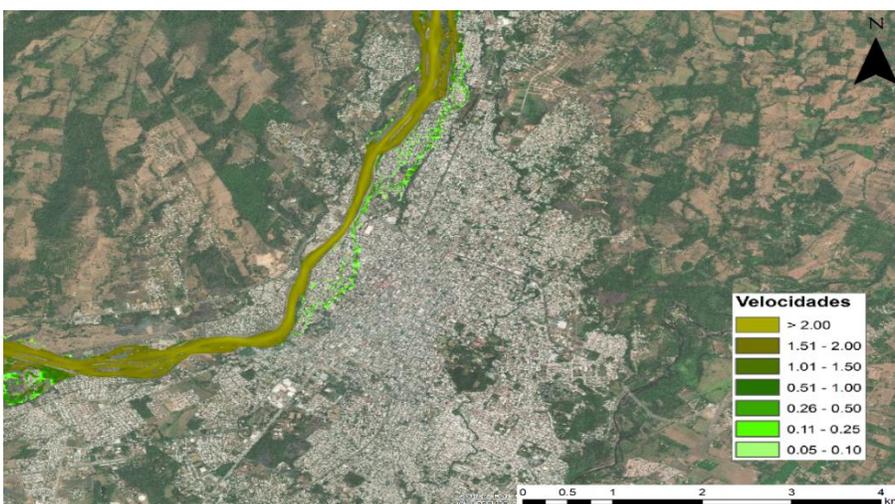


Figura 6.27 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 50 años.

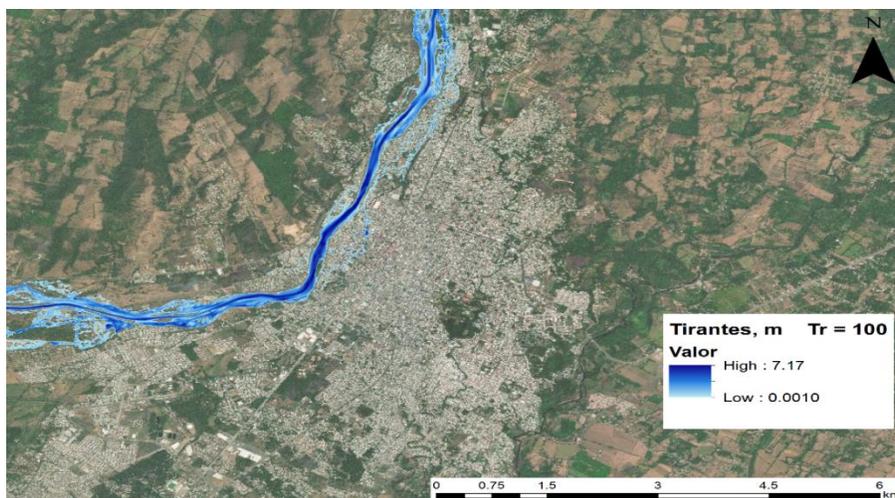


Figura 6.28 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 100 años.



Figura 6.29 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 100 años.

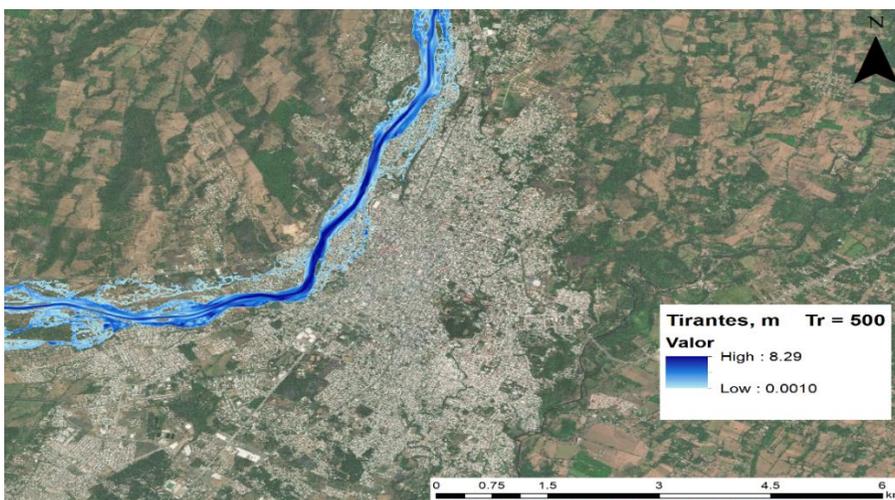


Figura 6.30 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 500 años.

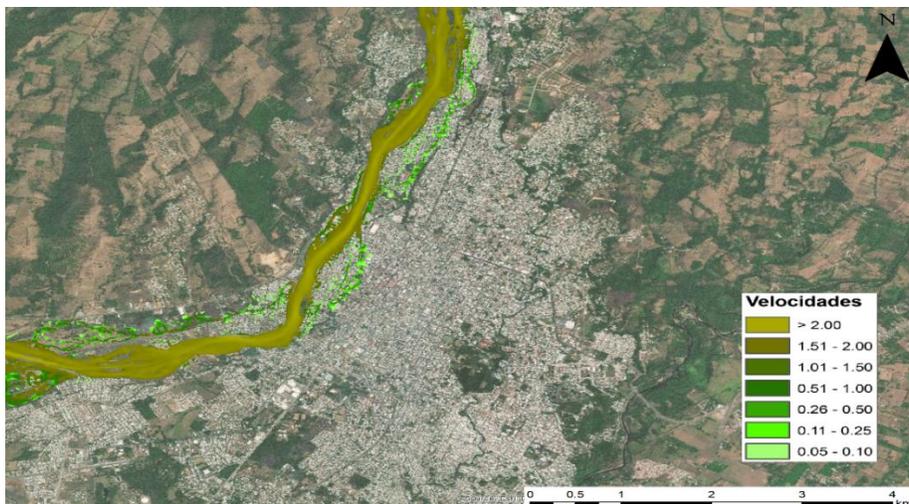


Figura 6.31 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 500 años.

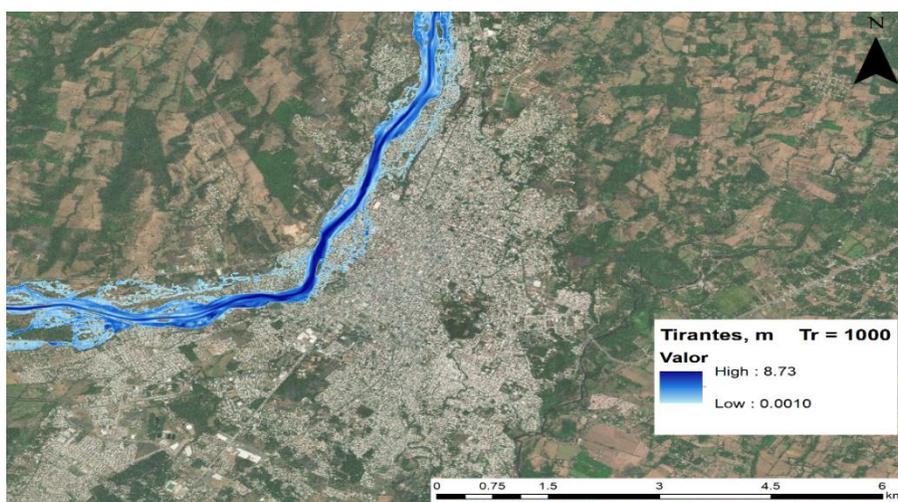


Figura 6.32 Tirantes máximos en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 1000 años.

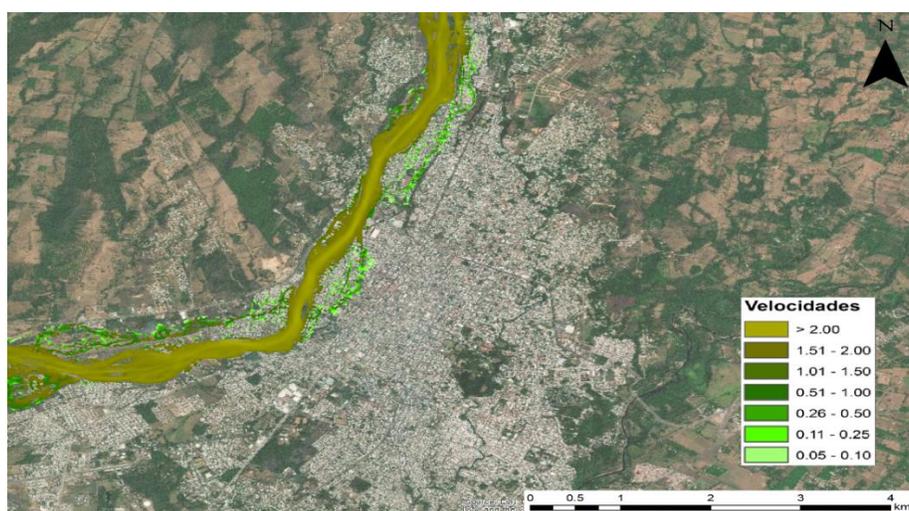


Figura 6.33 Velocidades máximas en la ciudad de Tapachula, Chiapas para un Tr = 1000 años.

6.5. PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO

6.5.1. Determinación del Peligro

Una vez obtenidas las manchas de inundación con sus respectivas velocidades, con ayuda del Diagrama de resistencia al vuelco (Nomograma de Dorrigo) se determinó la intensidad de la inundación, obteniéndose mapas con los valores máximos de la combinación de tirante y velocidad, los cuales pueden servir para identificar las áreas que no deben ser utilizadas para asentamientos humanos dependiendo del nivel de peligro.

Para obtener los mapas de peligro, con ayuda del Software ArcGIS se hizo lo siguiente:

- Convertir los raster de tirantes y velocidades (para todos los periodos de retorno) a formato shape de puntos, con la finalidad de manejar las distintas profundidades y velocidades que hay a lo largo del río en una base de datos, Figura 6.34 y Figura 6.35 respectivamente.

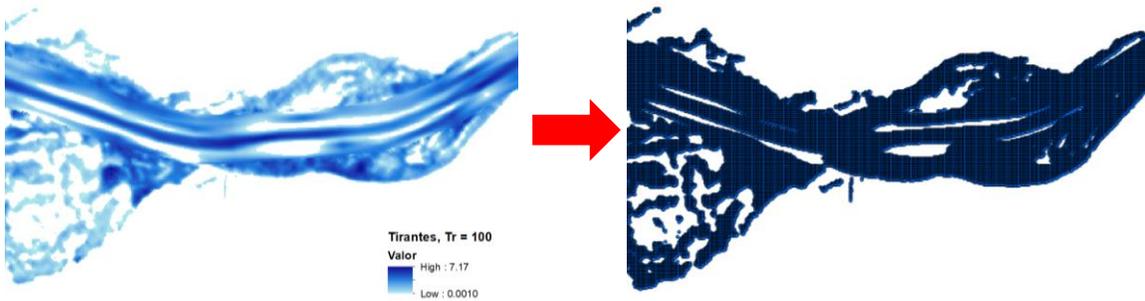


Figura 6.34 Conversión del raster de tirante a un shape de puntos para el Tr = 100.

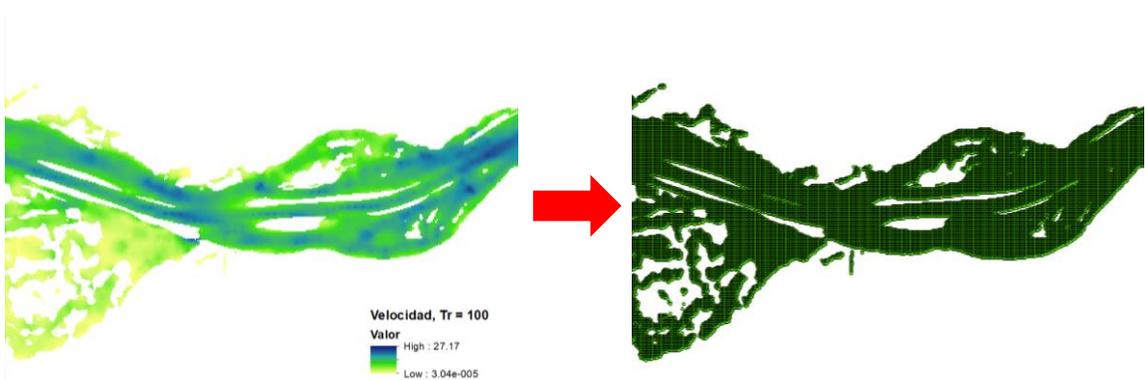


Figura 6.35 Conversión del raster de velocidad a un shape de puntos para el Tr = 100.



b) De la tabla de atributos de los shapets de puntos (tirantes y velocidades), se extrae a un archivo de Excel toda la información; cabe mencionar que por default ArcGIS proporciona un identificador (ID) a cada punto, este ID es el mismo para ambos shapets, Figura 6.36.

