



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

**METODOLOGÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES
FLUVIALES. CASO DE APLICACIÓN EN CAMPECHE, MÉXICO**

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

PRESENTA:
M. EN. I. BEATRIZ EDITH VEGA SERRATOS

TUTOR PRINCIPAL
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DR. JESÚS GRACIASÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. JULIO 2017



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. Jesús Gracia Sánchez

Secretario: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Vocal: Dr. Rodolfo Silva Casarín

1^{er}. Suplente: Dr. Ramón Domínguez Mora

2^{do}. Suplente: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, CIUDAD DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

FIRMA

DEDICATORIA

A mi esposo GREGORIO

Por tu amor, confianza y apoyo incondicional.

A PAULINA y DAVID

Son la luz que ilumina mi vida.

Pau, siempre tan intensa y llena de energía, te adoro.

David, tu llegada ha sido una bendición.

A mis PADRES

Siempre han sido un ejemplo a seguir en todos los sentidos,
fuente inagotable de amor, fortaleza y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen María.

A mi hermano Enrique y familia, Jaque, José Andrés y Sarita, por su cariño y apoyo incondicional.

A mi familia en Colombia, Doña Maria, Don Alcides, Vero, Carlos, Martín y Miguel, siempre pendientes de nosotros, apoyándonos en todos los sentidos. Siempre en mi corazón y mis oraciones.

A Faustino de Luna Cruz un amigo invaluable.

A mis amigos, los adquiridos durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería, que a la fecha han permanecido constantes a pesar de la distancia y el tiempo: Ismene, Gaby, José Luis, Javier Carrillo, Martín y Laura.

A mis amigos en Campeche: Karo, Rabdall, Dolores, Valentina, Paty, Elizabeth y a mis compadres William y Diana, por acogernos en sus familias y hacernos sentir en casa.

A mi comadre Edith, a pesar de la distancia, siempre estas presente como parte de mi familia.

En especial al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su guía, apoyo y buena disposición en la realización de este trabajo.

A mi comité tutor el Dr. Jesús Gracia Sánchez, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Dr. Rodolfo Silva Casarín y Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por su asesoría y revisión de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser parte vital en mi crecimiento académico. Al Instituto de Ingeniería, por ser parte fundamental en mi formación profesional.

A la Universidad Autónoma de Campeche, por integrarme a su proyecto de crecimiento constante.

A los alumnos que han colaborado en el área de Procesos Costeros e Hidrológicos, por su participación en todos los procesos del trabajo en campo y gabinete. A Débora, por su tenacidad y trabajo.

Al Instituto EPOMEX, por abrirme las puertas y darme la oportunidad de integrarme a un grupo de trabajo consolidado. En especial a su Director Guillermo Villalobos Zapata, su apoyo siempre incondicional y amistad sincera.

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado. A las Licenciadas Sara y Mayra, por su amabilidad y paciencia en los trámites de este apoyo.

Índice

Resumen	9
Palabras clave:	9
Abstract	9
Keywords	10
1 Introducción	11
2 Estado del arte	17
2.1 Peligro.....	18
2.1.1 Modelos hidráulicos	18
2.1.2 Modelos hidrológicos	18
2.2 Vulnerabilidad	20
3 Marco teórico	21
3.1 Definición de riesgo.....	21
3.1.1 Clasificación general de daños por inundación.....	22
3.2 Riesgo por inundación en viviendas.....	24
3.2.1 Peligro por inundación	24
3.2.1.1 Modelos numéricos.....	25
3.2.1.2 Peligro en términos de probabilidad.....	25
3.2.2 Evaluación de vulnerabilidad	27
3.2.2.1 Características de la inundación	27
3.2.2.2 Clasificación de las funciones de daño	27
3.2.2.3 Construcción de las funciones de daño.....	28
3.2.3 Exposición.....	28
3.2.3.1 Valor de los bienes expuestos.....	29
3.2.4 Modelo de riesgo	29
3.2.4.1 Riesgo para un escenario o evento específico	30
3.2.4.2 Riesgo como valor esperado de los daños anuales.....	30
3.3 Riesgo en zonas agrícolas.....	31
3.3.1 Clasificación de daños en la agricultura	31
3.3.1.1 Categorías de los daños por inundación en la agricultura	31

3.3.1.2	Daños directos instantáneos.....	32
3.3.1.3	Daños directos inducidos	33
3.3.2	Parámetros del peligro por inundación en la evaluación de daños en los cultivos	33
3.3.2.1	Estacionalidad	33
3.3.2.2	Profundidad del agua	34
3.3.2.3	Duración	34
3.3.2.4	Velocidad.....	34
3.3.2.5	Depósito, contaminación y salinidad	35
3.3.3	Funciones de daño	35
3.3.4	Valor de los elementos expuestos	36
3.3.4.1	Cultivos.....	36
3.3.4.2	Otros componentes.....	36
3.3.5	Modelos de estimación de daños en zonas agrícolas.....	37
3.4	Mapas de riesgo	38
4	Metodología: Riesgo por inundaciones en Campeche	40
4.1	Zona de estudio.....	40
4.2	Descripción general.....	41
4.3	Evaluación del riesgo por inundación en viviendas	42
4.3.1	Peligro por inundación	42
4.3.1.1	Integración del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	43
4.3.1.2	Hidrogramas de diseño	46
4.3.1.3	Condiciones de marea en la desembocadura	48
4.3.2	Calibración del modelo.....	51
4.3.3	Evaluación de la vulnerabilidad.....	54
4.3.3.1	Funciones de daño en viviendas	54
4.3.3.1.1	Parámetros de la inundación.....	54
4.3.3.1.2	Construcción de funciones de daño	55
4.3.3.1.3	Encuesta.....	55
4.3.3.2	Exposición.....	56
4.3.3.2.1	Fuentes de información	59
4.3.3.2.2	Valor de los bienes expuestos	59

4.3.5	Riesgo en viviendas	59
4.4	Evaluación del riesgo en zonas agrícolas	61
4.4.1	Peligro por inundación en zonas agrícolas.....	61
4.4.2	Funciones de daño en sectores productivos.....	62
4.4.2.1	Parámetros del peligro por inundación que afectan a los cultivos.....	62
4.4.2.2	Tipos de cultivos	63
4.4.2.3	Etapas del crecimiento del cultivo	64
4.4.2.4	Fechas de siembra y cosecha	65
4.4.2.5	Impacto del daño	65
4.4.3	Exposición.....	67
4.4.3.1	Entrevistas	67
4.4.3.2	Valor de los bienes expuestos.....	68
4.4.4	Riesgo en zonas agrícolas.....	69
4.5	Análisis espacial de resultados.....	70
5	Resultados: Evaluación del riesgo	72
5.1	Evaluación del riesgo por inundación en viviendas	72
5.1.1	Análisis del peligro en la cuenca Champotón	72
5.1.1.1	Calibración.....	72
5.1.1.2	Análisis hidráulico.....	73
5.1.2	Funciones de daño	76
5.1.2.1	Trabajo de campo y aplicación de encuestas.....	76
5.1.2.2	Características de las viviendas.....	77
5.1.2.3	Contenidos	81
5.1.2.4	Funciones de vulnerabilidad para viviendas	87
5.1.3	Exposición.....	88
5.1.3.1	Valor de los bienes expuestos.....	92
5.1.4	Mapas de riesgo	95
5.1.5	Evaluación del riesgo.....	98
5.2	Riesgo en zonas agrícolas.....	101
5.2.1	Evaluación del peligro	101
5.2.1.1	Temporalidad de la inundación.....	101

5.2.2	Construcción de las funciones de daño en zonas agrícolas	103
5.2.3	Exposición.....	104
5.2.3.1	Costos de los bienes	106
5.2.4	Evaluación del riesgo.....	107
6	Conclusiones.....	116
7	Bibliografía	120
A	Anexos	128
A.1	Formato de Encuesta	130
A.2	Resultados modelación hidráulica del río Champotón	134
A.3	Contenidos en viviendas de la ciudad de Champotón	138
A.3.1	Electrónicos	138
A.3.2	Muebles y aparatos electrónicos varios.....	141
A.3.3	Muebles.....	145
A.4	Daños agrícolas.....	151
A.5	Modelo lluvia-escurrimiento (De Luna, 2016)	154

Índice de Figuras

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS 10 PAÍSES CON MAYOR OCURRENCIA DE DESASTRE NATURALES, 2016.....	11
FIGURA 2. TRIÁNGULO DE RIESGO. FUENTE: ADAPTADO DE ESCUDERO ET AL. 2012	21
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIÓN. FUENTE: ADAPTADO DE MEYER, 2005	23
FIGURA 4. CUENCA DEL RÍO CHAMPOTÓN, ESTADO DE CAMPECHE, MÉXICO	40
FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA EVALUAR EL RIESGO POR INUNDACIÓN	42
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO PARA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PELIGRO POR INUNDACIÓN.....	43
FIGURA 7. MODELO TOPOBATIMÉTRICO GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	44
FIGURA 8. MODELO TOPOBATIMÉTRICO ZONA DE ESTUDIO, DETALLE.....	44
FIGURA 9. MALLA FLEXIBLE CUENCA RÍO CHAMPOTÓN, GENERAL	45
FIGURA 10. MALLA FLEXIBLE, RÍO CHAMPOTÓN, DETALLE.....	45
FIGURA 11. MALLA FLEXIBLE, DESEMBOCADURA RÍO CHAMPOTÓN, DETALLE	46
FIGURA 12. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE GASTOS MÁXIMOS ANUALES PARA DIFERENTES DURACIONES (DÍAS).....	48
FIGURA 13. SEÑAL DE MAREA REGISTRADA EN CHAMPOTÓN	49
FIGURA 14. LOCALIZACIÓN DE MAREÓGRAFOS Y BARÓMETROS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE NIVELES Y TEMPERATURA PARA EL ESTADO DE CAMPECHE.....	50
FIGURA 15. FUNCIÓN DE MAREA DE TORMENTA DE CHAMPOTÓN.....	51
FIGURA 16. REGISTROS HISTÓRICOS DEL HURACÁN ISIDORE (2002).....	52
FIGURA 17. REGISTROS HISTÓRICOS DEL HURACÁN STAN (2005)	53
FIGURA 18. CONDICIÓN DE FRONTERA EN EL MAR PARA CALIBRACIÓN DEL MODELO	53
FIGURA 19. DIAGRAMA PARA CONSTRUCCIÓN DE FUNCIONES DE DAÑO EN VIVIENDAS.....	55
FIGURA 20. ENCUESTA APLICADA PARA CARACTERIZAR VIVIENDA Y CONTENIDOS.	57
FIGURA 21. APLICACIÓN ELECTRÓNICA PARA REALIZAR ENCUESTAS	58
FIGURA 22. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN ZONAS AGRÍCOLAS	61
FIGURA 23. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE DAÑO EN CULTIVOS	62
FIGURA 24. DELIMITACIÓN DE LOS DISTRITOS DE DESARROLLO RURAL	63
FIGURA 25. SUPERFICIE SEMBRADA EN EL DDR CHAMPOTÓN, 2013. MODALIDAD DE RIEGO: TEMPORAL. (FUENTE: SIAP-SAGARPA, 2014)	64
FIGURA 26. ESTADOS FENOLÓGICOS DE LA PLANTA DE MAÍZ. FUENTE: RITCHIE Y HANWAY (1982)	65
FIGURA 27. FECHAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, ESTADO DE CAMPECHE. CICLO P-V 2015.....	66
FIGURA 28. INFORMACIÓN DE ENTREVISTA, FIRCO	68
FIGURA 29. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN PARA EL HURACÁN ISIDORE (2002)	72
FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN DE LAS COLONIAS EN LA CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	73
FIGURA 31. SIMULACIÓN NUMÉRICA ASOCIADA A UN $T_r=10$ AÑOS.....	74
FIGURA 32. SIMULACIÓN NUMÉRICA ASOCIADA A UN $T_r=50$ AÑOS	75
FIGURA 33. SIMULACIÓN NUMÉRICA ASOCIADA A UN $T_r=100$ AÑOS	75
FIGURA 34. PROFUNDIDAD DEL AGUA VS PERIODO DE RETORNO	76
FIGURA 35. ENCUESTAS APLICADAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAMPOTÓN	77
FIGURA 36. CARACTERÍSTICAS DE VIVIENDAS CUENCA CHAMPOTÓN.....	78
FIGURA 37. CONTENIDOS PARCIALES PARA VIVIENDA TIPO 2, CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	81
FIGURA 38. CONTENIDOS PARCIALES PARA VIVIENDA TIPO 3, CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	82
FIGURA 39. CONTENIDOS PARCIALES PARA VIVIENDA TIPO 6, CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	82
FIGURA 40. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTENIDOS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE VIVIENDA, CHAMPOTÓN	86
FIGURA 41. FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA VIVIENDA TIPO 2. CIUDAD DE CHAMPOTÓN	87
FIGURA 42. FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA VIVIENDA TIPO 3. CIUDAD DE CHAMPOTÓN	87
FIGURA 43. FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA VIVIENDA TIPO 6. CIUDAD DE CHAMPOTÓN	88
FIGURA 44. IDENTIFICACIÓN DE CANTIDAD DE CASAS POR MANZANA, CIUDAD DE CHAMPOTÓN	89
FIGURA 45. TIPOS DE VIVIENDA EN UNA MANZANA DE LA CIUDAD D CHAMPOTÓN	90
FIGURA 46. CLASIFICACIÓN DE MANZANAS POR TIPO DE VIVIENDA REPRESENTATIVO	90

FIGURA 47. VULNERABILIDAD DE LAS VIVIENDAS EN CHAMPOTÓN. TR = 10 AÑOS	91
FIGURA 48. VULNERABILIDAD DE LAS VIVIENDAS EN CHAMPOTÓN. TR = 50 AÑOS	91
FIGURA 49. VULNERABILIDAD DE LAS VIVIENDAS EN CHAMPOTÓN. TR = 100 AÑOS	92
FIGURA 50. DAÑOS POR INUNDACIÓN PARA TR 10 AÑOS. CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	96
FIGURA 51. DAÑOS POR INUNDACIÓN PARA TR 50 AÑOS. CIUDAD DE CHAMPOTÓN	96
FIGURA 52. DAÑOS POR INUNDACIÓN PARA TR 100 AÑOS. CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	97
FIGURA 53. RIESGO TOTAL POR INUNDACIÓN A NIVEL DE MANZANA EN CIUDAD DE CHAMPOTÓN	97
FIGURA 54. ÍNDICE DE RIESGO DESBORDAMIENTO DEL RÍO CHAMPOTÓN EN LA CIUDAD DE CHAMPOTÓN.....	98
FIGURA 55. FUNCIÓN DE RIESGO EN MANZANA DE LA COLONIA CRISTÓBAL COLÓN.....	99
FIGURA 56. FUNCIÓN DE RIESGO EN MANZANA DE LA COLONIA INFONAVIT	99
FIGURA 57. FUNCIÓN DE RIESGO EN MANZANA DE LA COLONIA POZO DEL MONTE	100
FIGURA 58. FUNCIÓN DE RIESGO PARA LA CIUDAD DE CHAMPOTÓN	100
FIGURA 59. PROFUNDIDAD Y DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN	101
FIGURA 60. CAUDALES RÍO CHAMPOTÓN EN ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CANASAYAB (1956-2011).....	102
FIGURA 61. FUNCIÓN DE DAÑO EN CULTIVOS PARA UNA DURACIÓN MAYOR A 11 DE INUNDACIÓN	104
FIGURA 62. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN CUENCA DEL RÍO CHAMPOTÓN.....	105
FIGURA 63. CURVAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN CULTIVO DE MAÍZ.....	112
FIGURA 64. DAÑO ANUAL ESPERADO, CULTIVO: MAÍZ	114
FIGURA 65. CASA GENERAL, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS.....	138
FIGURA 66. CASA TIPO 2, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	138
FIGURA 67. CASA TIPO 3, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	139
FIGURA 68. CASA TIPO 6, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	139
FIGURA 69. CASA TIPO 7, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	140
FIGURA 70. CASA TIPO 8, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	140
FIGURA 71. CASA TIPO 9, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: APARATOS ELECTRÓNICOS	141
FIGURA 72. CASA GENERAL, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	141
FIGURA 73. CASA TIPO 2, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	142
FIGURA 74. CASA TIPO 3, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	142
FIGURA 75. CASA TIPO 6, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	143
FIGURA 76. CASA TIPO 7, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	143
FIGURA 77. CASA TIPO 8, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	144
FIGURA 78. CASA TIPO 9, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES Y ELECTRÓNICOS.....	144
FIGURA 79. CASA GENERAL, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES.....	145
FIGURA 80. CASA TIPO 2, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	145
FIGURA 81. CASA TIPO 3, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	146
FIGURA 82. CASA TIPO 6, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	146
FIGURA 83. CASA TIPO 7, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	147
FIGURA 84. CASA TIPO 8, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	147
FIGURA 85. CASA TIPO 9, CHAMPOTÓN, CONTENIDOS: MUEBLES	148

Índice de Tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LA INUNDACIÓN Y EFECTO EN LOS DAÑOS. ADAPTADO DE MEYER, 2005	24
TABLA 2. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ANUAL	26
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DEL DAÑO POR INUNDACIÓN EN LA AGRICULTURA, ADAPTADA POR BRÉMOND ET AL., (2013).....	31
TABLA 4. REGISTRO HISTÓRICO DE GASTOS MÁXIMOS ANUALES DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CANASAYAB	46
TABLA 5. VARIABLES DE LA INUNDACIÓN EN MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	62
TABLA 6. FORMATO DE TABLA DE ENCUESTA PARA DETERMINAR EL DAÑO POR INUNDACIÓN EN CULTIVOS	66
TABLA 7. CANTIDAD DE ENCUESTAS POR MUNICIPIO.....	78
TABLA 8. MATERIALES COMUNES UTILIZADOS EN MUROS.....	78
TABLA 9. MATERIALES COMUNES UTILIZADOS EN TECHOS.	78
TABLA 10. COMBINACIONES MÁS COMUNES EN LAS ZONAS DE ESTUDIO	79
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LOS TIPOS DE VIVIENDA EN LAS ZONAS ESTUDIO.....	79
TABLA 12. ANÁLISIS DE CONTENIDOS PARA VIVIENDA TIPO 2. CHAMPOTÓN, MÉXICO	83
TABLA 13. ANÁLISIS DE CONTENIDOS PARA VIVIENDA TIPO 3. CHAMPOTÓN, MÉXICO	84
TABLA 14. ANÁLISIS DE CONTENIDOS PARA VIVIENDA TIPO 6. CHAMPOTÓN, MÉXICO	85
TABLA 15. ANÁLISIS DE COSTOS PARA VIVIENDA TIPO 2. CHAMPOTÓN, MÉXICO.	92
TABLA 16. ANÁLISIS DE COSTOS PARA VIVIENDA TIPO 3. CHAMPOTÓN, MÉXICO	93
TABLA 17. ANÁLISIS DE COSTOS PARA VIVIENDA TIPO 6. CHAMPOTÓN, MÉXICO	94
TABLA 18. ESCURRIMIENTOS HISTÓRICOS MENSUALES. ESTACIÓN CANASAYAB	102
TABLA 19. FACTORES DE IMPACTO DEL DAÑO EN DIFERENTES MESES DEL AÑO Y DIFERENTES DURACIONES DE INUNDACIÓN	103
TABLA 20. ÁREAS DE CULTIVO DE TEMPORAL.....	105
TABLA 21. PAQUETE TECNOLÓGICO PROPUESTO PARA CULTIVO DE MAÍZ BAJO CONDICIONES DE TEMPORAL	106
TABLA 22. EVALUACIÓN DEL DAÑO EN ÁREAS DE CULTIVO DE MAÍZ PARA UNA DURACIÓN DE 1-3 DÍAS DE INUNDACIÓN.....	109
TABLA 23. EVALUACIÓN DEL DAÑO EN ÁREAS DE CULTIVO DE MAÍZ PARA UNA DURACIÓN MAYOR A 11 DÍAS DE INUNDACIÓN.....	110
TABLA 24. RESUMEN DEL DAÑO POR ESCENARIO E INTERVALO DE DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN EN CULTIVO DE MAÍZ.....	112
TABLA 25. INUNDACIONES ASOCIADAS A Q_{UMBRAL}	113
TABLA 26. DAÑO TOTAL DE DURACIÓN PROMEDIO (DTP) PARA EL CULTIVO DE MAÍZ.....	113

RESUMEN

En el análisis del riesgo por inundación los métodos más desarrollados están asociados a la evaluación económica de los daños directos tangibles en zonas urbanas, donde los bienes principales, por su costo e importancia, son las viviendas y sus contenidos. En el caso del sector agrícola los daños económicos esperados debido a las inundaciones no han sido estudiados con la misma profundidad que los daños en zonas urbanas, aun cuando se han desarrollado diversos métodos para estimar las pérdidas monetarias en el sector agrícola, la evaluación de daños en zonas rurales se ha hecho con métodos simples y aproximados. En esta tesis se propone un método para evaluar el riesgo por inundaciones fluviales en zonas agrícolas considerando de los parámetros de inundación (duración y profundidad) Se plantean las curvas del impacto de daño en cultivos de maíz a partir de datos obtenidos mediante la aplicación de encuestas a personal científico, técnico y agricultores complementadas con información bibliográfica; dichas curvas consideran las distintas etapas del ciclo vegetativo del cultivo, de manera que al relacionarlas con la probabilidad de que una creciente ocurra en cada mes del año es posible calcular el daño anual esperado, para un evento de inundación. Por otro lado, para evaluar el riesgo por inundación en zonas urbanas se mejora la metodología propuesta por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, la cual es función de tres elementos: peligro, vulnerabilidad y exposición. Para determinar el comportamiento de las inundaciones se utilizó un modelo hidráulico bidimensional; para evaluar la vulnerabilidad se aplicó una encuesta para caracterizar las viviendas y sus contenidos, con los datos obtenidos se construyeron las funciones de vulnerabilidad en función de la profundidad del agua. Del análisis de riesgo por inundación fluvial, en la cuenca del río Champotón, se construyeron las curvas de probabilidad de daños para las zonas inundadas y de las cuales se puede obtener el valor del daño total que se puede esperar si sucede una inundación con una frecuencia específica de ocurrencia, así también se obtuvo el área total bajo la curva, valor que representa el daño anual esperado. La información contenida en estas curvas es fundamental para la toma de decisiones en el manejo del riesgo por inundación.

Palabras clave:

Riesgo, Daño, Inundación, Vivienda, Agrícola, Cultivo, Champotón, México.

ABSTRACT

In flood risk analysis, the most developed methods are associated with the economic evaluation of tangible direct damages in urban areas, where the main goods, by their cost and importance, are the households and their contents. In the case of the agricultural sector, the expected economic damages due to flooding have not been studied with same emphasis as damage in urban areas, even though various methods have been developed to estimate monetary losses in the agricultural sector, In rural areas has been done with simple and approximate methods. This

thesis proposes a method to evaluate the risk of flooding in agricultural areas considering the parameters of flood (duration and depth). The curves of the impact of damage in maize crops are proposed from data obtained through the application of surveys to scientific, technical and agricultural personnel complemented with bibliographical information; these curves consider the different stages of the vegetative cycle of the crop, so that when related to the probability that an increase occurs in each month of the year it is possible to calculate the expected annual damage for a flood event. On the other hand, the methodology proposed by the National Center for Disaster Prevention, which is a function of three elements: hazard, vulnerability and exposure, is improved to assess flood risk in urban areas. To determine the flood areas, a two-dimensional hydraulic model was used; To evaluate the vulnerability a survey was applied to characterize the houses and their contents, with the obtained data the functions of vulnerability were constructed according to the depth of the water. From the fluvial flood risk analysis in the Champotón river basin, damage probability curves were constructed for the flooded areas and from which the value of the total damage that can be expected can be obtained if a flood occurs with a frequency specific of occurrence, thus also the total area under the curve was obtained, representing the expected annual damage. The information contained in these curves is fundamental for decision making in flood risk management.

Keywords

Risk, Damage, Flood, Housing, Agricultural, Crops, Champotón, Mexico

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son parte de la naturaleza, en mayor o menor medida se presentan en todo el mundo, lo cual puede suceder en cualquier época del año. A lo largo de la historia, la humanidad ha vivido con este fenómeno y ha trabajado permanentemente en entender, predecir y manejar las inundaciones, sobre todo las poblaciones asentadas en las cercanías a cuerpos de agua tales como los ríos y costas en donde las afectaciones han sido devastadoras generando destrucción y en algunos casos fallecimientos (Zevenbergen C. et al., 2011).

En 2016, los datos preliminares de EM-DAT indican que se produjeron 301 desastres a nivel internacional, afectando a 102 países. El impacto de éstos suma un total de 7,628 muertes, 411 millones de personas afectadas y 97,000 millones de dólares de daños económicos. El análisis por tipo de desastre sugiere que el 50% de los eventos de 2016 están relacionados con inundaciones, y las tormentas representan el 22% de todos los eventos naturales reportados este año. En conjunto, estos dos tipos de desastres son responsables del 71% de todas las muertes relacionadas con desastres naturales, seguidas de terremotos (17% de muertes relacionadas). Las sequías representan una gran parte de la población afectada por el desastre (94%).

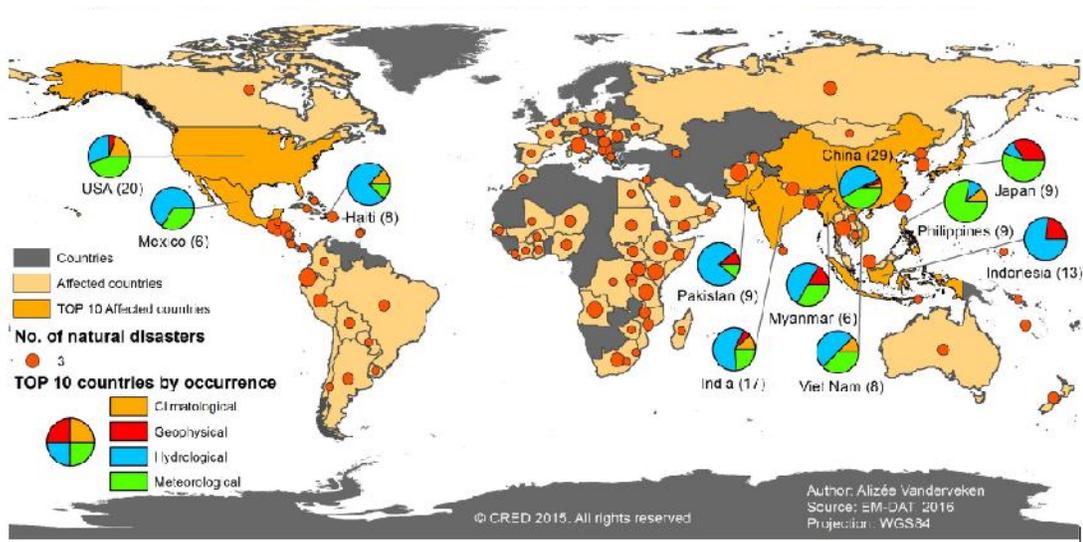


Figura 1. Clasificación de los 10 países con mayor ocurrencia de desastre naturales, 2016

Los efectos de las inundaciones van desde una escala local, afectando colonias o comunidades, hasta una gran escala, donde se consideran regiones enteras e inclusive múltiples estados o países (cuencas transfronterizas). Es en función de las causas de la inundación el comportamiento de éstas y por consecuencia el tipo de afectación. En las zonas urbanas se pueden alterar diversos aspectos de la vida cotidiana de sus habitantes y sus posesiones, así como el desarrollo de las actividades económicas. La población puede tener afectaciones en su seguridad, salud y en sus medios de subsistencia; los sectores económicos se pueden ver

mercados por la alteración en su capacidad productiva y en la demanda de los productos y, la infraestructura física de la población o ciudad puede presentar daños e interrumpir servicios básicos como agua, luz, drenaje e industrias específicas, entre otros.

El posible impacto de los eventos naturales no puede ser ignorado y por el contrario es una necesidad urgente incluir conceptos de manejo del riesgo de desastres en los planes de ordenamiento territorial, las evaluaciones de impacto ambiental y la valoración de estrategias ambientales (van Westen C., 2010). Es necesario desarrollar las herramientas que permitan evaluar las pérdidas para diferentes escenarios de peligro debido a la presencia de eventos extraordinarios (IPCC, 2007). Dentro de las acciones Sendai 2015-2030 de la UN-ISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, por sus siglas en inglés) se indican cuatro prioridades para la reducción del riesgo de desastres: Comprender el riesgo de desastres, fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo, invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia y Aumentar la preparación para casos de desastres con la finalidad de dar una respuesta eficaz y reconstruir mejor en los ámbitos de la recuperación, rehabilitación y reconstrucción. Así, el manejo del riesgo de desastres requiere de una evaluación la cual debe ser un esfuerzo multidisciplinario de todas las instancias involucradas (UN-ISDR, 2015).

En materia de riesgos México ha implementado medidas encaminadas a las acciones de la UN-ISDR y la ONU. En el marco de la Planeación Nacional de Desarrollo, la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) promueve el Programa de Prevención de Riesgos (PPR) en los asentamientos humanos, y el Ordenamiento territorial, así como llevar a cabo obras de mitigación y estudios de viabilidad y de costo beneficio para la reubicación de la población en zonas de riesgo. Este PPR es parte de una estrategia integral que busca la distribución y ordenación equilibrada de la población y sus actividades económicas. De igual manera, está dirigido a mitigar los efectos de los fenómenos perturbadores, para aumentar la fortaleza de los gobiernos locales y la sociedad, conceptualizado una política pública encaminada a evitar la ocupación del suelo en zonas no aptas para los asentamientos humanos y prevenir la ocurrencia de desastres, (DOF, 2016).

El PPR se estructura en tres componentes: Instrumentos de Planeación Territorial, Prevención de Riesgos en los Asentamientos Humanos y Obras de Prevención y mitigación. Dentro de la segunda componente se establecen como herramientas, entre otros, la elaboración de Atlas y Mapas de Riesgos, que se definen como un sistema documental y tecnológico a escala municipal que integra información de probables daños o pérdidas sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador a que está expuesta la comunidad y su entorno conformado por Mapas de peligros por fenómenos perturbadores, de susceptibilidad y riesgos, Inventarios de población, territorio, bienes expuestos, y vulnerabilidades y Escenarios de riesgos. Dichas herramientas deben ajustarse a los parámetros que para su integración al atlas nacional, determina el Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED).

En las metodologías para evaluar los riesgos por inundación, las más desarrolladas están asociadas a la evaluación económica de los daños directos tangibles. En esta categoría de daños los bienes principales son las viviendas y sus contenidos, por su costo e importancia. En el caso

del sector agrícola los daños económicos esperados debido a las inundaciones suelen ser considerablemente inferiores a los de las zonas urbanas para el mismo nivel de exposición. Por lo anterior, aun cuando se han desarrollado varios métodos para estimar las pérdidas monetarias en el sector agrícola, la evaluación de daños en zonas rurales se ha hecho con métodos simples y aproximados.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el riesgo por inundaciones fluviales en zonas agrícolas y urbanas.

Dentro de los objetivos particulares se encuentran:

- Caracterizar el peligro por el desbordamiento en ríos con un modelo hidráulico bidimensional.
- Desarrollar un método para la evaluación del daño en zonas agrícolas.
- Construir las funciones de daño que permitan determinar la vulnerabilidad de los sectores agrícolas.
- Construir las funciones de daño que permitan determinar la vulnerabilidad de las viviendas y sus contenidos.

En los últimos 50 años, el estado de Campeche, ha sufrido grandes inundaciones por el impacto de huracanes, dentro de los que se destacan Gilberto, 1988, Opal y Roxanne en 1995, Isidoro en 2002, Stan 2005 y Alex 2010. Estos eventos extraordinarios han generado daños, debido a las inundaciones fluviales y costeras, principalmente en la población y sus bienes, infraestructura, actividades económicas y en sus sistemas ecológicos.

Los daños debido a las inundaciones fluviales están asociadas al desbordamiento de los principales ríos del estado, por su magnitud y caudal aportado, Palizada, Candelaria y Champotón; las cuencas hidrológicas de los dos primeros cauces pertenecen a la región hidrológica 30D (Grijalva-Usumacinta) y la cuenca del río Champotón a la 31 (Yucatán Oeste). Palizada es una cuenca similar a las del estado de Tabasco, que se caracteriza por ser un brazo del río Usumacinta, por lo cual su caudal está controlado por el nivel del agua de la cuenca principal, los principales daños asociados a su desbordamiento afectan al sector agrícola y ganadero principalmente. Por otro lado, Candelaria es una cuenca transfronteriza que, aunque culmina en la Laguna de Términos, tiene en su parte intermedia una serie de caídas de agua que permiten separar su análisis de los efectos que el mar pueda ocasionarle, igualmente es susceptible a incrementar su caudal considerablemente debido al paso de eventos meteorológicos extremos, Opal y Roxanne en 1995, han sido los huracanes que mayores inundaciones han causado generando daños en las viviendas y sus bienes y en la ganadería. Finalmente, Champotón es la cuenca más pequeña que desemboca directamente en el Golfo de México, esta cuenca ha presentado las mayores afectaciones por los huracanes Gilberto (1998) e Isidoro (2002), los principales daños en la población fueron en la vivienda, sus bienes, interrupción de sus actividades y en las zonas agrícolas.

El huracán Gilberto causó, en el estado de Campeche, afectaciones principalmente en el sector agrícola causando daños totales y parciales de 56,000 hectáreas de cultivos, el daño en

zonas urbanas fue de 653 viviendas y un total de 8,500 habitantes afectados y 8 fallecidos (Bitran et al. 2001).

De acuerdo con los registros del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Bitran et al., 2003) los daños causados en el estado de Campeche por los efectos del huracán Isidore sumaron en total 2,342 millones de pesos (2002). Los sectores más dañados en orden de importancia: la producción de petróleo, como resultado de la evacuación de las plataformas petroleras, con un 38.2%; el sector ganadero, incluyendo afectaciones a la infraestructura de esta actividad, con un 17.7%; el sector agrícola por las hectáreas inundadas de diferentes cultivos e infraestructura anexa a la actividad, con un 16.1%, entre las más importantes.

En lo que se refiere a la actividad agropecuaria los daños fueron cuantiosos, la mayor concentración fue en las inundaciones de parcelas de distintas cosechas y en infraestructura asociada a la actividad como unidades de riego y caminos a las zonas productivas, afectando aproximadamente a 38 mil productores. La superficie total afectada ascendió a 102,578 hectáreas, que representó el 55.8% de la superficie sembrada en todo el estado para el ciclo agrícola correspondiente (P-V). Más del 80% de la superficie afectada correspondió al cultivo de maíz (82,861ha); otros daños considerables se presentaron en cultivos de arroz, hortalizas y cítricos entre otros. Se consideraron como daños indirectos a los cultivos que no se habían cosechado y que se perdieron, representando el 46.7% los cultivos de maíz, un 23.7% los cítricos y un 13.2% las hortalizas, entre los más importantes. En lo que se refiere a daños en la infraestructura: 183 unidades de riego fueron afectadas, las cuales cubrían un superficie de 6,358 ha y 952 km de caminos hacia zonas productivas. Así, sumando los daños indirectos a las cosechas en la agricultura y los daños directos a la infraestructura nos da un monto total de daños de 378.5 millones de pesos (2002). Por otro lado, se presentaron daños en las actividades pecuarias sobre todo las de ganado bovino. El cálculo indica que se perdió un 60% de las existencias de este tipo de ganado. También se registraron daños en la actividad apícola. La infraestructura de potreros y abrevaderos sufrió daños que alcanzaron a afectar a más de 30 mil productores.

Las localidades inundadas en el municipio de Champotón fueron Moquel, Zapote, San Antonio del río, Canasayab y Ulumal, mientras que las colonias el Huanal, Venustiano Carranza, Carolinas, Guadalupe Victoria, Manguitos, Aserradero, Tajonal, Brisas, Arenal, Cuauhtémoc, Lázaro Cárdenas, Los laureles y Cadenal de la ciudad de Champotón (Rivera A. et al. 2004).

En 2005 con el huracán Opal y Roxana se dañaron en total 94,237 hectáreas de uso agrícola y forestal, 3,014 cabezas de ganado, 4,856 viviendas, damnificados fueron 48,700 y 6 muertes reportadas. En ciudad del Carmen, Campeche, los huracanes Opal y Roxana destruyeron los muelles de descarga de camarón de dos plantas congeladoras; resultaron destruidos todos los puestos del mercado popular de pescados y mariscos. Hubo daños a 12 embarcaciones mayores, 183 motores y pérdida de 2,771 artes de pesca. La flota camaronera de altura paralizó sus actividades.

Por los antecedentes descritos, el sector agrícola en el estado de Campeche, está expuesto a diversos riesgos hidrometeorológicos cuyos efectos negativos pueden alcanzar dimensiones de desastres, ocasionando grandes daños patrimoniales a los productores y a la economía familiar, ya sea por pérdida parcial o total de la inversión y del ingreso esperado. También, pueden

generar daños a la economía regional y nacional por la interrupción del ciclo productivo, reducción de los ingresos, desempleo y desabasto de alimentos, entre otros.

En este trabajo se realiza una evaluación del riesgo por inundación en la cuenca del río Champotón, dentro de la categoría de los daños directos tangibles, para las viviendas y sus contenidos como elementos indispensables en una evaluación del riesgo, por la importancia y monto que representan para la población. Por otro lado, la aportación principal es una metodología que permite evaluar el riesgo por inundación en áreas de uso agrícola, para las condiciones del estado de Campeche, México. Se consideran de los parámetros de la inundación la duración y la profundidad de la inundación. Se proponen las curvas del impacto de daño en cultivos de maíz a partir de datos obtenidos mediante la aplicación de encuestas a personal científico, técnico y agricultores complementadas con información bibliográfica; dichas curvas consideran las distintas etapas del ciclo vegetativo del cultivo, de manera que al relacionarlas con la probabilidad de que una creciente ocurra en cada mes del año es posible calcular el daño anual esperado, para un evento de inundación.

En cuanto al contenido de esta tesis, en el capítulo 2 se presenta el estado del arte, donde se describen los principales modelos de estimación del riesgo por inundación. Por otro lado, se describen los modelos de cálculo y métodos que se consideran para la estimación de cada elemento que se considera en la evaluación del riesgo. En el capítulo 3 se presentan las bases teóricas generales que sustentan la metodología empleada en la zona de estudio, la cual está dividida en dos partes, una relacionada con el cálculo del riesgo en viviendas y contenidos; otra donde se desarrolla la metodología propuesta para el riesgo en zonas agrícolas, las cuales se detallan en el capítulo 4. Los resultados se presentan y discuten en el capítulo 5 y finalmente el capítulo 6 contiene las conclusiones. En los Anexos se encuentran los resultados de los procesos realizados de acuerdo al capítulo y subcapítulo.

2 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, el término riesgo tiene una variedad de significados y múltiples dimensiones relacionados con la seguridad y aspectos económicos, medioambientales y sociales. Los diferentes significados a menudo reflejan las necesidades de los responsables de las decisiones y como consecuencia no existe una definición única de riesgo y un intento por desarrollarla inevitablemente podría satisfacer sólo una parte de los administradores de riesgos. Por otro lado, existe a menudo una confusión en el análisis de riesgos y los términos de la evaluación de riesgos; algunas fuentes definen el análisis de riesgos como una metodología para determinar el riesgo mediante la combinación de probabilidades y consecuencias; mientras que la evaluación del riesgo comprende el entendimiento, la evaluación y la interpretación de las percepciones del riesgo y las tolerancias sociales del mismo para informar las decisiones y acciones en el proceso de gestión de riesgos. El objetivo de las metodologías de evaluación de riesgos es llegar a una estimación del riesgo futuro probable y proporcionar una visión de la distribución del riesgo y sus causas relacionadas, Escudero et al. (2012).

Samuels and Gouldby, 2009, indican que para que un riesgo pueda surgir debe existir un peligro que consiste en una fuente o acontecimiento iniciador (es decir, lluvia alta); un receptor (por ejemplo, asentamientos humanos, infraestructuras, etc.); y una senda entre la fuente y el receptor (es decir, áreas de inundación incluyendo defensas, corrientes o deslizamientos terrestres).

Un peligro no lleva automáticamente a un resultado perjudicial, pero la identificación de un peligro significa que hay una probabilidad de ocurrir un daño, que dependerá de la exposición al peligro y las características del receptor. Para evaluar el riesgo, se debe valorar a una serie de componentes:

- La naturaleza y la probabilidad del peligro (p)
- El grado de exposición de los receptores (número de personas y bienes) al peligro (e)
- La susceptibilidad de los receptores al peligro (s)
- El valor de los receptores (v)

Por lo tanto:

$$\text{Riesgo} = f(p, e, s, v) \quad (2.1)$$

En este contexto, vulnerabilidad es una sub-función de riesgo. El término incluye las características de un sistema que describe su potencial de ser dañado. Este se puede expresar en términos de las relaciones funcionales entre daños esperados y características del sistema, susceptibilidad (s) y el valor de los elementos de riesgo (v), en cuanto a toda la gama de los peligros de inundación. O, en forma funcional:

$$\text{Vulnerabilidad} = f(s, v) \quad (2.2)$$

En la práctica, sin embargo, la exposición y la vulnerabilidad son a menudo capturadas en la evaluación de las consecuencias; por tanto, el riesgo puede ser visto en términos simples (con probabilidad se entiende que probabilidad de exposición) como:

$$\text{Riesgo} = (\text{Probabilidad}) \times (\text{Consecuencia}) \quad (2.3)$$

Por otro lado, Guevara et al., 2006 indica que, en términos cualitativos, se entiende por riesgo la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos.

Esta definición se expresa en la ecuación siguiente y se detallan en los apartados posteriores:

$$\text{Riesgo} = f(\text{peligro, vulnerabilidad, exposición}) \quad (2.4)$$

$$\text{Riesgo} = f(P, V, E) \quad (2.5)$$

2.1 Peligro

2.1.1 Modelos hidráulicos

Para que una metodología proporcione estimaciones realistas de los daños es muy importante la selección adecuada de los parámetros del riesgo por inundación. Los más utilizados y que tienen mayor influencia en el cálculo de los daños directos son aquellos de tipo genérico y que pueden ser obtenidos a partir de modelos hidráulicos (Brémont et al., 2013). Actualmente existen varios modelos numéricos para caracterizar las inundaciones por el desbordamiento de ríos como como son el HECRAS (Posada, G. et al., 2011; Martínez A., 2011), ISIS, Mike 11 y Mike Flood (Patro et al. 2009; Kadam y Sen, 2012) los cuales son modelos unidimensionales (1D). Por otro lado, entre los modelos 2D más comunes se encuentran: Telemac2, Mike 21, RisoSurf (Sommer et al., 2009) o TrimR2D. En todo caso, la selección del modelo numérico a utilizar dependerá de factores como la calidad de información disponible y nivel de escala del estudio.

2.1.2 Modelos hidrológicos

Un aspecto muy importante que se debe considerar en la modelación hidráulica de ríos, para la cuantificación de los niveles de inundación, es la caracterización hidrológica de la cuenca de aportación en la zona de estudio. Las actividades humanas, tales como urbanizaciones, prácticas agrícolas, deforestación, construcción de presas y restauración del río (entre otros), afectan el equilibrio de los sistemas fluviales; por lo tanto, la predicción de estos impactos a escala de toda la cuenca es muy importante. Tradicionalmente, esta predicción se ha dividido en dos partes: la simulación hidrológica de la cuenca y la modelación de los ríos; con la primera se calcula la

relación lluvia-escorrimento y la erosión del suelo en toda la cuenca, y con la segunda, el flujo y transporte de sedimentos en los cauces, respectivamente.

Modelar la relación entre precipitación y escurrimiento es un problema básico de hidrología. Un modelo adecuado permite hacer una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca y puede ser utilizado en el diseño de obras para controlar inundaciones o para pronosticarlas oportunamente. Con base en él se pueden operar, además, obras ya construidas o emitir alarmas para movilizar a la población de una zona en riesgo, cuando sea necesario (Domínguez R., et al., 2008).