OBJECTID	Shape	pointid	grid_code
1	Point	1	0.450317
2	Point	2	1.096161
3	Point	3	0.611084
4	Point	4	1.210419
5	Point	5	1.606415
6	Point	6	1.916229
7	Point	7	2.065619
8	Point	8	0.724915
9	Point	9	1.301208
10	Point	10	1.68985
11	Point	11	2.000122
12	Point	12	2.161743
13	Point	13	2.497589
14	Point	14	2.813812
15	Point	15	3.448914
16	Point	16	0.105682
17	Point	17	0.846588
18	Point	18	1.384216
19	Point	19	1.788879
20	Point	20	2.06839
21	Point	21	2.300812
22	Point	22	2.646454
23	Point	23	3.059174
24	Point	24	3.715116
25	Point	25	4.161377
26	Point	26	5.295898
27	Point	27	5.725372

Tabla de atributos de los puntos para tirantes

OBJECTID	Shape	pointid	grid_code
1	Point	1	1.326072
2	Point	2	1.919394
3	Point	3	1.466208
4	Point	4	1.988442
5	Point	5	2.955645
6	Point	6	4.497447
7	Point	7	6.307755
8	Point	8	1.924506
9	Point	9	2.60602
10	Point	10	3.752846
11	Point	11	5.299016
12	Point	12	7.058489
13	Point	13	8.406153
14	Point	14	9.533443
15	Point	15	10.80983
16	Point	16	1.877225
17	Point	17	2.510256
18	Point	18	3.385577
19	Point	19	4.58571
20	Point	20	6.085268
21	Point	21	7.922781
22	Point	22	9.054393
23	Point	23	10.01623
24	Point	24	11.00709
25	Point	25	12.06494
26	Point	26	12.79776
27	Point	27	11.78886

Tabla de atributos de los puntos para velocidad

OBJECTID	Shape	pointid	grid_code
1	Point	1	0.450317
2	Point	2	1.096161
3	Point	3	0.611084
4	Point	4	1.210419
5	Point	5	1.606415
6	Point	6	1.916229
7	Point	7	2.065619
8	Point	8	0.724915
9	Point	9	1.301208
10	Point	10	1.68985
11	Point	11	2.000122
12	Point	12	2.161743
13	Point	13	2.497589
14	Point	14	2.813812
15	Point	15	3.448914
16	Point	16	0.105682
17	Point	17	0.846588
18	Point	18	1.384216
19	Point	19	1.788879
20	Point	20	2.06839
21	Point	21	2.300812
22	Point	22	2.646454
23	Point	23	3.059174
24	Point	24	3.715116
25	Point	25	4.161377
26	Point	26	5.295898
27	Point	27	5.725372
28	Point	28	0.266052

Excel de los puntos para tirantes

OBJECTID	Shape	pointid	grid_code
1	Point	1	1.326072
2	Point	2	1.919394
3	Point	3	1.466208
4	Point	4	1.988442
5	Point	5	2.955645
6	Point	6	4.497447
7	Point	7	6.307755
8	Point	8	1.924506
9	Point	9	2.60602
10	Point	10	3.752846
11	Point	11	5.299016
12	Point	12	7.058489
13	Point	13	8.406153
14	Point	14	9.533443
15	Point	15	10.80983
16	Point	16	1.877225
17	Point	17	2.510256
18	Point	18	3.385577
19	Point	19	4.58571
20	Point	20	6.085268
21	Point	21	7.922781
22	Point	22	9.054393
23	Point	23	10.01623
24	Point	24	11.00709
25	Point	25	12.06494
26	Point	26	12.79776
27	Point	27	11.78886
28	Point	28	2.18931

Excel de los puntos para velocidades

Figura 6.36 Extracción de los datos de la tabla de atributos a Excel.

c) Posteriormente, como se muestra en la Figura 6.37, con ayuda del identificador (ID) se formaron las parejas de puntos (x, y), combinaciones de tirantes y velocidades, respectivamente.



OBJECTID	Shape	ID_Tirante	ID_Velocidad	Tirante	Velocidad
1	Point	1	1	0.450317	1.326072
2	Point	2	2	1.096161	1.919994
3	Point	3	3	0.611084	1.466208
4	Point	4	4	1.210419	1.988442
5	Point	5	5	1.606415	2.955645
6	Point	6	6	1.916229	4.497447
7	Point	7	7	2.069519	6.307755
8	Point	8	8	0.724915	1.924506
9	Point	9	9	1.301208	2.60602
10	Point	10	10	1.68985	3.752846
11	Point	11	11	2.000122	5.299016
12	Point	12	12	2.161743	7.058489
13	Point	13	13	2.497589	8.406153
14	Point	14	14	2.813812	9.553443
15	Point	15	15	3.448914	10.80883
16	Point	16	16	0.105682	1.877225
17	Point	17	17	0.846588	2.510256
18	Point	18	18	1.384216	3.385577
19	Point	19	19	1.788879	4.58571
20	Point	20	20	2.06839	6.085268
21	Point	21	21	2.300812	7.802781
22	Point	22	22	2.646454	9.054393
23	Point	23	23	3.059174	10.01623
24	Point	24	24	3.775116	11.00709
25	Point	25	25	4.661377	12.06494
26	Point	26	26	5.295898	12.79776
27	Point	27	27	5.725372	11.78886
28	Point	28	28	0.266052	2.38931

Figura 6.37 Pareja de puntos (Tirantes, Velocidades) para cada punto de extracción.

d) Las combinaciones de puntos (tirantes, velocidades) se plasman en el Nomograma de Dorrigo con ayuda del ArcGIS, tal como se muestra en la Figura 6.38.

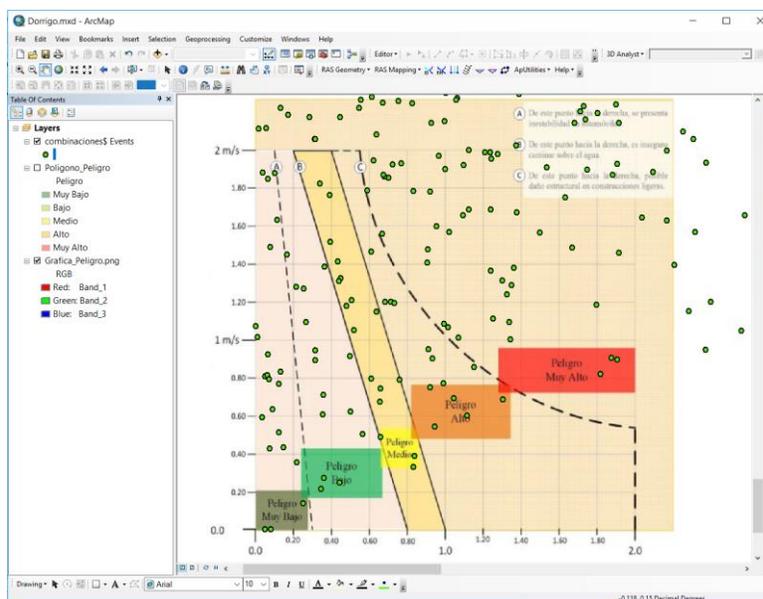


Figura 6.38 Combinaciones de puntos de tirantes y velocidades sobre el Nomograma de Dorrigo.



- e) Una vez identificadas las combinaciones sobre el Nomograma de Dorrigo, se les asigna la clasificación correspondiente sobre el nivel de peligro en que se encuentren, Figura 6.39.

OBJECTID	Shape	OBJECTID_1	Shape_1	ID_Velocidad	Velocidad	peligro
1	Point	1	Point	1	1.326072	Medio
2	1 Point	2	Point	2	1.919994	Muy Alto
3	1 Point	3	Point	3	1.466208	Alto
4	2 Point	4	Point	4	1.988442	Muy Alto
5	3 Point	5	Point	5	2.955645	Muy Alto
6	4 Point	6	Point	6	4.497447	Muy Alto
7	5 Point	7	Point	7	6.307755	Muy Alto
8	6 Point	8	Point	8	1.924506	Muy Alto
9	7 Point	9	Point	9	2.60602	Muy Alto
10	8 Point	10	Point	10	3.752846	Muy Alto
11	9 Point	11	Point	11	5.299016	Muy Alto
12	10 Point	12	Point	12	7.058489	Muy Alto
13	11 Point	13	Point	13	8.406153	Muy Alto
14	12 Point	14	Point	14	9.553443	Muy Alto
15	13 Point	15	Point	15	10.80883	Muy Alto
16	1 Point	16	Point	16	1.877225	Muy Bajo
17	14 Point	17	Point	17	2.510256	Muy Alto
18	15 Point	18	Point	18	3.385577	Muy Alto
19	16 Point	19	Point	19	4.58571	Muy Alto
20	17 Point	20	Point	20	6.085268	Muy Alto
21	18 Point	21	Point	21	7.802781	Muy Alto
22	19 Point	22	Point	22	9.054393	Muy Alto
23	20 Point	23	Point	23	10.01623	Muy Alto
24	21 Point	24	Point	24	11.00709	Muy Alto
25	22 Point	25	Point	25	12.06494	Muy Alto
26	23 Point	26	Point	26	12.79776	Muy Alto
27	24 Point	27	Point	27	11.78886	Muy Alto
28	25 Point	28	Point	28	2.38931	Muy Alto
29	26 Point	29	Point	29	3.176676	Muy Alto

Figura 6.39 Clasificación de los niveles de peligro para el periodo de retorno de 100 años.

- f) Finalmente, con ayuda del ID, se hace la unión de la clasificación de los niveles de peligro de Excel con la tabla de atributos del shape de puntos de cada periodo de retorno y así obtener los mapas de peligro por inundación, en la Figura 6.40 se muestra el mapa de peligro para el periodo de retorno de 100 años.

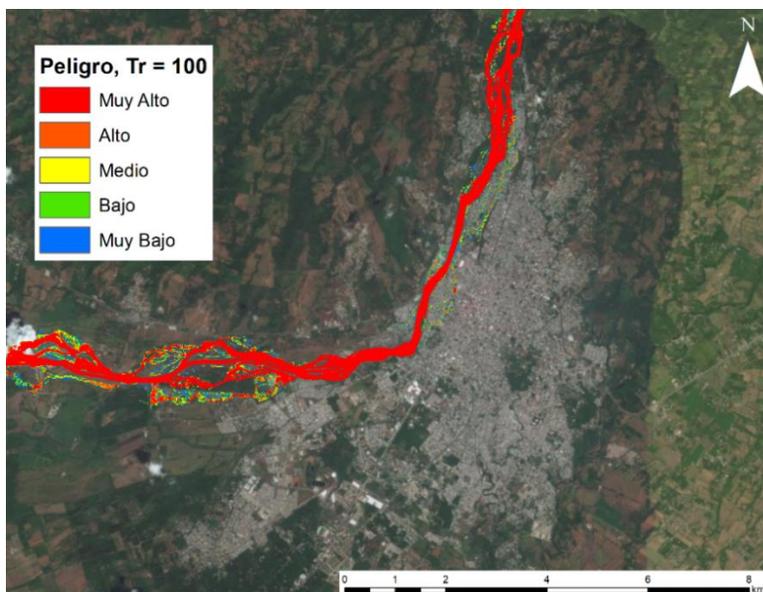


Figura 6.40 Mapa de peligro por inundación en la ciudad de Tapachula para un Tr = 100 años.

Al hacerle un zoom dentro de la ciudad de Tapachula se puede observar los diferentes niveles de peligro por inundación fluvial en casas aledañas al río, Figura 6.41.

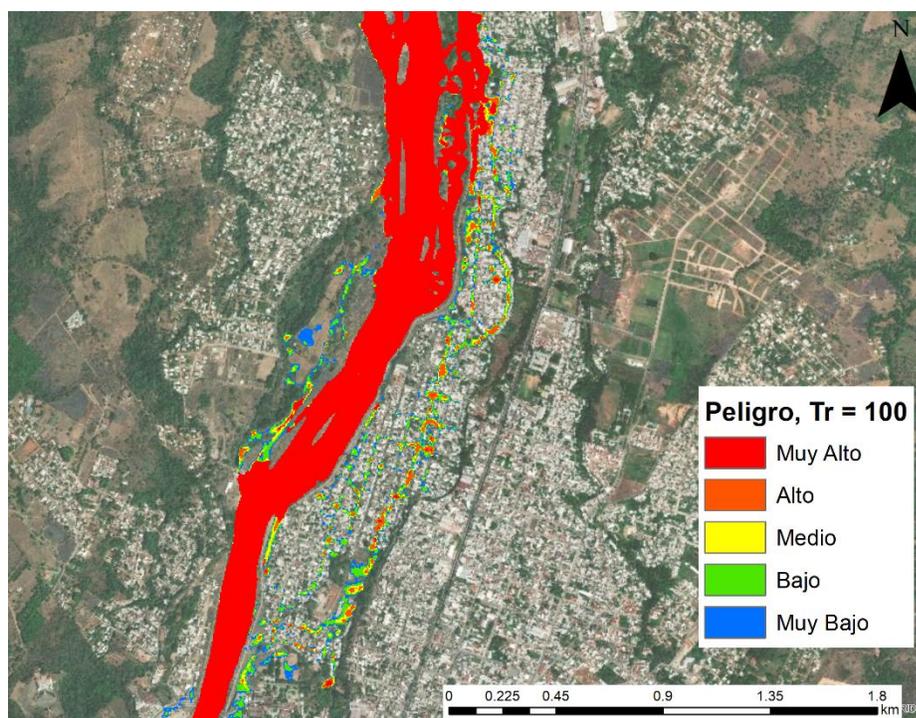


Figura 6.41 Peligro por inundación en las casas aledañas al río Coatán.



6.5.2. Evaluación de la vulnerabilidad física

La vulnerabilidad que se analizará es la vulnerabilidad física que corresponde al análisis de las viviendas en Tapachula, con la finalidad de conocer que tan susceptibles son a las inundaciones.

Una metodología que se había optado para llevar a cabo el censo de las viviendas fue la de utilizar la tecnología *Street View* desarrollada por la compañía de Google que proporciona imágenes panorámicas a lo largo de distintas calles en el mundo. Con toda esta información, para Tapachula se revisó la cobertura existente de estas imágenes, en la Figura 6.42 se muestra dicha cobertura sombreada (las calles) en color azul.

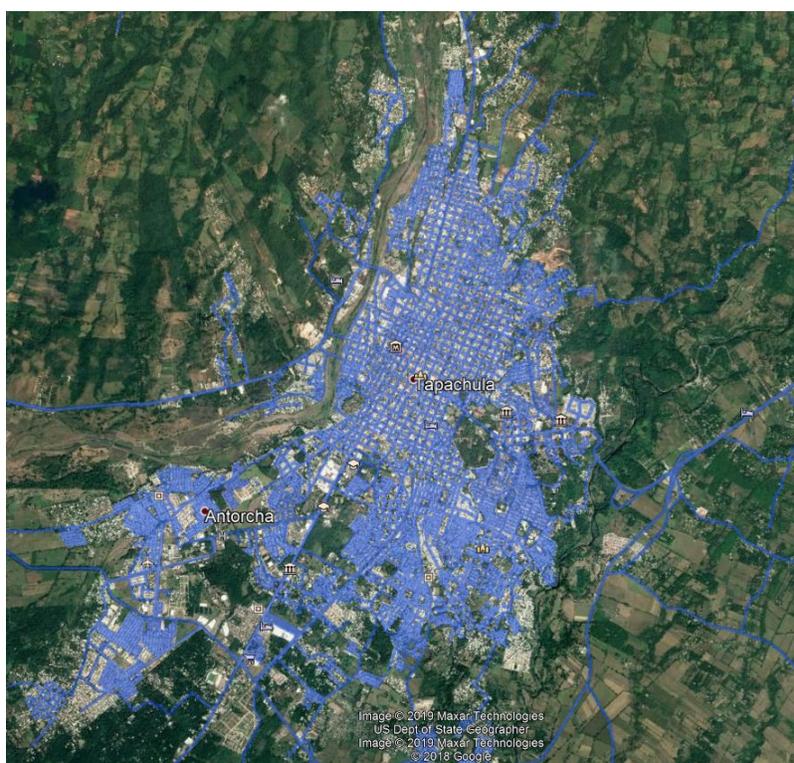


Figura 6.42 Cobertura de imágenes panorámicas a lo largo de las calles. Fuente: Google Earth, 2019

Se definieron límites de censo considerándose aquellas viviendas que se encuentran cerca del río y que pueden ser propensas a inundarse. Con base en eso se empezó a hacer el recorrido virtual de las calles, en el cual se observó las viviendas y se registraron las características de éstas como se muestra en la Tabla 6.18.