Por mucho tiempo, para modelar el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento, se utilizaron modelos de parámetros concentrados, que son alimentados con valores medios y tratan a las características de la cuenca y de la precipitación como si fueran las mismas en toda su área, por lo que no pueden considerar las variaciones espaciales en el interior de la cuenca, de tipo y uso del suelo ni de precipitación (Campos D., 1998). En función de la información disponible y la aplicación del análisis Posada, G. et al., (2011) y Martínez A., (2011) proponen aplicar un modelo lluvia-escorrimento, basado en el método racional, para estimar los gastos de diseño (escenarios de análisis) para la cuenca del río Champotón.

Con el advenimiento de nuevas herramientas tecnológicas que incluyen, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los modelos numéricos del terreno (DEM), las nuevas técnicas de interpolación y tecnologías de radares meteorológicos entre otros, se han fomentado y extendido el uso de los llamados modelos distribuidos, en los que la producción del escurrimiento se estima para cada una de las celdas o pixeles y el escurrimiento generado en cada una de ellas se hace transitar por la cuenca siguiendo trayectorias individualizadas hasta los sitios de interés (Méndez, B. 2005).

Se han desarrollado muchos modelos computacionales de cuencas en las últimas tres décadas. Entre los más utilizados se mencionan: el HEC-HMS del *Hydrological Engineering Center*, el TR-20 del Servicio de Conservación de Suelos USDA y el SWMM (Modelo de Gestión de Agua de Tormenta) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El TOPMODEL (*Topographical Model*), basado en el análisis y procesamiento de la información digital del terreno y SHE que son los modelos estándar para análisis hidrológicos en muchos países de Europa. En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Domínguez R., et al. (2008) propone un modelo que permite obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del número de curva o SCS (*Soil Conservation Service*), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia (permite considerar las pérdidas por evapotranspiración) y la transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado.

Debido a que el cauce y su cuenca están profundamente relacionados entre sí, las cuencas hidrográficas y la simulación hidráulica de los cauces deben ser integradas para el éxito del estudio a nivel de cuenca. Las dos partes en el modelado de sistemas integrados pueden complementarse entre sí para producir una mejor predicción. La simulación de las cuencas hidrográficas proporciona una buena descripción del escurrimiento de la cuenca alta y la erosión del suelo, especialmente para las cuencas hidrográficas no aforadas, mientras que la

simulación del cauce mejora el estudio a nivel de toda la cuenca, proporcionando los hidrogramas de escurrimiento y la evolución morfológica de los cauces (Gupta R., 2008).

2.2 Vulnerabilidad

El monto real de los daños causados por una inundación depende de la vulnerabilidad de los sistemas económicos, sociales y ecológicos afectados, es decir, definido en términos generales, del potencial de ser dañados por un peligro (Messner et al. 2005).

El daño por inundación se refiere a todas las variedades de daños causados por las inundaciones. Abarca una gran variedad de efectos nocivos sobre las personas, en su salud y sus bienes, infraestructura pública, patrimonio cultural, sistemas ecológicos, producción industrial y desarrollo de la economía. Algunos de estos daños pueden evaluarse en términos monetarios y otros, los llamados intangibles, generalmente son registrados en medidas no monetarias como el número de vidas perdidas o en metros cuadrados de ecosistemas afectados por la contaminación.

Por otro lado, los efectos de los daños por inundación pueden clasificarse en directos e indirectos; los daños directos comprenden toda la variedad de daños que se relacionan con el contacto físico inmediato de agua de la inundación con las personas, bienes y medio ambiente. Esto incluye, por ejemplo, daños a edificios y bienes económicos y diques, pérdida de cultivos y ganado en la agricultura, la pérdida de vidas humanas, impactos en la salud y la contaminación de los sistemas ecológicos. Daño indirecto o efectos a consecuencia incluyen daños, que se producen debido a la inundación y la interrupción de las actividades económicas y sociales. Este daño puede afectar áreas más extensas que las que realmente se inundaron. Un ejemplo destacado es la pérdida de la producción económica debido a instalaciones destruidas, la falta de energía y suministros de telecomunicaciones, y a la interrupción del suministro de bienes intermediarios. Otros ejemplos son la pérdida de tiempo y beneficios debido a interrupciones de tráfico, la perturbación de los mercados después de las inundaciones (p. ej., un aumento de los precios de los alimentos o disminución de los precios de los inmuebles cercanos las planicies), disminución de la producción con la consecuencia de descenso de la competitividad de determinados sectores económicos o regiones y los inconvenientes de mercado reducido, y servicios públicos (Smith and Ward, 1998).

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Definición de riesgo

De acuerdo a la literatura especializada, Escudero et al. 2012, una de las definiciones más aceptadas del riesgo, cuando se abordan problemas de inundación, se establece en el denominado triángulo de riesgo (Crichton 1999; Granger 2003; Thywissen 2006; Guevara et al. 2006), Figura 2, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir, el peligro; la vulnerabilidad de los bienes expuestos y la exposición, interpretada como el valor de los bienes expuestos.



Figura 2. Triángulo de riesgo. Fuente: Adaptado de Escudero et al. 2012

De lo anterior podemos expresar el riesgo como:

$$R = f(P, V, E) \quad (3.1)$$

De la expresión anterior, el **peligro** se puede considerar como la probabilidad de ocurrencia de un evento físico, un fenómeno o una actividad humana con el potencial de causar daño con cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado (Samuels y Gouldby, 2009). Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos.

La **vulnerabilidad** se interpreta 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 (Guevara, et al. 2006). Por lo tanto, para evaluar los daños es esencial establecer una categoría de daños que puede contemplar una amplia gama de efectos nocivos sobre los seres humanos, su salud y sus bienes, a la infraestructura pública, el patrimonio cultural y los sistemas ecológicos, la producción industrial y la posición competitiva de la economía, entre otros. Aunque la terminología difiere en ocasiones, una clasificación muy común en primer lugar se deriva en daños directos e indirectos y, en segundo lugar, en daños tangibles e intangibles (Smith & Ward 1998; Parker et al. 1987; Penning-Rowsell et al. 2003; Meyer and Messner, 2005)

La **exposición** se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero (Guevara et al. 2006). En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas. El grado de exposición es un parámetro que varía con el tiempo, el cual está íntimamente ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura.

3.1.1 Clasificación general de daños por inundación

En el análisis del riesgo por inundación se combinan el conocimiento hidrológico sobre la frecuencia de los diferentes tipos de inundación, la información de la modelación hidráulica sobre el comportamiento de la inundación y sus características en las llanuras o zonas de inundación y el conocimiento económico de evaluación de daños por inundación. Los resultados del análisis conjunto de dichos elementos permiten obtener, en función de la aplicación, la construcción de curvas de probabilidad de daños y mapas para una zona o región específica.

Para el análisis de riesgo es esencial establecer una categoría de daños debido a que existe una amplia gama de efectos nocivos para los seres humanos, la infraestructura pública, la producción industrial, los sistemas ecológicos y la competitividad de la economía afectada. Aunque la terminología difiere ocasionalmente, los daños causados por inundaciones se clasifican en primer lugar en daños directos e indirectos y, en segundo lugar, en daños tangibles e intangibles (Penning-Rowse et al. 2003; Messner and Meyer, 2005). En la Figura 3 se muestra una clasificación de daños.

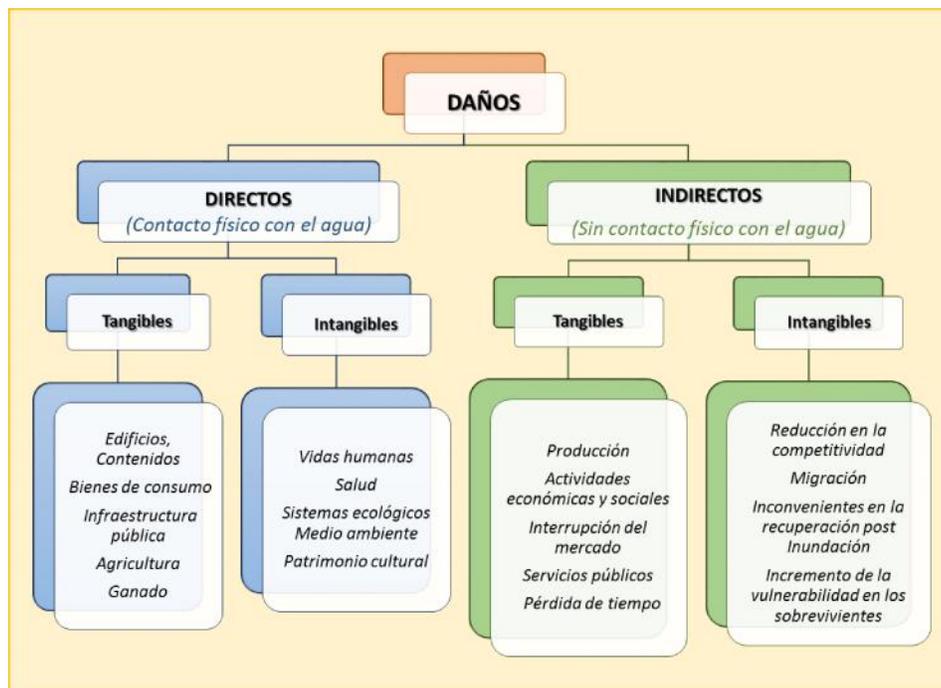


Figura 3. Clasificación de daños por inundación. Fuente: Adaptado de Meyer, 2005

Los daños directos y tangibles pueden distinguirse, además, en diferentes categorías, Figura 3. Aunque es conveniente incluir todas las categorías en la evaluación de daños para estimar los impactos totales de las inundaciones, debe considerarse en cada estudio las categorías más importantes para reducir el esfuerzo. En todo caso, Messner, et al. 2007, recomienda que, para estudios en todos los niveles de escala, al menos se deben incluir daños en edificios residenciales y no residenciales y sus contenidos. Los daños en calles y vías de ferrocarriles pueden resultar insignificantes en zonas de planicie, sin embargo, deben ser considerados en cuencas con inundaciones súbitas por las altas velocidades. La estimación detallada en zonas agrícolas es necesaria cuando se habla de micro escala o cuando es una de las principales actividades económicas de la región. En todo caso, es necesaria la justificación de los elementos en riesgo considerados.

Las categorías más importantes, dentro de los daños directos tangibles, son los edificios y sus contenidos. En general en diversos estudios, se separan en propiedades residenciales y contenidos de viviendas, y propiedades no residenciales, es decir, edificios para la industria, comercio o servicios públicos y sus equipos fijos y móviles, así como inventarios. En el caso de los productos agrícolas, como el ganado y los cultivos, que en general representan una parte baja con respecto al monto total, los daños dependen en gran medida de la época del año y el daño al ganado depende del tiempo de evacuación, por lo que ambos elementos no son sencillos de calcular (Green, 2003). El tipo de elementos a evaluar dependerá al final del tipo de inundación en la zona donde se desarrolla el estudio (Messner, 2007)

De acuerdo con lo anterior, en este estudio se estimará el riesgo por inundación en viviendas y sus contenidos y en la agricultura, ubicados dentro de la categoría de daños directos tangibles.

En lo que se refiere a las viviendas y sus contenidos, el actual estado del arte indica que es la categoría de daños más desarrollada por su importancia, sin embargo, para la zona de estudio no es posible utilizar funciones de daño obtenidas en otras ciudades o países debido a las características locales y regionales. Se utilizan diversas fuentes de información y criterios basados en la bibliografía, que se detalla en los apartados siguientes, para la construcción de las funciones de daño.

Por otro lado, la aportación principal de este trabajo se refiere a un método para estimación del riesgo en zonas agrícolas, siendo una de las actividades económicas importantes de la zona de estudio.

3.2 Riesgo por inundación en viviendas

3.2.1 Peligro por inundación

Existen varios parámetros físicos de la inundación que pueden tener un impacto importante en la cantidad total de los daños. La Tabla 1, propuesta por Meyer, 2005 presenta las características más importantes en una inundación y su relevancia.

Tabla 1. Características de la inundación y efecto en los daños. Adaptado de Meyer, 2005

Parámetro de inundación	Relevancia
Área	Determina qué elementos en riesgo se verán afectados
Profundidad	Tiene quizás la influencia más fuerte en la cantidad de daño.
Duración	Influencia especial en daños en edificios
Velocidad	Altas velocidades conducen a mayores daños. Se considera en inundaciones súbitas.
Variación en el nivel del agua	Influencia en sistemas de protección civil: advertencias y evacuación
Tiempo de ocurrencia	Especialmente importante para áreas agrícolas
Contaminación	Los contaminantes y las cargas pueden aumentar significativamente los daños
Salinidad/Agua Fresca	El agua salada puede aumentar los daños; Pertinentes en las zonas costeras.

La extensión de la inundación, es decir el área, en combinación con los datos de uso de suelo indica en un estudio los elementos en riesgo que se verán afectados ante un evento. En algunos estudios sencillos se considera el área de la inundación y tomando un promedio de datos empíricos sobre la profundidad de inundación, realizan el cálculo de los bienes en riesgo (DEFRA, 2001).

En general el parámetro que se utiliza, en la evaluación del riesgo por inundación, con mayor frecuencia es la profundidad de inundación. Basándose en que el tirante de inundación tiene mayor influencia en sobre la magnitud del daño en los bienes (Merz et al., 2004).

La duración de la inundación es importante en el cálculo de los daños en los sectores productivos, pero también puede afectar en la estructura de algunos tipos de construcción (USASE, 1996, Penning-Rowsell et al. 2003)

La velocidad de inundación tiene una influencia significativa cuando en las zonas de estudio se puede presentar inundaciones súbitas o donde las zonas se encuentran cercanas a diques. Es poco común considerar la velocidad, sin embargo, se utiliza para la estimación de daños en humanos y edificaciones (Kok et al. 2004 y De Luna et al. 2015)

El tiempo de ocurrencia es especialmente importante en la actividad agrícola ya que los daños serían considerables si la inundación se presenta justo antes de la cosecha. Estudios en la República Checa consideran en el cálculo del riesgo el mes de ocurrencia de la inundación (Satrapa et al. 2005).

Por otro lado, el contenido y las cargas del agua de inundación pueden influir en los daños por los contaminantes, sedimentos y el agua salada ya que pueden provocar daños adicionales (Penning-Rowsell et al. 1992)

3.2.1.1 Modelos numéricos

Actualmente para determinar las características físicas de las inundaciones existen diversos modelos numéricos. Es importante conocer de antemano que en función de los recursos y la información disponible es el tipo de modelo de simulación que se puede utilizar.

Existe una gran variedad de modelos unidimensionales (1D) para realizar las modelaciones hidráulicas en los cauces y las inundaciones, según Paperberger (2005) entre los más conocidos están ISIS, Mike 11 o Mike Flood de la familia SHI o HEC-RAS (Posada, G. et al., 2011 y Martínez A., 2011). Algunos de estos modelos están disponibles en internet y tienen extensiones y aplicaciones con sistemas GIS, como ArcView o ArcGIS (Bechteler et al., 1994, Bonner et al., 1999).

Los modelos 1D calculan el flujo en una dimensión entre dos secciones consecutivas resolviendo la ecuación de St. Venant. Los datos de entrada son las secciones transversales a lo largo del cauce, que integren la batimetría con las llanuras de inundación.

Por otro lado, con respecto a los modelos 2D más comunes se encuentran: Telemac2, Mike 21, RisoSurf o TrimR2D, todos resuelven las ecuaciones de St. Venant en 2D incluyendo el proceso de turbulencia (Bates et al. 1994, Feldhaus et al., 2003). Estos modelos se recomiendan para la simulación de flujo en llanuras de inundación (Messner et al., 2007) y sus características generales son las siguientes:

- Permiten una descripción compleja y altamente detallada del proceso de flujo,
- Necesitan un tiempo relativamente largo para la modelación,
- Necesitan un número considerable de parámetros de entrada en relación con el evento, el flujo de agua y la superficie del área donde ocurre la inundación.

Entre más complejo sea el modelo numérico utilizado, aunque se espera que represente mejor la realidad, será necesario contar con datos de mejor calidad y con mayores recursos de cómputo, igualmente los recursos humanos necesarios para ejecutar el modelo deben tener una mayor formación académica. De las características básicas de la inundación que se requieren en el análisis de riesgos son: la profundidad, la velocidad, la extensión y el tiempo de la inundación, por lo que es necesario un modelo en dos dimensiones.

3.2.1.2 Peligro en términos de probabilidad

Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos.

Para cuantificar el peligro se debe, en términos de probabilidades, evaluar la ocurrencia para un lapso de tiempo específico de los fenómenos potencialmente dañinos para los bienes expuestos. Por medio de la intensidad (*i*) se caracteriza el peligro la cual es una cantidad (o un vector de cantidades) que por medio de relaciones físicas asocia los efectos del fenómeno con los bienes expuestos (Eslava et al. 2006).

Por medio del periodo de retorno se mide la excedencia de intensidad de un fenómeno a través del tiempo. El periodo de retorno es definido como el tiempo promedio entre las ocurrencias de un evento que excede cierta intensidad.

El periodo de retorno es la función $Tr_{(i)}$, cuyo dominio son los diferentes niveles de intensidad *i*, y su representación es el lapso promedio de tiempo entre ocurrencias de eventos con intensidad *i* o mayor, generalmente dada en años. La función $Tr_{(i)}$ es proporcional con la intensidad, es decir, a mayor magnitud o grado de un evento, aumenta el tiempo entre excedencias.

Si el evento que excede una intensidad definida ocurre en promedio cada $Tr_{(i)}$ años, entonces la probabilidad de que un evento exceda la intensidad *i* en cualquier año es (3.2):

$$P_e = \frac{1}{Tr_{(i)}} \tag{3.2}$$

La Tabla 2 representa, para diversas intensidades asociadas cada una a un periodo de retorno su probabilidad.

Tabla 2. Probabilidad de excedencia anual

Intensidad	Periodo de Retorno	Probabilidad de que un evento exceda intensidad <i>i</i> en un año
<i>i</i>	$Tr_{(i)}$ (años)	Pe
1	2	0.5000
2	5	0.2000
3	10	0.1000
4	25	0.0400
5	50	0.0200
6	100	0.0100
7	250	0.0040

8	500	0.0020
9	1000	0.0010
10	2000	0.0005

3.2.2 Evaluación de vulnerabilidad

En general, un elemento en riesgo de ser dañado es más vulnerable, entre más expuesto esté al peligro y es más susceptible a sus fuerzas e impactos. Los daños causados por las inundaciones se pueden expresar en una escala entre 0 (donde no hay pérdida) y 1 (pérdida total), con el fin de cuantificar el daño esperado simplificado para varias categorías de elementos en riesgo (Elsner et al. 2003).

Utilizando los mapas de inundación y la información de uso de suelo es posible evaluar los elementos o activos que pueden verse afectados por un cierto escenario de inundación y cuanto se ven afectados en función de las características de inundación. Para estimar el daño es necesario obtener información sobre la susceptibilidad de los elementos en riesgo de inundación. Para lo anterior se utilizan funciones de daño las cuales muestran la parte dañada, denominadas funciones de daño relativo, o la cantidad absoluta de daños, denominadas funciones de daño absoluto, de un cierto conjunto de elementos en riesgo como una función de la magnitud de ciertas características de inundación.

3.2.2.1 Características de la inundación

De acuerdo con la Tabla 1, en donde se muestran las principales características físicas de una inundación, y al actual estado del arte en la evaluación de daños por inundación, el principal parámetro que se incorpora en la construcción de las funciones de daño es la profundidad de la inundación debido a su influencia significativa. Estudios como los de Penning-Roswell et al., 2003 y Kok et al., 2004 han incorporado la velocidad en las funciones de daño para las propiedades residenciales.

3.2.2.2 Clasificación de las funciones de daño

Existen dos tipos diferentes de funciones de daño, las funciones de daño relativas, mostrando la parte dañada del valor total de los elementos en riesgo en función de la profundidad de inundación. Este tipo de funciones, en un primer enfoque, permite calcular el daño real y es utilizado en los Países Bajos (Kok et al., 2004), Hungría y Alemania (Messner et al., 2007).

En otros enfoques, los daños se estiman directamente por medio de funciones de daño absoluto, que muestran la cantidad absoluta de daño en función de la profundidad de

inundación. Tales funciones de daño absoluto son, por ejemplo, proporcionadas por el Manual Multi Color en el Reino Unido (Penning-Rowse et al., 2003) o en Alemania en la base de datos HOWAS (IWK 1999).

3.2.2.3 Construcción de las funciones de daño

Las funciones de daño pueden derivarse ya sea de datos de encuestas o datos sintéticos (Green et al., 1994). Los datos reales de daños causados por inundaciones que se obtienen de encuestas implican recolectar información referente al tipo de propiedades afectadas, la profundidad de inundación y los daños causados, posteriormente se puede construir una base de datos. Con un análisis de regresión, se pueden derivar funciones típicas de daños en función de la profundidad para diferentes tipos de propiedades. Este enfoque requiere de un gran tamaño de muestra ya que tiene que representarse la variedad de los diferentes tipos de construcción y uso. Para este procedimiento se debe garantizar que todos los daños se evalúen con el mismo concepto, determinando los valores depreciados y no los valores de reemplazo completo, como lo hacen a menudo los ajustadores de daños del seguro.

Para el caso de datos sintéticos, los daños no se calculan para las propiedades reales sino para los tipos de propiedades estandarizados (Penning-Rowse et al., 2003, 2005). El procedimiento considera que los tipos de edificios estándar se definen por su tamaño típico, la construcción y sus contenidos. Posteriormente se evalúa su valor y finalmente, la susceptibilidad de cada uno de estos elementos, es decir, el daño proporcional en función de la profundidad de la inundación, se estima mediante evaluadores expertos. Las estimaciones de daños de todos los elementos se pueden derivar en una función de daño para cada tipo de edificio (Green et al., 1994). Un inconveniente en este tipo de enfoque es el asegurar que los tipos de propiedades estándar construidos sintéticamente representen verdaderamente propiedades reales con todos sus componentes.

Otra variante es la estimación de las curvas de daño en función de la profundidad por expertos evaluadores directamente para las propiedades en el área de estudio, un enfoque que se recomienda en particular para micro-estudios en Alemania (Buck, 2004)

Para este enfoque de datos sintéticos se utiliza una síntesis de todas las fuentes de datos disponibles, incluyendo datos reales de daños por inundación. Por otro lado, también las funciones de daño basadas en datos de encuestas a menudo se ajustan mediante estimaciones de expertos (Messner et al., 2007)

3.2.3 Exposición

Posteriormente a la obtención de las características del peligro, es necesario identificar el número, ubicación y tipo de elementos en riesgo, así como su valor. Existen dos formas de obtener la información necesaria sobre el uso de suelo: la primera se refiere a un levantamiento

en campo mediante encuestas y la segunda mediante fuentes de datos preexistentes. En el primer caso, considerados datos primarios, permite clasificar de manera más detallada el uso de suelo, la desventaja es el tiempo y costo que implica, por lo que generalmente se limitan a estudios de pequeña escala. El segundo caso, datos secundarios, también puede ser costoso e implica menos esfuerzo, sin embargo, no necesariamente han sido integradas con la óptica para una evaluación de daños (Messner et al. 2007).

De los datos de uso de suelo es importante determinar la resolución espacial de los datos y su nivel de diferenciación en cada clasificación. En las zonas urbanas la información varía considerablemente, ya que pueden existir detalles de cada una de las edificaciones (datos orientados a objetos) y se podría hacer una evaluación del riesgo denominado “enfoque de propiedad por propiedad” (Penning-Roswell et al., 2003)

En otras fuentes de datos, las propiedades o edificios se agregan a áreas de uso más o menos homogéneo del suelo. A continuación, este tipo de datos se denominarán datos agregados de uso del suelo. Actualmente, la información espacial se almacena y presenta principalmente en mapas digitales, ya sea en forma de puntos, áreas o líneas discretas (datos vectoriales) o en formato de cuadrícula. Otro criterio, el nivel de diferenciación de los tipos de uso de la tierra se correlaciona más o menos con la resolución espacial: los datos con una resolución espacial alta a menudo también tienen una alta diferenciación de las categorías de uso de la tierra (Messner et al. 2007).

Finalmente, las fuentes de información deben coincidir con las categorizaciones del peligro y las funciones de daño.

3.2.3.1 Valor de los bienes expuestos

Es necesario determinar el valor de los bienes expuestos, de existir información, es la relacionada con el costo del inmueble, sin embargo, el costo relacionado con los contenidos de viviendas, inventarios comerciales e industriales o el valor de automóviles de uso privado, se podrá determinar mediante estadísticas o bases de datos de compañías de seguros. Cuando no está disponible dicha información un método adecuado es la recopilación de información mediante encuestas (Satrapa et al., 2005, Penning-Roswell et al., 2003).

3.2.4 Modelo de riesgo

Considerando la Figura 2 podemos expresar al riesgo como la combinación del peligro, vulnerabilidad y costo de los bienes expuestos, de acuerdo con lo indicado en la ecuación (3.1).

Así el riesgo, en general, está dado por la expresión:

$$R = C P V$$

Donde:

C: es el valor de los bienes expuestos

P: es peligro o probabilidad de que ocurra un determinado evento

V: es la vulnerabilidad o porcentaje de daños en una vivienda, debidos a una inundación

Dado que la vulnerabilidad así como el peligro 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.

El análisis del riesgo R, o la presentación de los resultados, puede realizarse como se mostrará a continuación.

3.2.4.1 Riesgo para un escenario o evento específico

En un escenario en particular o un evento asociado a un periodo de retorno T_r , el riesgo está dado por la expresión:

$$R_j = C_j \cdot P_{T_r} \cdot V_{T_r} \quad (3.3)$$

Donde:

P_{T_r} : es la probabilidad de que se alcance un tirante o profundidad de inundación asociado a un cierto periodo de retorno

V_{T_r} : es la vulnerabilidad asociada con un tirante o profundidad de inundación con un cierto periodo de retorno

3.2.4.2 Riesgo como valor esperado de los daños anuales

En este caso se estima un valor esperado, de los daños de los bienes expuestos, que se tiene año con año, mediante la sumatoria del producto de las funciones de vulnerabilidad, peligro y el valor de los bienes expuestos, de tal forma que el riesgo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R_j = \sum_{i=1}^m C_j \cdot P(i) \cdot V_i(Y_i) \quad (3.4)$$

Donde:

i : es el periodo de retorno por analizar

j : bien en la que se realiza el análisis

$Y(i)$: tirante asociado a diferentes periodos de retorno

$P(i)$: función de peligro

$V_i(Y_i)$: función de vulnerabilidad

3.3 Riesgo en zonas agrícolas

En el caso del sector agrícola los efectos de una inundación, tanto en la superficie como en el perfil del suelo, frecuentemente influyen de manera negativa en los resultados esperados ya que pueden disminuir la producción proyectada de forma significativa, limitando la oferta disponible para abastecer el mercado y generando pérdidas económicas en toda la cadena de producción.

3.3.1 Clasificación de daños en la agricultura

La actividad agrícola es un sistema que se encuentra integrado por una gran cantidad de componentes que se relacionan y dependen entre sí, que funcionando en conjunto permiten que se desarrolle de manera adecuada. En los sistemas agrícolas, en función de la recomendación propuesta por Merz et al., (2010), se distinguen diferentes categorías de daños tangibles, dependiendo de la escala espacial y temporal:

- Daño instantáneo, que se produce durante o inmediatamente después de la inundación
- Daño inducido, que se produce más adelante en el tiempo

En la práctica, esta distinción no es muy clara y depende de la escala de tiempo elegido para analizar el sistema. En el caso de la agricultura, Brémond et al., (2013) considera que el daño instantáneo es el que se puede observar justo después de una inundación y el daño inducido se produce al final, es decir, hasta el final de la temporada de cultivo y en los años siguientes. En cuanto a la escala espacial, las categorías propuestas son:

- Daño directo, la cual está relacionada con la exposición a las inundaciones
- Daños indirectos, que se producen en un área que no ha sido expuesta a inundaciones

Esta distinción depende en gran medida de los límites del sistema bajo estudio. En el caso de la agricultura, los diferentes límites que se pueden seleccionar son la parcela, granja o sector agrícola y tendrá influencia en la cuantificación del daño directo e indirecto.

3.3.1.1 Categorías de los daños por inundación en la agricultura

Para mostrar cada categoría de los daños por inundación en la agricultura Brémond et al., (2013) propone, para abarcar diferentes instancias como sea posible, el sistema agrícola a una escala de granja, Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del daño por inundación en la agricultura, Adaptada por Brémond et al., (2013)

Daños Espacial\Temporal	Instantáneos (Justo durante o inmediatamente después de la inundación)	Inducidas (Más tarde después de la inundación)
----------------------------	--	---

<p>Directos (Debido a la exposición directa con la inundación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdida de las cosechas y reducción del rendimiento ▪ Ganado muertos ▪ Pérdida de los productos de origen animal (por ejemplo, la leche) ▪ Daños en plantas perennes ▪ Daños materiales en el suelo ▪ Daños en los edificios ▪ Daños a la maquinaria ▪ Daños a insumos almacenados ▪ Daños a la infraestructura (por ejemplo, carreteras) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdida de valor agregado debido a la pérdida de rendimiento en los primeros años de plantación planta perenne material (huerta, viñedo) o la resiembra césped ▪ Pérdida de valor agregado debido a la falta de disponibilidad de factores de producción (maquinaria, insumos, etc.) ▪ Costo de traslado o las ventas prematuras de ganado, ▪ Costo adicional de alimentos para el ganado, ▪ Reducción del tamaño del rebaño
<p>Indirectos (No directamente expuestos a la inundación, en un área no expuesta)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento del tiempo de viaje debido a los daños a la infraestructura ▪ Retraso o cancelación de la oferta de la zona inundada (insumos, maquinaria, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pérdida de valor agregado fuera de la zona inundada debido a interrupción de la actividad empresarial de los bienes en el área inundada ▪ Pérdida de valor agregado fuera de la zona inundada debido a daños en la infraestructura

3.3.1.2 Daños directos instantáneos

Diferentes componentes del sistema agrícola pueden verse afectados por una inundación; algunos elementos corresponden a las cosechas y otros a plantas perenes, edificios y maquinaria. Algunos estudios cualitativos sobre impactos de las inundaciones en la agricultura (Pivot et al., 2002; Bauduceau, 2001; Chatterton et al., 2010; Twining et al., 2007; Posthumus et al., 2009; Morris and Brewin, 2013) indican las siguientes subcategorías de daños directos instantáneos:

- Pérdidas de las cosechas y reducción del rendimiento;
- Daño o destrucción de las plantas perenes (viñedos, huertos);
- Muertes y heridas en el ganado;
- Pérdida en los productos de origen animal (leche, huevos);
- Daños al suelo (erosión, depósito de residuos y basura, contaminación);
- Daño en edificios;

- Daños en la maquinaria y equipo;
- Deterioro de los materiales almacenados (insumos, alimentación, forraje).

Los daños a la infraestructura, como carreteras y caminos, en relación con las zonas agrícolas rara vez son mencionados, pero se indican por Chatterton et al. (2010), Morris y Brewin (2013).

Algunos de los estudios posteriores a las inundaciones (Posthumus et al., 2009; Morris y Brewin, 2013) mencionan que la reducción en el rendimiento puede causar algunas variaciones en los costos de producción: ahorro debido a un descenso en el rendimiento (por ejemplo, la reducción en el tiempo dedicado a algunas de las tareas). Sin embargo, a medida que se puede prever en función de la pérdida de rendimiento, por lo general se toman en consideración para calcular daños directos a los cultivos (Brémond et al., 2013).

3.3.1.3 Daños directos inducidos

Los daños directos inducidos en la agricultura que pueden ser considerados dependen de la escala en la que se estudian las actividades agrícolas. Cuando la agricultura se estudia sólo mediante el uso de la tierra (es decir las parcelas y edificios de la granja por separado), el daño directo inducido implica un pequeño monto. Brémond et al., 2013 apunta a futuras pérdidas de rendimiento que podrían continuar por un número de años después de la inundación cuando se trata de cultivos perenes destruidos.

Específicamente con respecto a la ganadería, Posthumus et al., (2009) menciona daños directos inducidos por una reducción en la producción de leche, debido a la pérdida de producción de pastizal y el valor del alimento, o un aumento de los costos por tratamientos veterinarios a consecuencia del estrés de los animales. También menciona un incremento en los costos de producción (insumos adicionales para limitar las pérdidas). Cuando algunos daños directos no son reparados completamente (erosión del suelo, la contaminación de los suelos), también puede dar lugar a restricciones en el uso de la tierra, por ejemplo, en rechazar ciertos cultivos.

3.3.2 Parámetros del peligro por inundación en la evaluación de daños en los cultivos

De acuerdo con la revisión exhaustiva hecha por Brémond et al., 2013, de los estudios que se concentran en el cálculo de los daños directos en la agricultura, los parámetros del peligro que son más utilizados y tienen mayor influencia en el cálculo de los daños directos son aquellos de tipo genérico y que pueden ser obtenidos a partir de modelos hidráulicos.

Los principales parámetros que se pueden considerar para la construcción de las funciones de daño directo en la agricultura son la estacionalidad de las inundaciones, profundidad del agua, duración, velocidad de la corriente, depósitos, contaminación ambiental y salinidad del agua.

3.3.2.1 Estacionalidad

La estacionalidad de las inundaciones, es un parámetro que se justifica en la mayoría de los estudios, Brémond et al., 2013, porque vincula diferentes coeficientes de daño con la estación

del año. La mayoría de los estudios revisados utilizan el año como la escala de tiempo y los intervalos pueden ser mensuales o la etapa vegetativa de crecimiento para un cultivo en específico. Este parámetro es utilizado para evaluar el daño en el material vegetal y en la disponibilidad (Brémond, 2012).

Debido a que la producción en el área agrícola es variable durante el año, diversos expertos en el tema coinciden en que la estacionalidad es un parámetro esencial y que debe considerarse para definir el daño en cultivos y plantas de material vegetal perenne. La complejidad radica en que la mayoría de las funciones consultadas consideran una referencia de tiempo anual y su transferencia a otras ubicaciones geográfica no es tan sencilla, pues la variación del ciclo vegetativo de los cultivos depende de las condiciones climáticas de la región, las épocas de humedad y secas pueden diferir de un estado a otro en un mismo país. Por lo anterior, Brémond, 2013, sugiere que el desarrollo de las metodologías para el diseño de las funciones de daño en los cultivos se ha basadas en sus ciclos vegetativos. De esta manera, las funciones que se generen tendrán el mismo paso de tiempo, la etapa de desarrollo vegetal, y permitirán su transferencia o aplicación entre diferentes regiones o países compartiendo los esfuerzos de investigación.

3.3.2.2 Profundidad del agua

La profundidad de inundación es el parámetro más utilizado en la construcción de funciones de daño directo. En el caso de la infraestructura de vivienda, servicios y menaje, el porcentaje de daño está asociado a la altura que el agua alcanza en estas edificaciones; por otro lado, en la agricultura también se considera para evaluar los daños en el material vegetal y en algunos casos del suelo (Brémond, 2013).

3.3.2.3 Duración

Algunos trabajos consideran los días que permanece la inundación para evaluar el daño en los cultivos y material vegetal. En la mayoría de los casos no es claro el concepto de duración utilizado, es decir, si se refiere a los días que el cultivo duró sumergido o los días que el suelo de la parcela agrícola tardó en secarse, lo cual depende del tipo de suelo. Brémond et al., (2013) recomienda que lo ideal sería considerar como medida estándar el número de días que dura la sumersión del cultivo para generar funciones estándar y posteriormente si es necesario adaptarlas, considerando la textura del suelo, para agregar el tiempo de secado del suelo. En estudios muy específicos, el tiempo que el suelo tarda en secarse es un parámetro fundamental para evaluar los efectos de la salinidad en suelos agrícolas. Por otro lado, no todos los modelos hidráulicos simulan la duración o permanencia de la inundación y este aspecto es importante considerarlo en el momento de realizar una evaluación de daños en la agricultura pues la duración es parámetro es necesario.

3.3.2.4 Velocidad

La velocidad es un parámetro que no es común utilizar en las funciones de daño en la agricultura, ya sea para edificaciones (bodegas, silos, etc.) y sus contenidos, como si lo es en la evaluación de edificaciones domésticas (De luna, 2015). En casos específicos se establecen

intervalos como velocidad media, baja y alta para determinar el daño potencial de la planta por extracción (Brémond, 2012). Como se ha comentado inicialmente, los daños y efectos de una inundación están estrechamente relacionados con sus características locales y para fines prácticos en los estudios que impliquen inundaciones súbitas es necesario considerar la velocidad y utilizar los modelos hidráulicos que la puedan obtener.

3.3.2.5 Depósito, contaminación y salinidad

El sedimento transportado por el agua puede depositarse en los cultivos y afectar posteriormente la producción. En el caso de las praderas afectadas por este fenómeno tiene repercusiones en la alimentación del ganado, por lo tanto, el potencial depósito es un elemento a considerar en la evaluación de daños en cultivos (USACE, 1985).

Por otro lado, la sal puede generar impactos específicos en los cultivos y el suelo (Roca et al., 2011) y en el caso de la sumersión marina el efecto provoca una alta reducción en la producción inducida por la toxicidad de la sal en el suelo.

Hasta ahora, ningún método ha incluido todos los parámetros mencionados en un único modelo de estimación de daños (Vozinaky et al., 2015), sin embargo, se han realizado combinaciones de los parámetros más influyentes; Forster et al., 2008 y Pistrika (2010) consideraron la estacionalidad y la duración; Citeau (2003) utilizó el tiempo de inmersión, la velocidad y la profundidad. Otras combinaciones más complejas han sido presentadas por la USACE (1985) considerando la estacionalidad, profundidad del agua, duración, velocidad y depósito de sedimentos. Brémond et al., (2012) combinan cuatro parámetros de la inundación para construir sus funciones de daño en cultivos: estacionalidad, profundidad del agua, duración y velocidad.

3.3.3 Funciones de daño

En general, en la construcción de funciones de daño se combinan varios parámetros de la inundación, principalmente en los cultivos, lo que las vuelve muy complejas. La combinación va desde considerar dos o tres parámetros hasta 5 de ellos, como el caso de USACE, 1985 que considera, la estacionalidad, profundidad del agua, duración, velocidad y depósito de sedimentos. Brémond et al. 2011 combinan cuatro parámetros de la inundación para construir sus funciones de daño en cultivos: estacionalidad, profundidad del agua, duración y velocidad.

El desarrollo de las funciones de daño o curvas de daño es esencial e implica un proceso complejo (Smith 1994; Vosinaky et al., 2015). Existen dos tipos de curvas de daños, las históricas que han sido obtenidas de bases de datos de daños de inundaciones pasadas como HOWAS 21 desarrollada en Alemania y, por otro lado, las curvas de daño sintéticas, las cuales se basan en análisis hipotéticos de daños esperados bajo ciertas condiciones de inundaciones (Vosinaky et al., 2015). Diversas funciones de daño se han utilizado en el pasado en el sector agrícola, funciones que han combinado datos históricos con datos sintéticos (Merz et al. 2010); curvas derivadas de datos históricos promediados y normalizados de las publicaciones del Ministerio Japonés de la Construcción considerando la profundidad y la duración de las inundaciones (Dutta et al., 2003). Funciones empíricas basadas en datos de daños agrícolas registrados por el

Ministerio griego de Desarrollo Rural han sido utilizadas en Pistrika (2010). Brémond y Grelot (2012), construyeron funciones de daños a partir de datos obtenidos de la literatura y entrevistas. Thiecken et al., 2008 han realizado encuestas en línea para obtener una base de datos de daños en el sector rural. Basados en datos empíricos, obtenidos en entrevistas a expertos, se han generado factores de impacto para diferentes tipos de cultivos (Förster et al., 2008).

3.3.4 Valor de los elementos expuestos

La mayoría de los métodos para evaluación de daños por inundación dependen de dos etapas principales: la cuantificación de los impactos por inundación y expresar estos impactos en valores monetarios (Penning-Rowsell et al., 2005); dependiendo del nivel de detalle en los estudios.

El indicador correcto para la evaluación económica de daños es la pérdida del valor agregado o el costo de la reparación del material dañado. Brémond et al., 2013 identificaron los indicadores económicos utilizados en 26 estudios de evaluación de daños directos en la agricultura, a saber, cultivos y otros componentes de una granja.

3.3.4.1 Cultivos

En el caso del daño en cultivos, la pérdida del valor agregado corresponde a la disminución en producto menos la variación de los costos de producción debido a la inundación. Debido a la pérdida de rendimiento, algunos procesos de producción pueden salvarse y mantener o disminuir su costo, mientras que otros, se verán incrementados.

Usualmente, la variación en el producto es directamente monetizado aplicando los precios de venta a la variación en el rendimiento. Por lo tanto, algunos autores utilizan directamente la variación del producto bruto como un aproximado de los daños en el cultivo. Esta aproximación significa que la variación de los costos de producción debido a la inundación está considerada (Blanc et al., 2010).

De hecho, la variación de los costos de producción depende de la estacionalidad de la inundación. USACE (1985) recomienda que la variación de los costos de producción sea función de la estacionalidad. Para llevarlo a cabo, es necesario contar con información detallada sobre la distribución de los costos de producción a lo largo de un año. Brémond (2012) desarrolló un modelo que considera la secuencia del manejo de cultivos y puede determinar la variación de costos como una función de la estacionalidad. Este método requiere información específica de las tareas de producción requeridas para cada cultivo. Una estimación precisa en la variación de los costos requiere conocimiento de la distribución de los costos a lo largo de un año; este proceso se deberá automatizar si existen numerosos eventos de inundación para varias temporadas.

3.3.4.2 Otros componentes

Además de los cultivos, existen otros elementos en la agricultura o una granja que se pueden dañar, es decir, el daño en el suelo, edificios, maquinaria, almacenes, etc. El indicador económico utilizado para evaluar estos daños es el costo de reparación, esto es, el costo que implican todas las acciones necesarias para recuperar el estado equivalente al que se tenía antes de la inundación o los costos de recompra de lo que se perdió.

El daño en el suelo se evalúa por los costos de limpieza, labranza adicional y nivelación del terreno dependiendo de la intensidad de las inundaciones y Brémond (2012) detalla estas tareas para adaptarlas a su metodología para estudios locales.

Daño en edificios se consideran los costos de reparación y limpieza; con respecto a la maquinaria es necesario considerar el costo de reparación o reposición del equipo. Desde el punto de vista económico se debe considerar la depreciación del valor, en función de la edad de la maquinaria.

Con respecto al material vegetal, se consideran los costos de replantación y pérdida del valor agregado antes de que el cultivo alcance su potencial de producción anterior.

3.3.5 Modelos de estimación de daños en zonas agrícolas

Para la evaluación de los daños por inundación en el sector agrícola se han propuesto varios métodos de complejidad variable desarrollados principalmente en países europeos. Las diferencias entre las metodologías son función de la escala de análisis, tamaño del área de estudio, exactitud de análisis, cantidad de recursos requeridos, cantidad de datos necesarios para aplicar los modelos numéricos disponibles y de los componentes del sistema agrícola considerados (Meyer and Messner, 2005; Merz et al., 2010).

Por otro lado, no existe un modelo estándar para la estimación de los daños causados por inundaciones en zonas agrícolas ya que el daño en los cultivos puede diferir mucho de una situación a otra, en el tiempo y en el espacio, incluso para dos campos contiguos y situados en la misma ribera del río (Pivot, et al., 2002; Förster et al., 2008). Algunos modelos utilizan curvas de daño empíricas, como el modelo desarrollado en el marco del proyecto MEDIS (Forster et al., 2008) y el desarrollado por Dutta et al. (2003). La información se basa en datos empíricos de encuestas en Francia y Alemania y el conocimiento experto. Otros, como el modelo EVA (Blanc et al., 2010) utilizan curvas de daño sintéticas. El modelo FEIAS (Kourgialas y Karatzas, 2013) se basa en el modelo de daño empírico de Dutta et al., 2003. En Pantaleoni et al (2007) se presenta una metodología diferente utilizando la teledetección para la estimación de daños en parcelas agrícolas temporalmente inaccesibles. Vozinaky et al., (2015) presenta una metodología tecnológica para la estimación de pérdidas por inundaciones súbitas en zonas agrícolas de diversos cultivos que se basa en curvas de daño logístico sintético

Sin embargo, los modelos de evaluación de daños se transfieren en el tiempo y el espacio sin justificación suficiente (Merz et al., 2011), introduciendo imprecisiones.

3.4 Mapas de riesgo

Los resultados que se obtienen de un análisis de riesgo conducen a valores únicos asociados a los escenarios de inundación considerados, sin embargo, es importante identificar en donde ocurren los daños. La distribución espacial de los daños esperados es de gran interés, en el caso de las zonas urbanas para las entidades de protección civil y para la población es importante saber si se encuentran ubicados en zonas de alto riesgo por inundación.

La cartografía de daños y riesgos puede llevarse a cabo con relativa facilidad por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG con su capacidad para manejar la información espacial (en comparación con las bases de datos tradicionales) es una herramienta apropiada para la evaluación de daños (Messner et al., 2007).

4 METODOLOGÍA: RIESGO POR INUNDACIONES EN CAMPECHE

4.1 Zona de estudio

La metodología propuesta se aplicó en la cuenca del río Champotón, ubicada en la parte central del estado de Campeche, Figura 4. Pertenece a la Región Hidrológica (RH) número 31 Yucatán Oeste, cuya superficie total es de 649 km², con una elevación máxima de 120 msnm. Limita al norte con la RH número 32 Yucatán Norte, al sur con la RH número 30 Grijalva-Usumacinta.

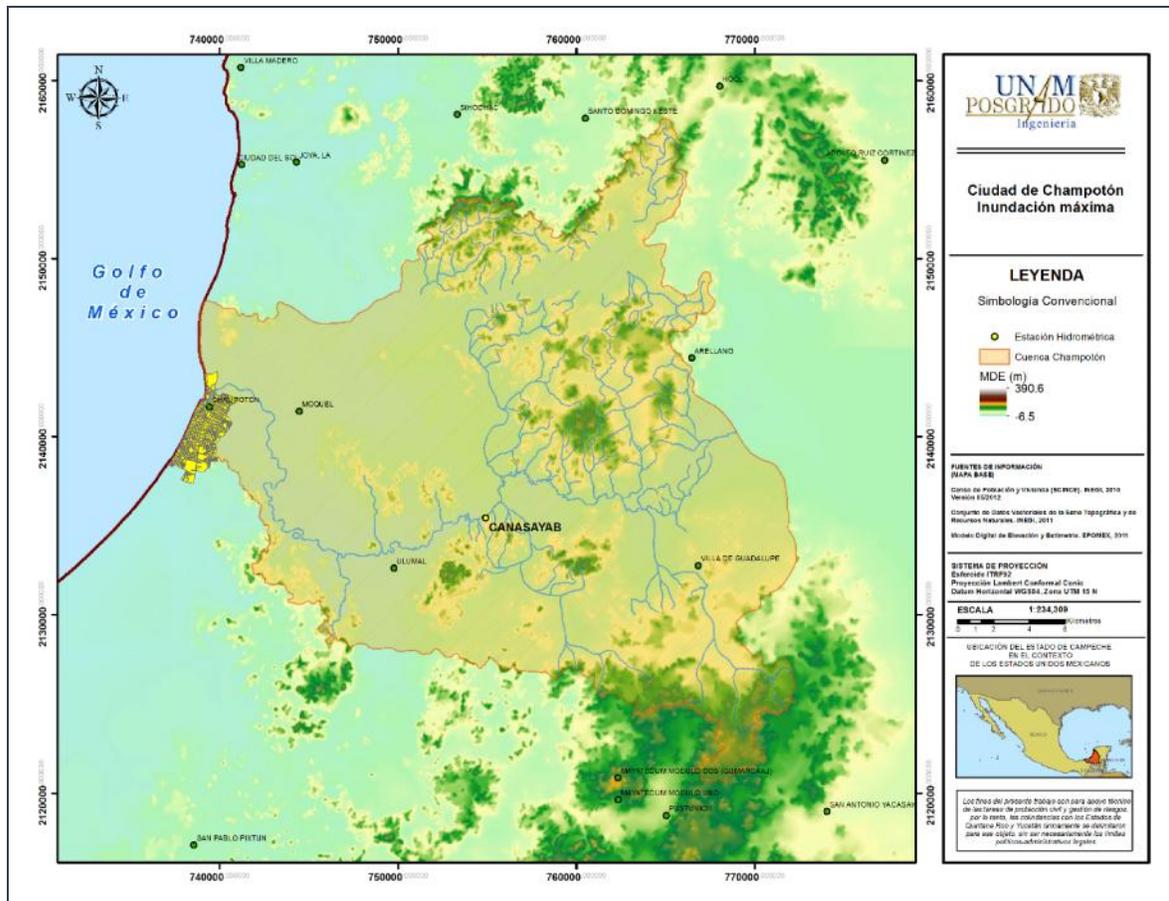


Figura 4. Cuenca del río Champotón, Estado de Campeche, México

La longitud del río es de 48 km aproximadamente, con origen cerca del poblado de San Juan Carpizo hasta su desembocadura al Golfo de México (Posada et al., 2013). El desarrollo principal del río es sobre una planicie de pendiente suave, con un ancho promedio de 50 m y en la desembocadura un ancho máximo de 80 m, su profundidad media es de 4 m. A lo largo del río se encuentran diversos ojos de agua, corrientes intermitentes, las lagunas de Nayarit de Castellot, conocida localmente como laguna de Nilúm, y la laguna de Noch, así como las aguadas de Xbacab, Chuina y Hool (Ramírez V., 2015). Su trayectoria general es Este-Oeste y es alimentado en forma subterránea por los ríos Desempeño y Las Pozas, los cuales nacen en la región hidrológica número 31 Yucatán Oeste, y se infiltran en dirección al río Champotón.

Predominan los suelos de tipo Gleysoles, con alto contenido de arcilla, baja capacidad de drenaje lo que origina la rápida saturación e impermeabilización; hacia la costa se encuentran Rendzina líticas que tienen una capa delgada de caliza poco profundas (SAGARPA, 2009).

4.2 Descripción general

En la evaluación del riesgo por inundación que se realiza en este trabajo se incluyen, de acuerdo con la clasificación de la Figura 3, los daños directos tangibles en las viviendas y en sus contenidos, bienes a considerar en todos los análisis de riesgo independientemente de la escala de estudio (Meyer et al. 2009) y la principal aportación es la estimación de daños por inundación en las zonas agrícolas, pues se ha propuesto una metodología para construir las funciones de daño y un modelo para la evaluación del riesgo.

La metodología propuesta para la estimación del riesgo, como el daño esperado, se divide en cuatro secciones: la primera parte evalúa el peligro por inundación mediante la aplicación de un modelo numérico bidimensional que requiere condiciones de frontera compuestas por hidrogramas de diseño y marea de tormenta para diversos periodos de retorno, un modelo digital de elevaciones integrado por la topografía de la cuenca de análisis, la batimetría del río Champotón y la zona costera cercana a la desembocadura del río en el Golfo de México.

La segunda parte del método consiste en la elaboración de las funciones de daño por inundación para viviendas y zonas agrícolas en la cuenca del río Champotón. En esta etapa, la construcción de funciones de daño en viviendas se basa en trabajo de campo: inspección de las zonas susceptibles a inundarse y la aplicación de encuestas, con una herramienta electrónica para la recolección de información llamada *HarvestYourData*. Para las funciones de daño en zonas agrícolas se hace un análisis de la producción histórica de todos los cultivos que se llevan a cabo en la zona de estudio, una investigación bibliográfica de los diferentes métodos para evaluar daños en la agricultura y de las variables más importantes que consideran; adicionalmente se complementa con información obtenida de visitas a campo y la aplicación de entrevistas a actores del medio (agricultores, investigadores y funcionarios estatales y federales cuyo trabajo se asocia a la agricultura) y finalmente, tomando en cuenta dichos elementos y la información disponible, se adaptaron criterios para la construcción de las curvas de daño en cultivos; en particular, se consideró la relación entre la etapa de desarrollo del cultivo y la probabilidad de que se presenten crecientes importantes asociada a cada etapa.

La tercera etapa consiste en cuantificar la cantidad de viviendas y áreas agrícolas mediante el levantamiento en campo, cartografía urbana y uso de suelo y vegetación del INEGI e imágenes de satélite; con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se generan mallas con dicha información. Los costos se determinan, para el caso de la vivienda con un análisis de precios en el mercado y para las zonas agrícolas con información del INIFAP.

En la cuarta etapa se aplica el modelo de riesgo para viviendas y para agricultura y se construyen los mapas para presentar la información.

A continuación, se desarrollan los principales pasos de la metodología propuesta para evaluar el riesgo como el daño esperado, Figura 5.

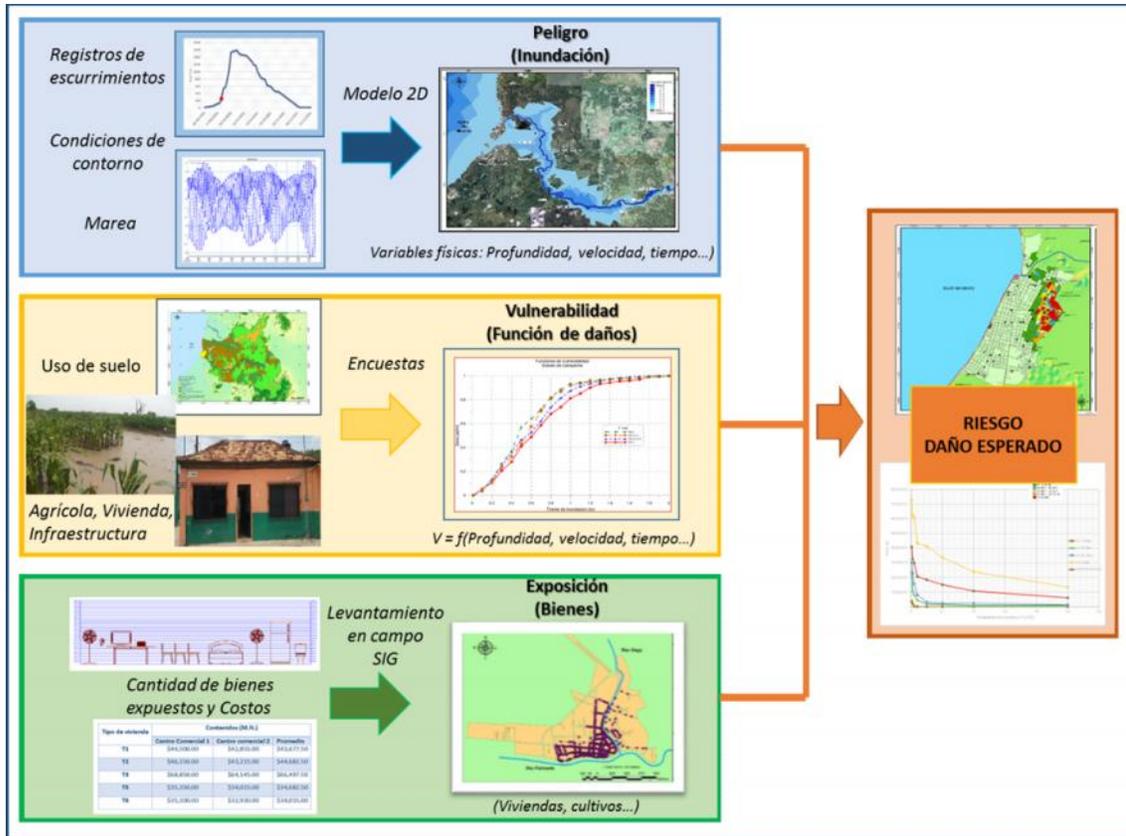


Figura 5. Diagrama de flujo general para evaluar el riesgo por inundación

4.3 Evaluación del riesgo por inundación en viviendas

4.3.1 Peligro por inundación

Para caracterizar el peligro por inundación, en este trabajo se utilizó el modelo Mike 21 Flow Model FM (DHI, 2014), el cual contiene un sistema de modelado completo para los flujos a superficie libre en 2D aplicable a la simulación de fenómenos hidráulicos y afines en lagos, estuarios, bahías, zonas costeras y mares (DHI, 2014). El módulo utilizado fue el hidrodinámico (HD) para simular la variación de los niveles de agua y flujos sujetos a una variedad de condiciones de frontera en el área costera y en el río.

Para realizar las modelaciones numéricas en una primera etapa se integran el modelo digital de elevaciones y las batimetrías del río y la zona de costa donde desemboca el río Champotón, con el módulo generador de mallas flexible se interpolaron varias configuraciones, dando más detalle en las zonas de interés, es decir, con el tamaño de las celdas más pequeño. Establecida la malla final se indicaron las condiciones de frontera, aguas arriba de la zona de análisis es la estación hidrométrica Canasayab y aguas abajo es la desembocadura del río al Golfo de México y el coeficiente de rugosidad (n , Manning). Posteriormente se hizo el análisis hidrológico utilizando los registros históricos de los escurrimientos para generar los hidrogramas de diseño,

así como también, la identificación de los hidrogramas asociados a los eventos extraordinarios. Para la condición en la desembocadura se obtuvieron las condiciones de marea astronómica y de tormenta. En la Figura 6 se indica el diagrama de flujo del procedimiento desarrollado.

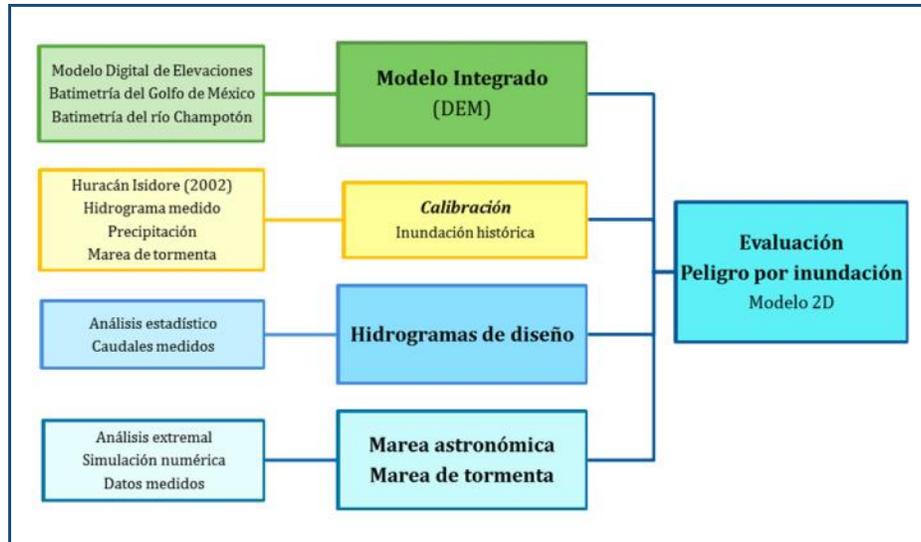


Figura 6. Diagrama de flujo para simulación numérica del peligro por inundación

4.3.1.1 Integración del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El proceso inicial consistió en el procesamiento de la batimetría del río Champotón, la cual se generó mediante un levantamiento en campo desde la desembocadura del río al Golfo de México hasta la estación hidrométrica Cansayab (Posada et al., 2013). A partir de transectos tomados a cada 200 m en una longitud total de 39 km se interpolaron los puntos para definir el cauce. Para complementar la batimetría en la desembocadura del río ya el Golfo de México, se utilizó la Carta Náutica 28260 correspondiente al Golfo de México-Barra Tupilco a Isla Piedra, año 1981 de la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR). Posteriormente se agregó un modelo digital del terreno (MDE, pixel de 20 x 20m) de la cuenca del río Champotón, Figura 7 y Figura 8

El área de estudio está discretizada mediante una malla de celdas triangulares de dimensiones variables, lo que permite un mayor detalle en las zonas de interés, el río, la ciudad de Champotón, la desembocadura y la línea de costa, Figura 9 y Figura 11

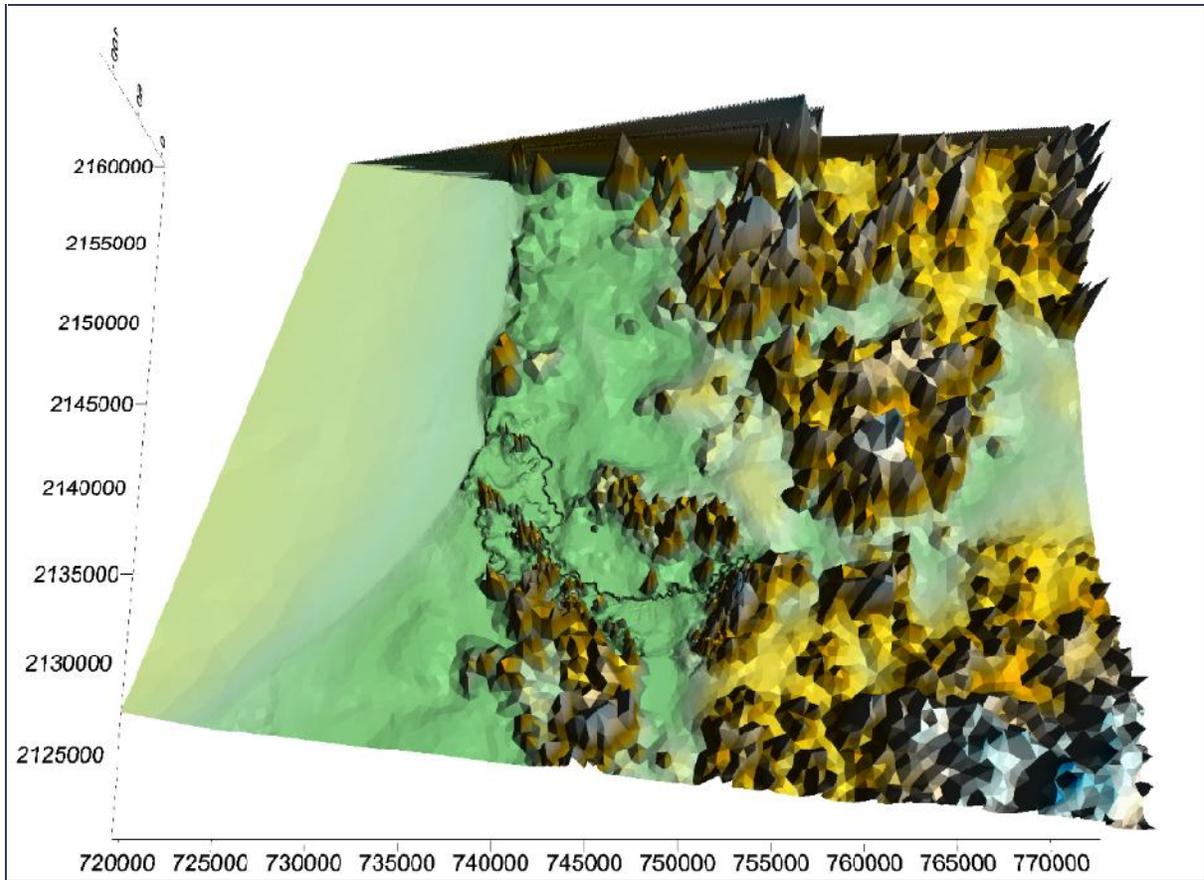


Figura 7. Modelo topobatimétrico general de la zona de estudio

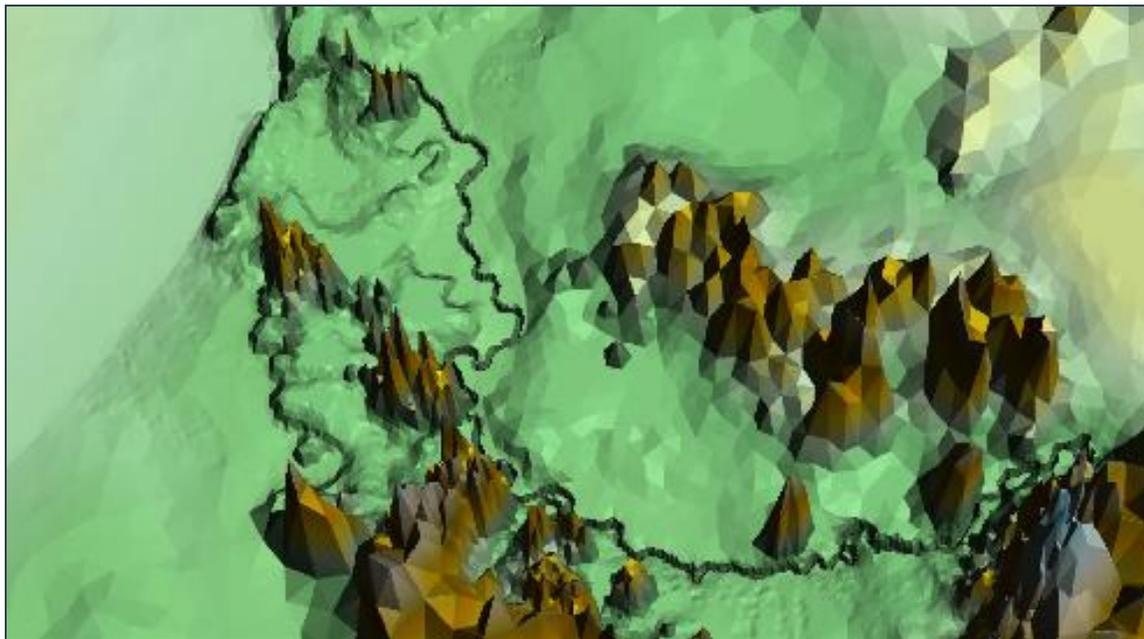


Figura 8. Modelo topobatimétrico zona de estudio, detalle

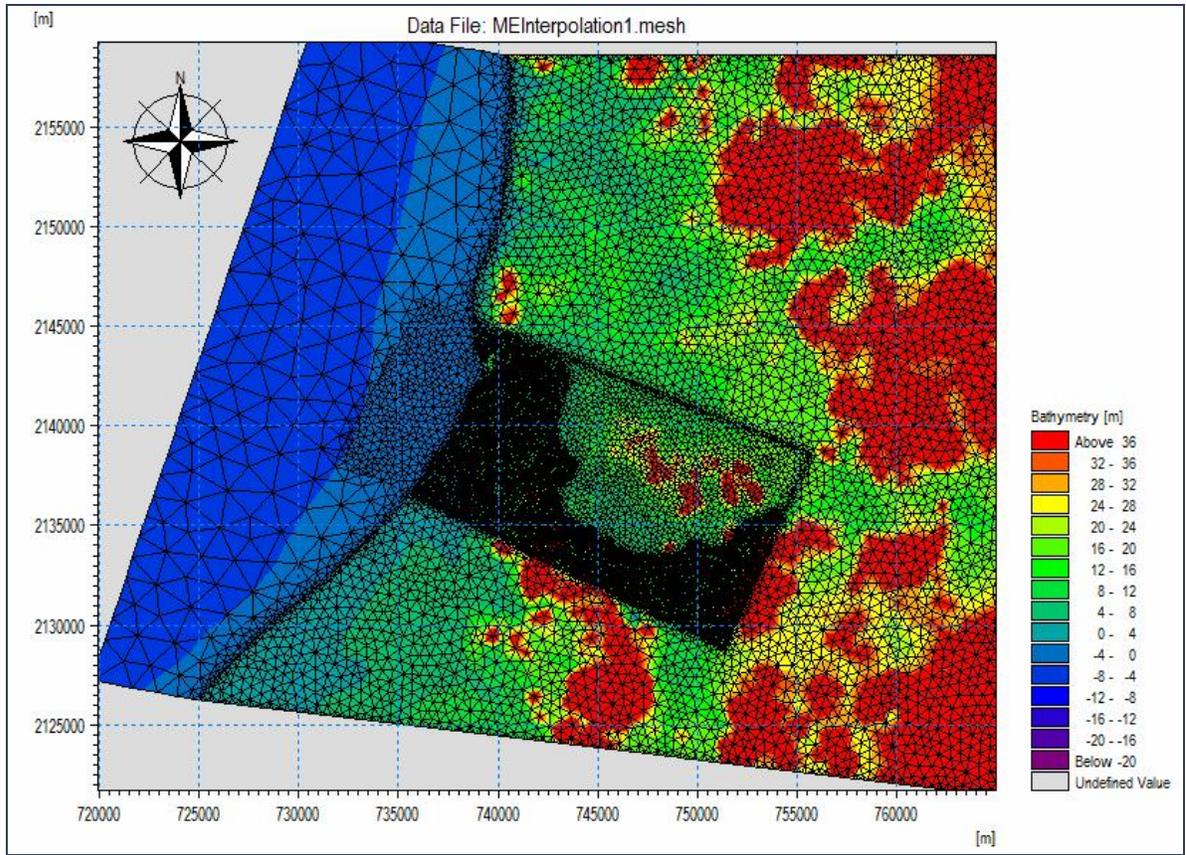


Figura 9. Malla flexible cuenca río Champutón, general

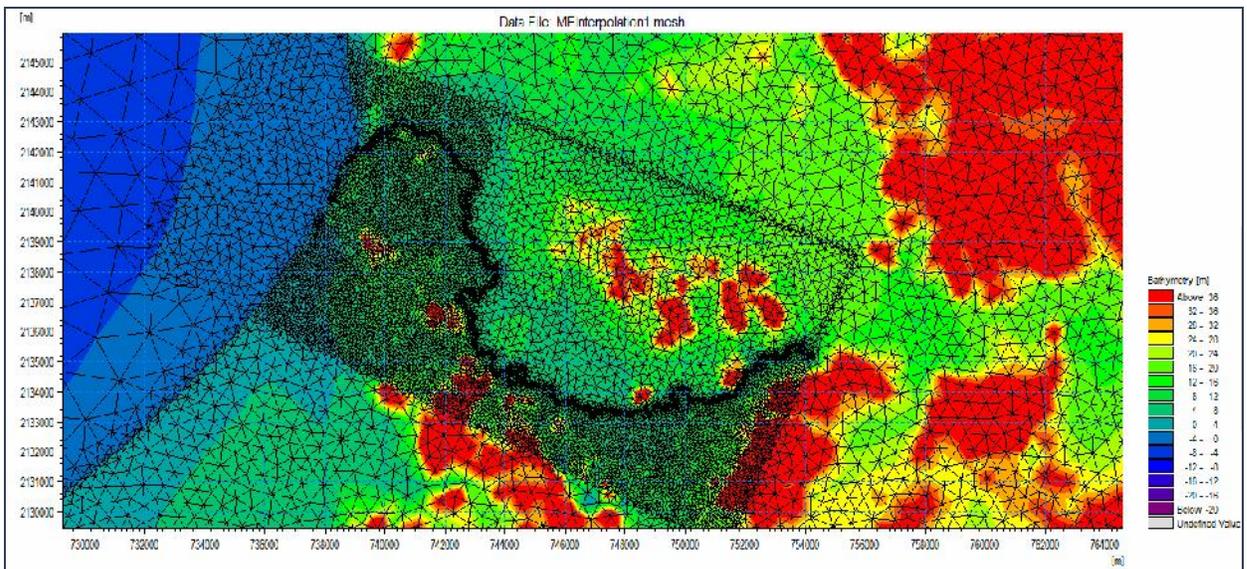


Figura 10. Malla flexible, río Champutón, detalle

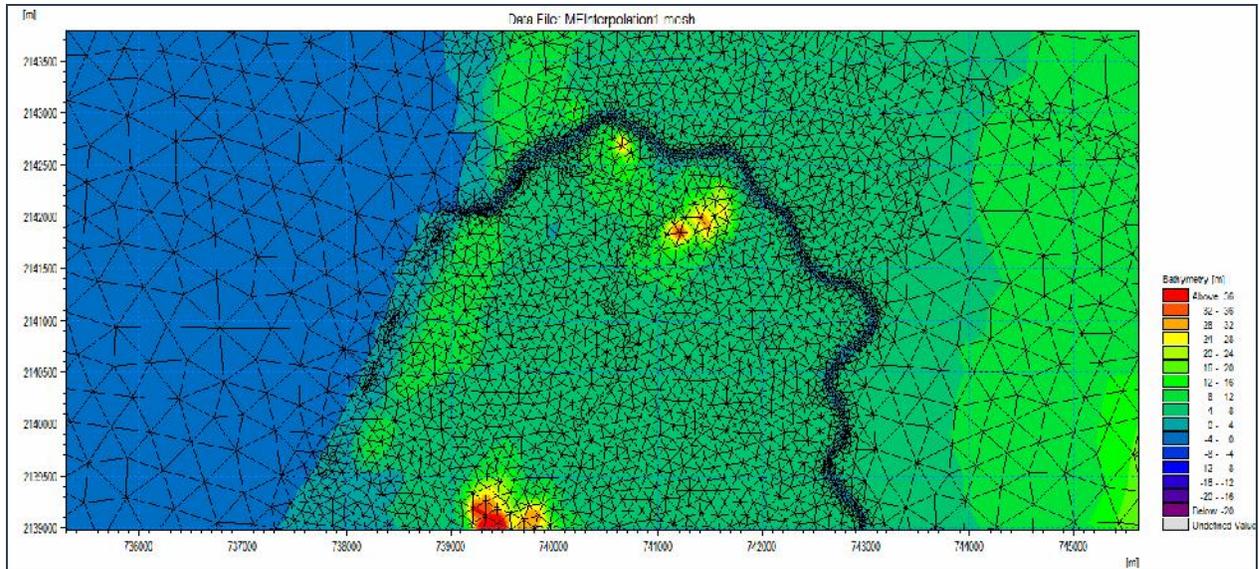


Figura 11. Malle Flexible, desembocadura río Champotón, detalle

4.3.1.2 Hidrogramas de diseño

El análisis de frecuencias se utiliza como herramienta para predecir el comportamiento futuro de los caudales generados por eventos hidrometeorológicos. A partir de la información histórica y con base en procedimientos estadísticos se calcula la magnitud del caudal asociado a un período de retorno (Tr) el cual, se define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento de magnitud dada x , sea igualado o excedido por lo menos una vez en ese periodo de tiempo (Escalante y Reyes, 2002). Para la generación de los hidrogramas de diseño se aplicaron las metodologías descritas por Domínguez et al. (2008).

Para caracterizar el peligro por inundación se utilizó el registro de caudales medidos en la estación hidrométrica Canasayab en el río Champotón durante el periodo de 1956 al 2011, cuenta con 51 años de registros, siendo importante aclarar que la calidad de la información es variable ya que a lo largo de algunos años existen muchos datos faltantes (Tabla 4). Esta estación se encuentra ubicada a 39 km de la desembocadura del río Champotón al Golfo de México. No existen ríos tributarios relevantes sobre el tramo del río entre la estación de medición y el área de análisis.

Tabla 4. Registro histórico de gastos máximos anuales de la estación hidrométrica Canasayab

No.	Año	Gasto Máximo Anual	Evento Identificado	No.	Año	Gasto Máximo Anual	Evento Identificado
1	1956	37.22		28	1983	20.27	H. Alicia
2	1957	56.60		29	1984	278.32	T.T. Edoard
3	1958	17.32		30	1985	87.01	H. Danny
4	1959	4.31		31	1986	44.75	

5	1960	14.05	H. Ethel	32	1987	310.84	T.T. S. N.
6	1961	57.53		33	1988-1991	Sin operación	
7	1962	24.65		34	1992	288.08	H. Debby
8	1963	450.23		35	1993	42.21	
9	1964	58.48		36	1994	Sin operación	
10	1965	60.21		37	1995	174.38	H. Opal-Roxana
11	1966	156.66		38	1996	25.67	
12	1967	74.55		39	1997	56.94	
13	1968	77.59		40	1998	71.54	H. Mitch
14	1969	287.98		41	1999	61.13	
15	1970	25.66		42	2000	131.21	H. Keith
16	1971	38.11		43	2001	24.46	H. Iris
17	1972	44.76		44	2002	1606.33	H. Isidore
18	1973	152.08		45	2003	46.21	H: Larry
19	1974	22.97		46	2004	68.36	H: Iván
20	1975	344.71		47	2005	348.88	H. Stan
21	1976	183.86		48	2006	77.13	
22	1977	232.49		49	2007	202.35	
23	1978	294.01		50	2008	88.19	
24	1979	290.95		51	2009	105.94	
25	1980	238.03		52	2010	171.05	
26	1981	201.07		53	2011	44.49	
27	1982	378.53	H. Alberto				

Tomando como base los registros de los gastos medios diarios de la E. H. Canasayab, se realizó un análisis de frecuencias de los gastos máximo anuales. Para realizar el análisis de probabilidad se utilizó el programa AX V.1.05 (Jiménez, 1992) el cual dio como resultado que la función Doble Gumbel se ajustó mejor al conjunto de datos seleccionados con el menor error estándar; posteriormente se calcularon eventos para los periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años (Figura 12).

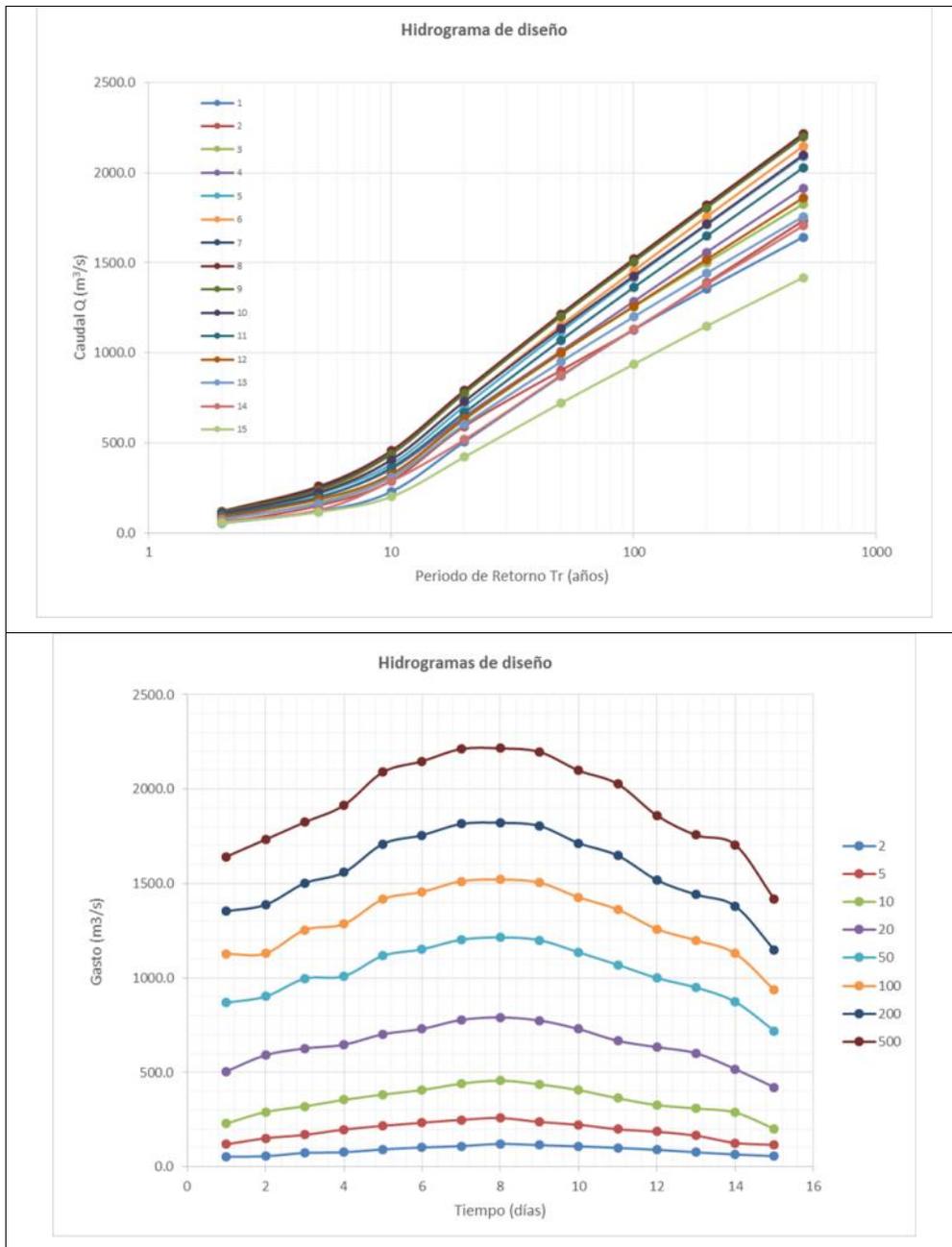


Figura 12. Análisis de frecuencia de gastos máximos anuales para diferentes duraciones (días)

4.3.1.3 Condiciones de marea en la desembocadura

Como se ha mencionado en la zona de estudio, el río Champotón desemboca al Golfo de México, por lo tanto, se debe realizar un análisis del comportamiento de la marea astronómica y de los eventos extraordinarios que ocasionan la presencia de marea de tormenta y que a su vez podrían alterar el comportamiento del río tanto en la salida como hacia aguas arriba. Es importante recordar que la cabecera municipal de Champotón se encuentra asentada entre la

desembocadura y sobre la línea de costa, por lo que se ha visto afectada por el desbordamiento del río y la sobreelevación del nivel medio del mar.

Según la norma N-PRY-PUE-1-0-001/8 de la SCT que trata sobre los estudios de mareas, las mareas pueden ser de dos tipos: astronómica y meteorológica.

- La marea astronómica es el movimiento periódico de ascenso y descenso de las aguas del mar, producidos por las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol, combinadas con la fuerza centrífuga y el efecto causado por la rotación de la Tierra.
- La marea meteorológica o de tormenta es el aumento o disminución del nivel del agua respecto al plano horizontal de referencia, debido a la acción de la fuerza del viento ciclónico o huracanado y/o a los cambios de la presión atmosférica. En el caso del aumento de la marea, el viento sopla contra la costa y en caso de disminución de la marea, el viento sopla en la dirección opuesta (de tierra hacia el mar).

Para calcular la sobreelevación de marea meteorológica es necesario conocer, en primera instancia el comportamiento de marea que ocurre en un muelle o costa; esto se logra registrando el cambio en el nivel de mar por medio de mareógrafos. Posteriormente, se necesita conocer la marea astronómica para así, de manera diferencial, obtener las sobreelevaciones producto del huracán o frente fríos; es decir la marea meteorológica es interpretada como la marea astronómica más una elevación (negativa o positiva) provocada por la fuerza del viento o por la baja de presión atmosférica que ocurre en estos casos.

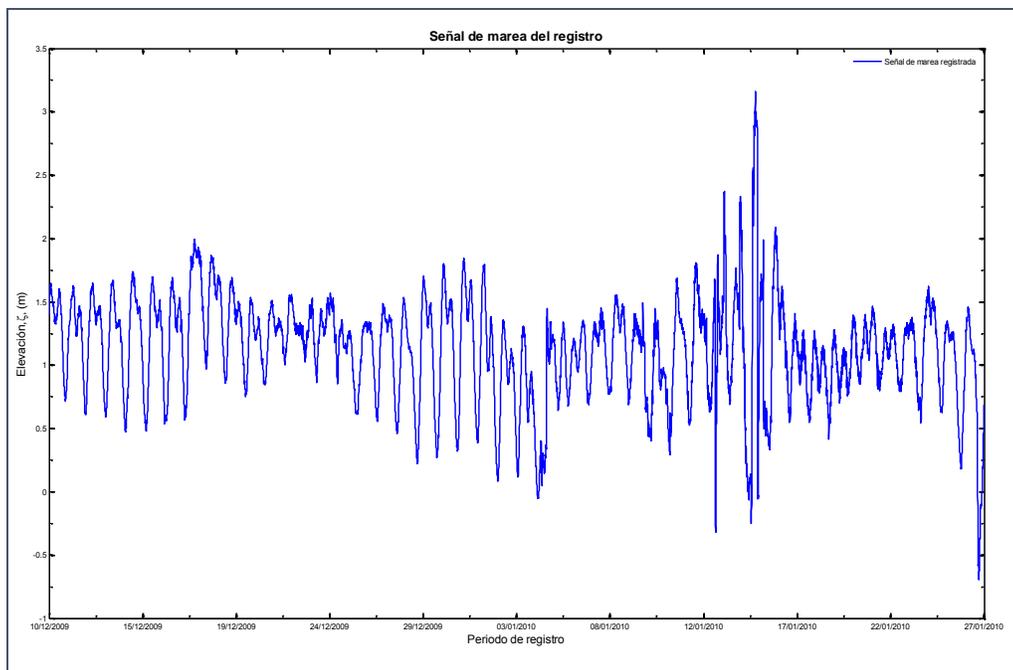


Figura 13. Señal de marea registrada en Champotón

Para definir la condición de frontera en el punto de la desembocadura del río Champotón se consideraron los resultados del trabajo de Pulido, Y. A. (2011) y de Ruíz et al., (2010), en ambos trabajos se presenta un análisis de las componentes de la marea a partir de mediciones realizadas con sensores de presión absoluta, Figura 13. Los sensores fueron instalados en diferentes puntos sobre la línea de costa del estado de Campeche, siendo uno de los puntos de medición en Champotón, frente a la desembocadura del río (Figura 14).

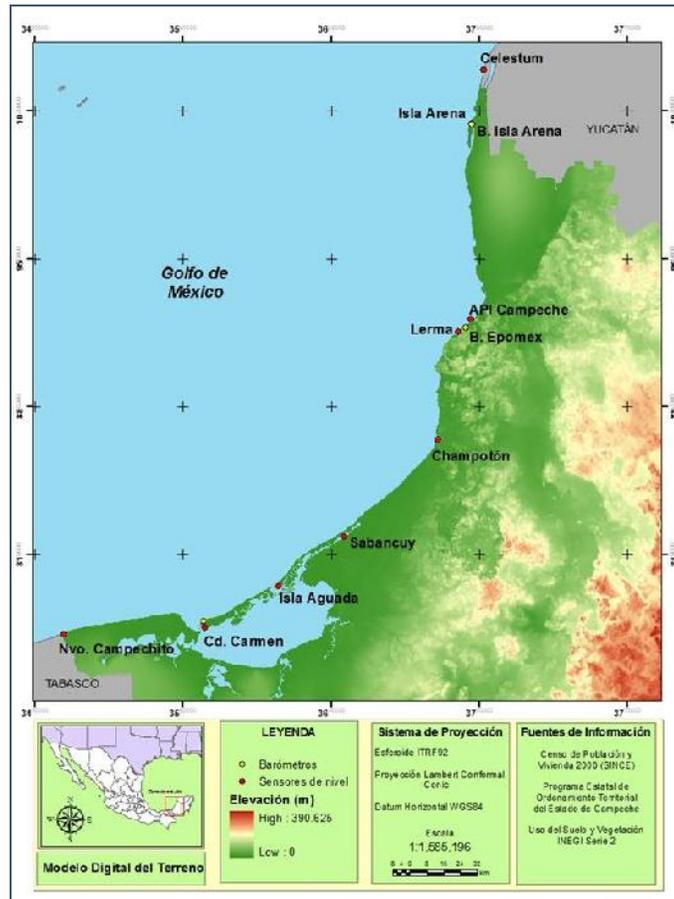


Figura 14. Localización de mareógrafos y barómetros del Sistema de Medición de Niveles y temperatura para el Estado de Campeche.

Después del procesamiento y análisis de los datos mediante el programa T-Tide, adaptado a las condiciones del estado de Campeche, se determinaron las componentes armónicas y así el tipo de marea que se presenta en los diferentes puntos de medición.

Para considerar los escenarios más desfavorables se deberá realizar un análisis para determinar el incremento asociado a la marea de tormenta para diferentes periodos de retorno y que se pueden presentar de manera simultánea con avenidas extraordinarias en el río Champotón.

Se tomaron los resultados presentados por Posada et al., 2013, en dicho trabajo se realiza un análisis considerando todos los huracanes que han afectado el estado de Campeche en el periodo de tiempo de 1948 a 2010, posteriormente se obtuvo la marea de tormenta provocada por cada huracán en todos los puntos de la zona costera de manera anualizada, realizando un

análisis extremal que permitió calcular las funciones de marea de tormenta, la Figura 15 muestra la función generada para Champotón.