Tabla 6.18 Características de las viviendas levantadas por medio del Street View en la ciudad de Tapachula, Chis.

Núm. de casas	Coordenadas geográficas		Niveles por vivienda	Material de viviendas			Distinción
	Latitud	Longitud		Pared	Techo	Piso	
1	14.952386	-92.254645	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
2	14.952614	-92.254669	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
3	14.952125	-92.254625	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Lámina metálica	Cemento o firme	Casa
4	14.951688	-92.254597	2	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
5	14.951436	-92.254582	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
6	14.950917	-92.254318	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Lámina metálica	Cemento o firme	Casa
7	14.950569	-92.254353	2	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
8	14.950469	-92.254319	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
9	14.950386	-92.254287	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
10	14.950323	-92.254266	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
11	14.950264	-92.253783	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Lámina metálica	Cemento o firme	Casa
12	14.950197	-92.254329	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
.
.
.
1329	14.932802	-92.259919	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1330	14.932939	-92.25989	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1331	14.933042	-92.259849	2	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1332	14.933143	-92.259838	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1333	14.933232	-92.2598	2	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1334	14.933206	-92.259751	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa
1335	14.93319	-92.259682	1	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Cemento o firme	Casa

Para el registro de las coordenadas se agregaron indicadores de posición sobre la vivienda en vista satelital. Se contabilizaron el número de niveles de las que estaban conformadas las casas, considerándose a la planta baja como nivel.

Para asignar los materiales de construcción de la vivienda se usaron los registrados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), entonces, para el caso de las paredes y techos, se registraron con base a la apariencia del material y similitud con imágenes, con esto, se asignaba un material a la vivienda observada. Para el material de piso, una de las limitaciones de la tecnología Street View es la observación a interiores de las edificaciones para conocer los materiales con mayor detalle, por lo que se consideró el material de banquetas, patios y pasillos que se encuentran rodeando a la vivienda como material de piso.

En total se levantaron 1335 casas con ayuda del Street View, es decir un 20% del total que se iban a levantar. En la Figura 6.43 se muestra en verde el total de casas que se levantarían y con las tachuelas amarillas las 1335 casas levantadas.



Figura 6.43 Cobertura de casas levantadas con Street View de Google Earth.

Aunque esta metodología es buena para cuantificar el tipo de vivienda, se decidió no tomarla debido a lo siguiente:

- Algunas imágenes observadas durante el recorrido virtual en Street View son de años anteriores respecto a la vista en planta de Google Earth y se pueden presentar interpretaciones erróneas durante el censo de casas. Un caso evidente de esta problemática ocurre en los lugares donde el Street View no muestra edificación alguna, pero en vista de planta se aprecian la existencia de estos (muy evidente cuando se trata de lotes baldíos) o casas que se encontraban deshabitadas pero que en la actualidad podrían estarlo o viceversa, así como aumentos en los niveles de las casas por construcciones que se realizaron durante años posteriores.
- La principal desventaja de este método es que muchas de las zonas aledañas al río carecen de imágenes de calle (son importantes estas zonas porque son más propensas a inundarse), debido a la inaccesibilidad u otros factores que impidieron la obtención de la información.
- Todo esto conlleva a una interpretación posiblemente errónea de los materiales, la posición y existencia de las casas que rodean al río Coatán.

Por ello, se decidió obtener la vulnerabilidad física con la información del Censo General de Población y Vivienda de INEGI y dependiendo de la información cartográfica que se tenga se puede plasmar a nivel vivienda, manzana o Área



Geoestadística Básica (AGEB). La metodología que se usó en este trabajo fue a nivel manzana, ya que es el nivel más pequeño que maneja la base de datos de INEGI.

Cabe mencionar que se usó el Censo de Población y Vivienda 2010, ya que es el último censo más completo sobre el cual se apoya el conocimiento de la realidad nacional (INEGI, 2010). La información que contiene este censo expone una selección de indicadores sobre las características sociodemográficas de la población y las viviendas de las localidades urbanas del país y cuenta con una desagregación hasta nivel de área geoestadística básica (AGEB) y manzana, esta última es la que se usará en el análisis de la vulnerabilidad.

Entonces, para definir la vulnerabilidad de las viviendas, se hizo lo siguiente:

- a) Del siguiente Link se descargó la base de datos del censo de población y vivienda para el estado de Chiapas.

https://www.inegi.org.mx/app/tmp/scitel/default?ev=7

- b) El archivo descargado se abre con ayuda del Excel, en la Figura 6.44 se muestra parte de la información contenida en el archivo. Por medio de un filtro, se selecciona únicamente la localidad de Tapachula.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Clave de entidad federal	Nombre de la entidad	Clave de municipio o delegación	Nombre del municipio o delegación	Clave de localidad	Nombre de la localidad	Clave de ageb	Clave de manzana	Población total	Total de hogares censales	Total de viviendas habitadas	Total de viviendas habitadas	Viviendas particulares habitadas que disponen de radio	Viviendas particulares habitadas que disponen de televisión	Viviendas particulares habitadas que disponen de internet
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	1	178	51	57	*	39	49	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	2	53	11	11	*	10	11	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	3	131	39	44	*	24	34	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	4	182	50	54	*	36	44	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	5	159	44	48	*	24	44	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	6	129	40	45	*	30	37	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	7	95	27	38	*	21	22	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	8	129	33	41	*	25	30	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	9	172	55	59	*	30	51	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	10	184	46	51	*	31	43	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	11	111	31	38	*	24	30	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	12	57	15	16	*	10	15	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	13	93	26	31	*	21	26	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	14	121	33	36	*	27	30	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	15	186	49	49	*	36	48	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	16	100	36	41	*	33	36	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	17	162	47	60	*	32	44	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	18	176	46	46	*	37	45	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	19	127	30	32	*	20	29	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	20	171	43	57	*	41	46	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	24	157	40	46	*	32	38	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	25	528	134	157	*	113	130	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	26	133	43	48	*	24	39	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	27	72	23	29	*	18	22	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	28	0	0	0	*	0	0	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	29	4	3	7	*	*	3	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	31	149	25	29	*	18	25	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	32	95	27	33	*	19	27	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	35	243	63	78	*	45	61	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	36	157	45	51	*	35	43	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	37	123	38	47	*	28	33	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	38	15	7	9	*	7	7	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	39	37	15	23	*	13	15	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	40	29	9	10	*	8	9	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	42	123	39	45	*	31	36	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	43	110	40	49	*	29	35	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	46	185	61	75	*	39	51	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	47	46	15	16	*	14	14	
07	Chiapas	089	Tapachula	0001	Tapachula de Córdoba y Ordóñez	13	48	133	39	46	*	28	37	

Figura 6.44 Formato de la información contenida en la base de datos del Censo de población y vivienda para Tapachula, Chiapas.



De este archivo, las columnas de utilidad para realizar el análisis de vulnerabilidad son:

- Ubicación geográfica. Definida por las columnas *Clave de entidad federativa, Clave de municipio o delegación, Clave de localidad, Clave de ageb y Clave de manzana.*
- Posesión de automóvil y computadora. Se localizan en las columnas *Viviendas particulares habitadas que disponen de automóvil o camioneta, y Viviendas particulares habitadas que disponen de computadora.*

c) Del siguiente Link se descarga la información de los materiales de construcción del Censo de Población y Vivienda 2010 para el estado de Chiapas:

<https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?p=487&ag=00>

d) De igual forma, el archivo descargado se abre con ayuda de Excel y por medio de un filtro se selecciona la localidad de Tapachula, Figura 6.45.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	T
	ENT	NOM_ENT	MUN	NOM_MUN	LOCSOK	NOM_LOC	ID_VIV	CLAVVP	PAREDES	TECHOS	PISOS	COCINA	CUADORM	
2	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000957	1	8	03	2	1	01	0
3	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000959	1	6	03	1	3	02	0
4	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000962	1	6	03	1	3	01	0
5	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000964	1	6	03	1	1	01	0
6	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000967	1	8	03	2	3	01	0
7	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000968	1	6	03	2	1	01	0
8	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000975	1	6	06	2	1	03	0
9	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000981	1	6	03	2	1	01	0
10	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000987	1	8	03	2	1	02	0
11	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000990	1	8	03	2	1	01	0
12	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000992	1	6	03	1	1	01	0
13	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000994	1	8	03	1	1	01	0
14	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000995	1	6	03	1	1	01	0
15	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000996	1	6	03	1	3	01	0
16	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000997	1	6	03	2	1	04	0
17	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000998	1	6	03	2	1	01	0
18	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00000999	1	6	03	1	1	01	0
19	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001000	1	6	03	1	1	02	0
20	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001001	1	8	03	1	1	02	0
21	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001003	1	6	03	1	3	01	0
22	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001005	1	6	03	2	1	01	0
23	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001009	1	6	03	2	3	01	0
24	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001013	1	6	03	1	1	01	0
25	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001016	1	6	03	1	1	01	0
26	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00001022	1	8	03	1	1	03	0
27	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00121097	1	7	03	2	1	02	0
28	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00126155	1	8	03	2	1	01	0
29	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00193673	1	8	03	1	3	03	0
30	07	Chiapas	089	Tapachula	0000	Localidad de r	00193676	1	6	03	1	1	01	0

Figura 6.45 Base de datos sobre materiales de construcción para Tapachula, Chiapas.

En este archivo las partes que interesan son el de materiales de construcción que se especifican en las columnas PAREDES y TECHOS.

Como puede observarse en la figura anterior, tanto el tipo de material para paredes como para techos están definidos por un número. Para identificar el tipo



de material, INEGI proporciona esta información, misma que se muestra en la Figura 6.46 y Figura 6.47.

CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2010 DICCIONARIO EXPLOTACIÓN - CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS CUESTIONARIO AMPLIADO					
					VIVIENDAS_EE
Cons.	Descripción	Mnemónico	Pregunta y categoría	Rango Válido	Longitud
12	Paredes	PAREDES	¿De qué material es la mayor parte de las paredes o muros de esta vivienda?	{1..9,b}	1
			Material de desecho	1	
			Lámina de cartón	2	
			Lámina de asbesto o metálica	3	
			Carrizo, bambú o palma	4	
			Embarro o bajareque	5	
			Madera	6	
			Adobe	7	
			Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	8	
			No especificado	9	
			Blanco por pase	b	

Figura 6.46 Tipo de material para paredes asociado a un número.

CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2010 DICCIONARIO EXPLOTACIÓN - CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS CUESTIONARIO AMPLIADO					
					VIVIENDAS_EE
Cons.	Descripción	Mnemónico	Pregunta y categoría	Rango Válido	Longitud
13	Techos	TECHOS	¿De qué material es la mayor parte del techo de esta vivienda?	{01..09,99,b}	2
			Material de desecho	1	
			Lámina de cartón	2	
			Lámina metálica	3	
			Lámina de asbesto	4	
			Palma o paja	5	
			Madera o tejamanil	6	
			Terrado con vigería	7	
			Teja	8	
			Losa de concreto o viguetas con bovedilla	9	
			No especificado	99	
			Blanco por pase	b	

Figura 6.47 Tipo de material para techos asociado a un número.

Así, por ejemplo, para una vivienda con pared tipo 8 y un techo tipo 3 corresponde a una vivienda con paredes de Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina metálica.

- e) Es necesario contar con el archivo en formato shapefile de las manzanas en el área de estudio, con la finalidad de plasmar en un mapa la vulnerabilidad a nivel manzana. En la Figura 6.48 se muestra el shape de manzanas en la ciudad de Tapachula.

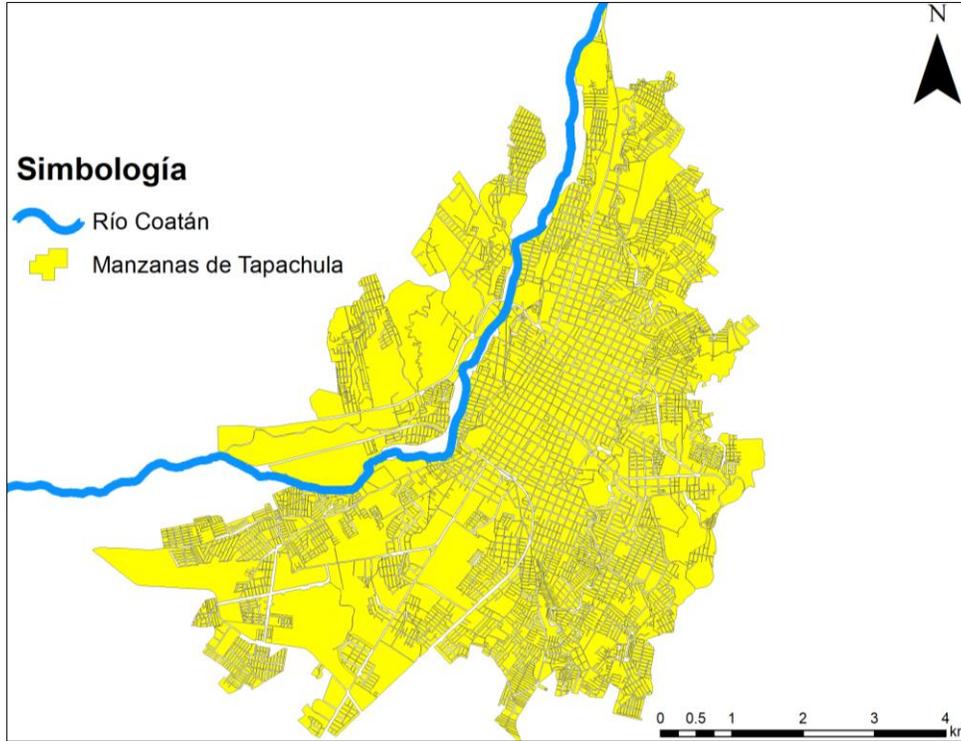


Figura 6.48 Shapefile de manzanas para la ciudad de Tapachula.

f) Con la información disponible y con procesos hechos en ArcGIS, se identifican las combinaciones de materiales para cada caso, Figura 6.49, las cuales se obtuvieron con base en la Tabla 4.6 del apartado 4.2.2.