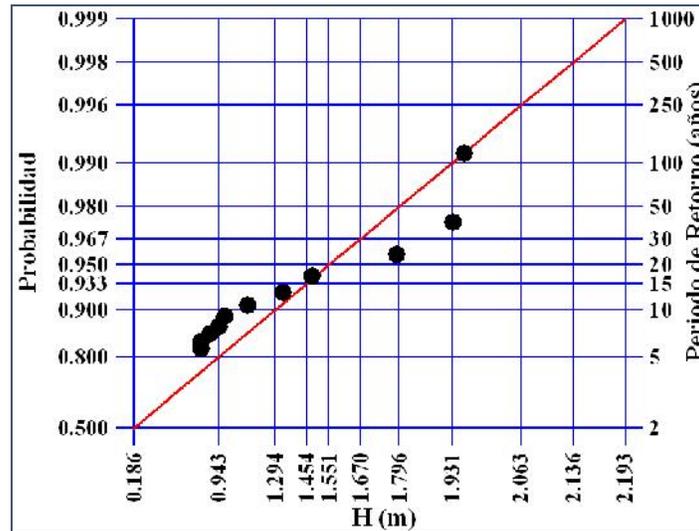
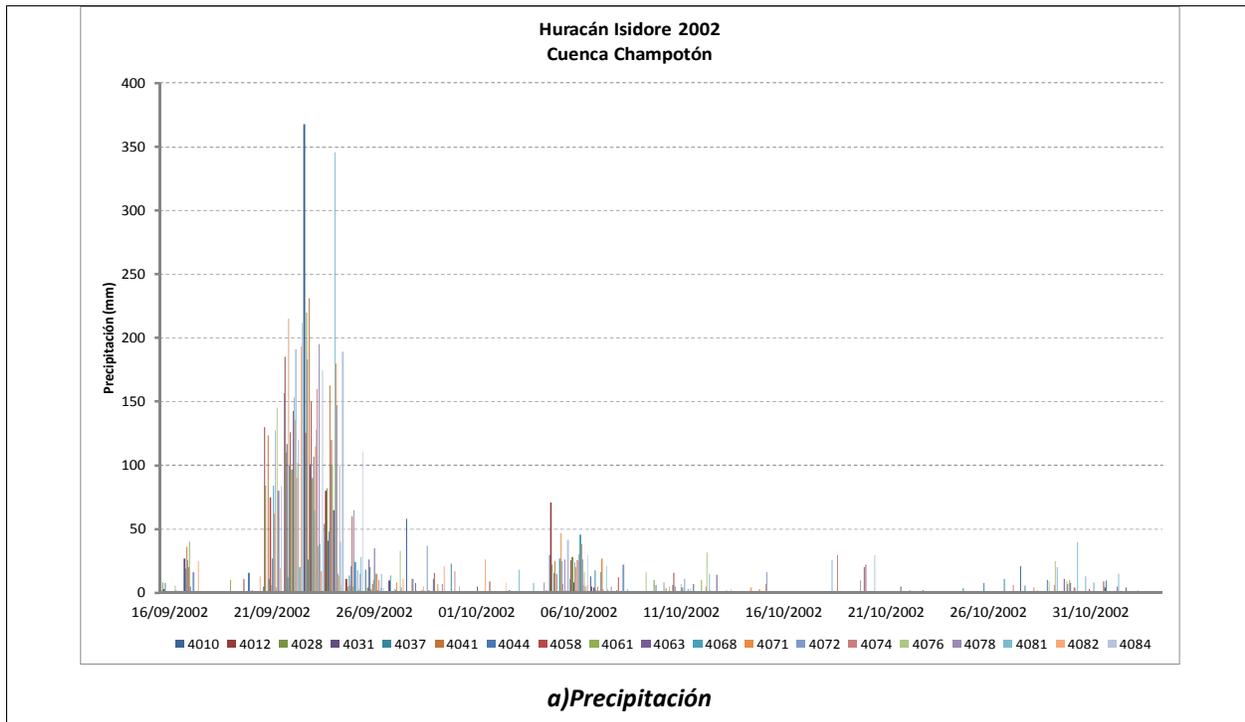


Figura 15. Función de marea de tormenta de Champotón

4.3.2 Calibración del modelo

Para llevar a cabo la calibración del modelo hidráulico se utilizaron los datos históricos de las inundaciones provocadas por el huracán Isidore (2002) y Stan (2005), los hidrogramas de escurrimiento medidos (Figura 16 y Figura 17), datos recabados en campo y marea de tormenta (Posada et al, 2013).



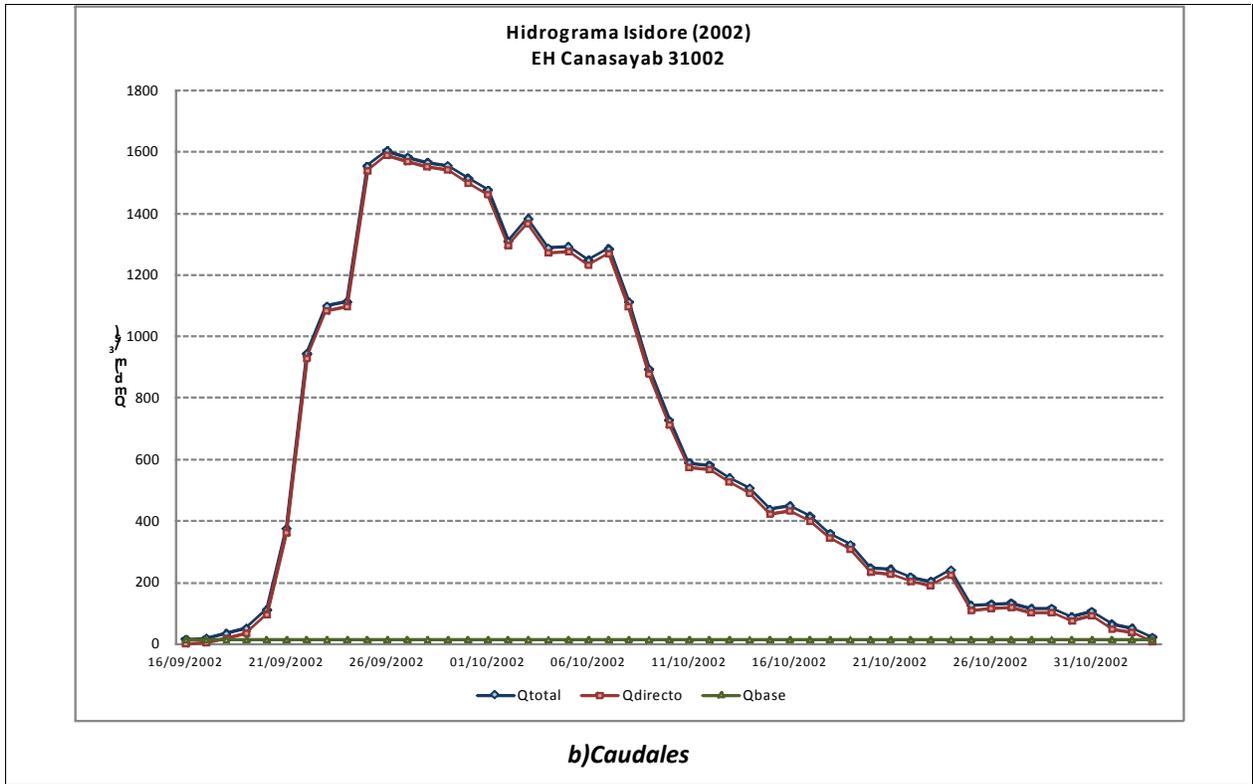
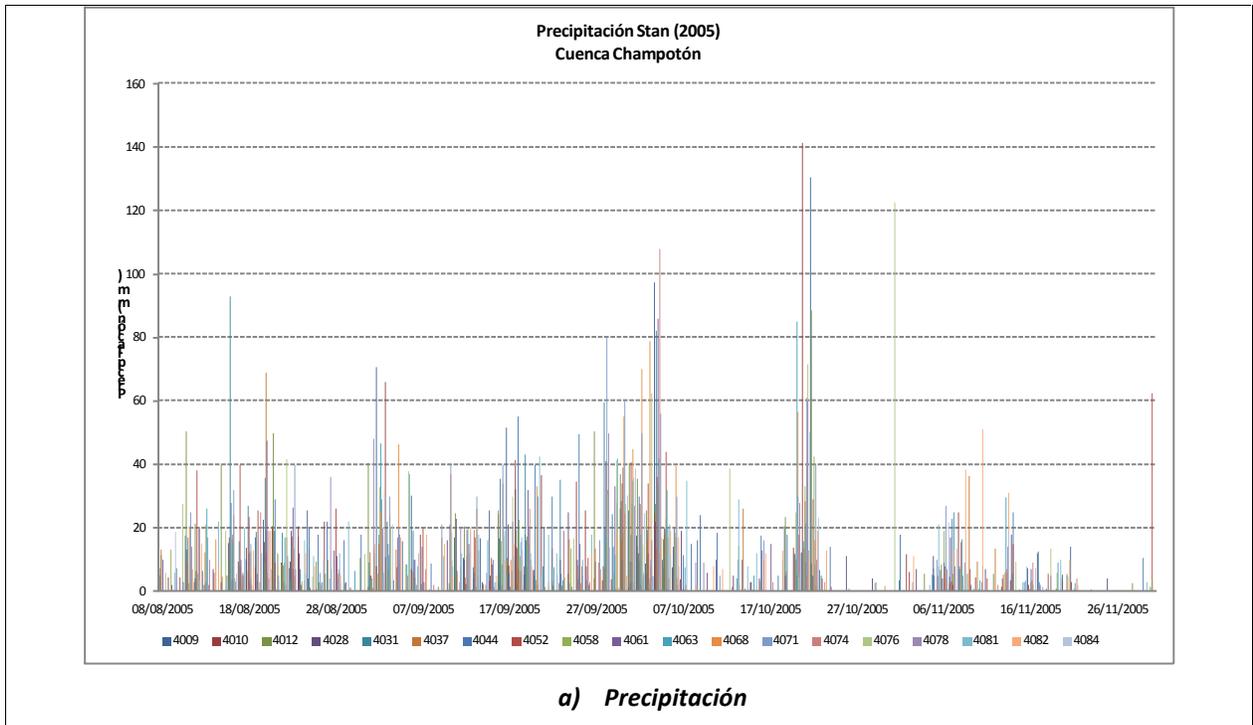


Figura 16. Registros históricos del huracán Isidore (2002)



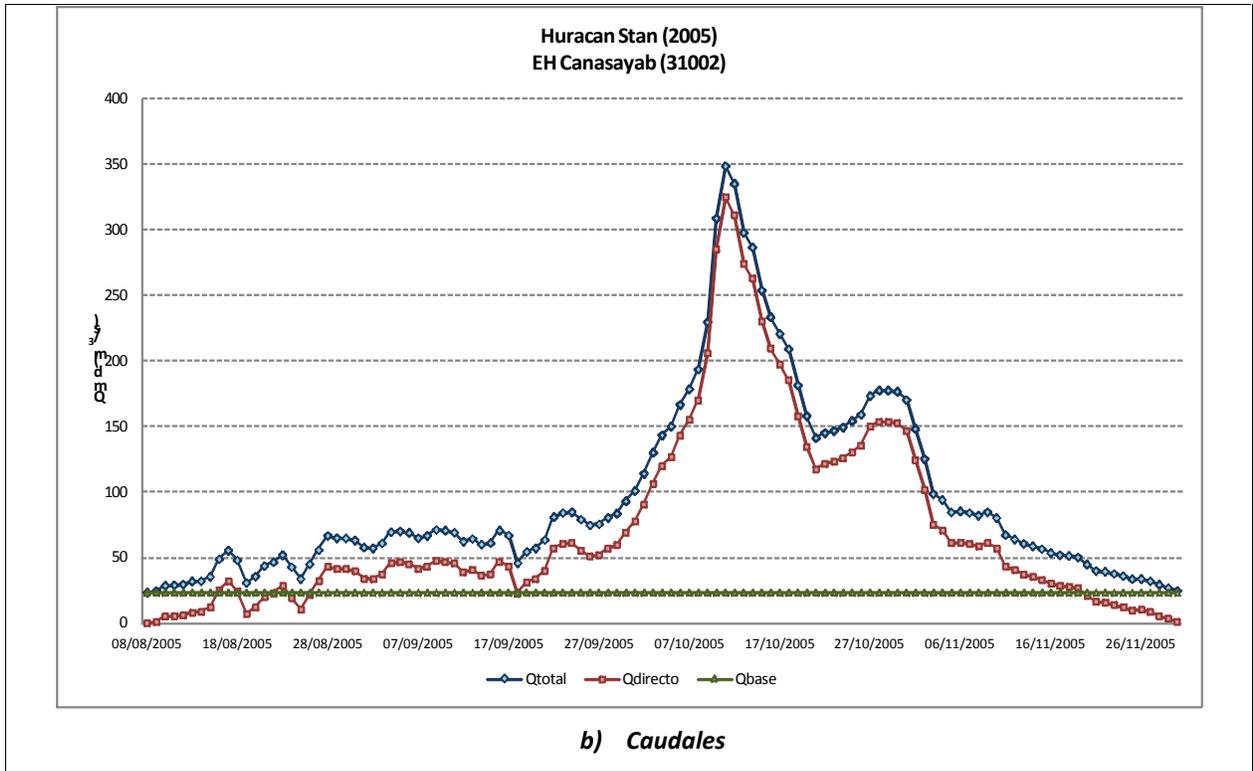


Figura 17. Registros históricos del huracán Stan (2005)

El huracán Isidore afectó a la península de Yucatán en septiembre de 2002, si bien sus vientos no fueron catastróficos, al estar prácticamente detenido sobre la península durante dos días, la marea de tormenta asociada fue notable en el municipio de Champotón, Figura 18a

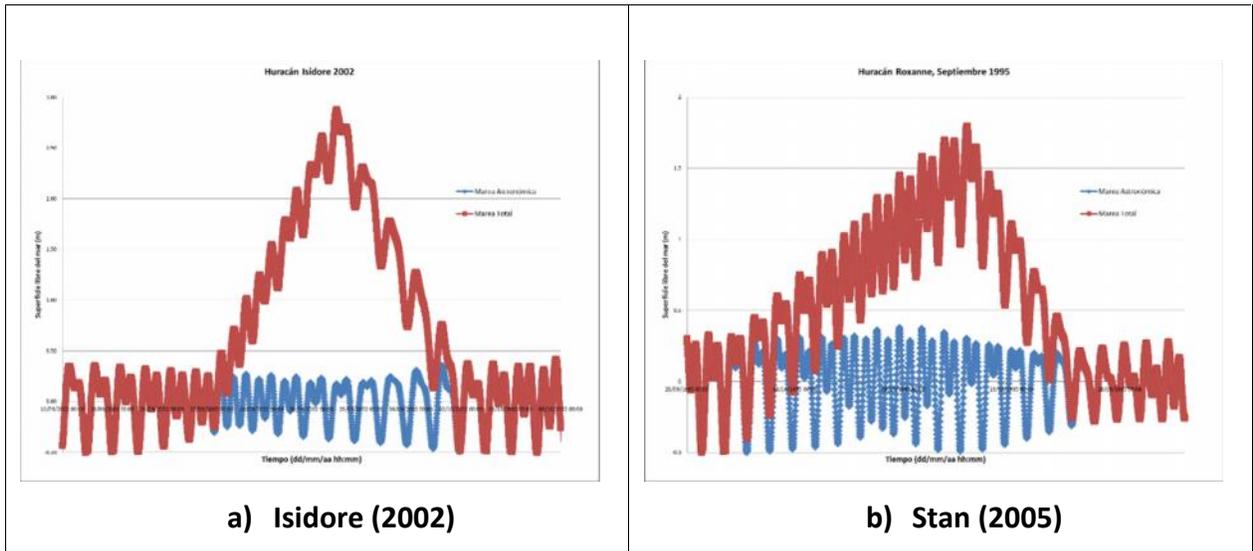


Figura 18. Condición de frontera en el mar para calibración del modelo

4.3.3 Evaluación de la vulnerabilidad

El procedimiento para evaluar la vulnerabilidad de la zona de estudio se basa en la construcción de funciones de daño, las cuales muestran la susceptibilidad de los bienes en riesgo ante ciertas características de inundación.

Las curvas de daño deben ser generadas para las diferentes áreas geográficas y su aplicación se concreta a regiones limitadas y con características homogéneas (Luino et al. 2009). Aun existiendo bases de datos históricos en ciertas regiones o países que han permitido construir y desarrollar muy ampliamente funciones de daños de diversos bienes, es complicado extrapolar datos de distintos lugares y relacionarlos con bienes diferentes, ya que existen diferencias, económicas, sociales y culturales, de un lugar a otro (Smith, 1994).

Por otro lado, las funciones de daño pueden derivarse de datos reales de daños por inundación (datos obtenidos de encuestas y levantamientos) o sintéticamente, es decir, por estimación de expertos para tipos de propiedad estandarizados o para las propiedades específicas localizadas en el área de estudio (Messner, et al. 2007).

Por lo anterior y considerando que no existe información disponible en la zona de estudio, el método que se propone para construir funciones de daño se basa principalmente en la recolección de información en campo mediante la aplicación de encuestas a los habitantes, agricultores, especialistas y entidades de gobierno, siendo esta técnica adecuada para caracterizar diversos bienes como los inmuebles, contenidos e infraestructura, entre otros; así como también, en escenarios específicos de inundaciones para recolectar los daños directos e indirectos causados (Thieken et al. 2008, Elmer et al. 2010). Posteriormente se realiza un análisis de la información obtenida y se complementa mediante información bibliográfica especializada. A continuación, se desarrolla a detalle el proceso establecido para los bienes seleccionados.

4.3.3.1 Funciones de daño en viviendas

Las funciones de daño por inundación más desarrolladas son las relacionadas con los inmuebles residenciales y no residenciales y sus contenidos, principalmente en zonas urbanas, ya que son los bienes más importantes. Dichas funciones se han generalizado en función del tipo de construcción, sin embargo, para caracterizar los contenidos en la zona de estudio es necesario un análisis detallado ya que los materiales de la vivienda no determinan el tipo de contenidos y éstos pueden ser muy variados.

4.3.3.1.1 Parámetros de la inundación

Existen diferentes características físicas que se presentan en una inundación, como el área, la profundidad, la duración, la velocidad, la velocidad en el incremento del nivel del agua y el tiempo de ocurrencia, que pueden influir en la cantidad y grado de daño. De acuerdo con estudios especializados la profundidad de inundación es el parámetro con influencia más

significativa y que se incorpora en la mayoría de las funciones de daño. Por otro lado, Penning-Rowell et al. 2003 documentó que en inundaciones con una duración mayor a 12 h se incrementan los daños en los edificios que tienen materiales como mortero, yeso y madera, así como en tejas y desagües. Para el caso en donde las inundaciones son lentas o se presentan en zonas de planicie, la velocidad no es un parámetro significativo.

4.3.3.1.2 Construcción de funciones de daño

Para este estudio se construyen funciones de daño relativo, en donde las curvas que se proponen indican el porcentaje de daño del número total de los contenidos, por tipo de inmueble, en función de la profundidad del agua.

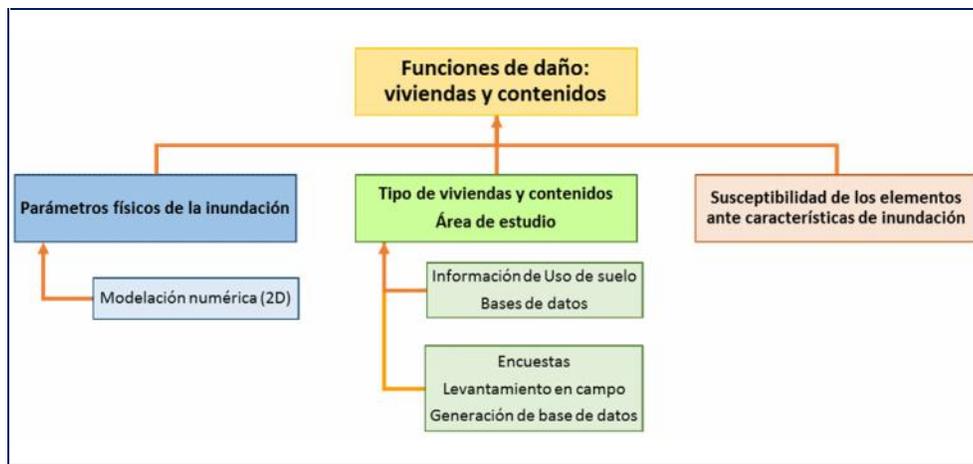


Figura 19. Diagrama para construcción de funciones de daño en viviendas

La información relativa a daños por inundación en la zona de estudio ha sido documentada de manera aislada por la entidad estatal de Protección Civil, como tal, no existe una base de datos organizada y disponible sobre los daños asociados a inundaciones. En general, algunos de los reportes que se han registrado ante inundaciones no contienen información con las características necesarias para la construcción de curvas de daños, para los diferentes bienes. Para compensar este vacío y construir una base de datos se implementó el mecanismo de encuestas (Messner et al. 2007)

4.3.3.1.3 Encuesta

Para el diseño del cuestionario se consideraron diversos aspectos, basados en la clasificación de daños de la Figura 19, que permiten caracterizar los elementos en riesgo y el tipo de daños:

Tipo de viviendas. Con el objetivo de determinar cuáles son las viviendas comunes en las poblaciones a estudiar, se involucran preguntas que por inspección se respondieron, como el tipo de techo, materiales de muros, número de pisos o niveles de la casa, material del piso y cantidad de habitaciones.

Antecedentes de las inundaciones. Las preguntas asociadas, indican desde qué tiempo las personas habitan sus domicilios actuales y cuantas veces se han inundado, el nombre del evento meteorológico, los niveles máximos que la última inundación alcanzó y si hubo pérdidas humanas asociadas a este fenómeno natural.

Menaje de la vivienda. Se incluyeron preguntas que permiten identificar el tipo de contenidos característico asociado al tipo de vivienda.

Daños y consecuencias. Por un lado, se evalúan, respecto a las inundaciones que han sufrido, los daños producidos en la infraestructura de las viviendas, así como también a los contenidos. Por otro lado, se preguntan los efectos a nivel laboral y emocional en la población durante la inundación.

Ayuda y apoyos económicos. Con el propósito de evaluar, ante una situación de inundación, la capacidad de respuesta por parte de las entidades de protección civil y federal se incluye preguntas sobre los tipos de apoyos recibidos, económicos y en especie.

Efectos en la salud y atención médica. Se pregunta sobre el tipo de enfermedades ocasionadas por la inundación y el tipo de atención médica recibida.

La encuesta es de tipo cerrado y está integrado por 165 preguntas (Anexo 1), es importante indicar que la sección referente a los contenidos es muy amplia por el catálogo de bienes que se consideraron, en la Figura 20 se muestra una sección de la encuesta. Previo a la entrevista, se agregan datos generales donde se indican las coordenadas y señas particulares del domicilio.

La primera etapa consistió en determinar a priori las áreas que han presentado problemas de inundación consultando el Atlas de Peligros Naturales del estado de Campeche (Posada et al. 2013) de tal manera que todas las colonias afectadas fueran incluidas en el levantamiento, para este procedimiento se utilizó información cartográfica y la base de datos por AGEBA del INEGI (2014), así como imágenes de satélite. Para aplicar la encuesta se utilizó la herramienta electrónica *HarvestYourData* (Figura 21), que integra automáticamente la información de todas las encuestas y disminuye el tiempo para procesar los datos.

4.3.4 Exposición

La exposición o grado de exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.

01. Material del techo

Cartón	1
plástico	2
Lámina cartón	3
Lámina plástico	4
Lámina asbesto	5
Lámina metálica (galvanizada)	6
Paja	7
Madera	8
Teja	9
Losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla	10
Losa de concreto ligada	11

02. Material de muros

Cartón o	1
plástico	2
Piedra	3
Láminas de cartón	4
Embarro o Bahareque	5
Madera	6
Adobe sin repellido	7
Adobe con repellido	8
Tabique de barro o concreto sin elementos de concreto	9
Tabique de barro o concreto con elementos de concreto	10

03. Material del piso

Tierra	1
Madera	2
Cemento	3
Mosaico	4
Otro	5

04. Número de pisos (niveles) que tiene la casa _____

05. Número habitaciones que tiene la casa (Sin contar pasillos)

Piso 1	
Piso 2	
Piso 3	

06. Número de personas viven en la casa

Mujeres	
Hombres	
Niños (de 12 o menos años)	

07. Número de personas que viven en la casa y que trabajan _____

08. Tiempo de vivir la familia en la casa _____
Años (0 si es menos de 1 año)

09. Cuantas veces se ha inundado desde que viven en esta casa?

Ninguna	1
1 o 2 veces	2
3 a 5 veces	3
Más de 5 veces	4
No sabe	9

Recuerda cuales fueron los huracanes/ años _____

Pedir autorización para tomar fotos al interior

(TERMINAR LA ENCUESTA SI ES NINGUNA O NO SABE)

10. Fecha de la última vez que se inundó la casa (Año o Huracán): _____

11. Qué altura de inundación mínima se ha presentado

10 cm o menos	1
20 cm	2
30 cm	3
50 cm	4
70 cm	5
1 m	6
1.5 m	7
2 m	8
2.5 m o más	9
No sabe	99

12. Qué altura de inundación máxima se ha presentado

10 cm o menos	1
20 cm	2
30 cm	3
50 cm	4
70 cm	5
1 m	6
1.5 m	7
2 m	8
2.5 m o más	9
No sabe	99

Figura 20. Encuesta aplicada para caracterizar vivienda y contenidos.

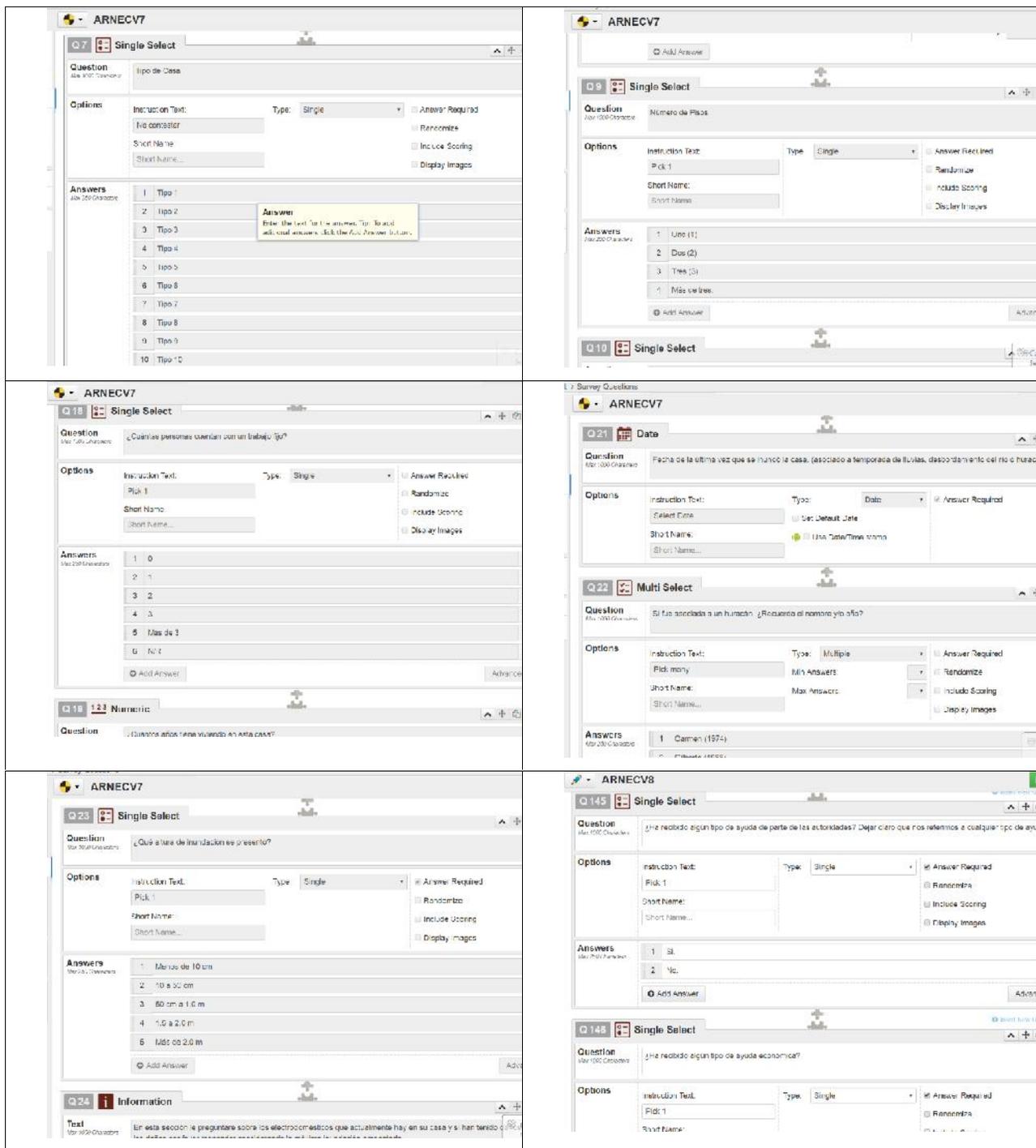


Figura 21. Aplicación electrónica para realizar encuestas

El manejo de la base de datos se realizó con el programa SPSS, el cual permite realizar un análisis estadístico de la información recopilada. Posteriormente mediante un análisis de regresión se derivan funciones típicas de daño en función de la profundidad para diferentes tipos de propiedades.

4.3.4.1 Fuentes de información

En la mayoría de los estudios de evaluación de riesgos no sólo se utiliza una fuente de datos sobre el uso de suelo. La anterior se debe a que una sola fuente de datos no contiene todos los tipos de uso de suelo o la clasificación es muy general, la escala no es la adecuada o la información no se encuentra desagregada como se requiere en el estudio. Por anterior, para el desarrollo de este trabajo se utilizó la combinación de diversas fuentes de información que a continuación se detallan:

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):
 - Carta Uso de suelo y vegetación.
 - Información vectorial de localidades urbanas
 - SCINCE 2010
 - Censo de población y vivienda
- Encuestas

4.3.4.2 Valor de los bienes expuestos

Posteriormente, cuando se ha documentado la ubicación, el número y el tipo de bienes en riesgo, es necesario cuantificar su valor en términos monetarios. Esta información se procesa de la siguiente forma:

En el caso de las inmuebles residenciales, para el determinar el valor de los contenidos asociado a cada tipo de vivienda se determina el costo de cada uno de los bienes en cada configuración. Posteriormente se determina el monto total por cada tipo de vivienda. Los costos se obtienen de los precios actualizados en el mercado.

La información se transforma en un conjunto de datos contenida en una malla donde se define el tamaño de la celda en función de la calidad de información.

4.3.5 Riesgo en viviendas

El análisis del riesgo R, o la presentación de los resultados pueden realizarse de varias maneras, como se mostrará a continuación.

Riesgo para un escenario particular

En este análisis se estudia una situación en particular, por ejemplo, un periodo de retorno de particular interés. El riesgo estará dado por la expresión siguiente.

$$R = C \cdot P_{Tr} \cdot V_{Tr} \quad (4.1)$$

Donde:

C: valor de los bienes expuestos

P_{Tr} : Probabilidad de que se presente un evento asociado con un periodo de retorno de Tr años

V_{Tr} : Vulnerabilidad asociada a la profundidad de la inundación correspondiente a un periodo de retorno de Tr años.

Valor esperado de los daños anuales

En este caso se estima el valor esperado, de los daños en los bienes expuestos, que se tiene año con año, mediante la suma del producto de las funciones de vulnerabilidad, peligro y el valor de los bienes expuestos de cada vivienda, de manera que se puede calcular el riesgo con la expresión siguiente

$$R_j = \sum_{i=1}^m C_j \cdot P(i) \cdot V_i(Y_i) \quad (4.2)$$

Donde:

i : periodo de retorno por analizar

j : vivienda en la que se realiza el análisis

$Y(i)$: tirante asociado a diferentes periodos de retorno

$P(i)$: función de peligro

$V_i(Y_i)$: función de vulnerabilidad

Para calcular el riesgo de inundación, es decir, los daños esperados anuales, las características de inundación deben ser estimadas para varios periodos de retorno, al menos tres eventos con diferentes períodos de retorno (Messner et al., 2007).

Índice de riesgo

Eventualmente, se pueden expresar los resultados mediante un índice de riesgo (Salas, 2011) para cada localidad de la manera siguiente:

$$I_{R_j} = \frac{R_j}{C_{MAX}} \quad (4.3)$$

Donde:

R_j : Valor de los bienes expuestos dentro de la localidad

4.4 Evaluación del riesgo en zonas agrícolas

La metodología propuesta para la estimación del riesgo de pérdidas por inundación en zonas agrícolas se divide en tres secciones: la primera parte evalúa el peligro por inundación mediante la aplicación del modelo hidrodinámico bidimensional bajo las mismas condiciones que en el apartado 4.3.1. La segunda parte del método consiste en la elaboración de las funciones de daño por inundación para los cultivos más importantes de la cuenca del río Champotón. Para esta etapa, se hizo un análisis de la producción histórica de todos los cultivos que se llevan a cabo en la zona de estudio, una investigación bibliográfica de los diferentes métodos para evaluar daños en la agricultura y de las variables más importantes que consideran; adicionalmente se hicieron visitas a campo para realizar entrevistas a actores del medio (agricultores, investigadores y funcionarios estatales y federales cuyo trabajo se asocia a la agricultura) y finalmente, tomando en cuenta dichos elementos y la información disponible, se adaptaron criterios para la construcción de las curvas de daño en cultivos; en particular, se consideró la relación entre la etapa de desarrollo del cultivo y la probabilidad de que se presenten crecientes importantes asociada a cada etapa. La tercera etapa consiste en la construcción del modelo para evaluar el daño anual esperado por inundación en zonas agrícolas, el cual considera las primeras dos etapas, el uso de suelo y vegetación, así como los costos esperados de producción. A continuación, se desarrollan los principales pasos de la metodología propuesta para evaluar el daño por inundación en zonas agrícolas, Figura 22.

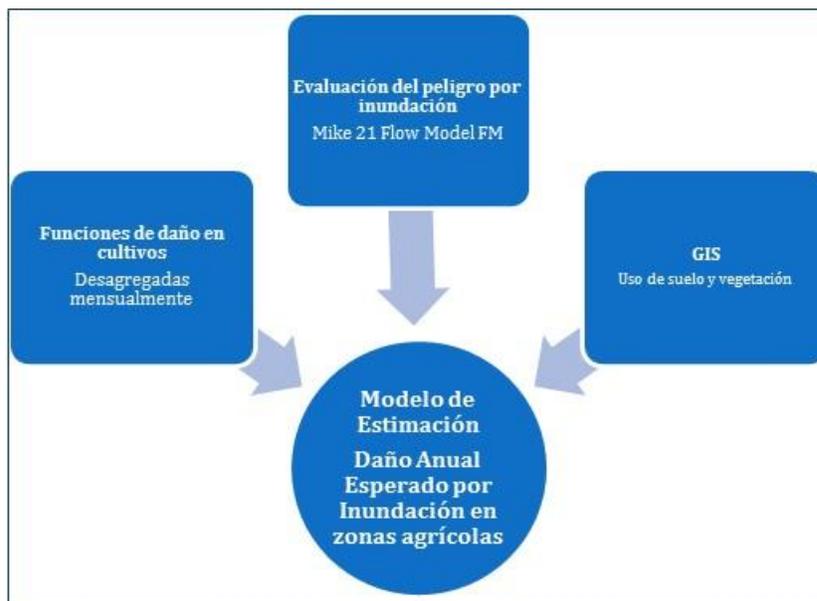


Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología propuesta en zonas agrícolas

4.4.1 Peligro por inundación en zonas agrícolas

Para la evaluación del peligro se desarrolló el procedimiento descrito en el apartado 4.3.1 con la característica adicional que las mallas de resultados se obtuvieron en función de 5 intervalos de duración de la inundación, obteniendo los valores máximos, medios y mínimos de las variables de la profundidad y velocidad, Tabla 5.

Tabla 5. Variables de la inundación en modelación hidráulica

Intervalo de duración (días)	VARIABLES OBTENIDAS
1-3	Profundidad Tiempo Velocidad
4-7	
8-11	
Mayor a 11	

4.4.2 Funciones de daño en sectores productivos

En el caso de estudio no se cuenta con una base de datos relacionada con daños en cultivos debido a inundaciones, por lo que, se adaptaron criterios y metodologías similares a las de Förster et al., (2008), Brémond et al., (2013) y Chau et al., (2014) para la construcción de las curvas de daño en cultivos. En la Figura 23 se muestra la secuencia propuesta para el desarrollo de las funciones.

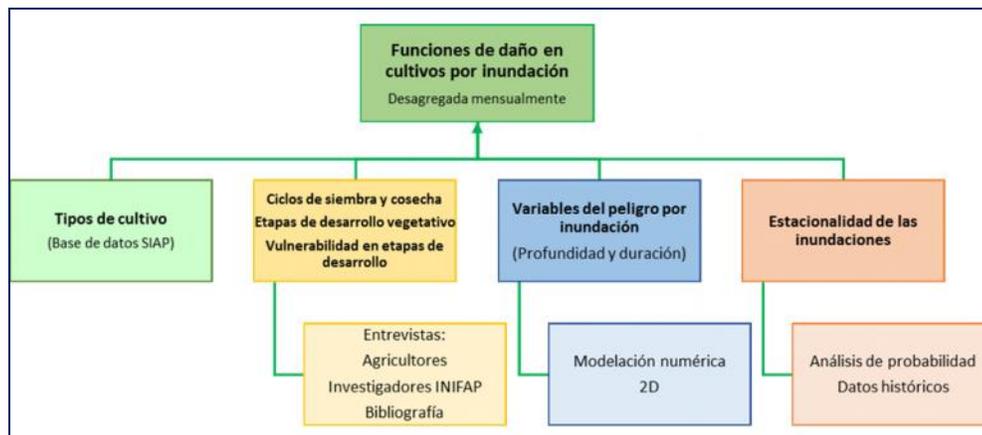


Figura 23. Diagrama de flujo para la construcción de las funciones de daño en cultivos

4.4.2.1 Parámetros del peligro por inundación que afectan a los cultivos

La selección de los parámetros del peligro que más influyen en los daños directos en la agricultura es parte fundamental ya que de ello depende que la estimación sea real. En este trabajo, los criterios de selección de los parámetros se basan en la información recabada en campo, a partir de agricultores, investigadores del Centro Experimental Edzná-INIFAP (Campeche), y en una investigación bibliográfica (Förster et al., 2008; Brémond et al., 2013; Chau et al., 2014; Vozinaki et al., 2015). De acuerdo con la información recabada y con las características de la zona de estudio, los parámetros hidráulicos que más afectan en las zonas agrícolas son la profundidad del agua, la duración de la inundación y la estacionalidad (temporalidad); con respecto a la profundidad del agua el daño comienza con el ahogamiento de la raíz de la planta; el tiempo que se encuentra sumergida la planta, independientemente de la profundidad del agua, genera estrés hídrico; con respecto a la temporalidad, nos referimos a la etapa del crecimiento en la que se encuentran los cultivos cuando ocurre la inundación. Para la zona de estudio, debido a la baja pendiente de la zona inundable, la velocidad del flujo no es un parámetro que influya significativamente en el daño.

4.4.2.2 Tipos de cultivos

Como se ha comentado anteriormente no existe una base de datos disponible en México, asociadas a inundaciones históricas, que nos indique los daños en el caso del sector agrícola en función de los parámetros hidráulicos que afectan principalmente a los cultivos.

Para estimar las pérdidas esperadas por inundación en las zonas agrícolas del área de estudio, es necesaria la información sobre los tipos de cultivos que se llevan a cabo en las zonas cultivables, la decisión de los agricultores para seleccionar el tipo de cultivos en una región o predio depende de la relación costo-beneficio, de los objetivos particulares del agricultor y de las características del suelo (Försters et al. 2008).

En una primera etapa se consultaron fuentes oficiales de información disponibles en diferentes entidades de gobierno. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), dentro de los servicios de consulta que maneja, ofrece el Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP, Marzo 2015) que proporciona información estadística histórica sobre los sectores productivos de México es decir, la producción agrícola de los años 1980 a 2013 correspondiente a superficie sembrada, superficie cosechada, producción y valor de producción de 685 cultivos cíclicos y perennes, por ciclo y modalidad.

Dentro del Organigrama Operativo de la Delegaciones Estatales de la SAGARPA, el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) es una unidad administrativa de desarrollo económico y social circunscrita a un espacio. El estado de Campeche está dividido en 4 DDR's, Figura 24, en los cuales el área de estudio se encuentra ubicadas en el DDR Champotón.

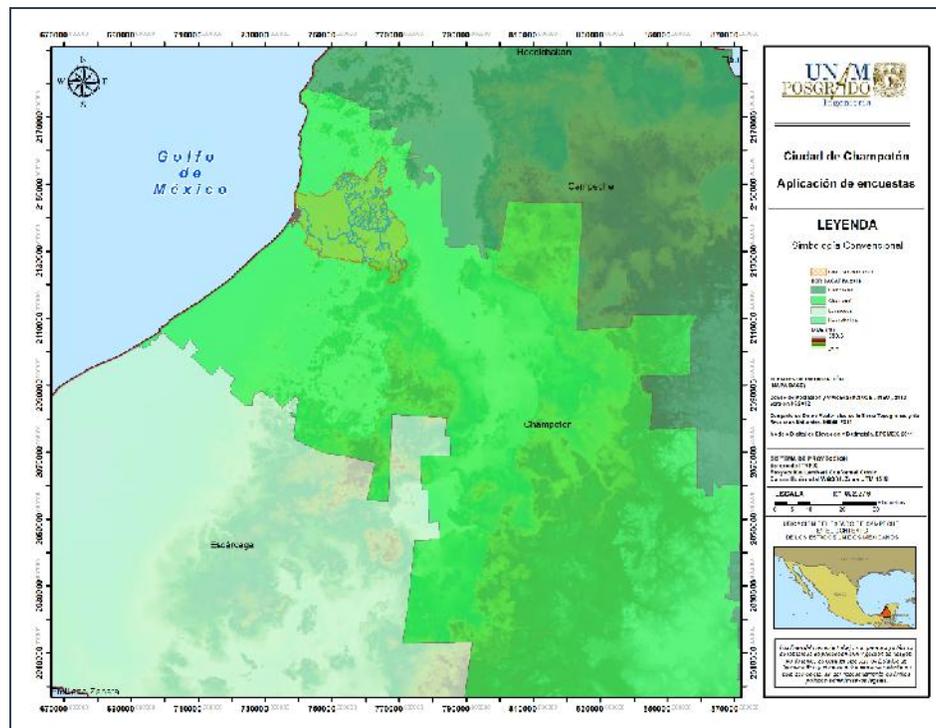


Figura 24. Delimitación de los Distritos de Desarrollo Rural

Para el área de análisis se extrajo la base de datos desde 1980 a 2013 de todos los cultivos que se practican, desagregados por ciclo Primavera-Verano (PV) y Otoño-Invierno (OI) y modalidad de riego, en la Figura 25 se observa que el maíz es el grano más representativo seguido del sorgo, arroz palay, soya, frijol y algunas hortalizas en menor porcentaje, para la modalidad de riego de temporal. Por lo tanto, se seleccionó el cultivo de maíz para desarrollar la metodología de la construcción de las curvas de daño.