	K	L	M	N	O	P	Q	R	BA	BB	BC	BD	BE
1	CLAVIV	PAREDES	TECHOS	PISOS	COCINA	COCDOR	CUADORM	TOTCUART	INGTOHOG	TIPO_VUL			
2	01	8	3	2	1	4	02	04		III			
3	01	8	6	2	1	4	04	10		V			
4	01	8	3	2	1	4	02	04		III			
5	01	8	3	2	1	4	01	05		III			
6	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
7	03	8	6	2	1	3	01	02		IV			
8	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
9	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
10	03	8	6	3	1	4	02	04		IV			
11	01	8	3	2	1	4	03	06		III			
12	01	8	6	2	2	4	02	03		IV			
13	01	8	3	2	1	4	02	04		III			
14	03	8	6	3	1	4	03	06		IV			
15	01	8	6	2	1	4	02	04		IV			
16	01	8	6	2	1	4	02	04		IV			
17	01	8	3	2	1	4	02	04		III			
18	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
19	03	8	6	2	1	3	01	01		IV			
20	03	8	6	2	1	3	01	01		IV			
21	03	8	6	2	1	3	01	01		IV			
22	03	8	6	2	1	3	01	01		V			
23	03	8	6	2	1	3	01	01		IV			
24	01	8	3	2	1	4	01	02		III			
25	01	8	3	3	1	4	02	03		III			
26	03	6	3	2	1	3	01	01		III			
27	03	8	3	2	1	3	01	01		III			
28	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
29	03	8	3	2	1	4	01	02		III			
30	03	8	3	2	1	4	01	02		III			

Figura 6.49 Identificación de la vulnerabilidad por manzana.

Para los casos en que las combinaciones resultaron de vulnerabilidad Tipo IV, se realizó un paso adicional; pues a diferencia de los primeros tres tipos, donde solo se consideran los materiales de construcción, se tomaron en cuenta la posesión de automóvil y computadora. Esto significa que las manzanas que cumplan con viviendas cuya vulnerabilidad es Tipo IV, pasaran al Tipo V si cuentan con dicha condición.

- g) Una vez identificados los Tipos de vulnerabilidad de cada manzana, se procedió a unir la tabla de vulnerabilidad con el shape de manzanas, esto por medio del ArcGIS, con el fin de mostrar visualmente el resultado del análisis de la vulnerabilidad en Tapachula. En la Figura 6.50 se muestra la vulnerabilidad a nivel manzana de la zona de estudio.

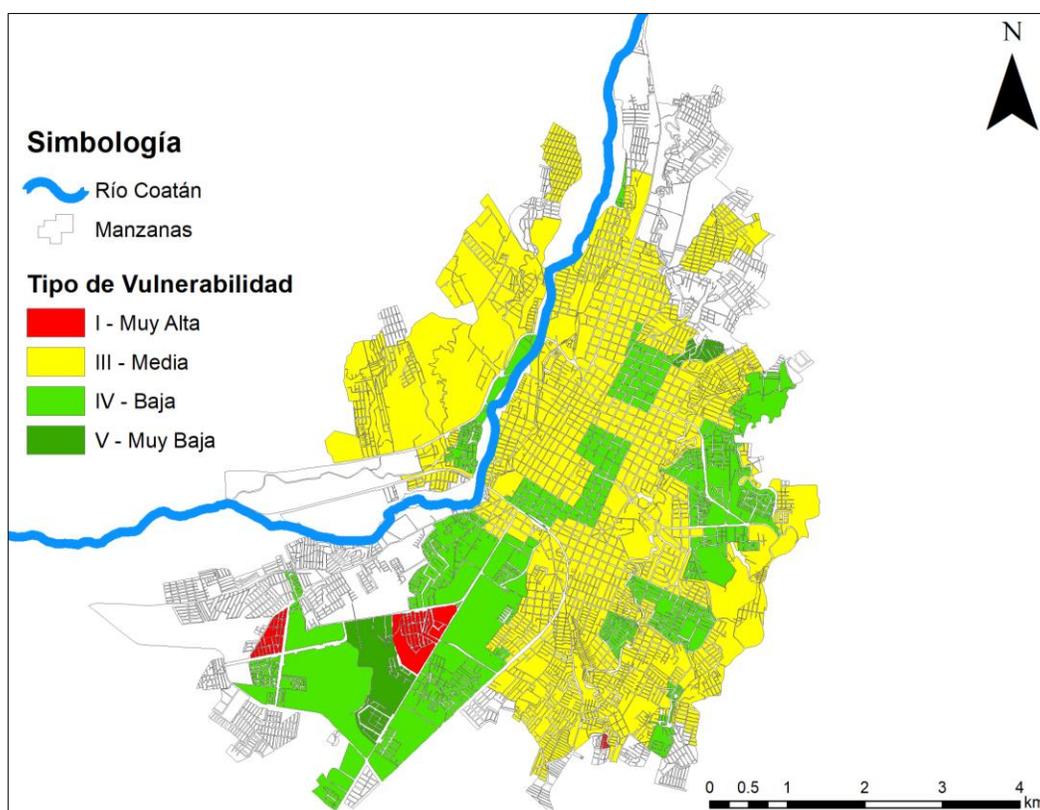


Figura 6.50 Mapa de vulnerabilidad en la ciudad de Tapachula, Chiapas.

- h) En función de los materiales usados para la construcción de las viviendas y de acuerdo con la figura anterior, las manzanas se clasificaron con los niveles I, III, IV y V. Entonces, para cuantificar el menaje expuesto en los diferentes tipos de vulnerabilidad se usó el propuesto por el CENAPRED en 2006 actualizado a precios de 2019, estos precios fueron actualizados con base en los factores de indexación que emite la Secretaría de Hacienda y Crédito



Público. En la Tabla 6.19 se muestra la actualización del valor máximo de los daños a valores del 2019.

Tabla 6.19 Menaje expuesto según el tipo de vulnerabilidad para 2019.

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Valor máximo de los daños en 2006	Valor máximo de los daños en 2019
I	Muy Alta	\$12,500.00	\$20,395.46
II	Alta	\$50,000.00	\$81,581.85
III	Media	\$150,500.00	\$245,561.36
IV	Baja	\$300,000.00	\$489,491.08
V	Muy Baja	\$450,000.00	\$734,236.62

Cabe mencionar que la tabla anterior presenta el menaje expuesto por vivienda, entonces para considerar el menaje expuesto por manzana se supuso que las viviendas sufren daños equivalentes al 10% del valor del menaje cada vez que se inunda y con base en la encuesta intercensal de 2015 se estima que la ciudad de Tapachula cuenta con una población actual de 202,672 habitantes y que una casa está habitada en promedio por cuatro personas; por lo que, de inundarse toda la zona urbana los daños se calculan como:

$$daño = \frac{(M)(10\%)(202,672)}{(4)}$$

Donde M es el menaje de acuerdo con el tipo de vulnerabilidad.

En la Tabla 6.20 se muestran los valores de los daños por inundación.

Tabla 6.20 Menaje expuesto según el tipo de vulnerabilidad en caso de inundarse toda la zona urbana.

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Valor máximo de los daños ($\times 10^6$)
I	Muy Alta	\$103.34
II	Alta	\$413.36
III	Media	\$1244.21
IV	Baja	\$2480.15
V	Muy Baja	\$3720.23

- i) Con ayuda de las funciones de vulnerabilidad definidas en el capítulo 4.2.3 y con el tirante de inundación alcanzado en la manzana, se le asigna a cada una el índice de vulnerabilidad adimensional correspondiente.

En la Figura 6.51 se muestra el índice de vulnerabilidad asociado al tipo de manzana y a los tirantes de inundación para un periodo de retorno de 100 años.



	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	NOM LOC	AGEB	MZA	CVEGEO	AMBITO	TIPOMZA	SHAPE_AE	SHAPE_LE	IDENTIF	Tipo	Vulnera	LTr100_m	U_vul100
2	Tapachula de	884	1	0708900010884001	U	Tipica	2081.558	192.23015	0	IV	Baja	0.06488	0
3	Tapachula de	884	2	0708900010884002	U	Tipica	4736.0211	439.49932	1	IV	Baja	0.432528	0.05
4	Tapachula de	884	4	0708900010884004	U	Tipica	2388.7447	205.74734	2	IV	Baja	0	0
5	Tapachula de	884	5	0708900010884005	U	Tipica	1864.6432	178.89735	3	IV	Baja	0	0
6	Tapachula de	884	6	0708900010884006	U	Tipica	1554.4712	162.75543	4	IV	Baja	0	0
7	Tapachula de	884	7	0708900010884007	U	Tipica	1717.6383	226.58321	5	IV	Baja	0.260024	0.02
8	Tapachula de	884	25	0708900010884025	U	Tipica	93639.714	2343.5147	14	IV	Baja	1.664359	0.47
9	Tapachula de	884	26	0708900010884026	U	Tipica	5450.0835	309.09496	15	IV	Baja	0.241296	0.02
10	Tapachula de	884	33	0708900010884033	U	Tipica	544.81217	134.10413	17	IV	Baja	0.198706	0
11	Tapachula de	884	39	0708900010884039	U	Tipica	3371.3474	300.1055	20	IV	Baja	0.361543	0.02
12	Tapachula de	884	40	0708900010884040	U	Tipica	45628.883	1109.3305	21	IV	Baja	0.585037	0.05
13	Tapachula de	899	1	0708900010899001	U	Tipica	3673.6356	257.86232	22	IV	Baja	0.260208	0.02
14	Tapachula de	899	2	0708900010899002	U	Tipica	4325.8905	273.2028	23	IV	Baja	0.484867	0.05
15	Tapachula de	899	3	0708900010899003	U	Tipica	3753.4881	255.24172	24	IV	Baja	0.214924	0.02
16	Tapachula de	899	4	0708900010899004	U	Tipica	3821.5967	258.59757	25	IV	Baja	0.433228	0.05
17	Tapachula de	899	5	0708900010899005	U	Tipica	6137.9045	353.15815	26	IV	Baja	0.27869	0.02
18	Tapachula de	899	6	0708900010899006	U	Tipica	1681.837	201.2129	27	IV	Baja	0.400114	0.02
19	Tapachula de	899	7	0708900010899007	U	Tipica	1175.455	171.73788	28	IV	Baja	0.331366	0.02
20	Tapachula de	899	8	0708900010899008	U	Tipica	3672.9269	254.00151	29	IV	Baja	0.666509	0.07
21	Tapachula de	899	9	0708900010899009	U	Tipica	3942.493	258.67091	30	IV	Baja	0.191902	0
22	Tapachula de	899	10	0708900010899010	U	Tipica	4116.2107	270.89648	31	IV	Baja	0	0
23	Tapachula de	899	15	0708900010899015	U	Tipica	5286.1164	309.67832	36	IV	Baja	0.215118	0.02
24	Tapachula de	899	16	0708900010899016	U	Tipica	21088.227	781.85221	37	IV	Baja	0.174927	0
25	Tapachula de	899	17	0708900010899017	U	Tipica	5515.398	429.86957	38	IV	Baja	0.115235	0
26	Tapachula de	899	20	0708900010899020	U	Tipica	1334.6519	211.72519	39	IV	Baja	0.077294	0
27	Tapachula de	899	29	0708900010899029	U	Tipica	2190.5563	194.92082	44	IV	Baja	0	0
28	Tapachula de O48A		1	070890001048A001	U	Tipica	2991.5451	220.7443	405	III	Media	0.411258	0.08
29	Tapachula de O48A		2	070890001048A002	U	Tipica	12920.519	673.99557	406	III	Media	0.392738	0.03
30	Tapachula de O48A		3	070890001048A003	U	Tipica	2032.514	183.63675	407	III	Media	0.53001	0.08
31	Tapachula de O48A		4	070890001048A004	U	Tipica	2782.6086	215.19622	408	III	Media	0.654766	0.31
32	Tapachula de O48A		6	070890001048A006	U	Tipica	3082.9515	229.61718	409	III	Media	0.705474	0.31
33	Tapachula de O48A		7	070890001048A007	U	Tipica	88017.64	1274.5076	410	III	Media	0.480431	0.08

Figura 6.51 Índice de vulnerabilidad para cada tipo de manzana con base en el tirante.

Así, por ejemplo, la manzana 003 de Tapachula presenta un tirante de inundación de 0.21 m y una vulnerabilidad tipo IV, por lo que al entrar a la Gráfica 4.5, con dicho tirante, resulta un índice de vulnerabilidad de 0.02.

6.5.3. Evaluación del riesgo

Una vez obtenido el peligro por inundación y la vulnerabilidad, se evaluó el riesgo por inundación en la ciudad de Tapachula.

Para realizar este procedimiento ya se tiene la determinación de los tirantes asociados con cada periodo de retorno y la estimación del índice de vulnerabilidad en cada caso, por lo que, para calcular los daños en cada escenario y el cálculo del riesgo, se realizó lo siguiente:

- a) Con ayuda del ArcGIS se calcula el porcentaje de área inundada en cada manzana asociada a cada periodo de retorno; en la Figura 6.52 se muestra el archivo en Excel donde ya se calculó dicho porcentaje de cada manzana propensa a inundarse para un Tr=100 años.