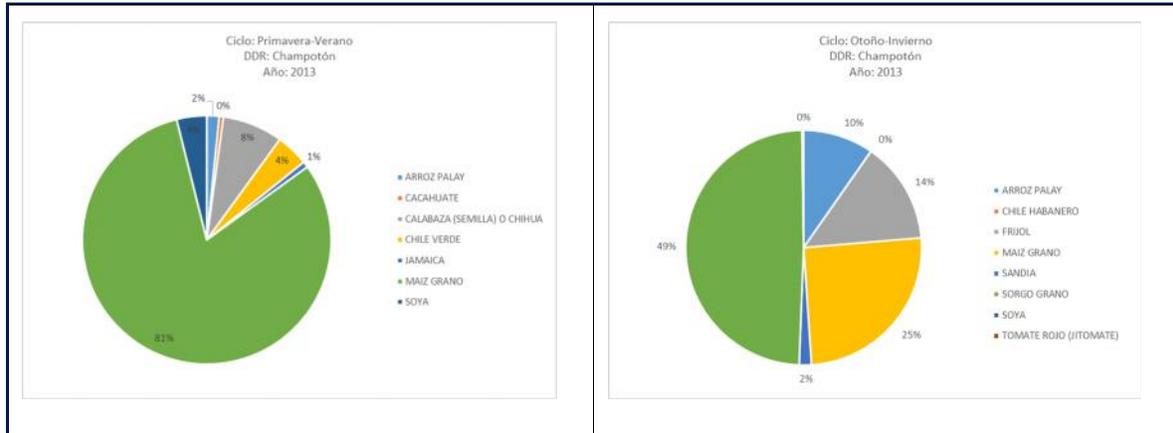


Figura 25. Superficie sembrada en el DDR Champotón, 2013. Modalidad de riego: temporal. (Fuente: SIAP-SAGARPA, 2014)

4.4.2.3 Etapas del crecimiento del cultivo

El impacto del daño en los cultivos depende de la etapa del desarrollo o crecimiento en el cual se encuentre en el momento de la inundación. De acuerdo con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, abril 2016) las diferentes etapas de crecimiento del maíz se pueden dividir en dos categorías: Vegetativa (V) y Reproductiva (R). Además, se pueden agrupar en cuatro grandes periodos:

1. Crecimiento de las plántulas (etapas VE y V1)
2. Crecimiento vegetativo (etapas V2, V3..., Vn)
3. Floración y la fecundación (etapas VT, R0, y R1)
4. Llenado de grano y la madurez (etapas R2 a R6)

En la Figura 26 , se observa la escala de Ritchie y Hanway (1982) que contiene las etapas consideradas en este trabajo. El número de días en cada etapa dependerá de las características particulares de la región de estudio relacionadas con las condiciones climáticas, tipo de suelo, temperatura y variedad de la semilla, entre otros. En el Campo Experimental de Edzná-Campeche del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, SAGARPA) se han probado diversos materiales (semillas) en las regiones Centro y Norte de Campeche, incluyendo diferentes variedades como VS-535 (nombre comercial) e híbridos como

H-431, entre otros, para determinar el rendimiento promedio de grano, desde condiciones de temporal excelentes hasta adversas.



Fases	Fase vegetativa					Fase reproductiva		
Días a inicio fase después de la siembra	0	4-5	10-15	25-30	30-55	55-65	65-90	90-110
Etapas	Siembra	Germinación Emergencia	Establecimiento	Diferenciación de órganos	Alargamiento entre nudos	Floración, polinización y fecundación	Llenado grano	Madurez fisiológica
Descripción	La semilla posee 5 hojas preformadas y una raíz principal llamada radícula.	Germinación: la radícula atraviesa el grano. Emergencia: el coleóptilo emerge del suelo.	En el estado de 2-3 hojas, la planta comienza a fotosintetizar y ya no depende de las reservas del grano.	Cuando la planta tiene de 6-8 hojas desarrolladas, la yema apical se transforma en inflorescencia masculina (panícula), las yemas axilares se transforman en inflorescencia femenina (espiga engrosada).	Los entrenudos del tallo se alargan rápidamente, se desarrolla la panícula y la espiga.	Masculina: la panícula se hace visible y las anteras comienzan a liberar polen. Femenina: aparición de estigmas, ocurre la polinización y fecundación de óvulos.	Los granos acumulan almidón, proteínas y lípidos pasando por un estado lechoso, pastoso y duro de acuerdo a su contenido de agua y materia seca.	Los granos finalizaron su llenado. Un punto negro aparece en su base en el sitio de unión con la tusa. La humedad del grano es generalmente inferior al 40%.

Figura 26. Estados fenológicos de la planta de maíz. Fuente: Ritchie y Hanway (1982)

4.4.2.4 Fechas de siembra y cosecha

Para ambos ciclos agrícolas, Primavera-Verano y Otoño-Invierno, las superficies sembradas con los principales granos son bajo condiciones de temporal. La siembra se realiza en el intervalo del 1 de junio al 31 de julio. Cuando se utiliza el sistema de labranza tradicional del suelo se comienza a sembrar hasta que el temporal está bien establecido, siendo el periodo óptimo del 15 de junio al 15 de julio. Con el sistema de cero labranza esta labor puede realizarse desde las primeras lluvias, ya que con el “mantillo” de residuos vegetales que queda sobre el suelo, la humedad se conserva por más tiempo (INIFAP, Campo Experimental Edzná Campeche. Marzo 2015). Para el ciclo agrícola P-V del año 2015 en la Figura 27 se muestra el calendario de siembra, cosecha y comercialización para la producción de los cultivos de maíz, sorgo, arroz y soya.

4.4.2.5 Impacto del daño

El impacto del daño depende principalmente de la etapa de desarrollo de cada cultivo en la cual se presenta la inundación, los valores del impacto van de 0 a 100%. A partir del calendario de siembra, cosecha y comercialización (SAGARPA, 2015) se desagregó de manera mensual las etapas de desarrollo del cultivo.

En la construcción de las funciones de daño se consideraron los parámetros hidráulicos de profundidad, duración y temporalidad de la inundación. Para las diferentes profundidades de inundación se establecieron 4 rangos de duración de la inundación, tomando como base el estudio de Vozinaky et al., 2015, Bremond 2013 y Förster et al., 2008, se construyó una función de daño para cada rango, Tabla 6.

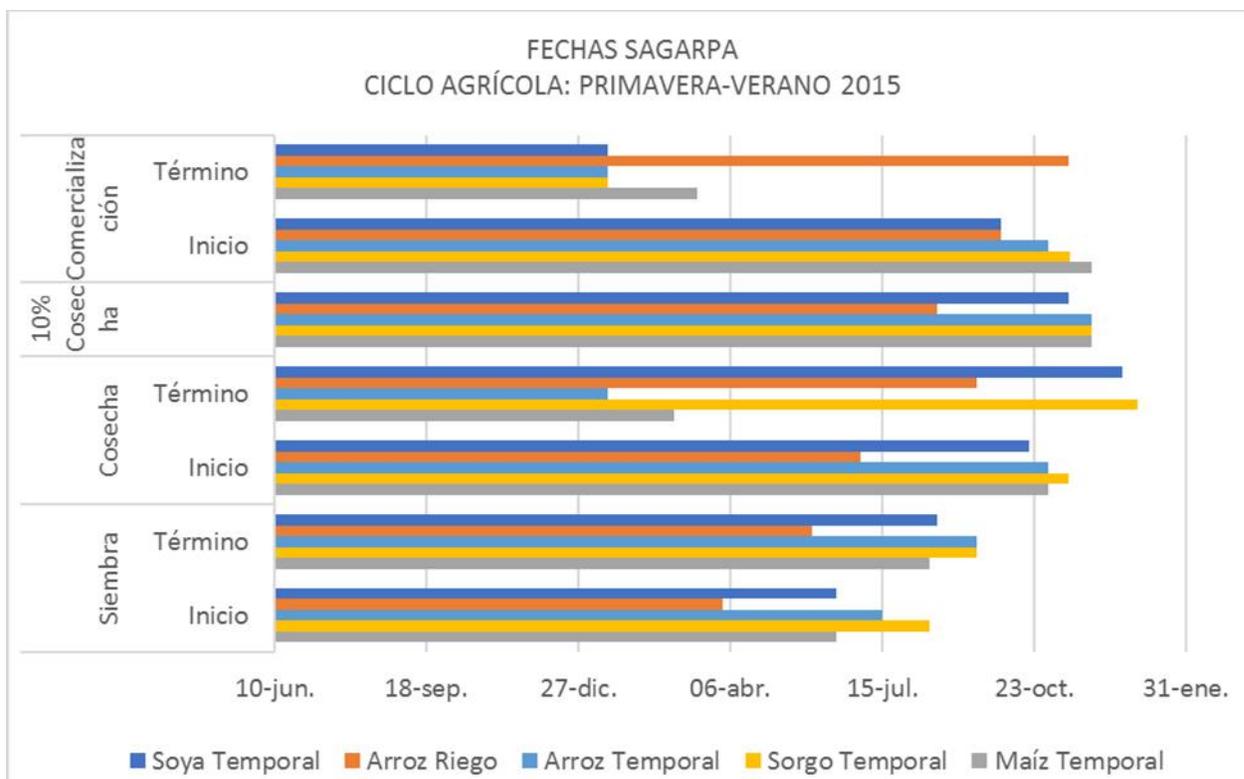


Figura 27. Fechas de producción agrícola, estado de Campeche. Ciclo P-V 2015.

Fuente: SAGARPA, Oficina local Campeche.

Tabla 6. Formato de tabla de encuesta para determinar el daño por inundación en cultivos

% Impacto del Daño en cultivo por inundación				
Mes	Duración (días)			
	1 a 3	4 a 7	8 a 11	>11
Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
...
Diciembre

Durante el año 2012 y 2013 se realizaron visitas a campo que permitieron recabar información de agricultores dedicados al cultivo de maíz, caña de azúcar y sorgo principalmente; por otro lado, se entrevistó a investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), del Campo Experimental Edzná, que han realizado estudios de los diferentes cultivos de la región en el estado de Campeche y proporcionaron sus opiniones y experiencias, sobre los efectos que una inundación produce en cultivos como la soya y el maíz. A través de los Paquetes tecnológicos para sembrar maíz de temporal en el estado de

Campeche, 2015 (SAGARPA-INIFAP, Campo Experimental Edzná), se complementó la información.

Las consideraciones generales para la zona de estudio son:

- Los eventos considerados son de inundaciones lentas, es decir, la velocidad del flujo es pequeña.
- El drenaje del agua, producto de las inundaciones, es lento
- Se considera un solo tipo de cultivo en cada parcela o área de cultivo.
- Se evalúa el daño directo en los cultivos
- En las zonas de estudio la pendiente del terreno es baja, del orden de 0.1%
- El suelo en el área de estudio es de tipo gleysol mólico y gleysol éutrico, es decir, con baja permeabilidad.
- Los rangos de inundación se consideran desde $h > 0$ m, tomando en cuenta que el estrés hídrico de la planta ha comenzado con la elevación del nivel freático.

Adicionalmente, en el calendario que maneja la SAGARPA en el año 2015, para el ciclo P-V, la época de siembra se establece en el intervalo de junio a julio, por lo tanto, para este trabajo se considera que el proceso de producción se inicia desde mayo con la preparación del terreno; posteriormente a la cosecha del ciclo P-V se inician los preparativos para el ciclo O-I.

4.4.3 Exposición

Las fuentes de información que se utilizaron para determinar las zonas agrícolas son las siguientes:

1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):
 - Carta Uso de suelo y vegetación (agregar formato y escala)
 - Censo nacional Agrícola ganadero forestal
2. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación)
 - INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias)
 - SIAP (Sistema Información Agrícola y Pecuaria)
 - FIRCO
1. INFOCAM
2. Entrevistas

4.4.3.1 Entrevistas

Se realizaron entrevistas a profesionales relacionados con el estudio de daños a cultivos por eventos extremos, 4 investigadores del INIFAP (Campo Experimental Edzná, Campeche), 1 Ingeniero agrónomo y 2 agricultores.

Se logró entrevistar en una primera etapa a algunas personas que su actividad se desarrolla en diferentes sectores de producción. Por un lado, a personal que labora en FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido) que es una Agencia Promotora de Agronegocios de la SAGARPA, personal que labora en la empresa Proyectos Especiales-Ingeniería Agrícola, en la zona de Palizada y un agricultor particular en la zona de Champotón.

A continuación, se presenta un resumen sobre puntos importantes que se comentaron en las entrevistas.

Figura 28. Información de entrevista, FIRCO

Sector Productivo		Champotón	Palizada	Candelaria
Sector Agrícola	Tipo de cultivos	<ul style="list-style-type: none"> • Caña • Maíz • calabaza (chihua) • cacahuete • Jamaica • papaya • mamey 	<ul style="list-style-type: none"> • Arroz palay • Sorgo • Palma de aceite (4,500 Ha) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz • palma de aceite (1,500 Ha)
	Problemática manifestada	<p>Maíz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Muy susceptible a las inundaciones, • El cultivo muere o su rendimiento es casi nulo. • A partir de 10 cm de lámina de agua. • La época más vulnerable es antes de la etapa de amarre de frutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Arroz y sorgo muy resistentes a inundaciones por meses. • A reserva de que se tenga la infraestructura para cosechar si está más inundada de los normal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Palma de aceite susceptible a inundaciones mayores a 2 meses. • La curva de producción se ve afectada, los frutos y cosecha
		Suelo arcilloso	suelos con más arena	Suelo arcilloso

4.4.3.2 Valor de los bienes expuestos

El Campo Experimental Edzná del INIFAP en Campeche proporcionó información referente a los paquetes tecnológicos de los diferentes cultivos que son aptos en el estado de Campeche. En ellos se concentran las características e indicaciones más importantes para poder sembrar cierto cultivo y los costos asociados. La información está distribuida como se enlista a continuación:

- Preparación del suelo
- Variedades e híbridos
- Potencial de rendimiento
- Fechas de siembra
- Densidad de siembra
- Método de siembra

- Fertilización
- Combate de maleza y plagas
- Manejo de enfermedades
- Cosecha
- Costos de las actividades e insumos del paquete tecnológico

4.4.4 Riesgo en zonas agrícolas

En este trabajo se propone evaluar el daño agrícola ocasionado por una inundación.

Debido a que la pérdida en zonas agrícolas tiene una variación estacional el análisis de frecuencias de inundación proporciona pesos mensuales sobre la probabilidad de inundación. El daño anual esperado se obtiene ponderando la pérdida, de un evento de inundación, que ocurre en cada mes con la probabilidad de inundación en ese mes (Förster et al., 2008; Hess and Morris, 1987). Se desagrega mensualmente el impacto del daño y los costos de producción del cultivo en función de las etapas de su desarrollo mediante el siguiente modelo:

Se estima la probabilidad de que se presente un gasto Q en cada uno de los meses del año; para hacer la estimación se consideró que dicha probabilidad es proporcional a los gastos medios mensuales registrados en la estación Canasayab. El dato que se genera es el valor de una probabilidad $P(i)$ para cada mes i . ($P(i)$ depende del mes i , independientemente del evento o periodo de retorno de la inundación simulada)

Se obtiene el impacto del daño en el cultivo (valor de 0-1) para cada mes ante una inundación, provocada por un gasto asociado a un Tr , (Q_{Tr}). Este dato se extrae de la función del impacto de daño propuesta para las diferentes duraciones de inundación. Se proponen 4 intervalos de duración d de la inundación: 1-3d, 4-7d, 8-11d y >11d. A los datos que se generan se les denomina %Daño (i, d)

Se determina el valor del costo por hectárea (\$/ha) que tiene el cultivo en el mes de acuerdo con la etapa de desarrollo en el proceso de producción. A los valores obtenidos se les denomina $CPHC(i)$.

Para cada inundación asociada a un Tr y cada intervalo de duración, se estima un daño anual mediante la suma ponderada de los daños correspondientes a los 12 meses del año:

$$DC_d = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \%D_{i,d} \cdot CPHC_i \quad (4.4)$$

Se determina el área (hectáreas) inundada por un gasto Q asociado a un Tr para los diferentes intervalos de duración. Se denomina a esta variable $ACI(j)$ en hectáreas, donde j varía en función del número de Tr analizados.

Se realiza el cálculo del daño, denominado D, para cada intervalo de duración:

$$D(Q_{Tr}) = \sum_{j=1}^m DC \cdot ACI_j \quad (4.5)$$

Para cada intervalo de duración, se construyen las curvas de riesgo; cada punto de la curva tiene coordenadas $(D(Q_{Tr}), Tr)$.

Se obtiene el daño anual esperado como el área bajo la curva de riesgo para cada intervalo de duración (Meyer et al. 2012).

$$DAE = \sum_{j=1}^m \frac{D(P_{Tr_j} + P_{Tr_{j-1}})}{2} \cdot \Delta P_j \quad (4.6)$$

Donde ΔP_j es el incremento de la probabilidad de excedencia entre periodos de retorno (Tr)

El daño total asociado a la duración promedio se obtiene mediante la suma de los productos de la frecuencia relativa de cada intervalo de duración por el daño asociado a dicho intervalo. Se denomina DTP.

La frecuencia relativa de cada intervalo de duración se obtuvo con los escurrimientos registrados en la EH Canasayab, estableciendo un gasto umbral a partir del cual se empieza a desbordar el río.

Se construye la curva de riesgo con el daño total promedio para cada Tr, (DTP, Tr).

El área bajo la curva de riesgo da como resultado el daño anual esperado promedio, DAEP.

4.5 Análisis espacial de resultados

De los resultados se obtiene el riesgo como el daño anual esperado o en todo caso, si así se requiere, por escenarios, es importante saber el monto total pero también lo es la distribución espacial de los daños esperados. Dependiendo de la aplicación de los resultados, para entidades de gobierno el monto total de los daños tiene una aplicación clara, sin embargo, para Protección civil y los ciudadanos también es de particular interés determinar aquellas zonas de alto riesgo. Una forma de presentar los valores es por medio de mapas.

La cartografía de daños y riesgo se presenta por medio de un Sistema de información Geográfica (SIG), con esta herramienta se pueden gestionar de manera eficiente los datos espaciales que se generan en cada una de las etapas que integran el riesgo

5 RESULTADOS: EVALUACIÓN DEL RIESGO

5.1 Evaluación del riesgo por inundación en viviendas

5.1.1 Análisis del peligro en la cuenca Champotón

Las simulaciones numéricas para determinar el comportamiento de las inundaciones del río Champotón se estableció de acuerdo al diagrama de la Figura 6. Los resultados de cada parte del proceso se presentan a continuación.

5.1.1.1 Calibración

La calibración del modelo topobatimétrico se hizo con una serie de hidrogramas medidos asociados, con registros completos tanto de lluvia como de caudales, a los huracanes que han causado grandes desastres en el estado de Campeche, Isidore (2002) y Stan (2005). En las Figura 16 y Figura 17 se observa que el comportamiento de estos eventos fue muy diferente; en cuanto a las magnitudes de las lluvias, para Isidore fueron muy grandes, pero en corto tiempo, generando un gasto pico del orden de $1,581 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, con respecto a Stan la lluvia tuvo magnitudes menores pero distribuidas en un número mayor de días.

Los resultados de las simulaciones se verificaron con varios puntos levantados en campo, es decir, de las colonias y poblaciones afectadas se tomaron puntos de control referenciando la profundidad del agua que se presentó, Figura 29.

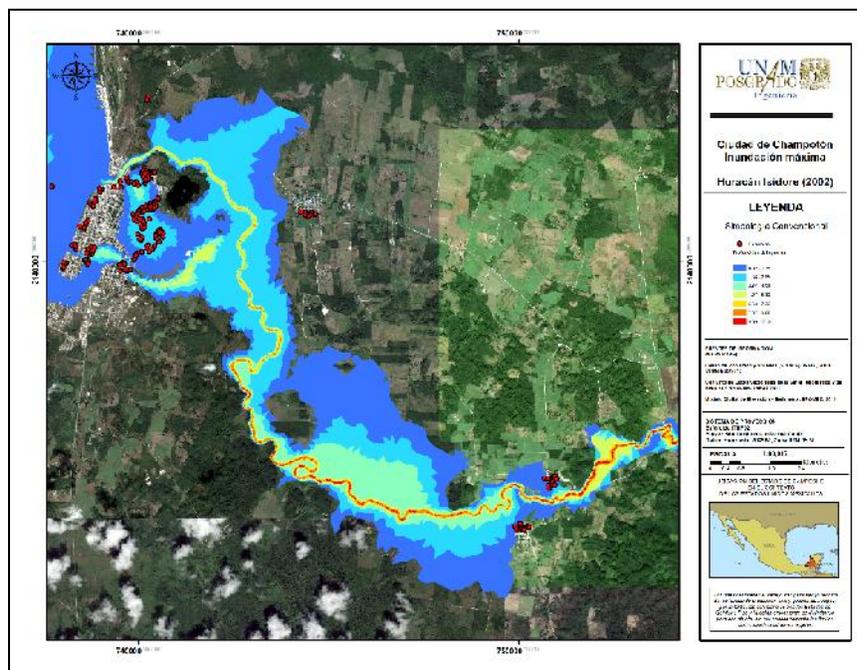


Figura 29. Resultados de la calibración para el huracán Isidore (2002)

5.1.1.2 Análisis hidráulico

Las modelaciones del peligro indican el comportamiento de los parámetros en función de la profundidad del agua, la duración de la inundación y las velocidades. Para el análisis del riesgo en este trabajo se realizaron simulaciones hidráulicas para los hidrogramas de diseño de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años de periodo de retorno (Tr). Para cada celda de la malla generada se obtuvieron los valores máximos, mínimos y medios de los parámetros mencionados.

El comportamiento de las inundaciones se analizará para los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, las modelaciones completas se encuentran en el Anexo 2. Por otro lado, se seleccionaron algunas manzanas que se encuentran ubicadas dentro de colonias que han presentado daños considerables por el desbordamiento del río Champotón, la Figura 30 nos indica la distribución de las colonias.

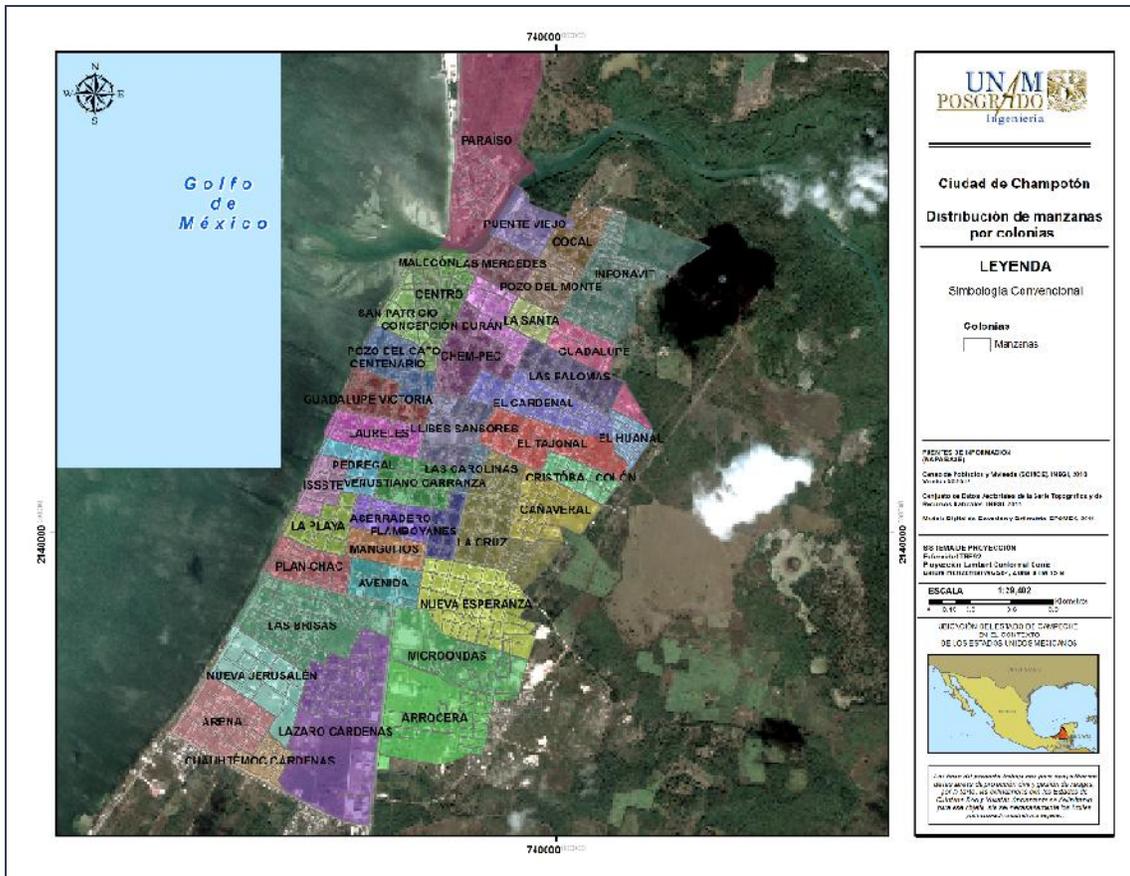


Figura 30. Distribución de las colonias en la ciudad de Champotón

De acuerdo con la Figura 31 se observa que el desbordamiento del río comienza a afectar a la ciudad por la parte Este y coincide que es donde se encuentran las colonias con una elevación topográfica más baja de toda la ciudad, por tal motivo la acumulación del agua dura varios días, hasta que se infiltra y evapora. Las colonias Pozo del Monte, El Cocal y una parte de Infonavit se encuentran ubicadas en un bajo inundable.

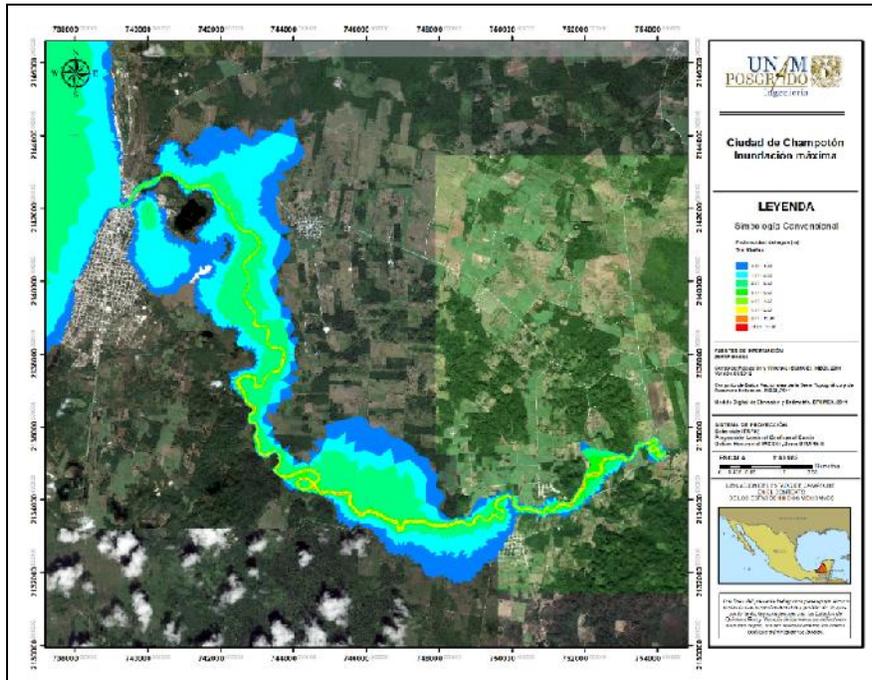


Figura 31. Simulación numérica asociada a un $T_r = 10$ años

El caso de las Colonias El Huanal, Tajonal y Cristobal Colón, que se encuentran ubicadas en los límites de la ciudad, es por donde la inundación comienza a ingresar a la ciudad, los tirantes son del orden de 0.5 m hasta 1 m. Algunas colonias ubicadas sobre la línea de costa como Las Brisas y el Arenal son afectas por la marea astronómica y de tormenta con inundaciones de 0.12 m.

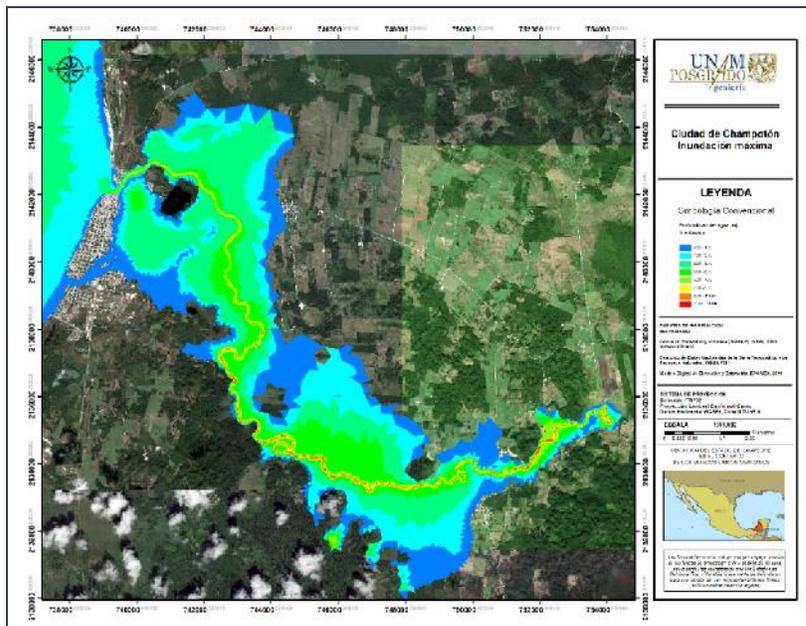


Figura 32. Simulación numérica asociada a un $Tr=50$ años

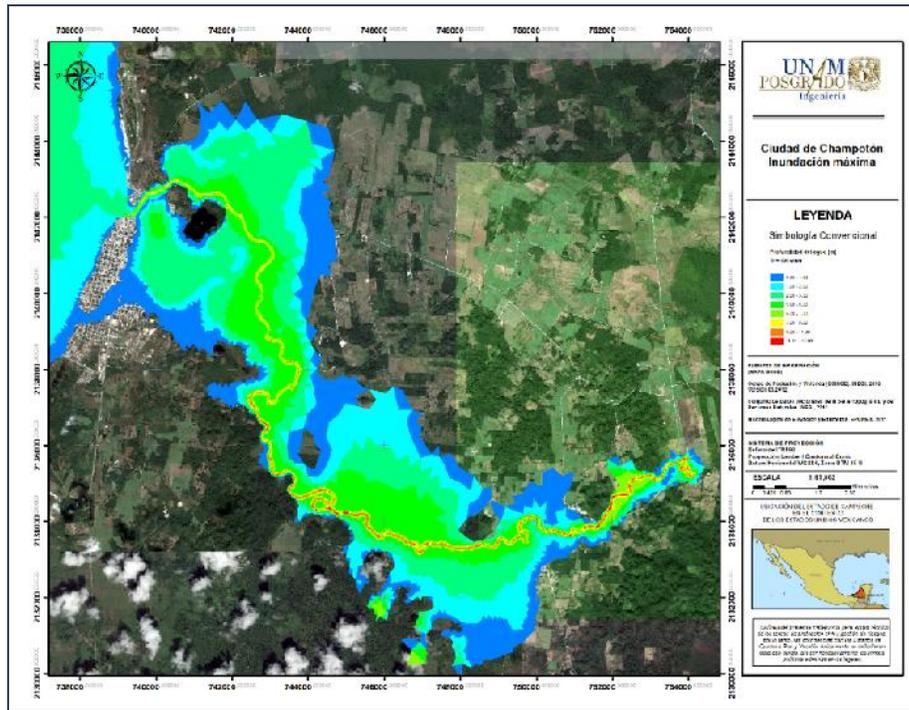


Figura 33. Simulación numérica asociada a un $Tr=100$ años

Comparando las inundaciones para los periodos de retorno de 50 y 100 años se observa que la diferencia entre sus áreas es pequeña ya que la llanura de inundación ha sido abarcada desde el $Tr = 50$ años, sin embargo, los tirantes de inundación si difieren en magnitud. Es importante comentar que el río Champotón tiene una capacidad de conducción asociada a un periodo de retorno entre 5 y 10 años, no está limitado por bordos naturales o artificiales por lo que al comenzar a desbordarse el caudal en sus puntos críticos el área de inundación se extiende rápidamente.

En la Figura 34 se muestra los tirantes que se presentan en puntos sobre diferentes colonias, siendo las colonias Pozo del Monte y Cristobal Colón las que presentan profundidades para un Tr de 100 años de 2.8 a 3.0 m y El Cocal e Infonavit de 1.5 a 2.0 m.

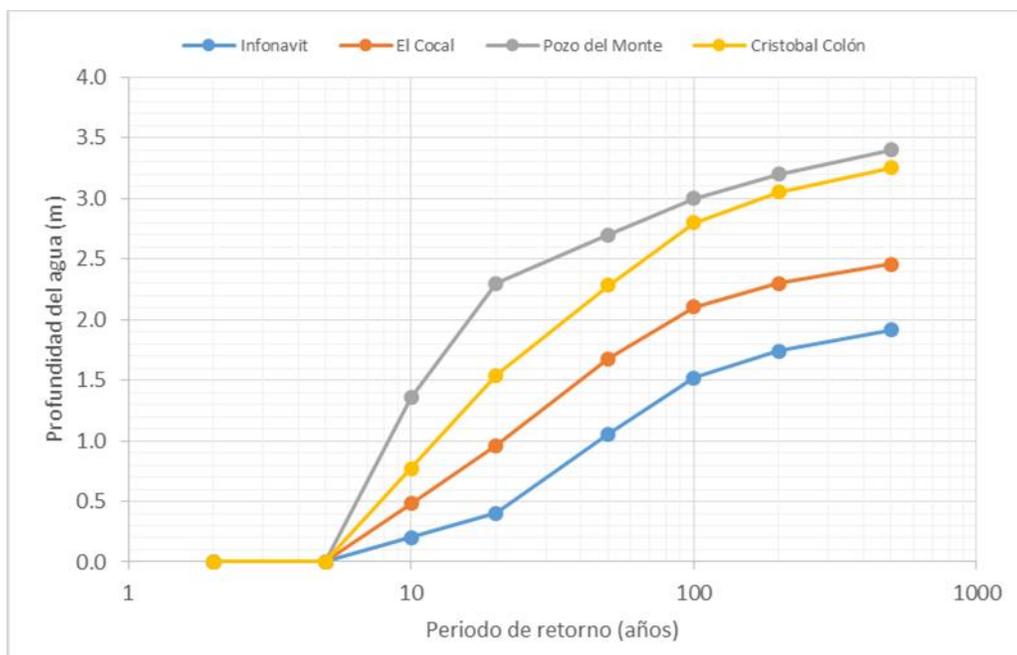


Figura 34. Profundidad del agua vs Periodo de retorno

5.1.2 Funciones de daño

Para construir las funciones de daño y evaluar la vulnerabilidad tanto en las viviendas como en los sectores productivos se realizó, en una primera fase, el trabajo de campo que implicó la recopilación de información, aplicación de encuestas a casa habitación y especialistas del sector agrícola así como la cuantificación de las viviendas susceptibles de inundarse.

La recopilación de información se realizó entrevistando a los responsables de las cabeceras municipales y protección civil locales, ya que en algunos casos proporcionaron información relativa a zonas nuevas con problemas de inundación y la construcción de obras de drenaje. También se obtuvo información sobre la planeación de nuevos sectores destinados para la construcción de viviendas de interés social que no se encontraban actualizados en la cartografía proporcionada por el INEGI y de asentamientos irregulares, incluida en los planes de ordenamiento territorial.

La aplicación de encuestas se realizó principalmente en la cabecera municipal de Champotón y en pequeñas poblaciones ubicadas en las márgenes de los ríos. Esta herramienta permitió hacer un levantamiento del tipo de construcción de las viviendas, de sus contenidos, de los servicios y afectaciones de inundaciones históricas. En la mayoría de los casos se las personas entrevistadas permitieron hacer un registro fotográfico.

5.1.2.1 Trabajo de campo y aplicación de encuestas

La aplicación de la encuesta en Champotón se realizó en el mes de junio de 2012, durante el primer semestre del presente trabajo, la cabecera municipal se encuentra ubicada entre la desembocadura del río Champotón y la línea de costa con coordenadas Longitud -90.72333° y Latitud 19.35555° , sobre el Golfo de México, cuenta 30,881 habitantes (INEGI, 2010).

Se utilizó la aplicación electrónica Isurvey, de la empresa *Harvest Your Data*, por medio de la cual se aplicaron 179 encuestas en la ciudad de Champotón, Figura 35. Por otro lado, también se aplicó la encuesta en las poblaciones cercanas a las llanuras del río o donde se indicó se han presentado inundaciones por el río Champotón, como Moquel, El Zapote, Ulumal, hasta llegar a la población de Canasayab, donde se encuentra la estación hidrométrica, Figura 35 .

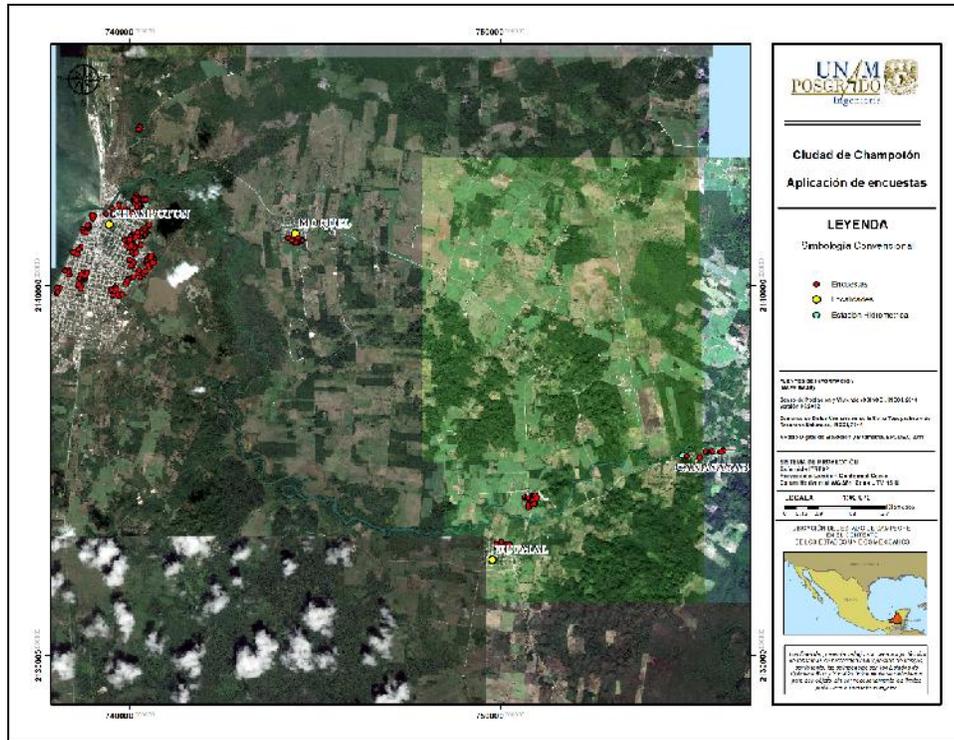
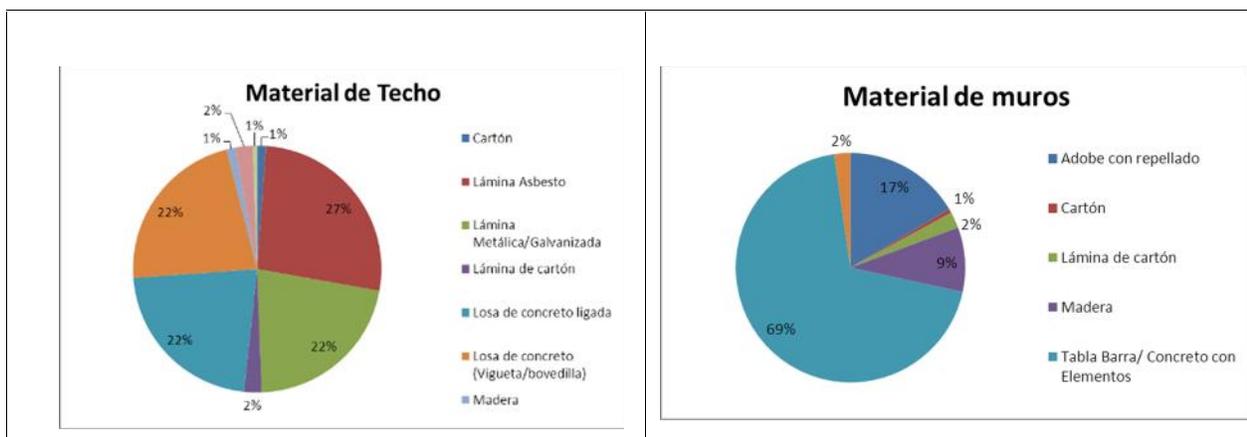


Figura 35. Encuestas aplicadas en la cuenca del río Champotón

5.1.2.2 Características de las viviendas

El proceso para clasificar la vivienda inició con la identificación de los principales materiales de construcción de techos, muros y piso.



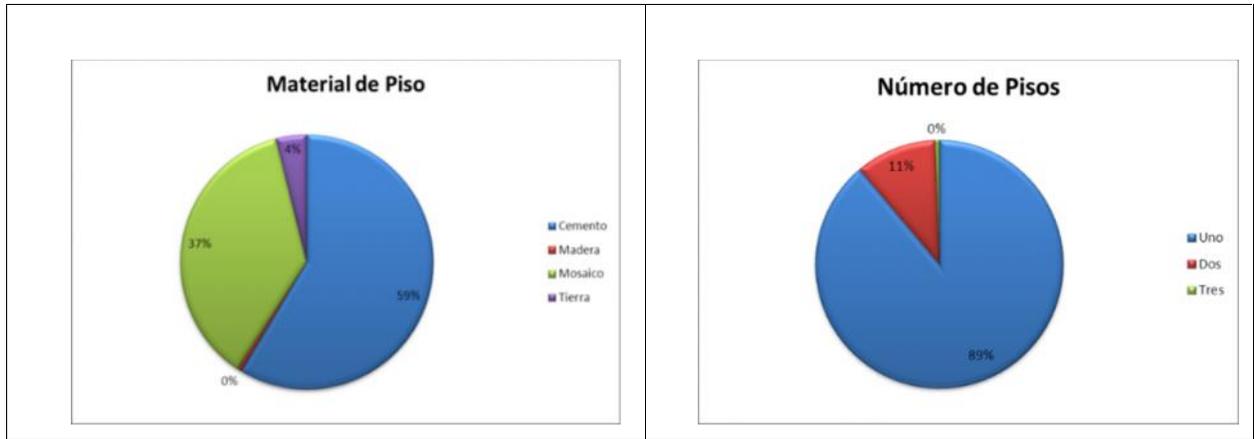


Figura 36. Características de Viviendas Cuenca Champotón

El estudio se complementó con la aplicación de encuestas en las cabeceras municipales, Palizada y Candelaria, de las cuencas de los ríos Palizada y Candelaria, aun cuando no es el objetivo estudiar dichas cuencas la información recaba robustece la base de datos de la región. En total se aplicaron 477 encuestas en zonas de características similares.

Tabla 7. Cantidad de encuestas por municipio

<u>Municipio</u>	<u>Encuestas</u>
<u>Palizada</u>	<u>91</u>
<u>Candelaria</u>	<u>208</u>
<u>Champotón</u>	<u>178</u>
<u>Total</u>	<u>477</u>

De la inspección física que se realizó se determinaron los materiales de construcción más comunes en la zona, en muros (Tabla 8) y techos (Tabla 9).

Tabla 8. Materiales comunes utilizados en muros

No.	Muro
1	Lámina cartón
2	Lámina metal
3	Madera
4	Tabique

Tabla 9. Materiales comunes utilizados en techos.

No.	Techo
1	Lámina cartón
2	Lámina metal
3	Palma
4	Madera

5	Teja
6	Concreto

De las posibles combinaciones que se pueden generar con los materiales anteriores, se determinó con el análisis estadístico de los datos, que existen 7 tipos de casas más comunes.

Tabla 10. Combinaciones más comunes en las zonas de estudio

Casa	Características	
	Muro	Techo
T2	Tabique	Lámina
T3	Tabique	Concreto
T6	Madera	Lámina
T7	Lámina	Madera
T8	Madera	Paja
T9	Lámina	Lámina

Las características constructivas de las viviendas se confirmaron de las visitas en campo, la Tabla 11 nos muestran las características observadas.