MZA	CVEGEO	AMBITO	TIPOMZA	SHAPE_AF	SHAPE_LE	IDENTIF	Tipo	Vulnera	LTr100_m	U_vul100	Area_m2	% area inun
1	0708900010884001	U	Tipica	2081.558	192.23015	0 IV	Baja	0.06488	0	59.128491	1.31615E-06	
2	0708900010884002	U	Tipica	4736.0211	439.49932	1 IV	Baja	0.432528	0.05	1816.4541	4.04328E-05	
3	0708900010884004	U	Tipica	2388.7447	205.74734	2 IV	Baja	0	0	0.255258	5.68184E-09	
4	0708900010884005	U	Tipica	1864.6432	178.89735	3 IV	Baja	0	0	0.363904	8.10021E-09	
5	0708900010884006	U	Tipica	1554.4712	162.75543	4 IV	Baja	0	0	0.671166	1.49396E-08	
6	0708900010884007	U	Tipica	1717.6383	226.58321	5 IV	Baja	0.260024	0.02	856.34751	1.90616E-05	
7	0708900010884025	U	Tipica	93639.714	2343.5147	14 IV	Baja	1.664359	0.47	36366.614	0.000809492	
8	0708900010884026	U	Tipica	5450.0835	309.09496	15 IV	Baja	0.241296	0.02	297.13929	6.61408E-06	
9	0708900010884033	U	Tipica	544.81217	134.10413	17 IV	Baja	0.198706	0	120.62629	2.68504E-06	
10	0708900010884039	U	Tipica	3371.3474	300.1055	20 IV	Baja	0.361543	0.02	457.70213	1.01881E-05	
11	0708900010884040	U	Tipica	45628.883	1109.3305	21 IV	Baja	0.585037	0.05	19731.363	0.000439204	
12	0708900010889001	U	Tipica	3673.6356	257.86232	22 IV	Baja	0.260208	0.02	179.42728	3.99391E-06	
13	0708900010889002	U	Tipica	4325.8905	273.2028	23 IV	Baja	0.484867	0.05	577.3591	1.28515E-05	
14	0708900010889003	U	Tipica	3753.4881	255.24172	24 IV	Baja	0.214924	0.02	625.90799	1.39322E-05	
15	0708900010889004	U	Tipica	3821.5967	258.59757	25 IV	Baja	0.433228	0.05	50.267719	1.11892E-06	
16	0708900010889005	U	Tipica	6137.9045	353.15815	26 IV	Baja	0.27869	0.02	102.86647	2.28973E-06	
17	0708900010889006	U	Tipica	1681.837	201.2129	27 IV	Baja	0.400114	0.02	212.17246	4.72279E-06	
18	0708900010889007	U	Tipica	1175.455	171.73788	28 IV	Baja	0.331366	0.02	105.14381	2.34042E-06	
19	0708900010889008	U	Tipica	3672.9269	254.00151	29 IV	Baja	0.666509	0.07	356.77205	7.94146E-06	
20	0708900010889009	U	Tipica	3942.493	258.67091	30 IV	Baja	0.191902	0	56.352519	1.25436E-06	
21	0708900010889010	U	Tipica	4116.2107	270.89648	31 IV	Baja	0	0	50.843503	1.13174E-06	
22	0708900010889015	U	Tipica	5286.1164	309.67832	36 IV	Baja	0.215118	0.02	79.253346	1.76412E-06	
23	0708900010889016	U	Tipica	21088.227	781.85221	37 IV	Baja	0.174927	0	114.57065	2.55025E-06	
24	0708900010889017	U	Tipica	5515.398	429.86957	38 IV	Baja	0.115235	0	50.609538	1.12653E-06	
25	0708900010889020	U	Tipica	1334.6519	211.72519	39 IV	Baja	0.077294	0	382.40226	8.51197E-06	
26	0708900010889029	U	Tipica	2190.5563	194.92082	44 IV	Baja	0	0	10.013189	2.22886E-07	
27	070890001048A001	U	Tipica	2991.5451	220.7443	405 III	Media	0.411258	0.08	852.76123	1.89818E-05	
28	070890001048A002	U	Tipica	12920.519	673.99557	406 III	Media	0.392738	0.03	935.40283	2.08213E-05	
29	070890001048A003	U	Tipica	2032.514	183.63675	407 III	Media	0.53001	0.08	301.71222	6.71587E-06	
30	070890001048A004	U	Tipica	2782.6086	215.19622	408 III	Media	0.654766	0.31	1076.7829	2.39683E-05	
31	070890001048A006	U	Tipica	3082.9515	229.61718	409 III	Media	0.705474	0.31	785.68982	1.74888E-05	
32	070890001048A007	U	Tipica	88017.64	1274.5076	410 III	Media	0.480431	0.08	603.38203	1.34308E-05	

Figura 6.52 Excel donde se muestra el cálculo del porcentaje de área inundada para un Tr=100 años.

b) Una vez calculado el porcentaje de área inundada, se procedió a la estimación de los potenciales daños en cada manzana. En la Tabla 6.21 se muestra la estimación de los daños para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 6.21 Estimación de los daños para el periodo de retorno de 100 años.

AGEB	MZA	Tipo	Tirante de inundación, m	Vulnerabilidad	Índice de vulnerabilidad	Área inundada, m ²	Daño, \$
884	001	IV	0.06	Baja	0.00	59.13	\$0.00
884	002	IV	0.43	Baja	0.05	1816.45	\$5,013.98
884	004	IV	0.00	Baja	0.00	0.26	\$0.00
884	005	IV	0.00	Baja	0.00	0.36	\$0.00
884	006	IV	0.00	Baja	0.00	0.67	\$0.00
884	007	IV	0.26	Baja	0.02	856.35	\$945.51
884	025	IV	1.66	Baja	0.47	36366.61	\$943,601.80
884	026	IV	0.24	Baja	0.02	297.14	\$328.08
884	033	IV	0.20	Baja	0.00	120.63	\$0.00
884	039	IV	0.36	Baja	0.02	457.70	\$505.36
884	040	IV	0.59	Baja	0.05	19731.36	\$54,464.70
899	001	IV	0.26	Baja	0.02	179.43	\$198.11
899	002	IV	0.48	Baja	0.05	577.36	\$1,593.69
899	003	IV	0.21	Baja	0.02	625.91	\$691.08
899	004	IV	0.43	Baja	0.05	50.27	\$138.75
899	005	IV	0.28	Baja	0.02	102.87	\$113.58



899	006	IV	0.40	Baja	0.02	212.17	\$234.26
899	007	IV	0.33	Baja	0.02	105.14	\$116.09
.
.
.
649	008	III	0.20	Media	0.00	30.64	\$0.00
649	011	III	0.45	Media	0.08	720.40	\$1,596.12
649	022	III	0.44	Media	0.08	445.30	\$986.62
649	061	III	0.34	Media	0.03	71.56	\$59.46
812	001	III	1.83	Media	1.00	2898.54	\$80,275.31
850	001	IV	0.51	Baja	0.05	8142.22	\$22,475.06
850	032	IV	0.06	Baja	0.00	37.78	\$0.00
865	033	III	0.63	Media	0.31	141.92	\$1,218.45
865	035	III	0.51	Media	0.08	4093.65	\$9,069.94
865	036	III	0.34	Media	0.03	2256.27	\$1,874.63
865	037	III	0.00	Media	0.00	0.01	\$0.00
865	038	III	0.31	Media	0.03	309.75	\$257.36
865	039	III	0.53	Media	0.08	309.44	\$685.60
865	042	III	0.69	Media	0.31	348.61	\$2,993.02
865	043	III	0.54	Media	0.08	93.12	\$206.33
865	046	III	0.57	Media	0.08	342.81	\$759.54
Total de daños							\$2,612,462.64

Para identificar el riesgo, es preciso estimar el monto de los daños que se generaría para cada avenida asociada a diferentes periodos de retorno. El monto total de daños que se generaría en la avenida con periodo de retorno de 100 años se estimó de \$2, 612,462.64 pesos.

- c) Para calcular el monto total de daños de los demás Tr se realiza el mismo procedimiento que con el Tr de 100 años. En la Tabla 6.22 se muestran los daños totales de cada periodo de retorno analizado.

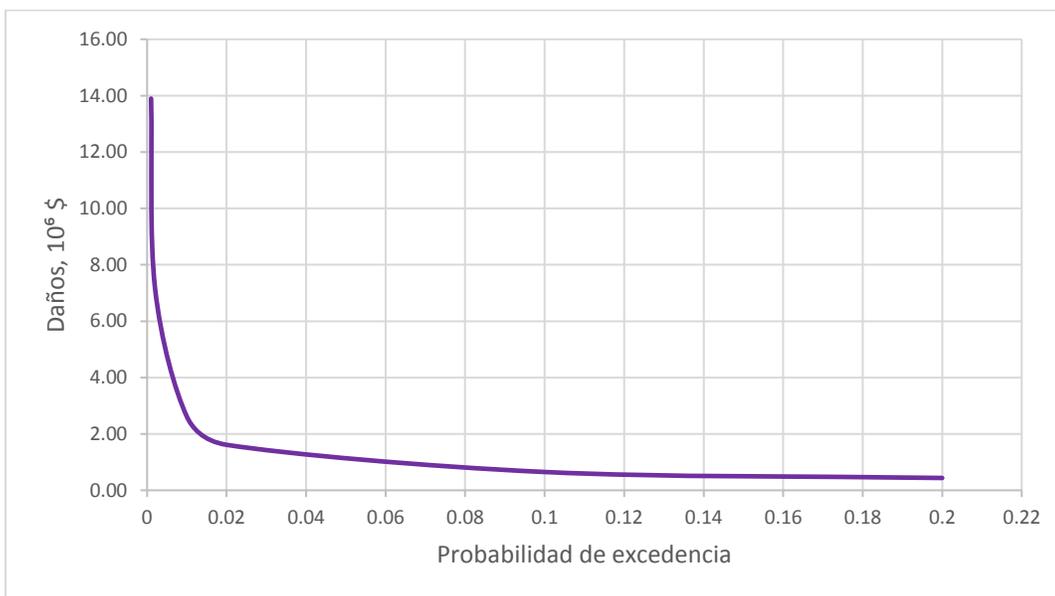
Tabla 6.22 Estimación de los daños totales por inundación para diferentes periodos de retorno.

Tr, años	Probabilidad de excedencia	Daños, \$
5	0.2	\$437,582.35
10	0.1	\$648,555.64
50	0.02	\$1,613,212.84
100	0.01	\$2,612,462.64
500	0.002	\$7,159,278.69
1000	0.001	\$13,895,770.34

- d) Una vez estimado los daños para los distintos periodos de retorno, se procedió a obtener un resultado global de Daño Anual Esperado (DAE).



Entonces, como se menciona en el capítulo 4.3, la evaluación del riesgo sigue principalmente una perspectiva de evaluación económica, por ello se construyó la curva de daños. En la Gráfica 6.20 se observa dicha curva al graficar la probabilidad de excedencia del daño respecto del monto económico de daños.



Gráfica 6.20 Curva de daños a diferente probabilidad de excedencia.

e) A partir de la curva de daños, se determinó el Daño Anual Esperado por inundación, calculándose el área bajo la curva con ayuda de las ecuaciones descritas en el capítulo 4.3. En la Tabla 6.23 se muestra el cálculo para obtener el DAE.

Tabla 6.23 Cálculo del daño anual esperado máximo para la ciudad de Tapachula.

Tr, años	Probabilidad de excedencia	Daño, en \$	DAE, \$/año
5	0.2	\$437,582.35	
10	0.1	\$648,555.64	\$54,306.90
50	0.02	\$1,613,212.84	\$90,470.74
100	0.01	\$2,612,462.64	\$21,128.38
500	0.002	\$7,159,278.69	\$39,086.97
1000	0.001	\$13,895,770.34	\$10,527.52
		TOTAL	\$215,520.51

El Daño Anual Esperado resulta de \$215, 520.51 pesos al año, lo cual representa el costo de daño total en promedio anual que puede ocasionar la ocurrencia de inundación.



6.6. ANÁLISIS DE OBRA DE PROTECCIÓN

Para disminuir el riesgo a inundación en las viviendas de la ciudad de Tapachula, se propuso construir una laguna de regulación aguas arriba de la ciudad con la finalidad de proteger a la población y como segunda opción construir bordos de protección en la margen izquierda del río Coatán, sobre todo en donde ocurre el desbordamiento del río. Para comparar los escenarios se utilizó los periodos de retorno de 100, 50, 20 y 10 años, debido a que la inundación de 2005 tuvo un $T_r=40$ años.

6.6.1. Laguna de regulación

Las lagunas de regulación que proporcionan un almacenamiento temporal del sobre flujo de una gran avenida, son cada vez más utilizadas en el mundo entero para obtener una reducción en la capacidad requerida del cauce aguas abajo, evitando así una inundación. Es usual que estas lagunas tengan una salida sin regulación de bajo nivel para ahogar la descarga y un vertedor o rampa de inundación que opera si la capacidad de almacenamiento de la laguna es excedida. El inconveniente de estas estructuras es que ocupan mucho espacio, el cual resulta ser muy escaso en las ciudades muy urbanizadas.

La formación de dichas lagunas puede ser la de un dique cerrando un valle o por excavación; y la de las depresiones naturales que proveen también un lugar apropiado.

Las ventajas asociadas con el uso de las lagunas de regulación son las siguientes (CONAGUA, 2007):

- ❖ Bajo consumo de energía y costo de operación.
- ❖ Bajo capital de inversión, especialmente en los costos de construcción.
- ❖ Esquemas sencillos de flujo.
- ❖ Operación y mantenimiento simple.
- ❖ Amortiguamiento de picos hidráulicos.
- ❖ Empleo como almacenamiento de efluente para reúso del agua.

Las principales desventajas son:

- ❖ Altos requerimientos de área.
- ❖ Pérdidas de agua debido a la evaporación e infiltración, que en zonas de escasas pueden ser importantes.

Con base en la topografía de la zona de estudio se eligió la zona en donde se pondrá la laguna de regulación, Figura 6.53.

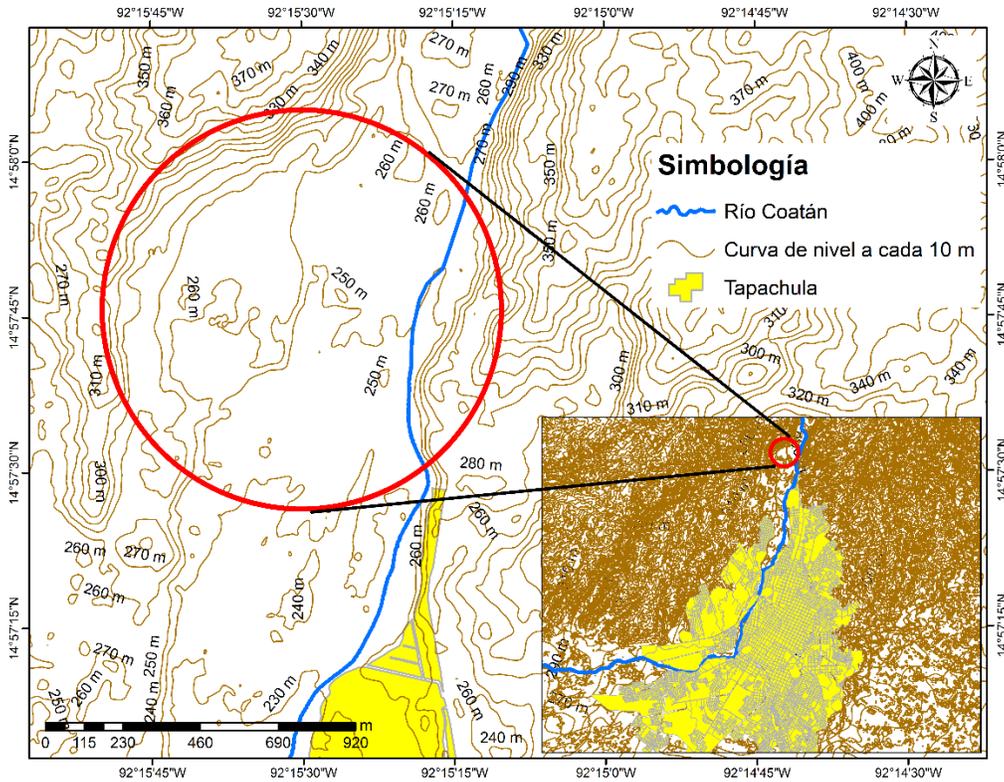


Figura 6.53 Ubicación de la zona en donde se pondrá la laguna de regulación.

Para la simulación de los periodos de retorno a analizar se tomó como base la configuración geométrica de los modelos de simulación obtenidos anteriormente y con ayuda de la herramienta de HecRAS se procedió a delimitar la geometría de la laguna.

En la ventana de *Geometric Data* se da clic en la herramienta *Storage Area*  la cual sirve para delimitar cuerpos de agua en las que el agua puede ser desviada de un río hacia ella o viceversa. En HecRAS las áreas de almacenamiento pueden ubicarse al comienzo del río (como condición de frontera aguas arriba), al final del río (como condición de frontera aguas abajo) o pueden ubicarse lateralmente al río.

En este caso se utilizó el área de almacenamiento lateral, al dibujarla se representa como un polígono de color azul, Figura 6.54.

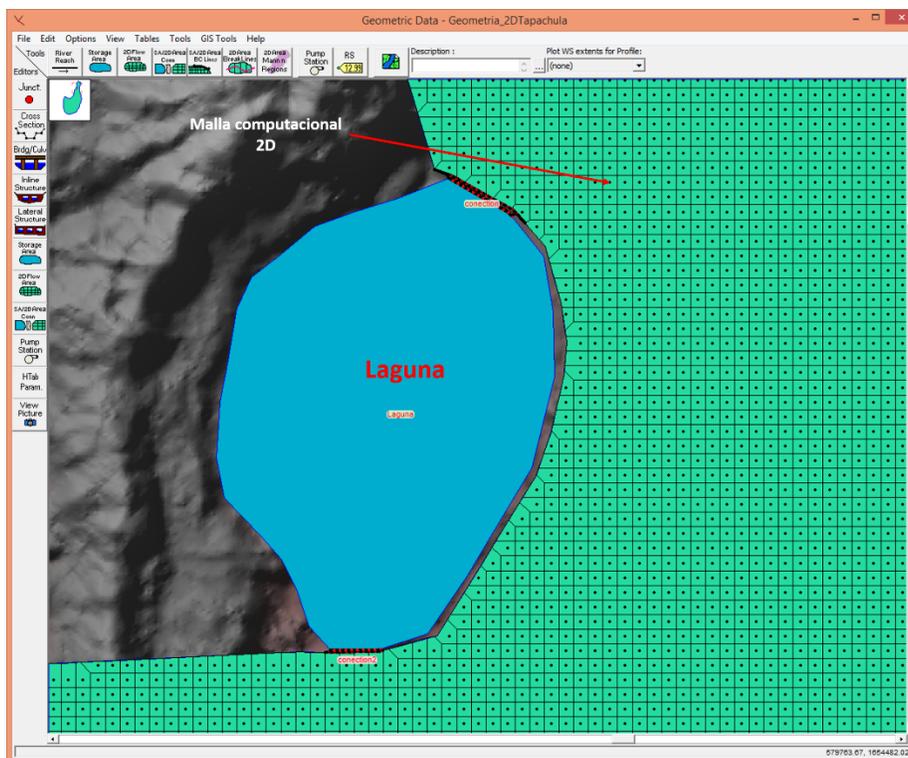


Figura 6.54 Laguna de regulación con la herramienta HecRAS.

Una vez dibujada la laguna se ejecuta el modelo obteniéndose como resultado el mapa de inundación mostrado en la Figura 6.55. En este caso se muestra la simulación para un periodo de retorno de 100 años.

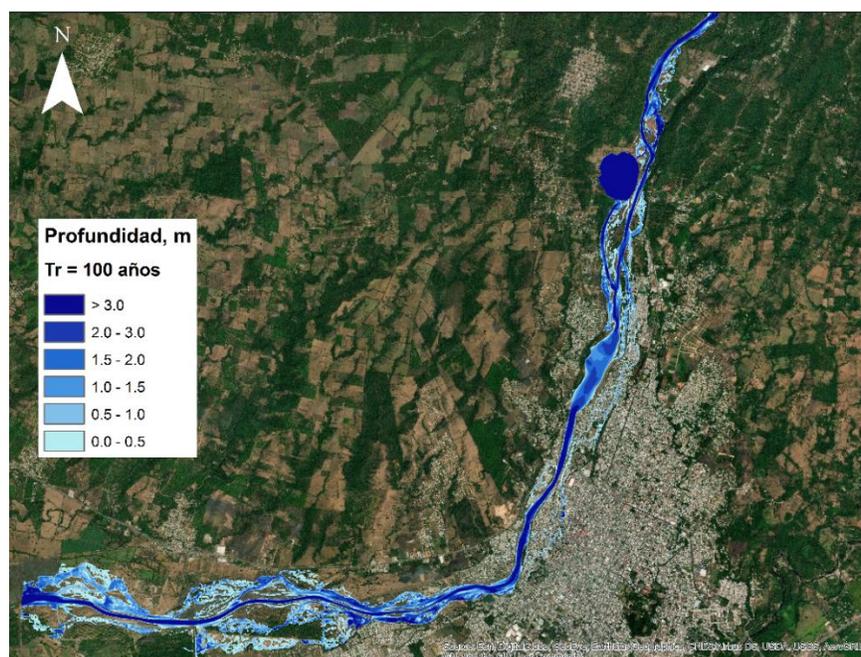
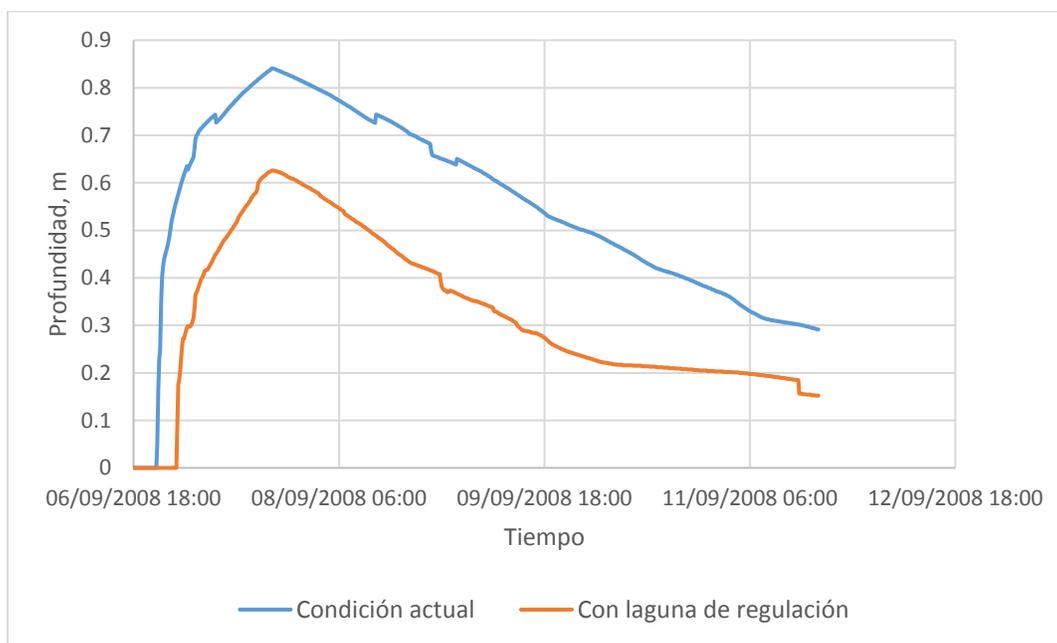


Figura 6.55 Tirantes de inundación para un $Tr = 100$ años con laguna de regulación.



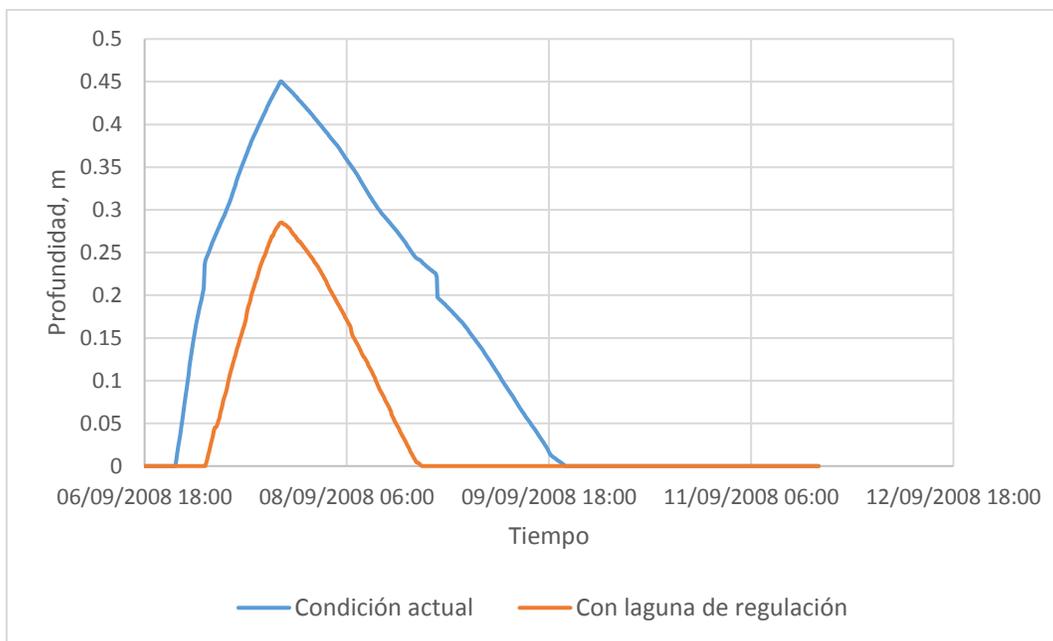
Para comparar los resultados obtenidos con la laguna y los de la condición actual, se hicieron graficas de tirantes vs tiempo de algunas zonas inundables, ver Gráfica 6.21 y Gráfica 6.22.



Gráfica 6.21 Tirantes vs tiempo de zona inundable

En la Gráfica 6.21 se puede observar que el tirante de la simulación con laguna es menor que el de la condición actual, aproximadamente un día después del evento se alcanza el máximo tirante para después empezar a disminuir. En la condición actual se llega a tener un tirante máximo de 0.84 m y con la laguna de regulación baja a 0.62 m. También se observa que la inundación con la laguna empieza 3.5 horas después que la de la condición actual.

Otro punto comparativo es el que se muestra en la Gráfica 6.22, en donde se observa que en esa zona el tirante bajo de 0.45 m a 0.28 m. La inundación, con la laguna, empieza cinco horas después que en la condición actual y la duración de la zona inundada disminuye. Cabe mencionar que en algunas partes de las zonas inundables si se nota mucho la diferencia en cuanto al nivel de profundidad y en otras zonas el nivel baja poco.



Gráfica 6.22 Tirantes vs tiempo de zona inundable

Entonces, con base en esta simulación, se procedió a obtener el daño por inundación que se genera sobre las viviendas con la obra de regulación, tal y como se hizo con la condición actual. Los resultados para un periodo de retorno de 100 años se muestran en la Tabla 6.24.

Tabla 6.24 Daño por inundación para un $Tr=100$ años con la laguna de regulación.

Tr, años	Probabilidad de excedencia	Daños, $\$10^6$
100	0.01	1.59

6.6.2. Bordos de protección

La segunda opción fue poner un bordo de protección sobre la margen izquierda del río, únicamente donde se encuentran las ventanas de desbordamiento. En la Figura 6.56 se muestra la ubicación del bordo perimetral.

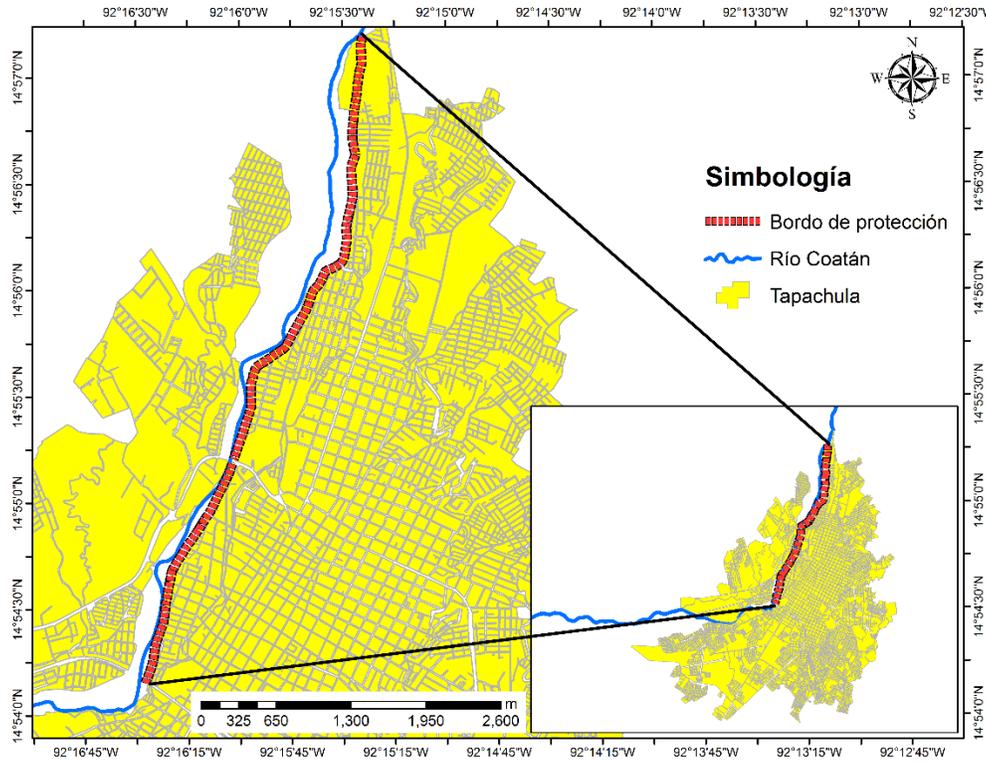


Figura 6.56 Ubicación del muro de protección sobre la margen izquierda del río Coatán.