Tabla 11. Características constructivas de los tipos de vivienda en las zonas estudio

Tipo	Características de la vivienda	Foto representativa
2	<p>Techo: Flexible (lámina de asbesto, metálica o galvanizada, de cartón).</p> <p>Muro: Mampostería deficiente reforzada con dalas y castillos.</p> <p>Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior insuficiente.</p> <p>Mampostería simple.</p> <p>Adobe.</p> <p>Altura: un nivel.</p>	
3	<p>Techo: Techos y entrepisos rígidos.</p> <p>Muros: Mampostería reforzada con dalas, castillos y repellido.</p> <p>Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior.</p> <p>Altura: de uno a tres niveles.</p>	

<p>6</p>	<p>Techo: Estructura metálica con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera).</p> <p>Flexibles, material de desecho (lámina de cartón, lámina de asbesto o metálica).</p> <p>Muros: De madera con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera)</p> <p>Altura: un nivel.</p>	
<p>7</p>	<p>Techo: De madera con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera).</p> <p>Muros: Estructura metálica con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera).</p> <p>Flexibles, material de desecho (lámina de cartón, lámina de asbesto o metálica).</p> <p>Altura: un nivel.</p>	
<p>8</p>	<p>Techo: Flexibles: material de desecho, lámina de cartón, lámina de asbesto y metálica, palma, tejamanil, bajareque, paja.</p> <p>Muros: De madera con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera)</p> <p>Altura: un nivel.</p>	
<p>9</p>	<p>Techo: Flexibles: material de desecho, lámina de cartón, lámina de asbesto y metálica, palma, tejamanil, bajareque, paja.</p> <p>Estructura metálica con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera).</p> <p>Flexibles, material de desecho (lámina de cartón, lámina de asbesto o metálica).</p> <p>Muros: Estructura metálica con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera).</p> <p>Flexibles, material de desecho (lámina de cartón, lámina de asbesto o metálica).</p> <p>Altura: un nivel.</p>	

Si bien todos los tipos de vivienda de la Tabla 11 se encontraron en el recorrido en campo, los cómo se explicará más adelante, los tipos 2, 3 y 6 son los tipos de vivienda más

representativos en la zona de estudio, por lo tanto, se abordará la caracterización de contenidos para este tipo de casas.

5.1.2.3 Contenidos

Posteriormente al análisis del tipo de vivienda en función de los materiales se realizó el análisis de los contenidos o menaje, identificando para cada tipo de vivienda en promedio cual era la configuración de sus contenidos, así como los daños ante la última inundación acontecida, Figura 39. En el Anexo 3 se encuentra el análisis detallado de los contenidos.

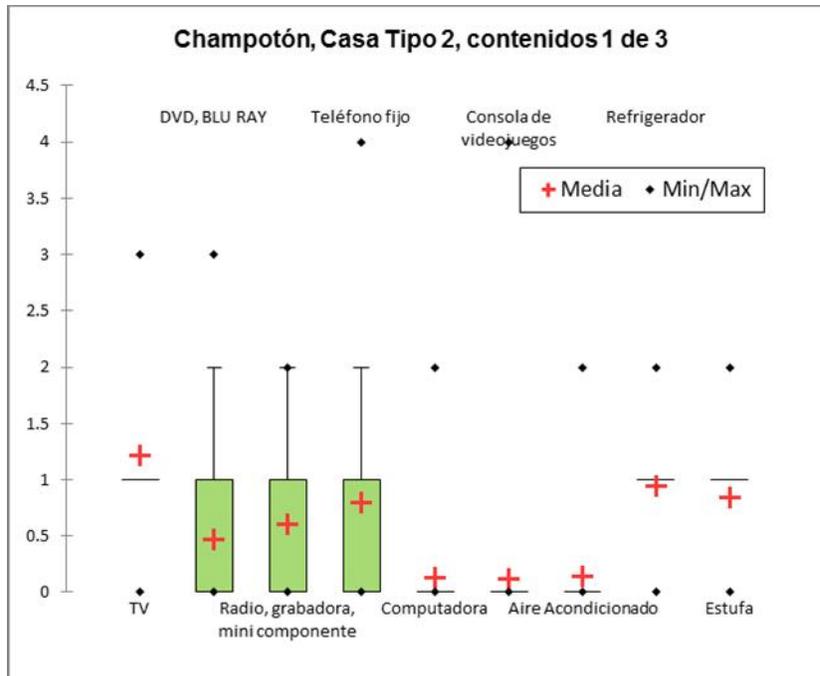


Figura 37. Contenidos parciales para vivienda tipo 2, ciudad de Champotón

Con base en las figuras anteriores se observa que los contenidos en las viviendas tipo 2 y 3 son muy similares, encontrándose una mayor cantidad de contenidos en la vivienda tipo 3 (techo: concreto, muro tabique). Independiente del tipo de vivienda, se observa que todas cuentan con televisor y refrigerador.

Para determinar el número de enseres típico asociado al tipo de vivienda se realizó el promedio simple de cada uno de éstos redondeando al entero superior, con la finalidad de obtener la configuración del menaje por tipo de vivienda. De la Tabla 12, a la Tabla 14 se presenta el análisis para los contenidos de las viviendas 2, 3 y 6.

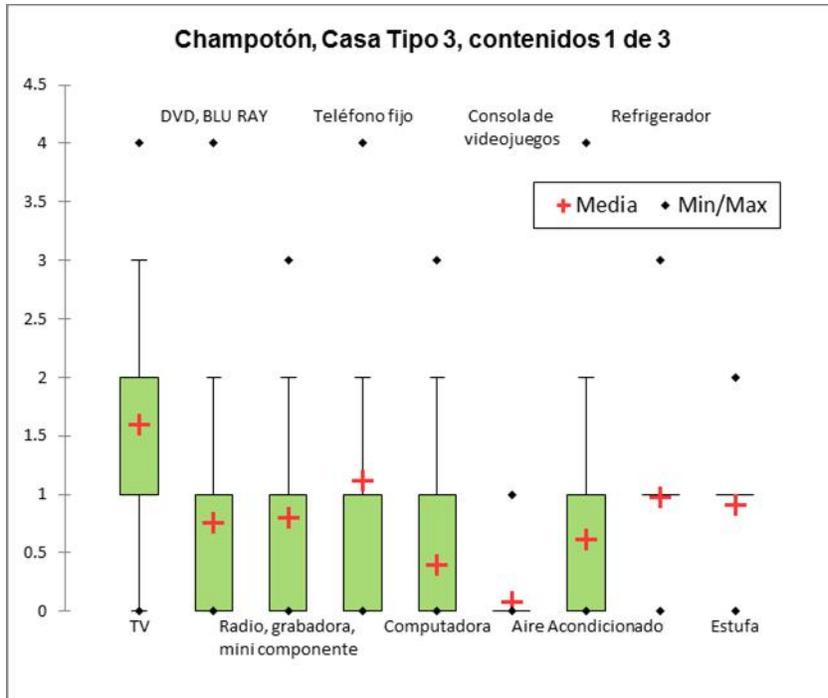


Figura 38. Contenidos parciales para vivienda tipo 3, ciudad de Champotón

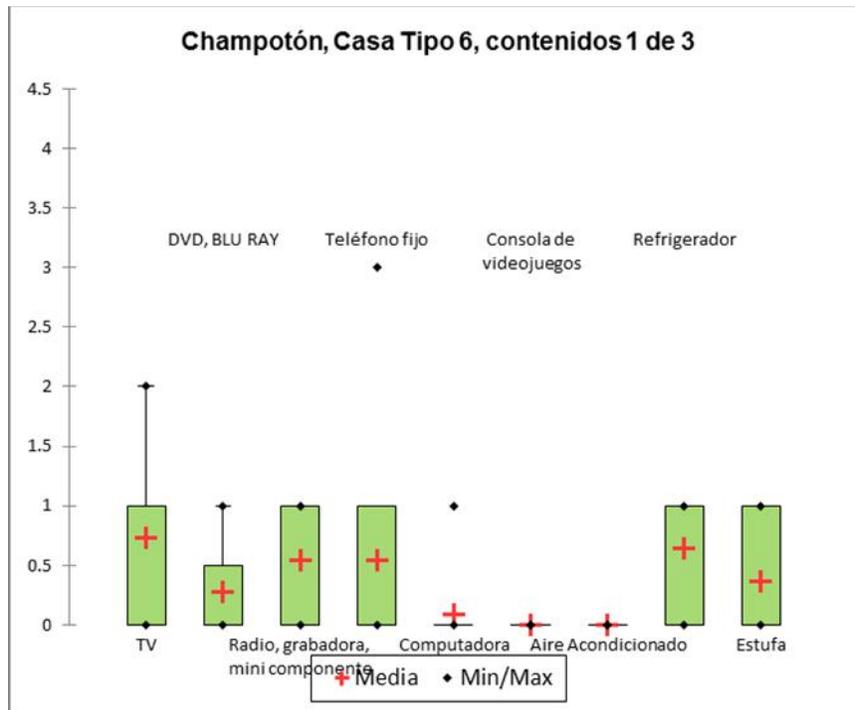


Figura 39. Contenidos parciales para vivienda tipo 6, ciudad de Champotón

Tabla 12. Análisis de contenidos para vivienda Tipo 2. Champotón, México

Vivienda Tipo 2					
Análisis de Contenidos					
		TOTAL	Total ENC	%	Cantidad
Numeral	ELECTRODOMÉSTICOS				
13.01	TV	119	98	121.43%	1.00
13.02	DVD, BLU RAY	46	98	46.94%	0.00
13.03	Radio, grabadora, mini componente	59	98	60.20%	1.00
13.04	Teléfono fijo	78	98	79.59%	1.00
13.05	Computadora	13	98	13.27%	0.00
13.06	Consola de videojuegos	11	98	11.22%	0.00
13.07	Ventiladores	228	98	232.65%	2.00
13.08	Aire Acondicionado	14	98	14.29%	0.00
13.09	Refrigerador	92	98	93.88%	1.00
13.1	Estufa	83	98	84.69%	1.00
13.11	Horno de Microondas	29	98	29.59%	0.00
13.12	Licuada	72	98	73.47%	1.00
13.13	Lavadora	80	98	81.63%	1.00
Otros	Sky	0	98	0.00%	0.00
	MUEBLES	0	98	0.00%	0.00
13.14	Sala	51	98	52.04%	1.00
13.15	Comedor	65	98	66.33%	1.00
13.16	Sillas	483	98	492.86%	5.00
13.17	Mesas	136	98	138.78%	1.00
13.18	Sofá	57	98	58.16%	1.00
13.19	Camas	159	98	162.24%	2.00
13.2	Colchón	91	98	92.86%	1.00
13.21	Catres	4	98	4.08%	0.00
13.22	Roperos/Armarios	89	98	90.82%	1.00
13.23	Libreros	30	98	30.61%	0.00
13.24	Vitrinas	25	98	25.51%	0.00
13.25	Alacenas	28	98	28.57%	0.00
13.26	Muebles de baño	89	98	90.82%	1.00
Otros	Fosa	0	98	0.00%	0.00
	Drenaje	0	98	0.00%	0.00
	Letrina	0	98	0.00%	0.00
	Tocador	0	98	0.00%	0.00

Tabla 13. Análisis de contenidos para vivienda Tipo 3. Champotón, México

Vivienda Tipo 3					
Análisis de Contenidos					
		TOTAL	Total ENC	%	Cantidad
Numeral	ELECTRODOMÉSTICOS				
13.01	TV	102	64	159.38%	2.00
13.02	DVD, BLU RAY	48	64	75.00%	1.00
13.03	Radio, grabadora, mini componente	51	64	79.69%	1.00
13.04	Teléfono fijo	71	64	110.94%	1.00
13.05	Computadora	25	64	39.06%	0.00
13.06	Consola de videojuegos	5	64	7.81%	0.00
13.07	Ventiladores	163	64	254.69%	3.00
13.08	Aire Acondicionado	39	64	60.94%	1.00
13.09	Refrigerador	62	64	96.88%	1.00
13.1	Estufa	58	64	90.63%	1.00
13.11	Horno de Microondas	26	64	40.63%	0.00
13.12	Licuada	48	64	75.00%	1.00
13.13	Lavadora	57	64	89.06%	1.00
Otros	Sky	21	64	32.81%	0.00
	MUEBLES		64	0.00%	0.00
13.14	Sala	45	64	70.31%	1.00
13.15	Comedor	48	64	75.00%	1.00
13.16	Sillas	328	64	512.50%	5.00
13.17	Mesas	115	64	179.69%	2.00
13.18	Sofá	55	64	85.94%	1.00
13.19	Camas	113	64	176.56%	2.00
13.2	Colchón	71	64	110.94%	1.00
13.21	Catres	10	64	15.63%	0.00
13.22	Roperos/Armarios	89	64	139.06%	1.00
13.23	Libreros	30	64	46.88%	0.00
13.24	Vitrinas	18	64	28.13%	0.00
13.25	Alacenas	31	64	48.44%	0.00
13.26	Muebles de baño	64	64	100.00%	1.00
Otros	Fosa	0	64	0.00%	0.00
	Drenaje	0	64	0.00%	0.00
	Letrina	0	64	0.00%	0.00
	Tocador	35	64	54.69%	1.00

Tabla 14. Análisis de contenidos para vivienda Tipo 6. Champotón, México

Vivienda Tipo 6					
Análisis de Contenidos					
Numeral		TOT AL	Total ENC	%	Cantid ad
	ELECTRODOMÉSTICOS				
13.01	TV	8	11	72.73%	1.00
13.02	DVD, BLU RAY	3	11	27.27%	0.00
13.03	Radio, grabadora, mini componente	6	11	54.55%	1.00
13.04	Teléfono fijo	6	11	54.55%	1.00
13.05	Computadora	1	11	9.09%	0.00
13.06	Consola de videojuegos	0	11	0.00%	0.00
13.07	Ventiladores	20	11	181.82%	2.00
13.08	Aire Acondicionado	0	11	0.00%	0.00
13.09	Refrigerador	7	11	63.64%	1.00
13.1	Estufa	4	11	36.36%	0.00
13.11	Horno de Microondas	2	11	18.18%	0.00
13.12	Licuada	5	11	45.45%	0.00
13.13	Lavadora	4	11	36.36%	0.00
Otros	Sky				
	MUEBLES				
13.14	Sala	1	11	9.09%	0.00
13.15	Comedor	1	11	9.09%	0.00
13.16	Sillas	28	11	254.55%	3.00
13.17	Mesas	13	11	118.18%	1.00
13.18	Sofá	2	11	18.18%	0.00
13.19	Camas	12	11	109.09%	1.00
13.2	Colchón	11	11	100.00%	1.00
13.21	Catres	2	11	18.18%	0.00
13.22	Roperos/Armarios	3	11	27.27%	0.00
13.23	Libreros	2	11	18.18%	0.00
13.24	Vitrinas	1	11	9.09%	0.00
13.25	Alacenas	4	11	36.36%	0.00
13.26	Muebles de baño	6	11	54.55%	1.00
Otros	Fosa	0	11	0.00%	0.00
	Drenaje	0	11	0.00%	0.00
	Letrina	0	11	0.00%	0.00
	Tocador	0	11	0.00%	0.00

En la Figura 40 se esquematiza el menaje de cada tipo de vivienda, cada enser se encuentra ubicado a la altura que en general se ubica en una casa, el dibujo está a escala. Esta información se utilizó para determinar el porcentaje de daño en función de la profundidad del agua.

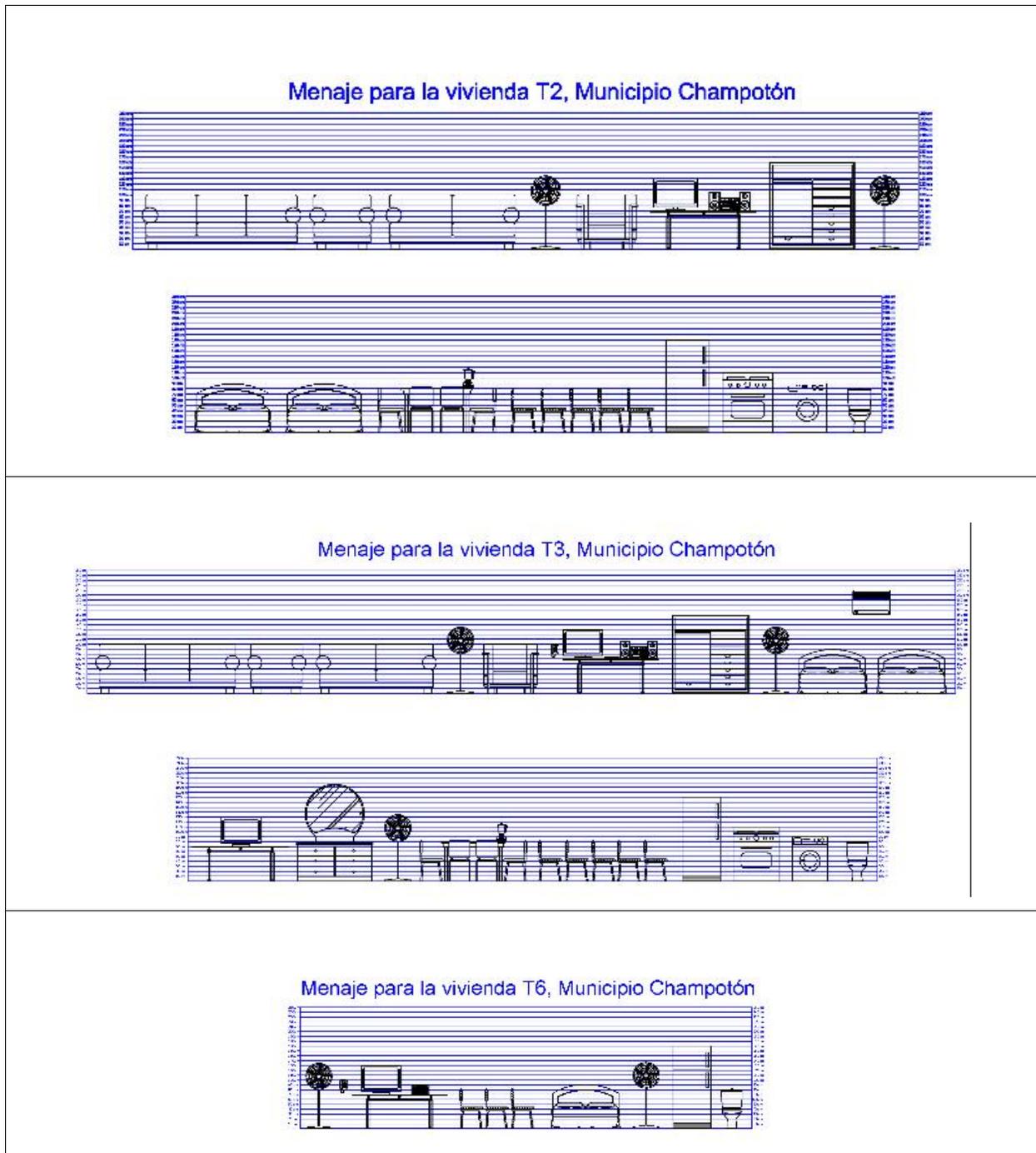


Figura 40. Características de los contenidos en función del tipo de vivienda, Champotón

5.1.2.4 Funciones de vulnerabilidad para viviendas

Las funciones de vulnerabilidad van de 0 a 1, donde 1 implica daño total de los contenidos. En las figuras se observa que el porcentaje de daño mayor se presenta entre 20 cm y 1.20 m, ya que todos los tipos de viviendas son de 1 piso y una inundación con una profundidad del orden de 1 m dañaría la mayoría de los electrodomésticos. Figura 41 a Figura 43

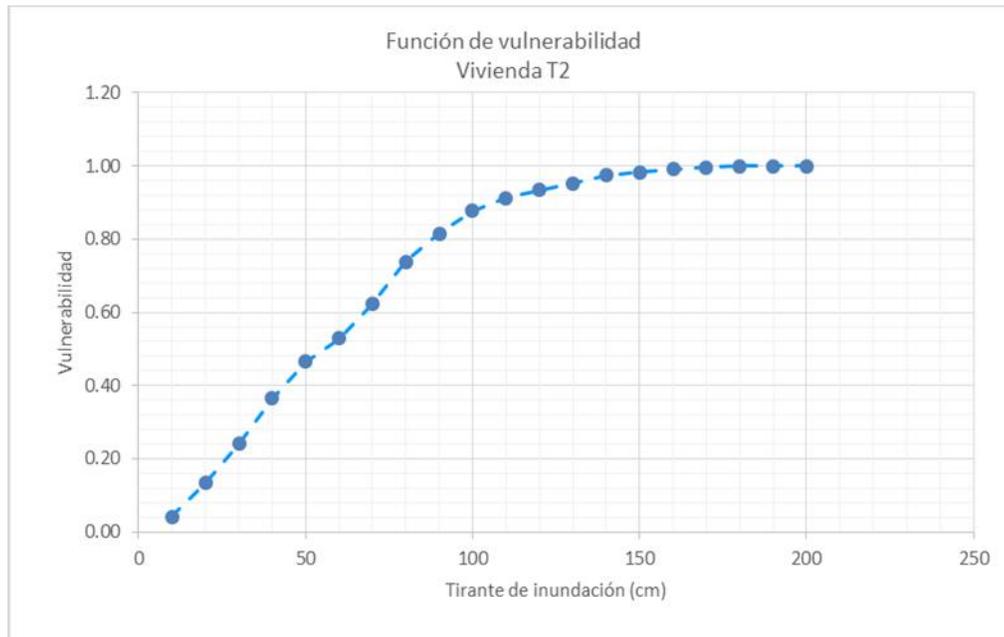


Figura 41. Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo 2. Ciudad de Champotón

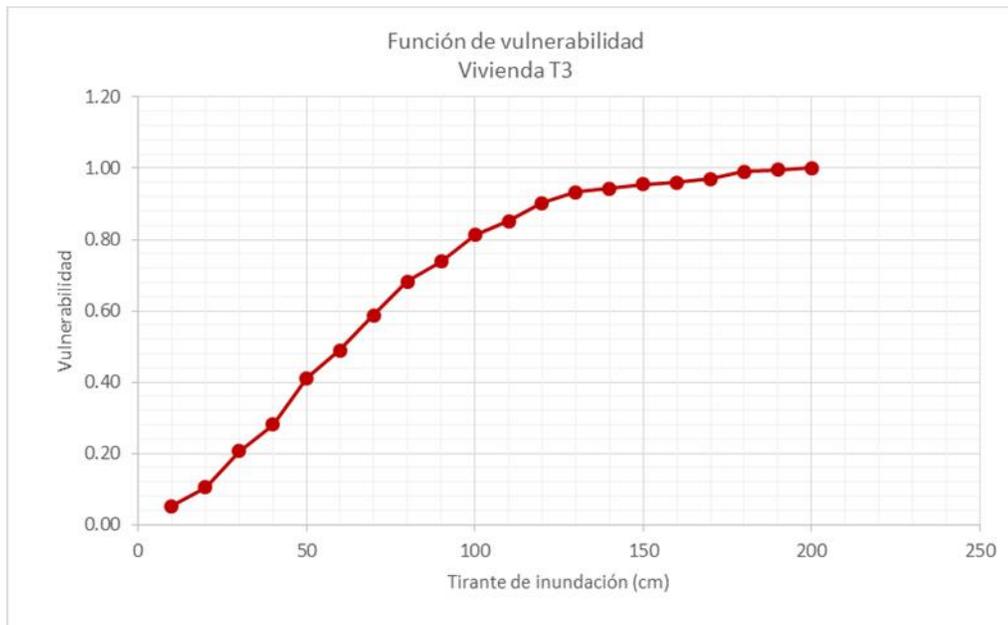


Figura 42. Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo 3. Ciudad de Champotón

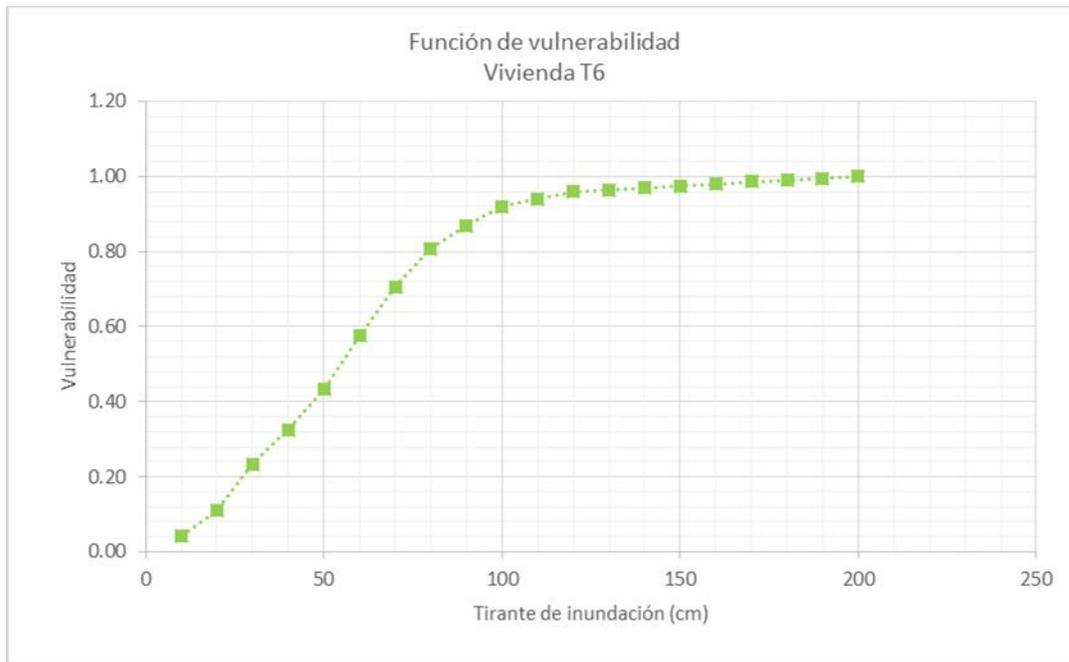


Figura 43. Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo 6. Ciudad de Champotón

5.1.3 Exposición

Para determinar la exposición de las viviendas se combinaron 4 procedimientos diferentes:

1) Utilizando la cartografía del INEGI. Para determinar las Áreas Geoestadísticas Básicas, (AGEB's) de las zonas analizadas para una valoración gruesa del daño.

2) Levantamiento con GPS. En aquellos casos en donde no era posible tener información a nivel de vivienda, localidades rurales y viviendas en las orillas de los cauces, se realizaron los levantamientos mediante un GPS, en los recorridos se obtuvieron las características físicas de la vivienda.

3) Street View de Google Earth. En el caso de ciudades principales en donde no se tenía información disponible del INEGI y para optimizar recursos monetarios se utilizó esta herramienta pues permite hacer el levantamiento de manera virtual. Cabe señalar que no se aplicó para poblaciones pequeñas pues este servicio no está disponible en la mayoría de estos casos.

4) SCINCE 2010 del INEGI. Contiene información de los materiales de techo, muro y piso así como también de algunos de los contenidos.

La exposición se considera como la cantidad de bienes que pueden ser afectadas agrupadas por cada uno de los tipos de construcción presentes en una zona de afectación (Guevara Ortiz 2006). En la Figura 44 se muestra cantidad total de viviendas en cada manzana de la ciudad de Champotón.

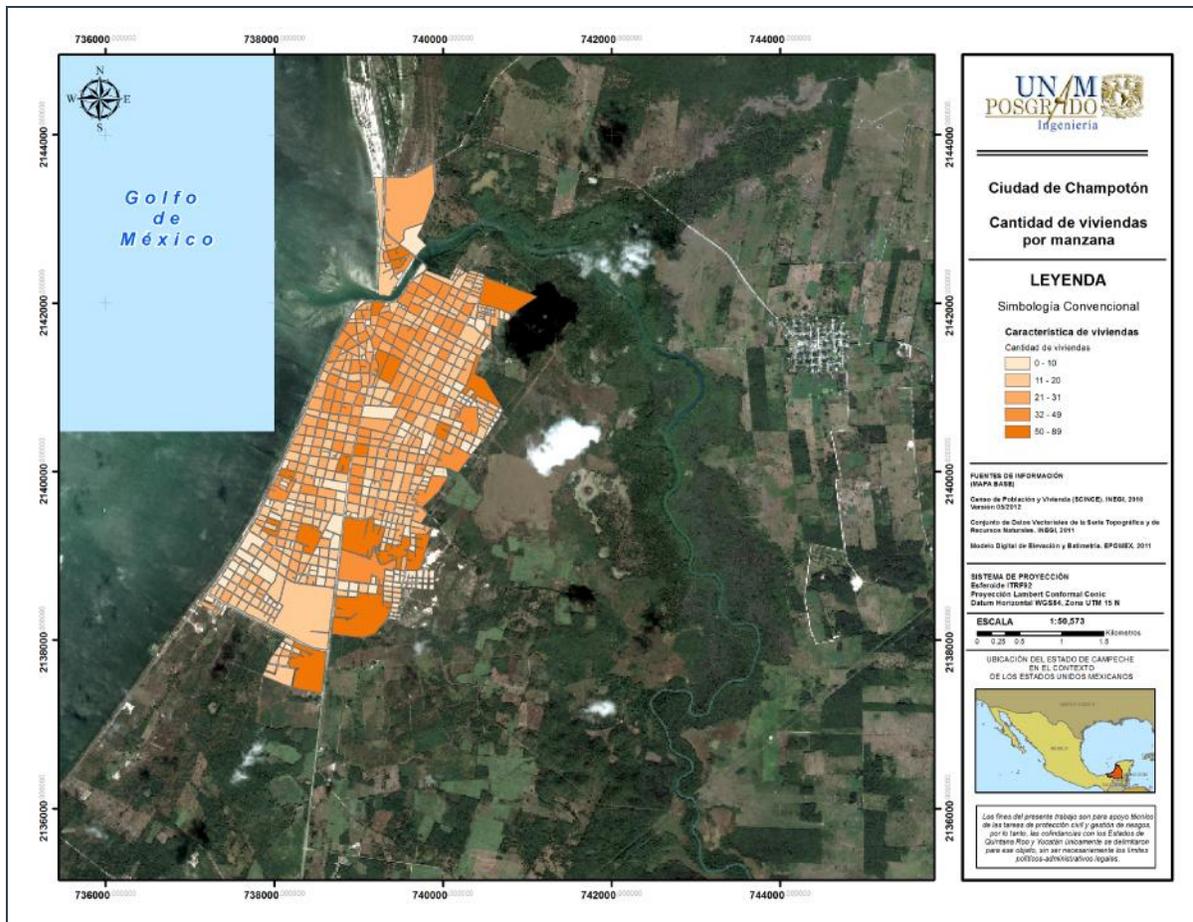


Figura 44. Identificación de cantidad de casas por manzana, Ciudad de Champotón

Para el análisis de la exposición se cuantificaron las viviendas por manzana, de la inspección en campo se observaron algunos aspectos importantes, entre ellos que aun cuando existe una delimitación por colonia, éstas no están estratificadas por el factor socioeconómico, por lo tanto, en una misma colonia a nivel de manzana se pueden encontrar viviendas contiguas de vulnerabilidad diferente, es posible encontrar casas de material de desecho junto a una casa de materiales de techo de concreto y muros de tabique, Figura 45. Por lo anterior, cada manzana se clasificó en función del tipo de vivienda más representativo, de acuerdo con el número máximo de casas de cada tipo, Figura 46.

El caso de las colonias El Hualal y Guadalupe es importante, ya que durante el huracán Isidore en 2002, la inundación que se presentó fue de más de 2m y en ese tiempo eran asentamientos irregulares, 15 años después son colonias totalmente establecidas con viviendas construidas con materiales formales, a pesar de que no se ha realizado ninguna obra civil que mitigue el riesgo.

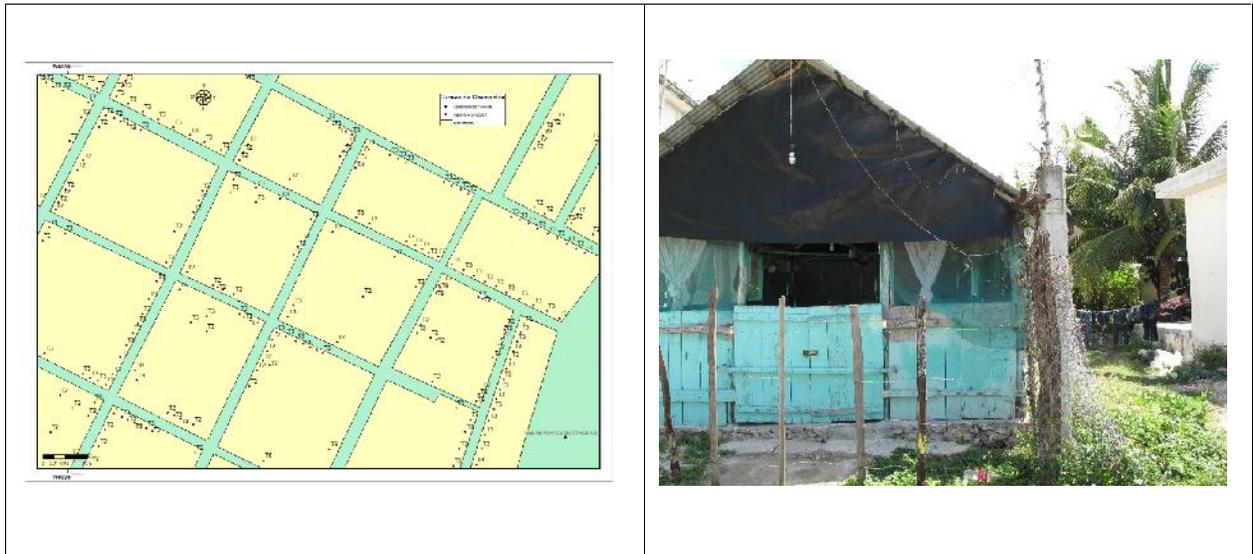


Figura 45. Tipos de vivienda en una manzana de la ciudad d Champotón

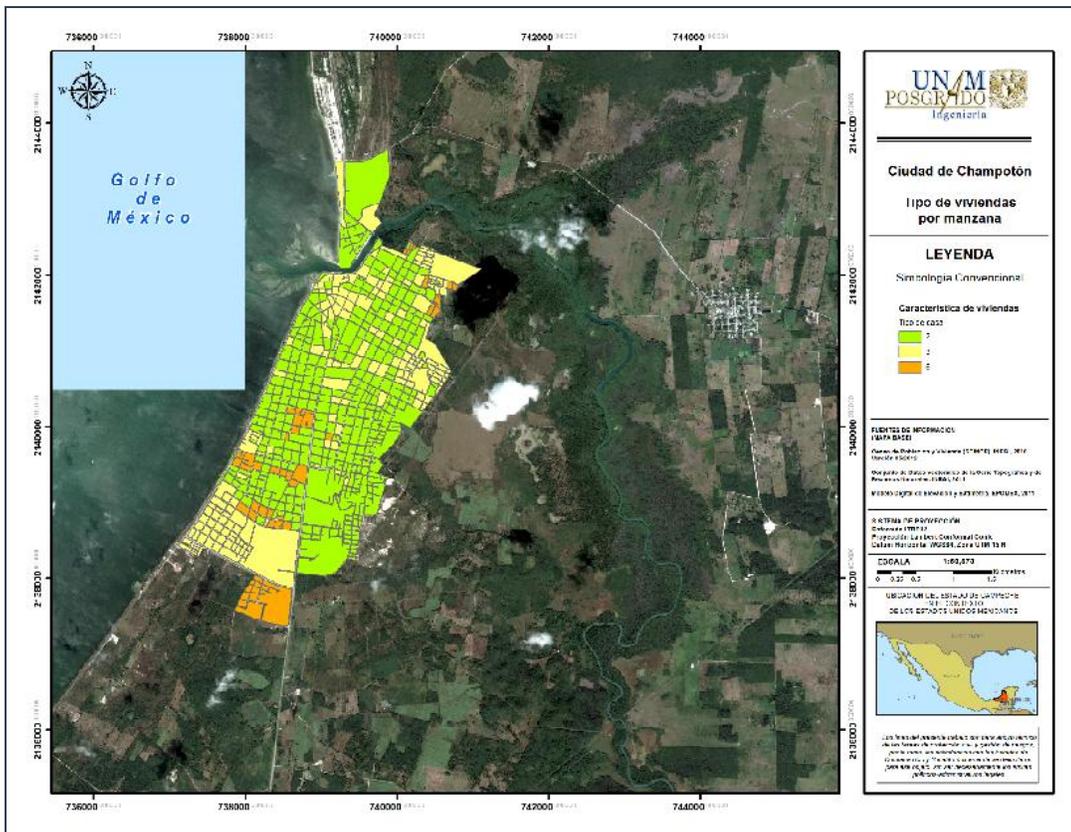


Figura 46. Clasificación de manzanas por tipo de vivienda representativo

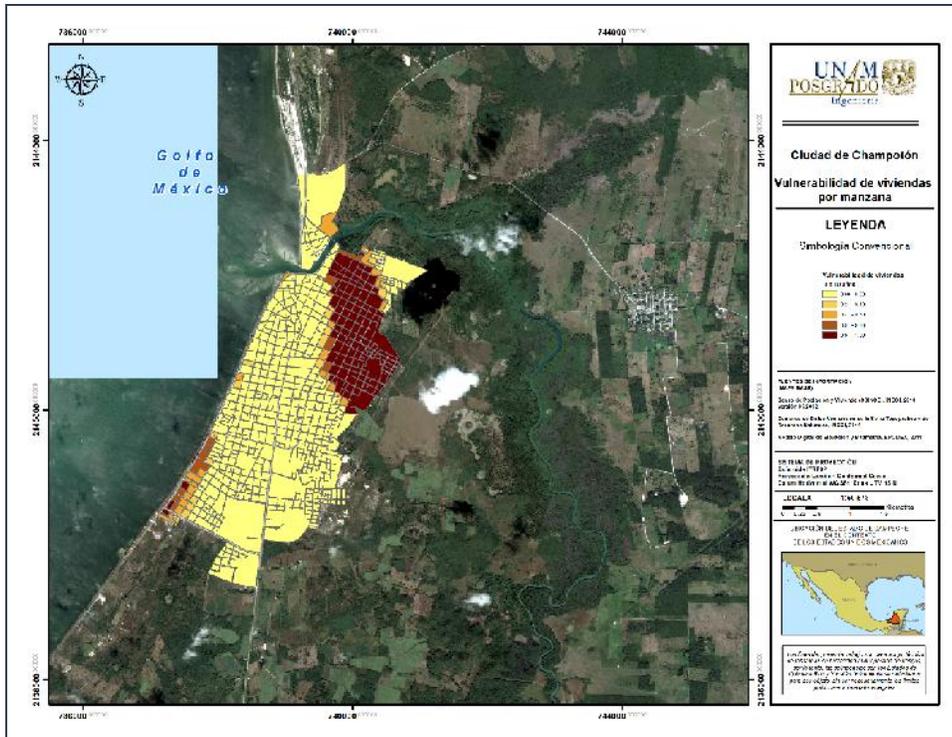


Figura 47. Vulnerabilidad de las viviendas en Champotón. Tr = 10 años

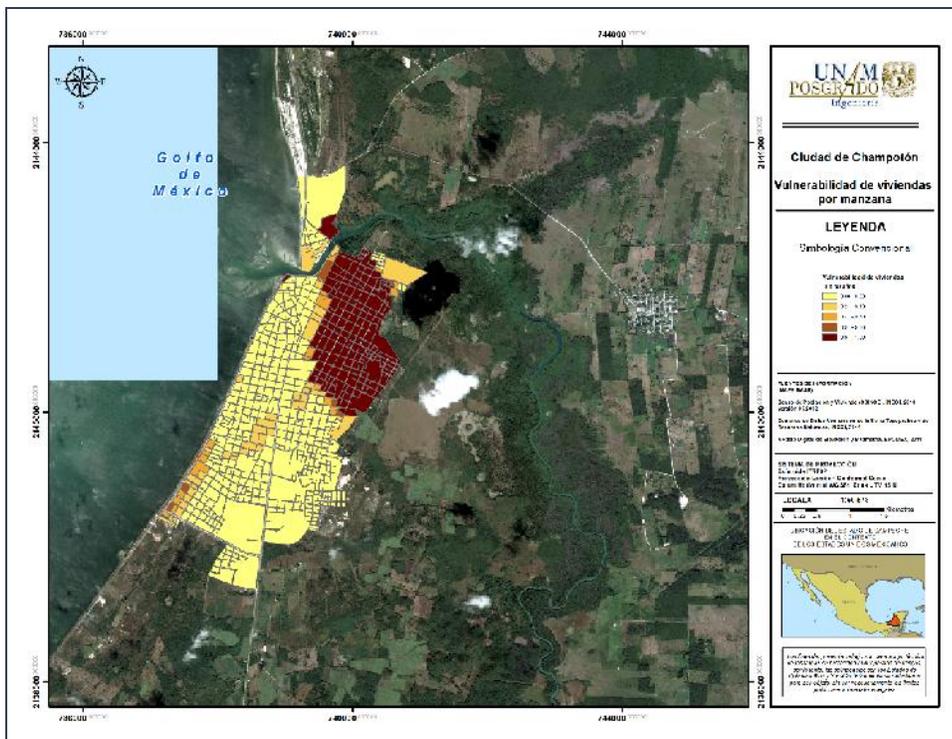


Figura 48. Vulnerabilidad de las viviendas en Champotón. Tr = 50 años

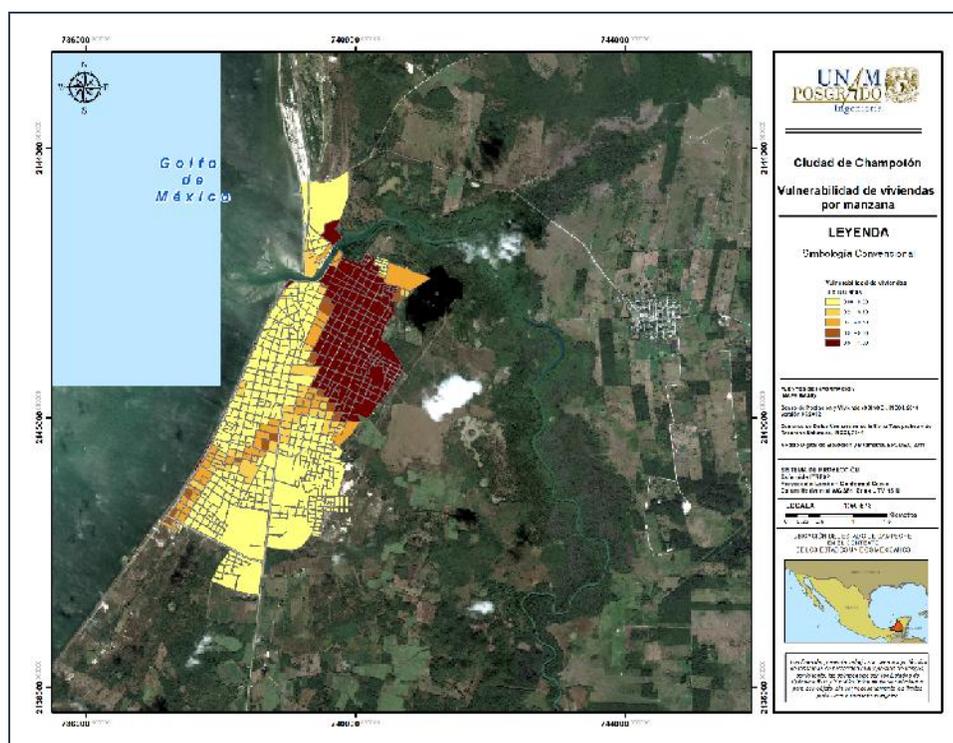


Figura 49. Vulnerabilidad de las viviendas en Champotón. Tr = 100 años

5.1.3.1 Valor de los bienes expuestos

En las siguientes tablas se indica el costo de contenidos para cada tipo de casa, actualizado al 2017, realizado a partir de un estudio de mercado en los dos almacenes principales donde los habitantes de Champotón adquieren sus bienes, Tabla 15 a Tabla 17.

Tabla 15. Análisis de costos para vivienda Tipo 2. Champotón, México.