Para el desarrollo de esta obra, se tomó como base la geometría de la simulación hecha anteriormente con las condiciones actuales para un Tr de 100 años y con base a las ventanas de desbordamiento y a las elevaciones de profundidad que se generaron con dicho periodo de retorno, fue que se decidió proponer el bordo en el lugar mostrado en la Figura 6.56.

La profundidad máxima alcanzada en el desbordamiento del río, con las condiciones actuales, sobre la población es de 2.30 metros. Entonces, con ayuda de la herramienta de HecRAS, para la consideración de diques, se procedió a delimitar el tramo del bordo de protección sobre la margen izquierda del río, Figura 6.57, abarcando una longitud de 6.11 km aproximadamente.

Al ejecutar el modelo se obtiene como resultado la simulación que se muestra en la Figura 6.58.

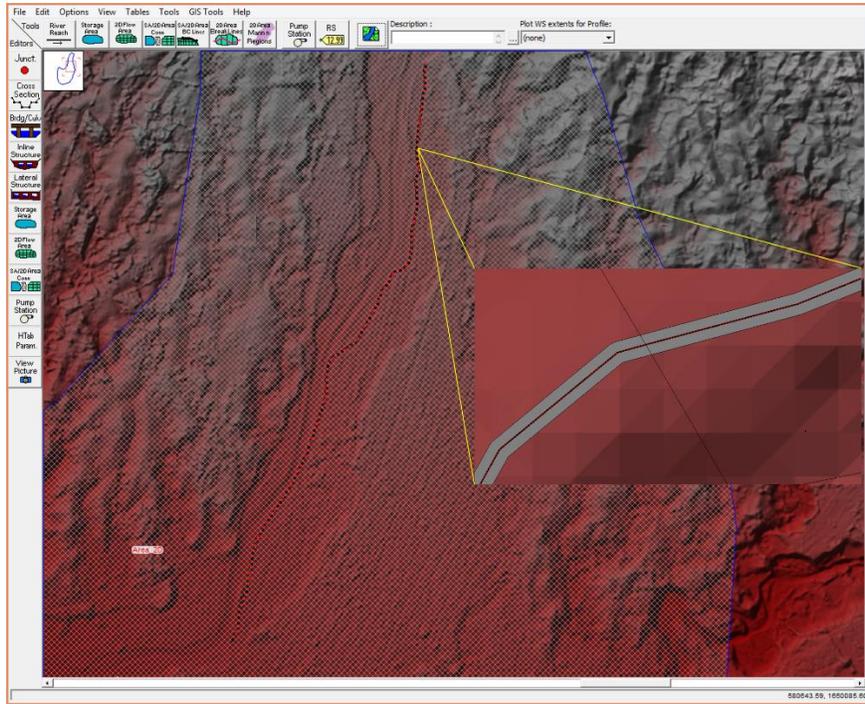


Figura 6.57 Bordo de protección en la margen izquierda del río con HecRAS.

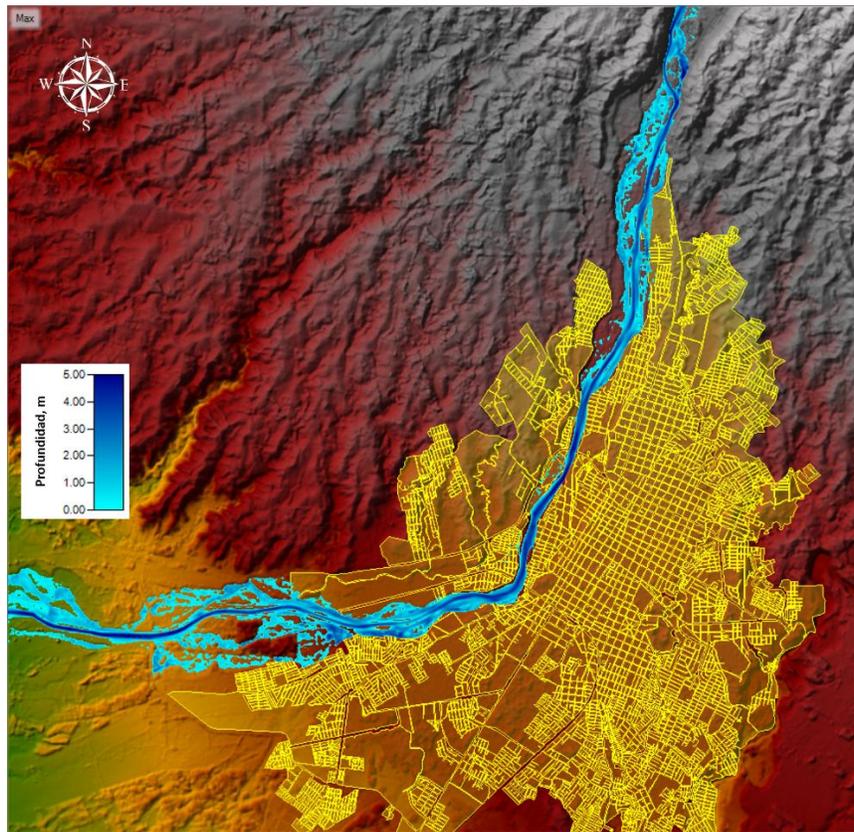
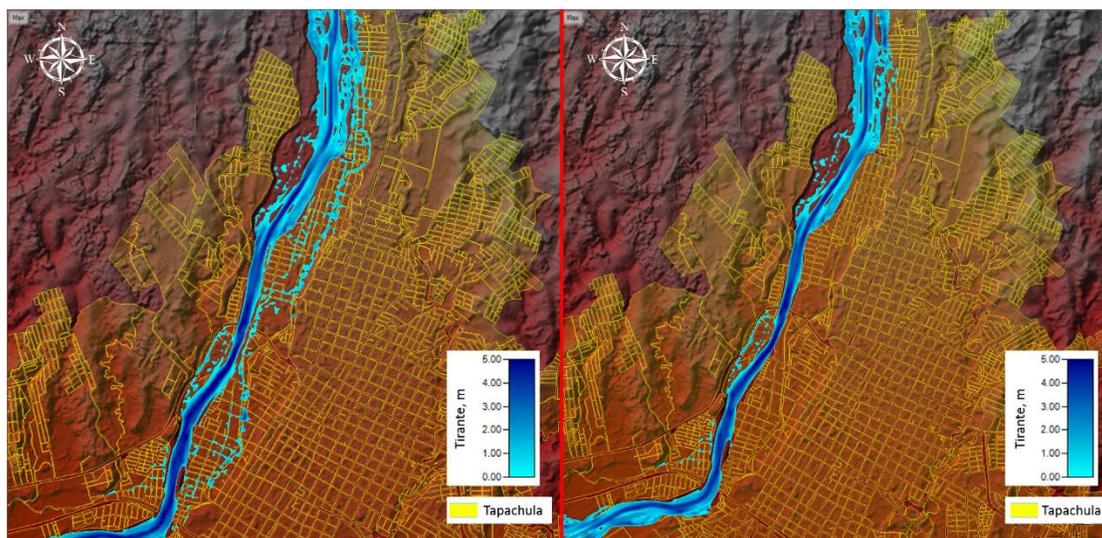


Figura 6.58 Simulación hidráulica para un $T_r = 100$ años considerando bordo de protección.



En la Figura 6.59 se muestra la comparación de la simulación para el Tr de 100 años en la condición actual y con el bordo de protección. En esta figura se puede observar que la mancha de inundación disminuye en la margen izquierda, que es donde se tiene el problema, mientras que en la margen derecha se sigue conservando la inundación propiciada con la condición actual. Cabe mencionar, como se mencionó anteriormente, que el tirante máximo de desbordamiento es de 2.30 metros por lo que se propuso una altura del bordo de 2.50 metros.



a) Simulación en la condición actual

a) Simulación con bordo de protección

Figura 6.59 Comparación de la simulación hidráulica con Tr=100 años en la condición actual y con bordo de protección.

En la Figura 6.60 se muestra la combinación de los tirantes con las velocidades para el Tr de 100 años sobre el nomograma de Dorrigo, observándose los niveles de peligro por inundación que presenta dicho periodo de retorno.

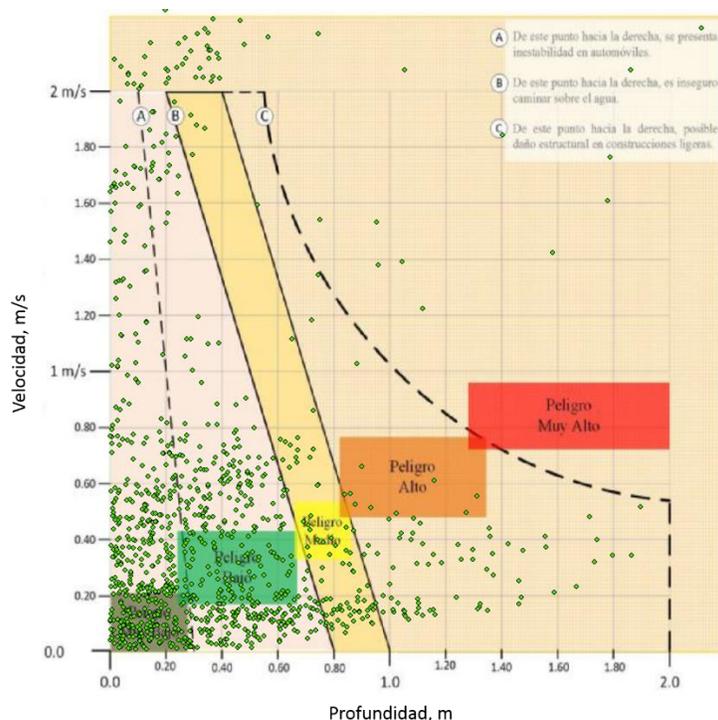
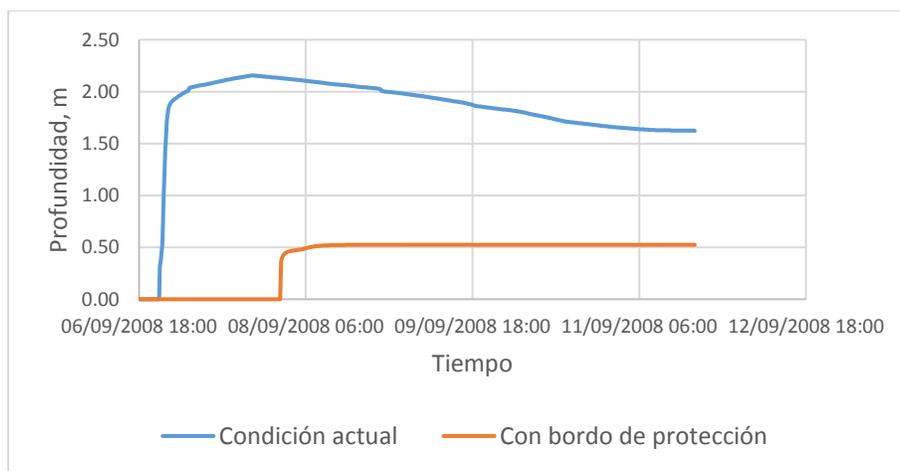


Figura 6.60 Combinación de puntos de tirantes y velocidades sobre el Nomograma de Dorrigo para un $Tr = 100$ años.

En la Gráfica 6.23 se muestra la comparación, de un punto en específico, de las profundidades alcanzadas durante el desbordamiento del río con la condición actual y con bordos de protección. Se puede observar que con el bordo de protección el desbordamiento empieza un día después, aproximadamente, que el desbordamiento de la condición actual y el tirante disminuye de 2.15 metros (tirante máximo) a 0.52 metros, es decir disminuye el 75%.



Gráfica 6.23 Comparación de profundidad vs tiempo de zona inundable en un punto.



Con base en la simulación con bordo de protección, se realizó la cuantificación del daño por inundación asociado a la vulnerabilidad que tiene cada manzana de la ciudad. En la Tabla 6.25 se muestra el resultado.

Tabla 6.25 Daño por inundación para un $Tr=100$ años con bordo de protección.

Tr, años	Probabilidad de excedencia	Daños, $\$10^6$
100	0.01	1.50

6.6.3. Alternativas de obras no estructurales

Estas obras permiten avisar a tiempo a la población que puede sufrir una inundación, así como el control y manejo de los escurrimientos, cuando es factible, para minimizar los daños. Se basan en la planeación, organización, coordinación y ejecución de una serie de ejercicios de protección civil que busca evitar o disminuir los daños causados por las inundaciones y pueden ser de carácter permanente o aplicable únicamente durante la contingencia.

Cuando una localidad se empieza a poblar y desarrollar se debe disponer de un plano de la llanura de inundación donde se limite la zona inundada por una avenida cuyo periodo de retorno sea de 100 años, ya que ayudará a sentar las bases para el futuro desarrollo, uso de tierra y otras regulaciones.