Vivienda Tipo 2										
Análisis de Contenidos						Análisis de costos de contenidos				
Numeral	ELECTRODOMÉSTICOS	TOTAL	Total ENC	%	Cantidad	Elektra		Coppel		Promedio (\$)
						\$ Unitario	Costo total	\$ Unitario	Costo total	
13.01	TV	119	98	121.43%	1.00	9000	9000	9700	9700	9350
13.02	DVD, BLU RAY	46	98	46.94%	0.00	1700	0	1800	0	0
13.03	Radio, grabadora, mini componente	59	98	60.20%	1.00	3749	3749	4000	4000	3874.5
13.04	Teléfono fijo	78	98	79.59%	1.00	369	369	400	400	384.5
13.05	Computadora	13	98	13.27%	0.00	9599	0	10599	0	0
13.06	Consola de videojuegos	11	98	11.22%	0.00	7999	0	8500	0	0
13.07	Ventiladores	228	98	232.65%	2.00	850	1700	1800	3600	2650

13.08	Aire Acondicionado	14	98	14.29%	0.00	6500	0	7000	0	0
13.09	Refrigerador	92	98	93.88%	1.00	8999	8999	9000	9000	8999.5
13.1	Estufa	83	98	84.69%	1.00	4800	4800	7000	7000	5900
13.11	Horno de Microondas	29	98	29.59%	0.00	2000	0	2600	0	0
13.12	Licuadaora	72	98	73.47%	1.00	800	800	1100	1100	950
13.13	Lavadora	80	98	81.63%	1.00	9500	9500	8000	8000	8750
Otros	Sky	0	98	0.00%	0.00		0		0	0
	MUEBLES	0	98	0.00%	0.00		0		0	0
13.14	Sala	51	98	52.04%	1.00	10000	10000	9200	9200	9600
13.15	Comedor	65	98	66.33%	1.00	9000	9000	8000	8000	8500
13.16	Sillas	483	98	492.86%	5.00	350	1750	300	1500	1625
13.17	Mesas	136	98	138.78%	1.00	1700	1700	1500	1500	1600
13.18	Sofá	57	98	58.16%	1.00	5200	5200	3700	3700	4450
13.19	Camas	159	98	162.24%	2.00	4000	8000	4500	9000	8500
13.2	Colchón	91	98	92.86%	1.00	3500	3500	4000	4000	3750
13.21	Catres	4	98	4.08%	0.00	2500	0	2300	0	0
13.22	Roperos/Armarios	89	98	90.82%	1.00	4000	4000	4400	4400	4200
13.23	Libreros	30	98	30.61%	0.00	3000	0	1700	0	0
13.24	Vitrinas	25	98	25.51%	0.00	5000	0	3500	0	0
13.25	Alacenas	28	98	28.57%	0.00	4000	0	3400	0	0
13.26	Muebles de baño	89	98	90.82%	1.00	4000	4000	4000	4000	4000
Otros	Fosa	0	98	0.00%	0.00		0		0	0
	Drenaje	0	98	0.00%	0.00		0		0	0
	Letrina	0	98	0.00%	0.00		0		0	0
	Tocador	0	98	0.00%	0.00	4000	0	4000	0	0
Total							86067		88100	87083.5

Tabla 16. Análisis de costos para vivienda Tipo 3. Champotón, México

Vivienda Tipo 3										
Análisis de Contenidos						Análisis de costos de contenidos				
Numer al	ELECTRODOMÉSTICOS	TOTAL	Total ENC	%	Cantid ad	Elektra		Coppel		Promedio (\$)
						\$ Unitario	Costo total	\$ Unitario	Costo total	
13.01	TV	102	64	159.38 %	2.00	9000	18000	9700	19400	18700
13.02	DVD, BLU RAY	48	64	75.00%	1.00	1700	1700	1800	1800	1750
13.03	Radio, grabadora, mini componente	51	64	79.69%	1.00	3749	3749	4000	4000	3874.5
13.04	Teléfono fijo	71	64	110.94 %	1.00	369	369	400	400	384.5
13.05	Computadora	25	64	39.06%	0.00	9599	0	10599	0	0
13.06	Consola de videojuegos	5	64	7.81%	0.00	7999	0	8500	0	0
13.07	Ventiladores	163	64	254.69 %	3.00	850	2550	1800	5400	3975

13.08	Aire Acondicionado	39	64	60.94%	1.00	6500	6500	7000	7000	6750
13.09	Refrigerador	62	64	96.88%	1.00	8999	8999	9000	9000	8999.5
13.1	Estufa	58	64	90.63%	1.00	4800	4800	7000	7000	5900
13.11	Horno de Microondas	26	64	40.63%	0.00	2000	0	2600	0	0
13.12	Licudadora	48	64	75.00%	1.00	800	800	1100	1100	950
13.13	Lavadora	57	64	89.06%	1.00	9500	9500	8000	8000	8750
Otros	Sky	21	64	32.81%	0.00					
	MUEBLES		64	0.00%	0.00		0		0	0
13.14	Sala	45	64	70.31%	1.00	10000	10000	9200	9200	9600
13.15	Comedor	48	64	75.00%	1.00	9000	9000	8000	8000	8500
13.16	Sillas	328	64	512.50 %	5.00	350	1750	300	1500	1625
13.17	Mesas	115	64	179.69 %	2.00	1700	3400	1500	3000	3200
13.18	Sofá	55	64	85.94%	1.00	5200	5200	3700	3700	4450
13.19	Camas	113	64	176.56 %	2.00	4000	8000	4500	9000	8500
13.2	Colchón	71	64	110.94 %	1.00	3500	3500	4000	4000	3750
13.21	Catres	10	64	15.63%	0.00	2500	0	2300	0	0
13.22	Roperos/Armarios	89	64	139.06 %	1.00	4000	4000	4400	4400	4200
13.23	Libreros	30	64	46.88%	0.00	3000	0	1700	0	0
13.24	Vitrinas	18	64	28.13%	0.00	5000	0	3500	0	0
13.25	Alacenas	31	64	48.44%	0.00	4000	0	3400	0	0
13.26	Muebles de baño	64	64	100.00 %	1.00	4000	4000	4000	4000	4000
Otros	Fosa	0	64	0.00%	0.00		0		0	0
	Drenaje	0	64	0.00%	0.00		0		0	0
	Letrina	0	64	0.00%	0.00		0		0	0
	Tocador	35	64	54.69%	1.00	4000	4000	4000	4000	4000
Total							109817		109900	107858.5

Tabla 17. Análisis de costos para vivienda Tipo 6. Champotón, México

Vivienda Tipo 6										
Análisis de Contenidos						Análisis de costos de contenidos				
Numeral	ELECTRODOMÉSTICOS	TOTAL	Total ENC	%	Cantidad	Elektra		Coppel		Promedio (\$)
						\$ Unitario	Costo total	\$ Unitario	Costo total	
13.01	TV	8	11	72.73%	1.00	9000	9000	9700	9700	9350
13.02	DVD, BLU RAY	3	11	27.27%	0.00	1700	0	1800	0	0
13.03	Radio, grabadora, mini componente	6	11	54.55%	1.00	3749	3749	4000	4000	3874.5
13.04	Teléfono fijo	6	11	54.55%	1.00	369	369	400	400	384.5
13.05	Computadora	1	11	9.09%	0.00	9599	0	10599	0	0
13.06	Consola de videojuegos	0	11	0.00%	0.00	7999	0	8500	0	0

13.07	Ventiladores	20	11	181.82%	2.00	850	1700	1800	3600	2650
13.08	Aire Acondicionado	0	11	0.00%	0.00	6500	0	7000	0	0
13.09	Refrigerador	7	11	63.64%	1.00	8999	8999	9000	9000	8999.5
13.1	Estufa	4	11	36.36%	0.00	4800	0	7000	0	0
13.11	Horno de Microondas	2	11	18.18%	0.00	2000	0	2600	0	0
13.12	Licuada	5	11	45.45%	0.00	800	0	1100	0	0
13.13	Lavadora	4	11	36.36%	0.00	9500	0	8000	0	0
Otros	Sky									
	MUEBLES									
13.14	Sala	1	11	9.09%	0.00	10000	0	9200	0	0
13.15	Comedor	1	11	9.09%	0.00	9000	0	8000	0	0
13.16	Sillas	28	11	254.55%	3.00	350	1050	300	900	975
13.17	Mesas	13	11	118.18%	1.00	1700	1700	1500	1500	1600
13.18	Sofá	2	11	18.18%	0.00	5200	0	3700	0	0
13.19	Camas	12	11	109.09%	1.00	4000	4000	4500	4500	4250
13.2	Colchón	11	11	100.00%	1.00	3500	3500	4000	4000	3750
13.21	Catres	2	11	18.18%	0.00	2500	0	2300	0	0
13.22	Roperos/Armarios	3	11	27.27%	0.00	4000	0	4400	0	0
13.23	Libreros	2	11	18.18%	0.00	3000	0	1700	0	0
13.24	Vitrinas	1	11	9.09%	0.00	5000	0	3500	0	0
13.25	Alacenas	4	11	36.36%	0.00	4000	0	3400	0	0
13.26	Muebles de baño	6	11	54.55%	1.00	4000	4000	4000	4000	4000
Otros	Fosa	0	11	0.00%	0.00		0		0	0
	Drenaje	0	11	0.00%	0.00		0		0	0
	Letrina	0	11	0.00%	0.00		0		0	0
	Tocador	0	11	0.00%	0.00	4000	0	4000	0	0
	Total						38067		41600	39833.5

La diferencia en costos de los contenidos entre la vivienda tipo 2 y 3 es pequeña con respecto a la vivienda tipo 6.

5.1.4 Mapas de riesgo

En este apartado se presentan los mapas de riesgo asociado a inundación para los periodos de 10, 50 y 100 años, se observa el incremento del costo total asociado a cada periodo, así como el área de inundación, al analizar la evolución de la inundación, en el sentido aguas arriba hacia aguas abajo, el caudal que se desborda del río, inunda en una primera etapa la parte oeste de la ciudad de Champotón, luego una parte del agua se dirige hacia el norte, hasta encontrarse con el cauce del río nuevamente con la inundación que se presenta antes de la desembocadura, y otro volumen importante se dirige, por el centro de la ciudad, hasta llegar al Golfo de México, esto a través de un canal que ha sido dragado para evacuar el agua producto de las inundaciones asociadas a huracanes.

Con base en las Figura 50 a Figura 52 donde se muestran los montos de los daños, es evidente que la parte norte es la más afectada, abarcando las colonias El Cocal, Infonavit, Pozo del Monte, Guadalupe y El Huanal, las cuales están asentadas en la parte baja de la ciudad de Champotón, en la periferia de la Aguadita de Cantemó.

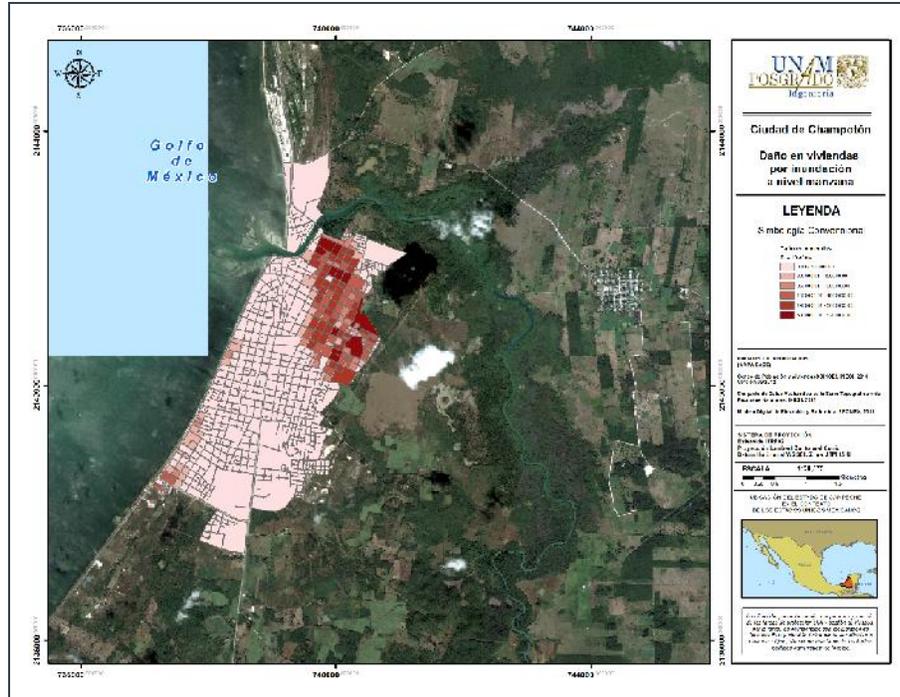


Figura 50. Daños por inundación para Tr 10 años. Ciudad de Champotón.

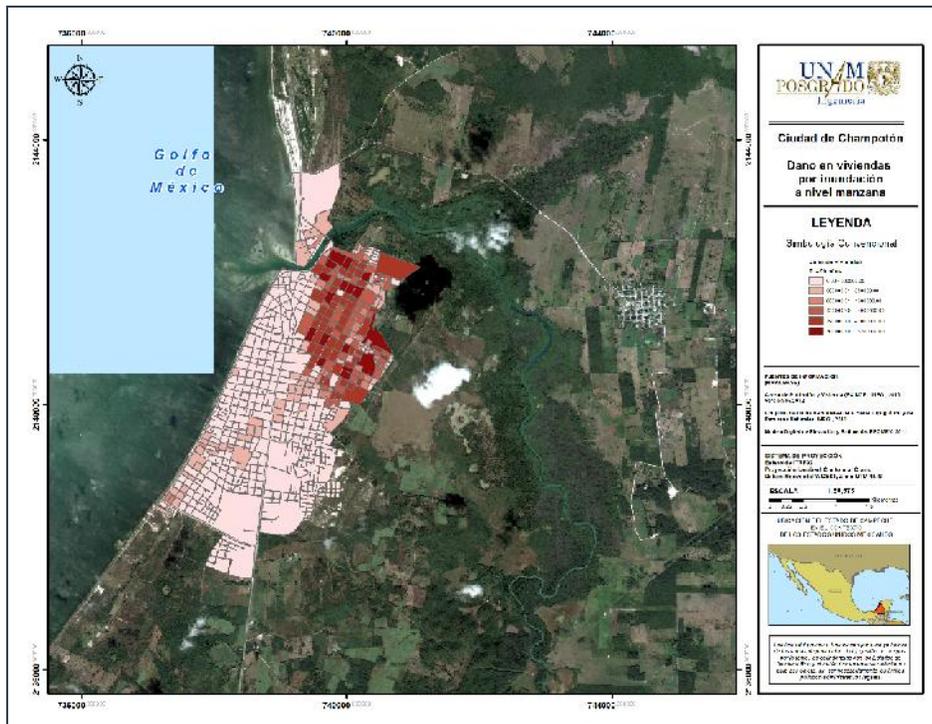


Figura 51. Daños por inundación para Tr 50 años. Ciudad de Champotón

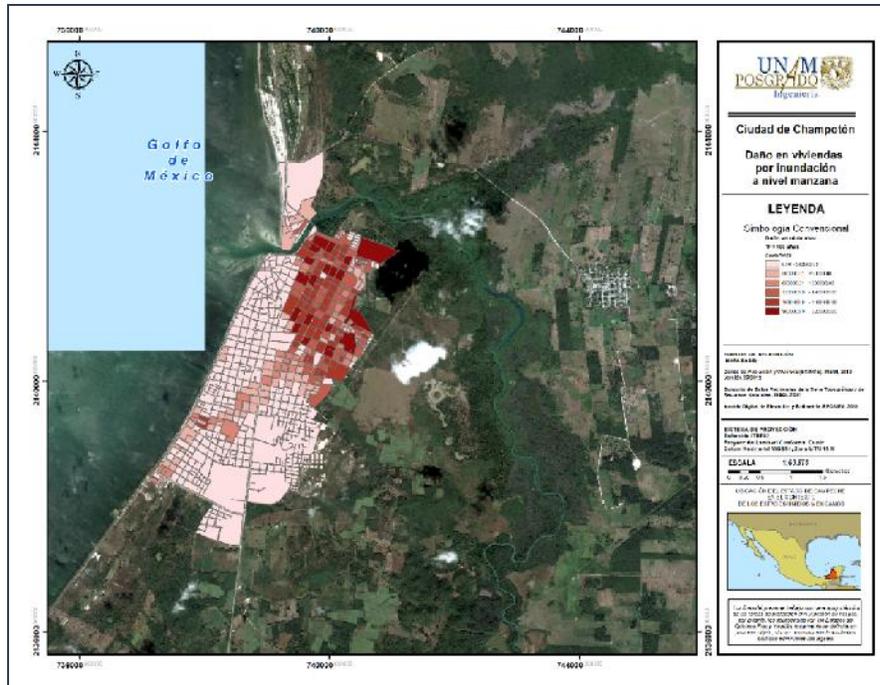


Figura 52. Daños por inundación para Tr 100 años. Ciudad de Champotón.

Para inundaciones con un periodo de retorno de 100 años se observa que las colonias Aserradero, Flamboyanes y Los Manguitos presentan un daño y riesgo muy alto, esto se asocia a la presencia de un canal natural que sirve para desalojar el agua que proviene del río Champotón cuando este se desborda, Figura 53.

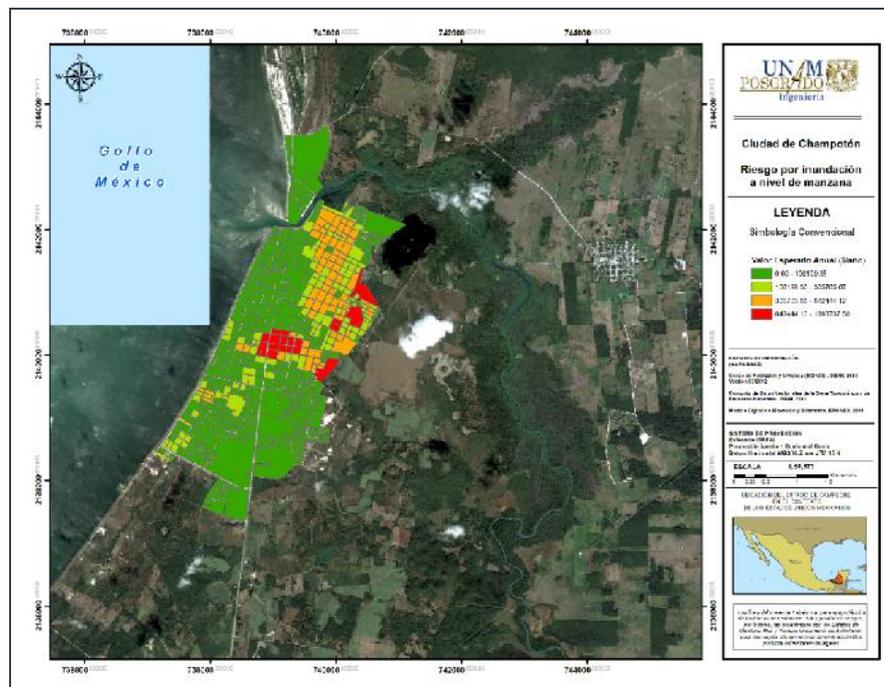


Figura 53. Riesgo total por inundación a nivel de manzana en ciudad de Champotón

En función de las expresiones (4.1), (4.2) y (4.3) se presentan los mapas de riesgo por desbordamiento del río Champotón en la cabecera municipal del mismo nombre. La Figura 53 representa el valor que los habitantes de cada manzana deben ahorrar anualmente para poder restituir sus bienes cada vez que ocurre una inundación, un 40 % de las manzanas deben ahorrar \$ 100,000 por año, diversas manzanas, ubicadas en la zona central de la ciudad, por la cual pasa el canal que permite desahogar el volumen de agua asociado a periodos de retorno mayores de 100 años, deben contar cada año con cerca de \$ 700,000.

En la Figura 54 se presenta el índice de riesgo por inundación, se observa que las manzanas con riesgo medio y alto representan 15 y 20 %, respectivamente, del total del manzana de la cabecera municipal, la mayoría de estas manzanas se encuentran en la zona norte de la ciudad, lugar donde en los últimos años se han construido casas de interés social.

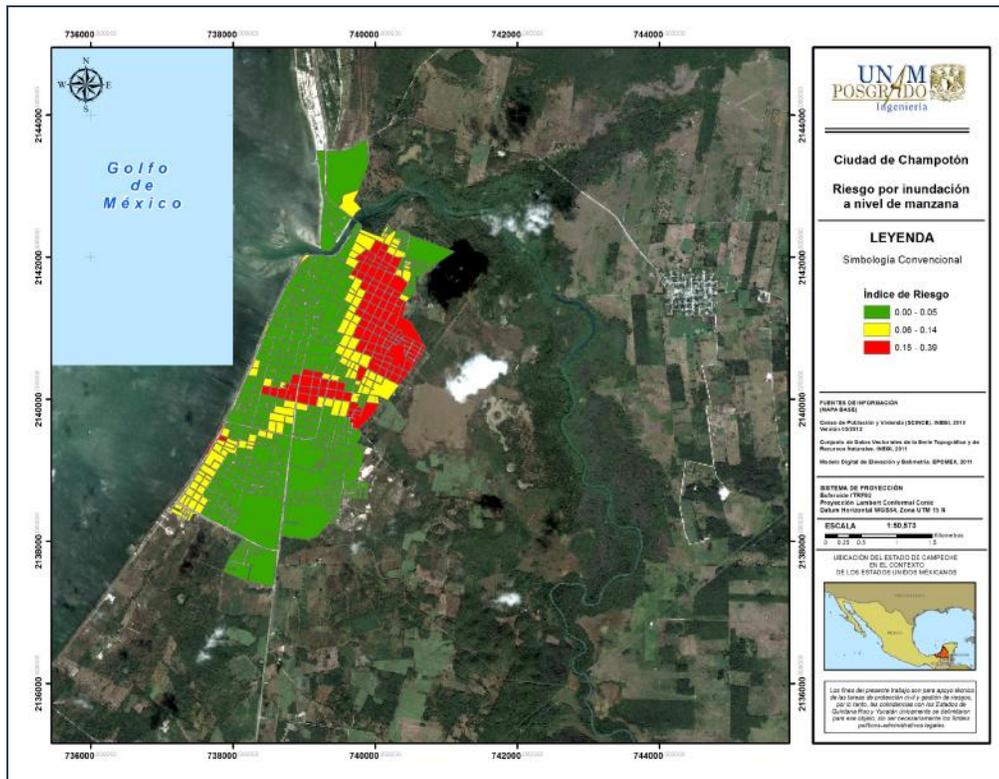


Figura 54. Índice de riesgo desbordamiento del Río Champotón en la ciudad de Champotón

5.1.5 Evaluación del riesgo

En la Figura 55 se presenta la función de riesgo para una manzana de la Colonia Cristobal Colón, ubicada en el límite Este de la ciudad de Champotón. Esta manzana, que en promedio tiene viviendas Tipo 3, comienza a inundarse para un Tr de 10 años, con dirección a las colonias del centro de la ciudad. El valor del riesgo anual asciende a \$64, 260.00. Para la manzana ubicada en la colonia Infonavit, el valor del riesgo anual es \$27,215.00 que en promedio tiene viviendas

Tipo 6. En la colonia Pozo del Monte la manzan tiene en promedio viviendas Tpo 2 y el riesgo anual es de \$235,132.00, Figura 57.



Figura 55. Función de riesgo en manzana de la Colonia Cristóbal Colón

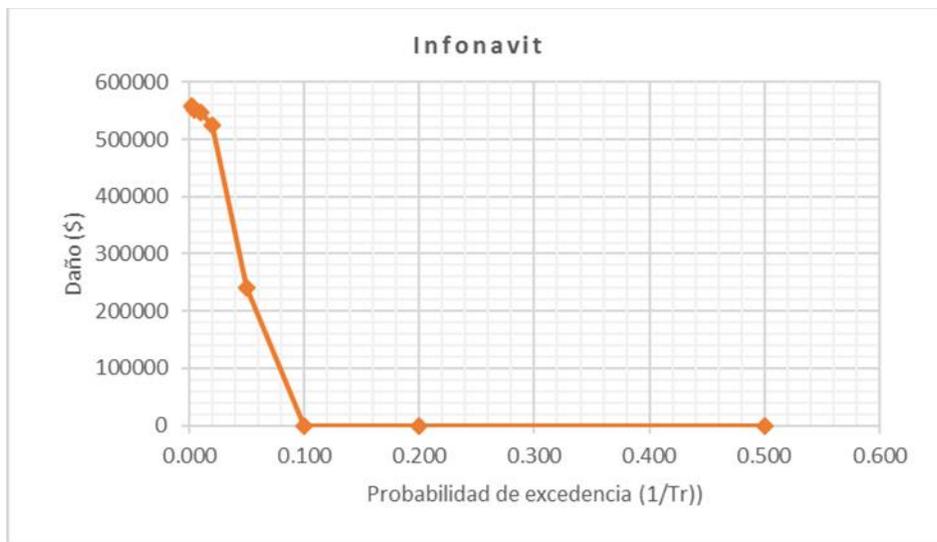


Figura 56. Función de riesgo en manzana de la Colonia Infonavit



Figura 57. Función de riesgo en manzana de la Colonia Pozo del Monte

El riesgo total para la ciudad de Champotón, teniendo en cuenta el análisis a nivel de manzana, es de \$ 41,772,245.23, Figura 58.



Figura 58. Función de riesgo para la ciudad de Champotón

5.2 Riesgo en zonas agrícolas

5.2.1 Evaluación del peligro

El parámetro físico que se considera es la duración de la inundación, intrínseca con la profundidad, por otro lado, con respecto a las velocidades que se presentan son de baja magnitud, en relación a ésta variable para un Tr de 100 años la velocidad máxima que se presenta es de 1.7 m/s, la mínima de 0.001 m/s y el valor promedio de 0.3258 m/s. En cada simulación los parámetros que se extrajeron en cada celda de análisis fueron las magnitudes máximas, promedio y mínimas de la profundidad, duración y velocidad de inundación, Figura 59.

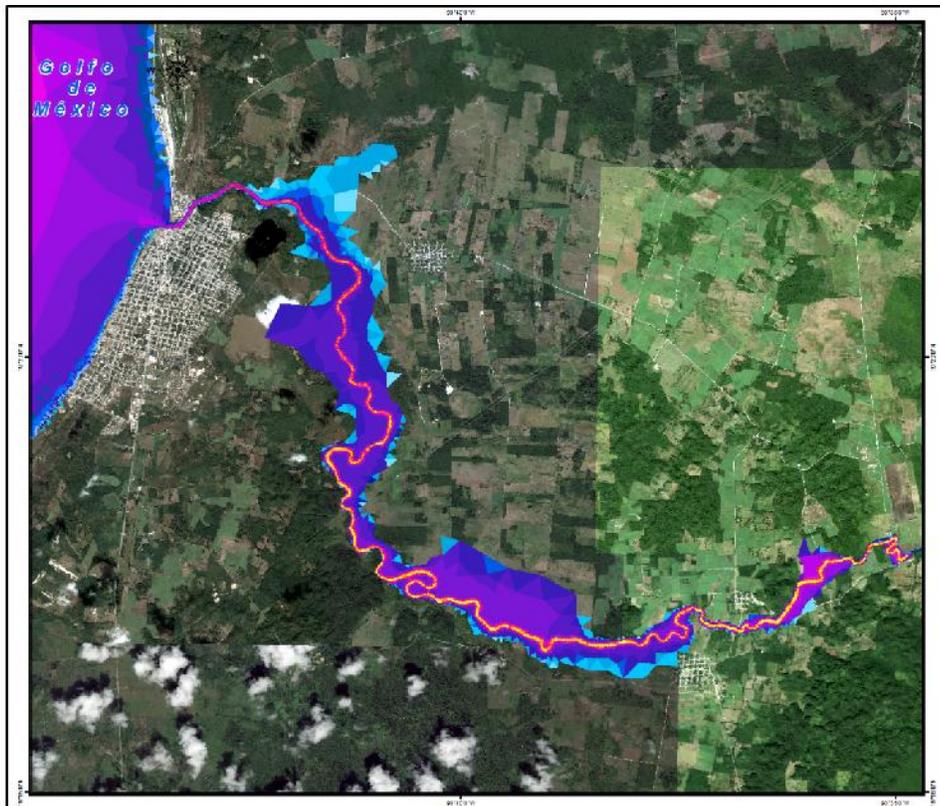


Figura 59. Profundidad y duración de la inundación

Las áreas de inundación más extensas son las asociadas a una duración de más de 11 días y son los que se presentan con mayor frecuencia en el área de estudio. El efecto de la permanencia del agua por un tiempo muy prolongado (semanas), aun cuando el agua ya se haya retirado, se refleja en la humedad excesiva del suelo, evitando que se pueda ingresar a las parcelas cultivadas.

5.2.1.1 Temporalidad de la inundación

Considerando que en la obtención del daño agrícola el costo de producción y el impacto del daño en los cultivos se han desagregado sobre una base mensual, de forma similar se realizó el análisis histórico de los gastos de la EH Canasayab (1956-2011). La Figura 60 muestra la distribución de escurrimientos mensuales promedio de todo el registro, de acuerdo con Agraz et al., 2015 se identifican tres épocas climáticas en el estado de Campeche que son la de secas, lluvias y nortes; se observa que durante la época de secas (febrero a abril) la magnitud de los caudales pico es relativamente pequeña pero el impacto del daño es mayor. Por otro lado, la época definida como de lluvias se encuentra bien establecida para los meses de mayo a octubre y de acuerdo con el análisis de frecuencias, los gastos máximos anuales se concentran en los meses de septiembre y octubre principalmente. Es importante comentar que en la época definida como de “nortes” la humedad es acompañada con fuertes vientos fríos que bajan del noreste, los cuales se presentan dentro de los meses de noviembre a enero, que, si bien el orden de magnitud en los gastos pico es pequeño comparada con los de la época de lluvias, por existir una humedad antecedente del suelo, la vulnerabilidad en las zonas agrícolas es considerable.

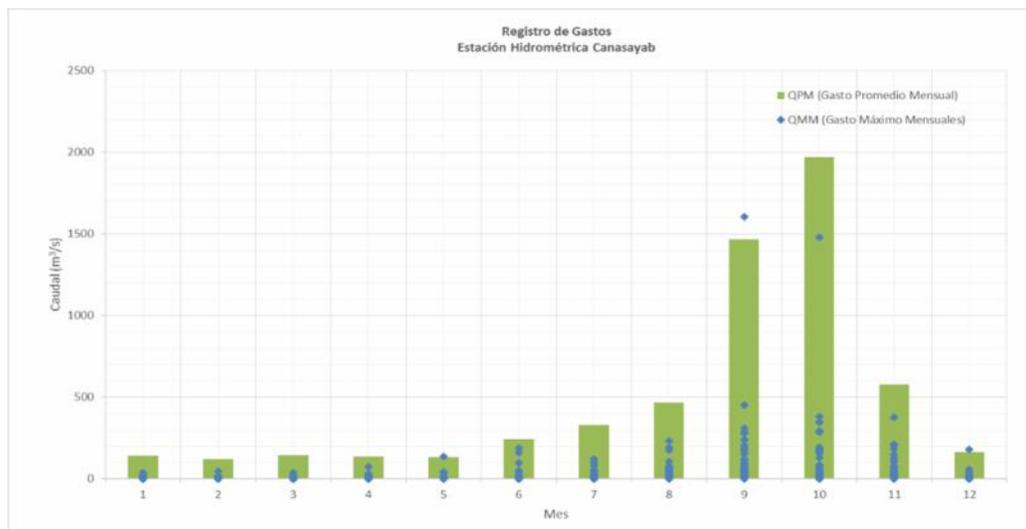


Figura 60. Caudales río Champotón en Estación Hidrométrica Canasayab (1956-2011)

Se consideró una desagregación mensual en la probabilidad de ocurrencia de una inundación por la fuerte dependencia de las pérdidas en la agricultura según el mes de ocurrencia de las inundaciones (Förster et al. 2008). En la Tabla 18 se muestran los valores de los escurrimientos medios mensuales y sus valores relativos al total anual. Se observa que las inundaciones extremas asociadas a un caudal pico máximo se presentan en los meses de septiembre y octubre

Tabla 18. Escurrimientos históricos mensuales. Estación Canasayab

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

Gasto promedio Mensual	142.98	121.82	145.78	137.08	133.75	242.14	331.17	466.43	1465.52	1971.99	579.30	164.88
P(i)	0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028

5.2.2 Construcción de las funciones de daño en zonas agrícolas

Siendo el maíz uno de los principales cultivos de la zona de estudio el caso de análisis se aplicó exclusivamente para aquellos predios donde se identificó este tipo de cultivo. En la Tabla 19 se muestran los porcentajes de daño para el maíz, para los diferentes meses del año. El valor del impacto puede alcanzar hasta valores de 100%, lo que indicaría una pérdida total del cultivo y es particularmente dependiente de la etapa de desarrollo de crecimiento del cultivo. En el caso del maíz de la zona, se tienen dos ciclos de cultivo, el de primavera-verano (P-V) que es de temporal y el de otoño-invierno (O-I) que es de humedad residual o riego.

Tabla 19. Factores de impacto del daño en diferentes meses del año y diferentes duraciones de inundación

Cultivo de Maíz						
Mes	Ciclo del cultivo	Desarrollo del cultivo %	Duración de la inundación			
			1-3 Días %	4-7 Días %	8-11 Días %	>11 Días %
Mayo	P-V	5	2	5	10	20
Junio	P-V	15	2	5	10	20
Julio	P-V	35	5	10	20	40
Agosto	P-V	60	10	20	40	80
Septiembre	P-V	90	30	50	80	100
Octubre	P-V	100	30	100	100	100
Noviembre	O-I	5	2	5	10	20
Diciembre	O-I	15	2	5	10	20
Enero	O-I	35	5	10	20	40
Febrero	O-I	60	10	20	40	80
Marzo	O-I	90	30	50	80	100
Abril	O-I	100	30	100	100	100

Los factores de impacto se diferencian en cuatro clases en función de la duración de la inundación en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. De acuerdo con los resultados de las entrevistas, en los meses de mayo y junio el impacto del daño es pequeño para los rangos de duración de 1 a 3 días y de 4 a 7 días de inundación ya que las afectaciones sólo implican un

retraso en la preparación del terreno y en la fecha de siembra. En el caso donde se presenta la inundación cuando ya se ha sembrado, para estos meses, el daño se asocia a la emergencia de la planta.

Por otro lado, los porcentajes de daño se incrementan, para los distintos rangos de duración, entre los meses de julio a agosto que coincide con un periodo crítico de desarrollo del cultivo, que va de los 45 a 75 días de edad de la planta, pues es donde el cultivo se desarrolla en altura y se establece la floración, posteriormente entre septiembre y octubre se presenta el llenado de grano y comienza la cosecha dependiendo de las condiciones de humedad del grano, en esta etapa el impacto del daño que se maneja es de pérdida total.

En la Figura 61 se muestra la función promedio del daño en el maíz, se observa que las inundaciones extremas asociadas a un caudal pico máximo se presentan en la etapa más vulnerable para el ciclo P-V del cultivo, justo antes y durante la cosecha, en los meses de septiembre y octubre.

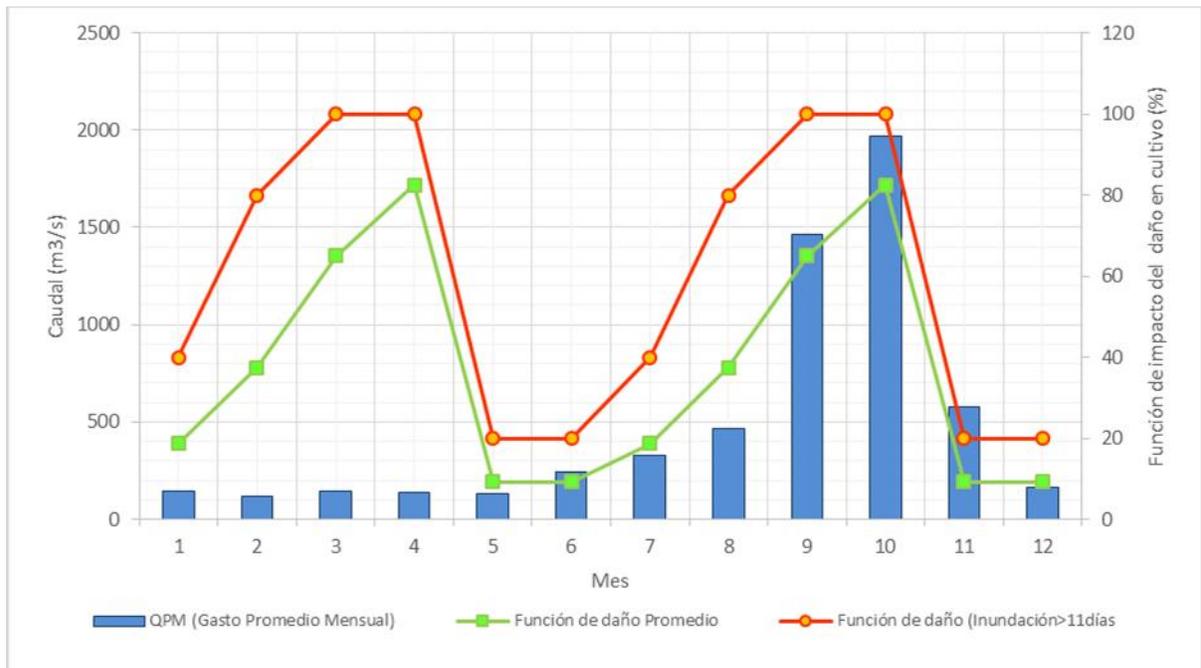


Figura 61. Función de daño en cultivos para una duración mayor a 11 de inundación

5.2.3 Exposición

La información sobre las áreas destinadas al cultivo no se encuentra desagregada por parcela y por tipo de cultivo, sin embargo, con la carta de uso de suelo y vegetación del INGEI se identificaron las zonas destinadas al cultivo permanente y semipermanente, complementando con la información de la producción por tipo de cultivo en el DDR Champotón y con las visitas a campo se establecieron áreas destinadas al cultivo de maíz. En la Figura 62 se muestra la clasificación del uso de suelo en la zona de estudio inundada.

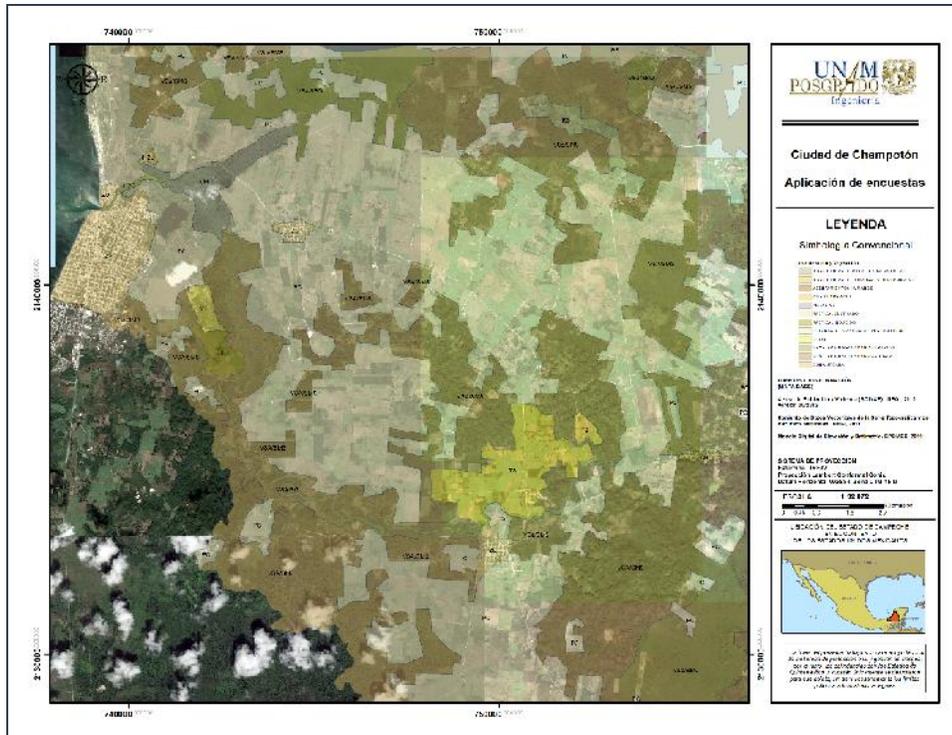


Figura 62. Uso de suelo y vegetación en cuenca del río Champotón.

La Tabla 20 indica la magnitud de las áreas destinadas al cultivo consideradas para este análisis desagregadas por el rango de duración de la inundación.

Tabla 20. Áreas de cultivo de temporal

Tr (años)	Áreas (ha)			
	Duración (Días)			
	1-3	4-7	8-11	Mayor a 11
2	0.1488	1.96847	2.46554	20.5919
5	0.25843	2.0113	4.08826	36.52873
10	0.51453	3.15503	4.20933	51.43557
20	0.65314	3.67466	5.6057	62.98086
50	0.9211	9.01778	14.08794	66.38443
100	1.87926	16.56971	27.21081	93.13969
200	11.5739	21.13848	39.96751	95.64235
500	21.4516	48.66245	52.79741	111.81153

Es importante comentar que una extensión de terreno importante indica que es zona de pastizal cultivado, sin embargo, la Secretaria de Desarrollo Rural del estado de Campeche a través del sistema Potencial Productivo Agropecuario de Campeche indica que esas parcelas tienen un uso potencial para diversos cultivos.

5.2.3.1 Costos de los bienes

El Campo Experimental Edzná del INIFAP en Campeche proporcionó información referente a los paquetes tecnológicos de los diferentes cultivos que son aptos en el estado de Campeche. En ellos se concentran las características e indicaciones más importantes para poder sembrar cierto cultivo:

- Preparación del suelo
- Variedades e híbridos
- Potencial de rendimiento
- Fechas de siembra
- Densidad de siembra
- Método de siembra
- Fertilización
- Combate de maleza y plagas
- Manejo de enfermedades
- Cosecha
- Costos de las actividades e insumos del paquete tecnológico

En la Tabla 21, se muestran los costos que implica sembrar maíz de temporal, para el ciclo primavera-verano (P-V).

Tabla 21. Paquete tecnológico propuesto para cultivo de maíz bajo condiciones de temporal.

Fuente: Paquete tecnológico, INIFAP-Campo Experimental Edzná Campeche

CONCEPTOS	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO \$	COSTO TOTAL \$
PREPARACIÓN DE TIERRA				
Deshierbe de terreno	1	Ha.	\$2,050.00	\$2,050.00
SUBTOTAL				\$2,050.00
SIEMBRA				
Semilla (variedad)	20	Kg.	\$30.00	\$600.00
Siembra	4	Jornales	\$150.00	\$600.00
SUBTOTAL				\$1,200.00
FERTILIZACIÓN				
18-46-00	100	Kg.	\$10.00	\$1,000.00
Biofertilizante	1	Paquete	\$275.00	\$400.00
Urea	50	Kg.	\$7.50	\$400.00
Aplicación	3	Jornales	\$150.00	\$450.00

SUBTOTAL				\$2,250.00
CONTROL DE PLAGAS				
Insecticida (Cypermctrina)	0.5	l.	\$180.00	\$90.00
Aplicación	2	Ha.	\$150.00	\$150.00
SUBTOTAL				\$240.00
CONTROL DE MALEZA				
2-4 d amina	1	l	\$90.00	\$90.00
Glyfosato	2	l.	\$170.00	\$340.00
Atrazina 90	1.3	l.	\$140.00	\$182.00
Nicosulfurón	0.5	l.	\$1,000.00	\$500.00
Aplicación	4	Jornales	\$150.00	\$600.00
SUBTOTAL				\$1,712.00
COSECHA				
Pizca	12	Jornales	\$150.00	\$1,800.00
Acarreo	1	Flete	\$300.00	\$300.00
Desgrane	3.5	Ton.	\$200.00	\$700.00
SUBTOTAL				\$2,800.00
SEGURO				
Seguro agrícola	0	Ha.		
TOTAL, COSTO CULTIVO				\$10,252.00
RENDIMIENTO ESPERADO/HA (TON)				3.5

Se consideran los costos directos del proceso de producción desagregados mensualmente, conforme se desarrolla el cultivo se van implementando diversas actividades acumulando el costo que implica cada una de éstas.