Entre las acciones no estructurales se consideran las siguientes (CONAGUA, 2013):

- ❖ Diseño, construcción y operación de sistemas de alerta, con base en estaciones hidrométricas y climatológicas, imágenes de satélite y pronósticos meteorológicos.
- ❖ Elaboración de mapas de riesgo por inundación al delimitar áreas en función de la frecuencia y duración de las inundaciones, o del periodo de retorno de las avenidas.
- ❖ Elaboración e implementación de sistemas de seguros en función del valor de los bienes.
- ❖ Elaboración de normas para el uso de suelo, tomando en cuenta la zonificación de la cuenca.
- ❖ Elaboración de historiales con mapas, fotografías y otras pruebas existentes de las huellas que han dejado otros eventos, en la llanura de inundación, para reducir las pérdidas de tiempo al momento de la inundación.

Algunas acciones preventivas a las inundaciones que maneja Protección Civil para estar preparados, enfrentarlas y responder adecuadamente son (CENAPRED, 2004):



Antes

- Identificar los lugares más altos de la región, que no puedan ser inundados, así como las rutas de acceso a los refugios temporales.
- Tener a la mano un botiquín de primeros auxilios, lámpara de mano, radio portátil y las baterías respectivas.
- En la temporada de lluvias mantener una reserva de agua potable, alimentos enlatados y ropa en lugares bien resguardados.
- Si se vive en zonas bajas, casa de palma, carrizo o adobe, es preferible refugiarse en lugares más seguros, como en las escuelas, iglesias o el palacio municipal (siempre y cuando estén fuera de peligro).
- Evacuar la zona si es necesario y llevar sólo lo indispensable.

Durante

- Atender las indicaciones de las autoridades correspondientes.
- Evitar caminar y cruzar por sectores inundados. Aunque el nivel del agua sea bajo, puede aumentar rápidamente y desarrollar velocidades peligrosas, y puede ser arrastrado por la corriente.
- No salir ni tratar de manejar a través de caminos inundados.
- Si el vehículo se atasca al intentar cruzar la corriente, debe ser abandonado inmediatamente y buscar la parte más alta en los alrededores.
- Ser precavido especialmente durante la noche, ya que es más difícil identificar el incremento del nivel del agua en el cauce.

Después

- Pasado el peligro, mantenerse informado y seguir las indicaciones de las autoridades.
- Mantenerse alejado de la zona de desastre.
- No regresar a la zona afectada hasta que las autoridades indiquen que no hay peligro, ni habitar las casas hasta que las condiciones en las que se encuentra sean las adecuadas.
- No acercarse a bardas o casas en peligro de derrumbarse. Alejarse de lugares donde puedan ocurrir deslaves.
- No pisar ni tocar cables eléctricos caídos.



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 7.1 se tiene la comparación de la cuantificación de los daños sin obra (condición actual) y con obra, a partir de la estimación de la vulnerabilidad física de las viviendas. Así como, la comparación del daño estimado para los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100 y 1000 años y del daño anual esperado.

Tabla 7.1 Estimación de los daños por inundación a las viviendas en la ciudad de Tapachula, Chiapas.

Tr, años	Daños, \$10 ⁶		
	Condición actual	Laguna de regulación	Bordo
5	0.44	0.18	0.36
10	0.65	0.29	0.60
50	1.61	1.01	0.99
100	2.61	1.59	1.50
1000	13.90	8.10	6.30
DAE	0.216	0.123	0.156

Como se observa en la tabla anterior la implementación de la laguna de regulación no evita las inundaciones en las viviendas de Tapachula puesto que los daños calculados no representan una ventaja considerable respecto a los daños con las condiciones actuales. Por ejemplo, para el periodo de retorno de 100 años con la condición actual se calculó el daño por \$2,612,462.64 pesos y con la laguna se estima el daño por \$1,587,285.48, es decir bajo únicamente el 40% sobre la condición actual; esto se debe a que la laguna necesita ser más grande para regular mejor el flujo del río, pero debido a la topografía de la zona no hay lugar para hacerla más grande.

Con respecto al bordo de protección, para el mismo caso del periodo de retorno de 100 años, se observa que con la obra baja únicamente 43% de los daños con respecto a la condición actual.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La principal causa de que ocurran inundaciones en la ciudad de Tapachula es el desbordamiento del río Coatán.

De acuerdo con el análisis hidrológico se estimó que la cuenca es de respuesta rápida por lo que las avenidas en dicho río son de tipo súbitas, es decir, en cuestión de horas o minutos llega el flujo a la ciudad. Una forma de evaluar más a detalle la respuesta de la cuenca es realizando el análisis estadístico de los gastos medios diarios máximos anuales, sin embargo, lo descrito anteriormente supera los alcances de este análisis.

Los hidrogramas de diseño se construyeron con el método de mayoración con base en los gastos máximos medios diarios.

Para obtener los gastos asociados a diferentes periodos de retorno se aplicaron las funciones de distribución a los gastos máximos instantáneos y la función de distribución Log Normal 2P fue la que arrojó el menor error estándar de ajuste; sin embargo, se notó que la distribución Doble Gumbel ajusta favorablemente a los datos medidos y aunque no tenga un Error Estándar de Ajuste menor al de la Log Normal 2P, se usó esta función para ajustar la muestra ya que en la zona de estudio hay presencia de ciclones.

Los tiempos de modelación son amplios puesto que se requiere realizar una validación de los resultados del modelo matemático propuesto con un evento previo o con una calibración utilizando imágenes satelitales.

En este caso como no se contaba con una imagen de Radar o de Satélite para comparar el área inundable, se utilizó la imagen histórica que presenta la herramienta de Google Earth para verificar que la modelación hecha con HecRAS se haya reproducido de manera parecida a la inundación de 2005.

Uno de los insumos para obtener resultados fiables en la simulación hidráulica del río es la base topobatimétrica, en función de la resolución con la que se cuente será la calidad con la que se pueda elaborar dichas simulaciones; en el caso de este estudio, la base fue el LiDAR de INEGI cuya resolución es de 5x5 metros; sin embargo, aunque dicha resolución es buena, la edición del LiDAR es de 2014 por lo que los cambios en la morfología del cauce a la fecha actual no se incluyen.

Es necesario contar con información más precisa del tipo y uso de suelo que hay en la zona de estudio actualmente. Ya que, la simulación bidimensional considera este parámetro de acuerdo con lo publicado por INEGI y por su influencia en el modelo, es deseable tener más detalle.

Para la parte de obtención de la vulnerabilidad física, es importante contar con censos actualizados de las viviendas, aunque la encuesta intercensal de 2015 es la más reciente no cuenta con la actualización de estas. Por lo que se usó el censo de



2010, debido a que es el censo más completo, para obtener la tipología de las viviendas en Tapachula y así cuantificar cada una de ellas proporcionándoles el grado de vulnerabilidad con la que cuentan actualmente.

Es importante mencionar que la estimación de los daños se hizo exclusivamente para las viviendas, puesto que la mayor proporción de pérdidas debido a la inundación de 2005 estuvo en el rubro de éstas. La comparación de los daños en la condición actual y la laguna de regulación, muestran una reducción mínima, debido a que la topografía del sitio no da para construir una laguna más grande y que esta pueda regular más el flujo del río. Por lo que sería factible realizar como prueba otra simulación con una laguna más grande y revisar cuanto se reduciría el daño ocasionado a las viviendas por inundación.

Otra medida estructural considerada fue la construcción de bordos de protección sobre la margen izquierda del río, en la que ocurren principalmente los desbordamientos; sin embargo, para que estos bordos funcionen deben de ser construidos con base en las profundidades máximas que se presentan en la zona y el alineamiento de estos se hace siguiendo la configuración de la zona por proteger, lo que no siempre es posible pues en ocasiones se obligaría a desplantar el bordo en lugares inadecuados, donde cimentarlos sería difícil y costoso.

El análisis de costo de la laguna de regulación y del bordo de protección requieren de un estudio más detallado, debido a que se tiene que hacer el diseño estructural, mano de obra y normativas del estado de Chiapas; por lo cual dicho análisis excede las proyecciones de este trabajo.

Para proteger las viviendas a ser inundadas se proponen las siguientes recomendaciones:

- Para evaluar la vida económica de un proyecto se tiene que comparar su costo con los beneficios que aportarán durante un periodo de tiempo determinado, sin importar que la obra pueda durar más. Tomando en cuenta diversos factores como las consecuencias de falla de obra, sobre todo en pérdidas de vidas humanas o el costo del incremento de la seguridad, ya que al incrementar el periodo de retorno el costo aumenta.
- Se pueden llevar a cabo otras medidas estructurales tales como: desazolve en el cauce del río Coatán, principalmente en las zonas afectadas, con la finalidad de obtener una mayor capacidad hidráulica y así evitar desbordamientos futuros.
- Implementar obras de protección no estructurales como lo son el diseño de un Sistema de Alerta Temprana con el propósito de contribuir a establecer un mecanismo de detección temprana de situaciones anómalas asociados a fenómenos hidrometeorológicos que se presentan en diferentes meses del año y que constituyen peligros para las poblaciones, sus bienes y medios de



vida, finalmente educar a la población referente a estos fenómenos naturales para que puedan responder adecuadamente a este tipo de emergencias cuando se presenten.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcocer-Yamanaka, V., et al. 2016. *Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas, Tecnología y ciencias del agua*, Vol. 7, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Aparicio, F. J. 1989. *Fundamentos de hidrología de superficie*, 1 ed., Limusa, México, pp. 27-34.
- Aragón, J. L., F. De Luna, L. Vélez, et al. 2016. La modelación numérica en hidráulica. Una herramienta en la planeación del territorio, *Revista L'esprit Ingéniux*, Colombia, enero-diciembre, ISSN 2422-2445, pp. 93-107.
- ArcGIS V10.2. Environmental Systems Research Institute (ESRI). Redlands, California, EUA.
- Baeza, C. 2018. *Programa Busca Ciclones V3.0.5*. Área de Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- BANDAS, 2019. Bases de datos hidrométricas. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Comisión Nacional del Agua. <https://www.gob.mx/conagua>. [última consulta 20 de marzo de 2019].
- Bladé, E., et al. 2014. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Revista Ingeniería del Agua*, Vol. 18.1, España, julio, ISSN 1134-2196, pp. 71-82.
- Breña, A. F. y M. A. Jacobo. 2013. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*, Universidad Autónoma Metropolitana, México, p. 289.
- CENAPRED, 2004. Inundaciones. *Serie de Fascículos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, SEGOB, México, p. 56.
- CENAPRED, 2006. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005. *Serie de impacto socioeconómico de los principales desastres*, No. 7, Centro Nacional de Prevención de Desastres, pp. 294-364.
- CENAPRED, 2006. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. *Serie Atlas Nacional de Riesgos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, SEGOB, México, p. 453.
- CENAPRED, 2011. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. *Serie Atlas Nacional de Riesgos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, SEGOB, México, p. 68.
- CONAGUA, 2007. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, Comisión Nacional del Agua, México, pp. 4.



- CONAGUA, 2013. **Manual para el control de inundaciones**, Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT, México, 2da edición, p. 366.
- CONAGUA, 2018. **Atlas del agua en México 2018**, Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT, México, pp. 24-25.
- Echeverri, C. 2007. *Estudio de las crecientes en las cuencas de la costa del estado de Chiapas*. Tesis de maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Escalante, C. y L. Reyes. 2005. *Técnicas estadísticas en hidrología*, 2 ed., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, p. 254.
- Fuentes, O. A., V. Franco, F. De Luna, et al. 2013. *Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el Atlas Nacional de Riesgos por inundaciones*. Organismo de Cuenca IV Balsas-Cuenca Yauatepec. CONAGUA-Instituto de Ingeniería UNAM, México, p. 76.
- Fuentes, O., et al. 2015. Maximización de la función de verosimilitud de distribuciones de probabilidad usando algoritmos genéticos. **Revista Ingeniería del Agua**, Vol. 19.1, España, enero, ISSN 1134-2196, pp. 18.
- González, F. 1970. Contribución al análisis de frecuencias de valores extremos de los gastos máximos en un río. Serie Azul, Instituto de Ingeniería UNAM, México, p. 28.
- GRASS Development Team, 2018. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, V. 7.4. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- HecRAS V5.0.1. Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, River Analysis System, Institute for Water Resources. Software. Davis, California, EUA.
- INEGI, 2010. Censo de Población y vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 10 de julio de 2019].
- INEGI, 2010. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 25 de febrero de 2019].
- INEGI, 2010. Edafología Serie I. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 5 de junio de 2019].
- INEGI, 2010. Marco geoestadístico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 03 de julio de 2019].



- INEGI, 2010. Modelos digitales de elevación LiDAR de superficie. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 25 de febrero de 2019].
- INEGI, 2015. **Principales resultados de la encuesta intercensal 2015 Chiapas**, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, pp. 4 y 71.
- INEGI, 2019. Uso de suelo y vegetación serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>. [última consulta 5 de junio de 2019].
- Jiménez, M. 1996. *Programa AX*. Área de Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Lluén, W. 2015. **Aplicación de la nueva herramienta HecRAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos**. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Barcelona, p. 74.
- López, J., J. Alavez y J. Hernández. 2009. Solución numérica del modelo de Saint-Venant vía volúmenes finitos, **Revista de Ciencias Básicas UJAT**, Vol. 8, No. 2, México, diciembre, pp. 34-53.
- Maza, J. A. y V. Franco. 1997. Obras de protección para control de inundaciones. En **Manual de ingeniería de ríos**. CONAGUA-Instituto de Ingeniería UNAM, México, p. 194.
- Meyer, V., et al. 2012. Economic Evaluation of Structural and Non-Structural Flood Risk Management Measures: Examples from the Mulde River, **Natural Hazards**, Vol. 62, Issue 2, London, June, ISSN 0921-030X, pp. 301-324.
- Ochoa, S., T. Reyna, S. Reyna, et al. 2016. Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba, **Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, Vol. 3, No. 2, Argentina, septiembre, pp. 95-101.
- Salas, M. A. 1999: Obras de protección contra inundaciones. Centro Nacional de Prevención de Desastres, **Cuaderno de investigación** No. 49, México, noviembre, p. 65.
- Solís, Y., et al. 2014. *Estimación de daños económicos en zonas urbanas inundables, con base en el Área Geoestadística Básica para obtención del daño anual esperado*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, p. 7.
- Tapachula, 2016. *Perfil sociodemográfico*, Gobierno del Estado de Chiapas. Instituto de población y ciudades rurales, México, pp. 6.
- US Army Corps of Engineers. 2016. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling, User's Manual. Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center, CA, February, 171 pp.



Vázquez, J. 2003. Modelación numérica en hidráulica, Universidad de Piura, Perú, pp. 2-4.