5.2.4 Evaluación del riesgo

En una primera etapa de la evaluación se obtiene el daño , $D(Q_{Tr})$, considerando la probabilidad, $P(i)$, el porcentaje de daño, % Daño (i,d) y el costo de producción del cultivo, $CPHC(i)$, desagregado mensualmente y obtenido para cada área cultivada inundada, ACI (j), en cada escenario, $Q(Tr)$, e intervalo de duración, $d(i)$, en la Tabla 22 y la Tabla 23 se muestran los resultados para los intervalos de duración de 1-3 días y más de 11 días de inundación respectivamente. El análisis completo para todos los intervalos de duración considerados se muestra en el Anexo 4

Tabla 22. Evaluación del daño en áreas de cultivo de maíz para una duración de 1-3 días de inundación

Mes	Enero	Febrero	marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Diciembre	
P_{mes}	0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028	
% Daño(i) (1-3D)	5	10	30	30	2	2	5	10	30	30	2	2	
Costo Producción CPHC(\$/ha)	5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00	5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00	
Tr	ACI(j) (ha)	Daño											
2	0.1488	1.03	2.03	8.22	10.63	0.14	0.67	2.40	7.76	82.59	152.89	0.60	0.46
5	0.2584	1.80	3.52	14.27	18.46	0.24	1.17	4.16	13.47	143.44	265.53	1.04	0.79
10	0.5145	3.58	7.00	28.41	36.75	0.48	2.32	8.28	26.82	285.59	528.67	2.07	1.58
20	0.6531	4.54	8.89	36.06	46.65	0.61	2.95	10.52	34.04	362.52	671.09	2.63	2.01
50	0.9211	6.40	12.54	50.85	65.79	0.86	4.16	14.83	48.01	511.25	946.41	3.71	2.83
100	1.8793	13.06	25.58	103.76	134.22	1.75	8.48	30.26	97.95	1043.07	1930.90	7.56	5.77
200	11.5739	80.46	157.55	639.01	826.63	10.75	52.22	186.36	603.23	6423.99	11891.97	46.57	35.56
500	21.4516	149.13	292.02	1184.36	1532.12	19.93	96.79	345.41	1118.05	11906.53	22041.12	86.32	65.91

Tabla 23. Evaluación del daño en áreas de cultivo de maíz para una duración mayor a 11 días de inundación

Mes		Enero	Febrero	marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octubre	Nov	Diciembre
Pmes		0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028
% I Daño (>11D)		40	80	100	100	20	20	40	80	100	100	20	20
Costo Producción (\$/ha)		5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00	5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00
Tr	Área inundada (ha)	Daño (\$)											
2	20.5919	1145.23	2242.52	3789.67	4902.40	191.30	929.16	2652.51	8585.94	38097.86	70525.99	828.56	632.71
5	36.5287	2031.57	3978.08	6722.63	8696.55	339.35	1648.26	4705.39	15230.91	67583.21	125108.65	1469.81	1122.38
10	51.4356	2860.62	5601.48	9466.04	12245.48	477.84	2320.90	6625.59	21446.43	95162.92	176163.65	2069.62	1580.41
20	62.9809	3502.72	6858.79	11590.79	14994.12	585.09	2841.85	8112.78	26260.32	116523.31	215705.56	2534.17	1935.15
50	66.3844	3692.01	7229.45	12217.18	15804.42	616.71	2995.42	8551.21	27679.46	122820.38	227362.57	2671.12	2039.72
100	93.1397	5180.02	10143.17	17141.13	22174.16	865.27	4202.68	11997.64	38835.25	172321.32	318997.69	3747.68	2861.80
200	95.6424	5319.21	10415.72	17601.71	22769.98	888.52	4315.61	12320.02	39878.76	176951.58	327569.14	3848.38	2938.70
500	111.8115	6218.47	12176.59	20577.43	26619.44	1038.73	5045.20	14402.83	46620.61	206866.80	382947.59	4498.98	3435.51

Para cada intervalo de duración se realiza la suma del daño desagregado mensualmente obteniendo los valores totales por escenario y por intervalo de duración de la inundación, Tabla 24.

Tabla 24. Resumen del daño por escenario e intervalo de duración de la inundación en cultivo de maíz

Probabilidad de excedencia	Daño (\$)				
	P=1/Tr	D= 1-3días	D= 4-7días	D= 8-11días	D>11días
0.5		269.40	9623.88	14073.76	134523.84
0.2		467.88	9833.28	23336.54	238636.79
0.1		931.55	15424.99	24027.63	336020.97
0.05		1182.50	17965.47	31998.37	411444.64
0.02		1667.63	44088.07	80416.56	433679.66
0.01		3402.36	81009.58	155324.33	608467.81
0.005		20954.31	103346.37	228141.93	624817.32
0.002		38837.69	237911.50	301377.37	730448.18

En la Figura 63 se muestran las curvas para obtener el riesgo como el daño anual esperado en el cultivo de maíz, diferenciadas por intervalo de duración de la inundación, se observa que existe una gran diferencia entre el intervalo de duración de 8-11 días y mayor de 11 días de inundación.

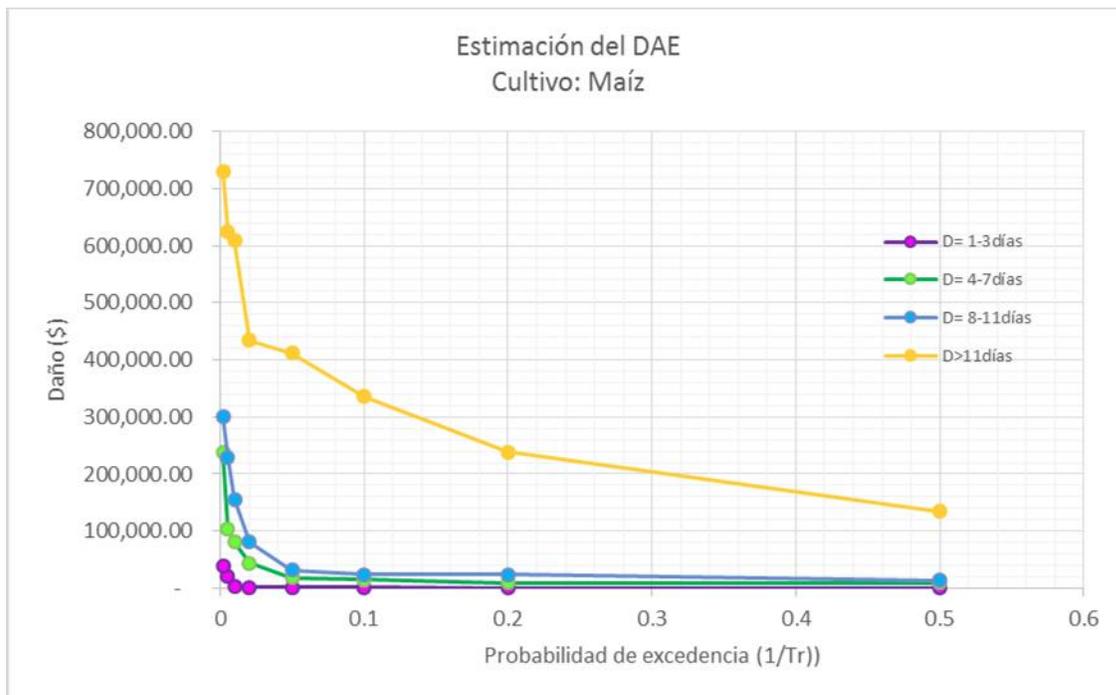


Figura 63. Curvas de riesgo por inundación en cultivo de maíz

El daño anual esperado para el intervalo de duración de 1-3días es de \$452/ha; para el intervalo de 4-7 días, es de \$7,545.00; para 8-11 días es de \$13,998.28 y el valor del riesgo para una duración de inundación mayor a 11 días es de \$126,397.3 por ha el más alto para los intervalos de duración propuestos. De acuerdo con los agricultores entrevistados este último intervalo de duración de la inundación es el más frecuente.

En la Tabla 26 se obtuvo el daño total asociado a la duración promedio (DTP), con la suma de los productos de la frecuencia relativa por el daño asociado a intervalos de duración. La frecuencia relativa de cada intervalo de duración se obtuvo con los escurrimientos registrados en la E.H. Canasayab, estableciendo un gasto umbral (Q_{umbral}) a partir del cual se empieza a desbordar el río en varias secciones, para este caso se consideró de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, Tabla 25.

Tabla 25. Inundaciones asociadas a Q_{umbral}

Duración (Días)	1-3D	4-7D	8-11D	>11D
Frecuencia inundación asociada a $Q(umbral)$	21	14	13	36
Frecuencia relativa inundación asociada a $Q(umbral)$	0.25	0.17	0.15	0.43

Tabla 26. Daño total de duración promedio (DTP) para el cultivo de maíz

Frecuencia	0.250	0.167	0.155	0.429	DAÑO TOTAL PROMEDIO
P=1/Tr	D= 1-3días	D= 4-7días	D= 8-11días	D>11días	
0.5	269.40	9623.88	14073.76	134523.84	61,502.48
0.2	467.88	9833.28	23336.54	238636.79	107,640.37
0.1	931.55	15424.99	24027.63	336020.97	150,531.27
0.05	1182.50	17965.47	31998.37	411444.64	184,575.41
0.02	1667.63	44088.07	80416.56	433679.66	206,073.05
0.01	3402.36	81009.58	155324.33	608467.81	299,162.40
0.005	20954.31	103346.37	228141.93	624817.32	325,549.50
0.002	38837.69	237911.50	301377.37	730448.18	409,052.30

Se construyó la curva de riesgo para el daño total promedio para cada Tr, con coordenadas (DTP, Tr) obteniendo el área bajo la curva de riesgo se obtuvo el valor del daño anual esperado promedio (DAEP) de \$57,707.267 por ha, Figura 64.

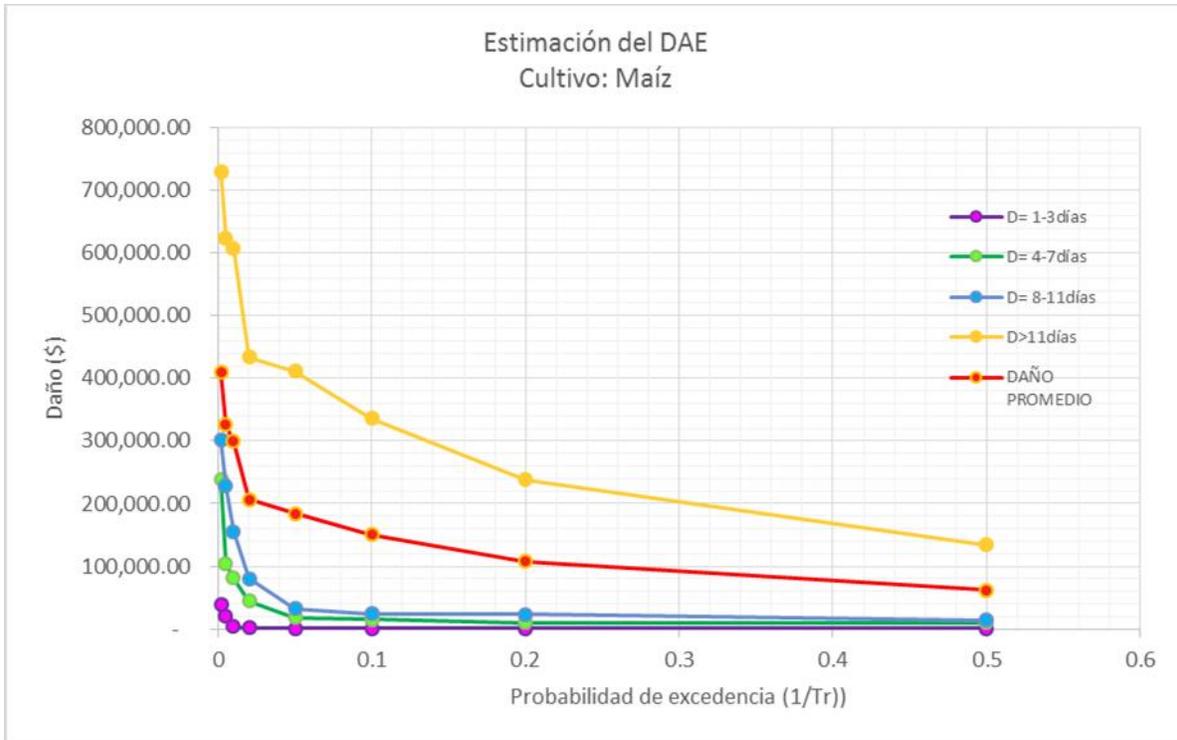


Figura 64. Daño anual esperado, cultivo: maíz

Para la evaluación del riesgo por inundación en zonas agrícolas no se consideró el daño a edificios, maquinaria, inventario y medidas de limpieza. Lo anterior es debido a que son características muy específicas en los ranchos de las zonas y la información disponible es nula.

6 CONCLUSIONES

El análisis integral del riesgo por inundaciones implica la evaluación de los daños directos e indirectos, tangibles e intangibles. Es en función de la escala, los recursos, los objetivos del proyecto y las características de la zona de estudio las categorías de daños que se consideran en el análisis del riesgo y las metodologías empleadas.

En este trabajo se aborda la evaluación del riesgo por inundación debido al desbordamiento del río Champotón.

La aportación principal está enmarcada dentro de la categoría de daños directos tangibles, proponiendo un método para evaluar el riesgo por inundaciones en zonas agrícolas. De igual manera se adapta la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para evaluar el riesgo por inundación en zonas urbanas.

Riesgo en zonas agrícolas

Los daños por inundación que se presentan en el sector agrícola son pequeños en comparación con los que se presentan en zonas urbanas e infraestructura, sin embargo deben considerarse en aquellas zonas donde la producción agrícola es de importancia aún a nivel local. El método propuesto se basa en un análisis mensual para la evaluación de daños, lo que permite tomar en cuenta la variación estacional en el crecimiento de los cultivos y se puede aplicar a una amplia variedad de ciclos agrícolas y obtener las pérdidas esperadas debido a las inundaciones. La metodología propuesta se aplicó al cultivo de maíz, sin embargo, existen otros tipos de cultivo como el sorgo, arroz palay, soya, caña y pastizal, entre otros.

Los principales resultados obtenidos en la evaluación del riesgo en las zonas agrícolas están relacionados con la construcción de las funciones del impacto del daño para el cultivo de maíz en función de cuatro categorías de duración de la inundación. La evaluación del daño considera la época en la cual se presenta la inundación en relación con la etapa de desarrollo del cultivo y los costos utilizados están asociados con la producción del cultivo, desagregados por etapa de desarrollo.

Evaluar el daño desagregado mensualmente genera resultados más apegados a la realidad ya que los factores de impacto del daño por inundación están directamente relacionados con la etapa de desarrollo del cultivo, que en comparación con un enfoque anual que considera que los valores del daño son independientes de cuándo se presenta la inundación. Es decir, el daño por inundaciones en la producción agrícola que resulta de un evento de inundación específico depende principalmente del tiempo de ocurrencia en relación con las etapas de crecimiento del cultivo.

Los costos utilizados en la evaluación de daños están relacionados con el proceso de producción del cultivo de maíz, desde la preparación del terreno hasta la cosecha, mientras que los daños a los edificios agrícolas, maquinaria e inventario, así como los costos de limpieza no fueron considerados. La evaluación del riesgo por inundación, considerado como el daño anual esperado para una duración de inundación promedio (DAEP) es de \$57,707.26 por ha y el valor

del riesgo para una duración de inundación mayor a 11 días es del orden de \$126,397.3 por ha el más alto para los intervalos de duración propuestos y que de acuerdo con el análisis estadístico el más frecuente, es decir, las estimaciones del daño en zonas agrícolas están directamente relacionadas con la duración de la inundación. Se considera que en las zonas agrícolas es importante evaluar la variación en la probabilidad de inundación, su distribución estacional y su magnitud, más que la variación del uso de la tierra.

Los alcances del presente trabajo se acotaron a la evaluación del riesgo por inundación asociada al desbordamiento del río Champotón, sin embargo, en relación con las zonas agrícolas y de acuerdo con las características topográficas y del tipo de suelo de la zona de estudio, se consideró importante evaluar su comportamiento con la aplicación de un modelo lluvia-escurrimiento para ver los efectos de la lluvia local. El modelo utilizado es el propuesto por De Luna, 2016 y se establecieron dos escenarios para el huracán Isidore, uno considerando sólo los escurrimientos registrados en la estación Canasayab y otro escenario donde se integran los datos de lluvia en diversos puntos de la cuenca. Los resultados en cuanto a la extensión de la inundación asociada al desbordamiento del río Champotón son muy similares, sin embargo, existen zonas alejadas de la influencia del río que presentan acumulación de agua por tiempo prolongado. Los efectos de la inundación se magnifican con el drenaje deficiente de en las zonas de cultivos.

Los resultados anteriores indican que para realizar un estudio más completo en las zonas agrícolas es necesario considerar la aplicación de un modelo lluvia-escurrimiento para incluir todas las áreas en el análisis de riesgo. El resultado completo de las modelaciones se encuentra en el Anexo 5.

Riesgo en zonas urbanas

La evaluación del riesgo natural asociado a inundaciones requiere, además de una adecuada caracterización del peligro por medio de programas de simulación numérica que representen el comportamiento del agua en las llanuras de inundación, caracterizar los bienes y zonas inundables acertadamente, en esta tesis se trabajó principalmente en la evaluación de la vulnerabilidad de las casas habitación del estado de Campeche que se encuentran en zonas inundables, por medio de la aplicación de encuestas a pobladores se construyeron las funciones de daños que representan los contenidos de las casas, lo cual permite cuantificar los costos de los daños en enseres en función del tirante de inundación; estas funciones deben ser específicas para cada región de estudio, el utilizar otras funciones, así sea del mismo país no necesariamente genera buenos resultados, por ejemplo, de acuerdo con la metodología común una casa que tienen material de techo y muros de madera o desecho tiene menos enseres que los presentes en una casa de techo y muros de concreto y ladrillo, esto no se cumple para las casas de Ciudad del Carmen, ya que para esta zona se obtuvo que los enseres de casas marginales tienen un costo similar al de las casas de material frágil.

Para la caracterización de la exposición se desarrolló en este trabajo una metodología basada en encuestas en campo y análisis de techos de casas por medio de imágenes satelitales y bases de datos del INEGI, de esta manera fue posible determinar el tipo de cada casa y posteriormente obtener el tipo de casa más común para cada manzana.

En las simulaciones hidráulicas se observa que para un Tr de 100 años la extensión de la inundación afecta el 45% del área urbana en promedio con una profundidad de inundación de 2.05 m, con un valor de los daños de \$361,750,944.8. Los resultados del análisis del riesgo son un indicador para el análisis costo-beneficio en la solución de las inundaciones en la ciudad de Champotón (Fuentes M. et al. 2012).

Con base en los resultados de vulnerabilidad se pueden proponer obras estructurales que ayuden a mitigar el riesgo, tales obras consideradas implican la construcción de un bordo carretera en conjunto con un sistema de drenaje pluvial en la ciudad. Al respecto Ramírez et al. 2015 presenta un análisis hidráulico de la zona urbana de Champotón, colocando un bordo carretero proyectado por Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Los resultados indican que la vulnerabilidad disminuye drásticamente.

En conclusión, se considera que los objetivos planteados inicialmente se han cumplido, se propuso un método para la evaluación del riesgo en zonas agrícolas y en zonas urbanas.

Para evaluar el riesgo en las zonas agrícolas se propuso un método que considera la probabilidad de que se presenten inundaciones en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo de maíz considerando como variable principal la duración de la inundación, sin embargo, se recomienda se desarrollen las funciones del impacto del daño por inundación para los diferentes cultivos que se desarrollan en el estado de Campeche. Por otro lado, es de vital importancia evaluar el riesgo de inundación en las zonas de manglar.

Con respecto a la evaluación del riesgo en zonas urbanas es necesario generar funciones de vulnerabilidad en los diversos tipos de infraestructura para robustecer los resultados.

Las aportaciones más importantes del presente trabajo se centran en el método propuesto para la evaluación del riesgo en zonas agrícolas, en las funciones del impacto del daño en cultivos por inundación.

Como futuras líneas de trabajo se propone:

- Construir una base de datos formal con información relacionada con los parámetros de daño por inundación en las diferentes categorías de bienes.
- Considerar más elementos en las zonas agrícolas, esto implica caracterizar de forma más detallada las zonas de estudios, que permitan estimar los factores de impacto del daño en infraestructura vial, edificios, maquinaria, inventario, limpieza.
- Caracterizar los cultivos de caña de azúcar, arroz y cítricos.
- Aplicación de un modelo lluvia-escorrentamiento.
- La información sobre los efectos de la inundación sobre los cultivos y su producción sigue siendo escasa por lo que es recomendable robustecer la información con información generada en los centros experimentales.
- Proponer una metodología que evalúe el daño en el área ganadera.
- Definir funciones de daños intangibles

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agraz-Hernández, C. M., C. A. Chan Keb, S. I. Iriarte-Vivar, G. Posada Vanegas, B. E. Vega Serratos y J. Osti Sáenz. 2015. Phenological variation of *Rhizophora mangle* and ground water chemistry associated to changes of the precipitation. *Hidrobiológica* 25 (1):49-61
- [2] Bates PD, Anderson M G, Baird L, Walling D E, Simm D (1992). Modelling floodplain flows using a 2-dimensional finite element model. *Earth Surface Processes and Landforms* 17(6): 575-588
- [3] Bechteler, W., Hartmann, S., Otto, A. J. (1994). Coupling of 2D and 1D models and integration into GIS, In: White H. R., Watts J (eds.), 2nd International Conference on River Flood Hydraulics, John Wiley & Sons
- [4] Bitrán Bitrán D. (2001). Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en México en el Período 1980-99. 1a edición ed. México, D.F.: CENAPRED.
- [5] Bitrán B D; Domínguez M R, L.; Durán H R.; Fuentes M Ó; García A N; Jiménez E M.; López B Ó; Matías R L G; Reyes S C; Salas S M A y Zepeda R Ó. (2003). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2002. Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. Secretaría de Gobernación. México, D.F. 172 pp.
- [6] Blanc C, Brémond P, Grelot F. (2010). Projet EVA: Evaluation de la Vulnérabilité Agricole. Développement méthodologique d'une évaluation économique des mesures de réduction de la vulnérabilité. FEDER Programme Opérationnel Plurirégional Plan Rhône; Compétitivité régionale et emploi, 2007 /2013. Contrat de projets interrégional Plan Rhône, Volet Inondations, Etat des exploitations agricoles face aux inondations.
- [7] Bonner, V., Ackermann, C., Brunner, G. W. (1999). A GIS Interface to HEC-RAS, Association of State Floodplain Managers; Annual Conference; Planning ahead reducing flood losses in the 21st century, Association of State Floodplain Managers, Portland, OR, pp. 119-124
- [8] Buck W (2004): Monetary evaluation of flood damages, In: D. Mahlzahn, T. Plapp. (Eds.): Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction, Int. Conf. July 2004, Karlsruhe, Berlin: Logos Verl. 2004, p. 123 - 127
- [9] Brémond, P., Grelot F. and Agenais A. L. (2013). Review Article: Economic evaluation of flood damage to agriculture– review and analysis of existing methods. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2493–2512, 2013 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2493/2013/
- [10] Brémond, P. and Grelot, F. (2010). Comparison of a systemic modelling of farm vulnerability and classical methods to appraise flood damage on agricultural activities, in: *Advancing Sustainability in a Time of Crisis*, 11th biennial conference of the

- International Society for Ecological Economics, August 22–25, Oldenburg and Bremen, Germany. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00615462/document>.
- [11] Brémond, P. and Grelot, F. (2012). Taking into account recovery to assess vulnerability: application to farms exposed to flooding, in: *Managing Resources of a Limited Planet, 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software*, edited by: Seppelt, R., Voinov, A. A., Lange, S., and Bankamp, D., International Environmental Modelling and Software Society, Leipzig, Germany. *Recuperado de http://www.iemss.org/sites/iemss2012//proceedings/H3_0429_Bremonda_%20Grelot.pdf*
- [12] Campos D. (1998) *Procesos del ciclo hidrológico*. Publicado por: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Tercera reimpresión. México.
- [13] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). <http://www.cimmyt.org/es/>
- [14] Citeau J. M. (2003) A new flood control concept in the Oise catchment area: definition and assessment of flood compatible agricultural activities. FIG Working Week, April. France, Paris, pp 13–17. Recuperado de https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_14/TS14_5_Citeau.pdf
- [15] Chatterton, J., Viavattene, C., Morris, J., Penning-Rowsell, E., and Tapsell, S. (2010). *The Costs of the Summer 2007 Floods in England*, Tech. rep., Environment Agency. *Recuperado de <http://nationalfloodforum.org.uk/wp-content/uploads/EA-Costs-of-Flooding.pdf>*
- [16] Chau, V. N., Cassells, S. & Holland, J. (2014.) Economic impact upon agricultural production from extreme flood events in Quang Nam, central Vietnam. *Nat Hazards*. First Online: 05 September 2014 DOI: 10.1007/s11069-014-1395-x.
- [17] Crichton D. (1999). The risk triangle, in *Natural Disaster Management* (Ed.: J. Ingleton), Tudor Rose, London, 102-103 pp.
- [18] De Luna C. F., Fuentes M. O., Ramos-Hernández J. (2017). 2D Hydraulic Flow Model to Estimate Flood based on Runoff as Precipitation records: Validation of natural conditions using an existing DEM. Informe doctoral, Posgrado de Ingeniería UNAM.
- [19] DEFRA (DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS) (2005). *Making space for water: Taking forward a new government strategy for flood and coastal erosion risk management in England: Government first response*. London: Defra
- [20] DHI, M. B. (2014). MIKE 21 Y MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation. 10 ed. Dinamarca: s.n.
- [21] DHI, M. B. (2014). MIKE 21 Y MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic Module. Step-by-step training guide. Dinamarca: DHI.
- [22] Diario Oficial de la Federación (DOF), (2016). http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5468350&fecha=31/12/2016

- [23] Domínguez, R., Esquivel, G., Méndez, B., Mendoza, A., Arganis, M.L., Carrizosa, E. (2008). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Series Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. 101 p.
- [24] Dutta D, Herath S, Musiake K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation. *J Hydrol* 277:24–49. doi:10.1016/s0022-1694(03)00084-2
- [25] Elmer F, Seifert I, Kreibich H, Thieken H (2010) A delphi method expert survey to derive standards for flood damage data collection. *Risk Anal* 30(1):107–124. doi:10.1111/j.1539-6924.2009.01325.x
- [26] Elsner A, Mai S, Meyer V, Zimmermann C (2003), Integration of the flood risk in coastal hinterland management, Proc. of the Int. Conf. CoastGis, Genua, Italy.
- [27] Escalante Sandoval, C. A. y Reyes Chávez, L. (2002). Técnicas estadísticas en hidrología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Facultad de Ingeniería. México, 298 pp.
- [28] Escudero, M., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., Arganis, M., Characterization of Risks in Coastal Zones: A Review, *Journal Clean – Soil, Air, Water*, 40 (9), 894–905, 2012, ISSN: 1863-0669, 2012
- [29] Eslava H., Jiménez M., Salas M. A., García F., (2006), “Guía Básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgos”, Fenómenos hidrometeorológicos, Serie del Atlas Nacional de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/12122006CapituloI.pdf>
- [30] Feldhaus R., Hoettges R., Brockhaus T., Rouve G (1992). Finite element simulation of flow and pollution transport applied to part of the river Rhine, In: Falconer R., Shiono K., Matthews R. (eds.), *Hydraulic and Environmental Modelling: Estuarine and River waters* Adlershot, Ashgare, pp. 323-334 Neunzert et al., 2003
- [31] Förster S, Kuhlmann B, Lindenschmidt KE, Bronstert A. (2008). Assessing flood risk for a rural detention area. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8:311–322. doi:10.5194/nhess-8-311-2008
- [32] Fuentes M. O. A., De Luna C. F., Vélez M. L. (2012). Análisis de vulnerabilidad, peligro y riesgo en una zona de planicie de inundación al sur de México. *Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Asociación Mexicana de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México. Noviembre 2012
- [33] Guevara, O., Quaas W., Fernández, V. (2006). Lineamientos Generales para la elaboración de atlas de riesgos. En *Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y representación geográfica*. Serie: Atlas Nacional de Riesgos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. ISBN: 970-628-904-6. 1ra. Edición, Noviembre 2006.
- [34] Gouldby, B., Samuels, P., Klijn F., Messner F., van Os A., Sayers P., Schanze J. (2005). *Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies-Language of Risk-Project Definitions*. Floodsite Report No. T32-04-01
- [35] Gupta R. (2008). *Hydrology and Hydraulic Systems*. Published by Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois. Third Edition. ISBN: 978-1-57766-455-0

- [36] Granger K., Jones T., Leiba M., Scott G. (2003). In *Defining Risk* (Ed.:I. Kelman), *FloodRiskNet Newsletter*, 2, 6–8.
- [37] Green C H (2003), *Evaluating vulnerability and resilience in flood management*, In: van der Veen a, Arellano A L V and Nordvik JP (eds), *In Search of a Common Methodology on Damage Estimation*, EUR 20997 EN, Ispra: European Commission
- [38] Green C H, Van der Veen A, Wierstra E, Penning-Rowsell E C (1994), *Vulnerability Refined: Analysing Full Flood Impact*, In: PENNING-ROWSELL E C, FORDHAM M (Eds.), *Floods Across Europe. Hazard Assessment, Modelling and Management*, S. 32-68
- [39] Hess, T. and Morris, J. (1988). *Estimating the Value of Flood Alleviation on Agricultural Grassland*, *Agricultural Water Management* 15, 141-153.
- [40] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), *Campo Experimental Edzná, Campeche. Paquete tecnológico para semabrar maíz de temporal en suelos mecanizables del estado de Campeche (Áreas de alto potencial) Marzo, 2015*
- [41] IWK (1999), *Auswertung der HOWAS-Datenbank*.
- [42] Jiménez, E. M., (1992). *AX (Ajuste de Función de Probabilidad) versión 1.05*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D.F.
- [43] Kadam P, Sen D. (2012). *Food inundation simulation in Ajoy River using MIKE FLOOD*. *J Hydraul Eng* 2:129–141
- [44] Kok M, Huizinga H J, Vrouwenfelder A C W M, Barendregt A (2004). *Standard Method 2004. Damage and Casualties caused by Flooding*, Client: Highway and Hydraulic Engineering Department.
- [45] Kourgialas N, Karatzas G (2013) *A hydro-economic modelling framework for flood damage estimation and the role of riparian vegetation*. *Hydrol Process* 27:515–531. doi:10.1002/hyp.9256
- [46] Li, K., Wu, S., Dai, E., Xu, Z. (2012). *Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China*. *Nat Hazards* (2012) 63: 737. doi:10.1007/s11069-012-0180-y
- [47] Luino F., Cirio C. G., Biddoccu M., Agangi A., Giulietto W., Godone F., Nigrelli G. (2009). *Application of model to the evaluation of flood damage*. *Geoinformatica*, Vol. 13, pp, 339-353
- [48] Martínez A. (2011). *Estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Champotón: Mapas de Peligro y Sistemas de Información Geográfica*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. México.
- [49] Méndez, B. (2005). *Aplicaciones hidrológicas de los radares meteorológicos*, tesis doctoral, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, Diciembre.
- [50] Merz B., Kreibich H, Thieken A and Schmidtke R (2004), *Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings*, *Natural Hazards and Earth System Science* 4: 153-163

- [51] Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thielen, A. (2010). Review article “Assessment of economic flood damage”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1697–1724, doi:10.5194/nhess-10-1697-2010
- [52] Merz B, Thielen A, Kreibich H (2011) Quantification of socio-economic flood risks. In: Schumann AH (ed) *Flood risk assessment and management: how to specify hydrological loads, their consequences and uncertainties*. Springer, Berlin, pp 229–245
- [53] Messner F., Penning-Rowsell E., Green C., Meyer V., Tunstall S., van der Veen A. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. Floodsite Report No. T09-06-01.
- [54] Meyer, V. and Messner, F. (2005). *National Flood Damage Evaluation Methods. A Review of Applied Methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany*, Deliverable of task 9 of FLOODSite project 2_0_P44, UFZ – Department of Economics.
- [55] Meyer, V., Scheuer S, Haase D. (2009). A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany. *Nat Hazards* 48:17–39
- [56] Meyer, V., Priest, S. & Kuhlicke, C. (2012). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Nat Hazards*. doi:10.1007/s11069-011-9997-z
- [57] Morris, J. and Brewin, P. (2013). The impact of seasonal flooding on agriculture: the spring 2012 floods in Somerset, England, *J. Flood Risk Manage.*, doi:10.1111/jfr3.12041, online first, 2013.
- [58] Pantaleoni E, Engel B, Johannsen C (2007) Identifying agricultural flood damage using Landsat imagery. *Precision Agric* 8:27–36. doi:10.1007/s11119-006-9026-5
- [59] Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty S, Singh, R., Raghuvanshi, N. S. (2009). Flood inundation modelling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *J Indian Soc Remote Sens* 37:107–118. doi:10.1007/s12524-009-0002-1
- [60] Paperberger, F. (2005). *Physical based flood models*, Internal Report (not published)
- [61] Parker, D. J., Green, C. H., and Thompson, P. M. (1987). *Urban flood protection benefits: A project appraisal guide*, Gower Technical Press, Aldershot.
- [62] Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., et al. (2003): *The benefits of flood and coastal defence: techniques and data for 2003*, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, UK, 2003.
- [63] Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., et al. (2005), *The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Manual of Assessment Techniques*, Enfield, Middlesex University Press
- [64] Pistrika, A. (2010). Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. *Eur Water* 30:3–11
- [65] Pivot, J.-M., Josien, E., and Martin, P. (2002). Farms adaptation to changes in flood risk: a management approach, *J. Hydrol.*, 267, 12–25.

- [66] Posada G., Vega B., Ruiz G., Echávez-Aldape G., Martínez A. (2011). Áreas inundables para la cuenca del río Champotón, Campeche: escenarios actuales y futuros. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático, 2da edición. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- [67] Posada Vanegas G., B.E. Vega Serratos, y R. Silva Casarin (eds.), (2013). Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil. Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM-Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED. 202 p.
- [68] Posthumus, H., Morris, J., Hess, T. M., Neville, D., Philips, E., and Baylis, A. (2009). Impacts of the summer 2007 floods on agriculture in England, *J. Flood Risk Manage.*, 2, 182–189.
- [69] Pulido Y A, (2011). Identificación de Marea de Tormenta para el Estado de Campeche por medio de un Sistema de Sensores de Presión, Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Fecha de grado 03 de junio de 2011.
- [70] Ramírez V. D. L. (2015). Modelación de escenarios en las zonas inundables ante la construcción de un desvío carretero en la ciudad de Champotón, Campeche. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. México.
- [71] Ritchie, S., Hanway, J. (1982). How a corn plant develops. Special Report N°48. Cooperative Extension Service, Iowa State University, Ames, IA, USA, 21 p.
- [72] Rivera A E.; Palacio A G; Villalobos Z G J; Silva C R; Salles A P. (2004). Evaluación de daños en las zonas costeras de la Península de Yucatán por el huracán Isidoro. Universidad Autónoma de Campeche. San Francisco de Campeche. 168 pp.
- [73] Roca, M., Bast, H., Panzeri, M., Hess, T. M., Sayers, P., Flikweert, J., Ogunyoye, F., and Young, R. (2011). Developing the evidence base to describe the flood risk to agricultural land in England and Wales, R&D Technical Report FD2634/TR, DEFRA.
- [74] Ruiz, G., Vega, B.E., Posada, G., Silva, R., Nava, J.. 2010. Implementación de red mareográfica en el litoral del Estado de Campeche 2010 *Revista Jaina*. Centro de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Universidad Autónoma de Campeche, México.
- [75] SAGARPA (2009). PRONAC. "Digitalización del Campo Cañero en México para alcanzar la Agricultura de Precisión de la Caña de Azúcar". Desarrollo de un Modelo Integral de SIG y Edáfica como Fundamento de la Agricultura de Precisión en la Caña de Azúcar en México. Etapa I, San Francisco de Campeche: SAGARPA. GOBIERNO FEDERAL.
- [76] SAGARPA(2015).<http://www.sagarpa.gob.mx/delegaciones/Campeche/Paginas/default.aspx>
- [77] Samuel P., Gouldby B. (2009). Language of Risk – Project Definitions (Second Edition). FLOODSite-Report T32-04-01, 55 pp.

- [78] Smith, D. I. (1994). Flood damage estimation—a review of urban stage–damage curves and loss functions. *Water SA* 20(3):231–238
- [79] Smith K., Ward R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Published by Wiley. ISBN: 978-0-471-95248-0.
- [80] Satrapa L, Fosumpaur P, Horsky M (2005). *Methods of flood damage evaluation*, MS PowerPoint Presentation
- [81] Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Aprobado en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres, celebrada del 14 al 18 de marzo de 2015 en Sendai, Miyagi (Japón).
- [82] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). <http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- [83] Sommer, T., Karpf, C., Ettrich, N., Haase, D., Weichel, T., Peetz, J.-V., Steckel, B., Eulitz, K., and Ullrich, K. (2009). Coupled modelling of subsurface water flux for an integrated flood risk management, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1277-1290, doi:10.5194/nhess-9-1277-2009.
- [84] Thieken, A. H., Ackermann, V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U. et al (2008). Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. In: *Proceedings of the 4th international symposium on flood defence: managing flood risk, reliability and vulnerability*, May 6–8, Toronto, Ontario, Canada
- [85] Thywissen K. (2006). *Components of Risk, A Comparative Glossary*, UNU Institute for Environment and Human Security, Bonn, Germany.
- [86] Twining, S., Procter, C., Wilson, L., Frost, A., Phillips, K., Turner, T., Tiffin, D., Emery, J., Walker, O., Welch, S., and Wells, A. (2007). *Impacts of 2007 Summer Floods on Agriculture*, Tech. Rep. Final, ADAS, Cambridge, UK.
- [87] USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS) (1996). *Engineering Manual-EM 1110-2-1619. Engineering and Design - Risk based analysis for flood damage reduction studies*
- [88] USACE (1985). *AGDAM, Agricultural Flood Damage Analysis, User's Manual (Provisional)*, Computer Program Documentation CPD-48, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.
- [89] Van Westen, C. J. (2010). GIS for the assessment of risk from geomorphological hazards. Pag.205-219. En *Geomorphological Hazards and Disasters Preventions*, ed. Irasema Alcántara-Ayala and Andrew S. Goudie. Published by Cambridge University Press. Cambridge University Press. ISBN: 978-0-52-76925-9
- [90] Vozinaki, A.E., Karatzas, G., Sibetheros, I., Varouchakis, E. (2015). An agricultural flash flood loss estimation methodology: the case study of the Koiliaris basin (Greece), February 2003 flood. *Nat Hazards* (2015) 79:899–920 DOI 10.1007/s11069-015-1882-8.
- [91] Zevenberger, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pashe, N., Garvin, S., Ashley, R. (2011). *Urban Flood Management*. Published by CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group, London, UK. 2011. ISBN: 978-0-415-55944-7

A ANEXOS

A.1 Formato de Encuesta

		Atlas de Riesgos Naturales del Estado de Campeche			
DATOS GENERALES					
Institución que elabora encuesta: Instituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche			Tipo de Encuesta: Vulnerabilidad Física ante Inundaciones en el estado de Campeche		
Entrevistador:			Fecha y hora		Folio
Capturista:			Municipio		Localidad
Colonia:			Calle y No.		
Longitud	Latitud		X(UTM)		Y(UTM)
"Buenas tardes, mi nombre es: _____ (continuar con el saludo) ***** Importante: El encuestador sólo podrá aplicar esta encuesta a personas mayores de 18 años.					

Croquis de ubicación y señas particulares de la vivienda seleccionada. <i>Para llenar por el encuestador</i>					
Color de la casa			Dibujo esquemático de localización de la casa: (calle, río, puentes... etc.) Color de la vivienda:		
Color del Portón o puertas					
Entre que calles se encuentra					
Cota de desplante					
Inventario Fotográfico					
Exterior y Frente de la Casa	Si		No		
Interior: Pedir autorización para tomar fotos al interior	Si		No		

01. Material del techo

Cartón	1
plástico	2
Lámina cartón	3
Lámina plástico	4
Lámina asbesto	5
Lámina metálica (galvanizada)	6
Paja	7
Madera	8
Teja	9
Losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla	10
Losa de concreto ligada	11

02. Material de muros

Cartón o	1
plástico	2
Piedra	3
Láminas de cartón	4
Embarro o Bahareque	5
Madera	6
Adobe sin repellido	7
Adobe con repellido	8
Tabique de barro o concreto sin elementos de concreto	9
Tabique de barro o concreto con elementos de concreto	10

03. Material del piso

Tierra	1
Madera	2
Cemento	3
Mosaico	4
Otro	5

04. Número de pisos (niveles) que tiene la casa _____

05. Número habitaciones que tiene la casa
(Sin contar pasillos)

Piso 1	
Piso 2	
Piso 3	

06. Número de personas viven en la casa

Mujeres	
Hombres	
Niños (de 12 o menos años)	

07. Número de personas que viven en la casa y que trabajan _____

08. Tiempo de vivir la familia en la casa _____

Años (0 si es menos de 1 año)

09. Cuantas veces se ha inundado desde que viven en esta casa?

Ninguna	1
1 o 2 veces	2
3 a 5 veces	3
Más de 5 veces	4
No sabe	9

Recuerda cuales fueron los huracanes/ años _____

Pedir autorización para tomar fotos al interior

(TERMINAR LA ENCUESTA SI ES NINGUNA O NO SABE)

10. Fecha de la última vez que se inundó la casa (Año o Huracán): _____

11. Qué altura de inundación mínima se ha presentado

10 cm o menos	1
20 cm	2
30 cm	3
50 cm	4
70 cm	5
1 m	6
1.5 m	7
2 m	8
2.5 m o más	9
No sabe	99

12. Qué altura de inundación máxima se ha presentado

10 cm o menos	1
20 cm	2
30 cm	3
50 cm	4
70 cm	5
1 m	6
1.5 m	7
2 m	8
2.5 m o más	9
No sabe	99

13. Cuales han sido las pérdidas por la inundación en su hogar?

	Piso 1			Piso 2		
	Cant.	Total (1)	Parcial (2)	Cant.	Total (1)	Parcial (2)
Electrodomésticos						
13.01 TV						
13.02 DVD, BLU RAY						
13.03 Radio, grabadora, mini componente						
13.04 Teléfono fijo:						
13.05 Computadora						
13.06 Consola de videojuegos						
13.07 Ventiladores						
13.08 Aire Acondicionado						
13.09 Refrigerador						
13.10 Estufa						
13.11 Horno de Microondas						
13.12 Licuadora						
13.13 Lavadora						
Otros _____						
Muebles						
13.14 Sala						
13.15 Comedor						
13.16 Sillas						
13.17 Mesas						
13.18 Sofá						
13.19 Camas						
13.20 Colchón						
13.21 Catres						
13.22 Roperos/Armarios						

13.23 Libreros						
13.24 Vitrinas						
13.25 Alacenas						
13.26 Muebles de Baño/Letrina						
Otros _____						
Otros _____						

14. ¿Cuántas pérdidas humanas se han presentado? (0 si es ninguna y pasar a la 16) _____

15. Causa _____

16. ¿Cuáles fueron los daños en la infraestructura de su hogar?

Daños	Piso 1			Piso 2		
	Sí (1) No (2)	Total (1)	Parcial (2)	Cantidad	Total (1)	Parcial (2)
16.1 Cuarteaduras/Reboque						
16.2 Pintura						
16.3 Derrumbe de muros o paredes						
16.4 Hundimientos						
16.5 Ropa						
16.6 Documentos						

17. ¿Que daños a medios de transporte privado sufrió durante la inundación?

	Cantidad	Daño		Descripción
		Total (1)	Parcial (2)	
17.1 Coche				
17.2 Moto				
17.3 Bicicleta/Triciclo				
17.4 Lancha				

18. ¿Que tipo de ayuda recibió de las autoridades para cubrir los daños por inundación?:

	Monto \$	¿Suficiente? (1 sí) (2 no)	¿Utilizado en?
18.1 Económico			
18.2 Material de construcción	Sí(1) No(2)		
18.3 Alimenticia/Despensas			
18.4 Servicios médicos /Consulta	Sí(1) No(2)		
18.5 Otro			

19. Cual fue el monto de los gastos asociados a la limpieza de su casa después de la inundación?

Ninguno	1
Hasta \$1,000	2
Más de \$1,000 hasta \$3,000	3
Más de \$3,000 hasta \$5,000	4
Más de \$5,000	5
No sabe	9

20. ¿Ha podido continuar con su trabajo después de la inundación? Sí (1) No (2)

Causa:

Incomunicados	1
Cancelación de actividades	2
No había trabajo	3
No había pesca	4
Jubilados	0

21. ¿Usted ó algún miembro de su familia a sufrido alguna enfermedad después de una inundación?

Ninguna	1	
Gastrointestinales	2	
Respiratorias	3	
De la piel	4	
Otra: (anotar)	5	Dengue (Implica el 2, 3 y 4)
No sabe	9	

22. ¿Que tipo de tratamiento recibió?

Ninguno	1	
Consulta médica	2	
Automedicación	3	
Remedio casero	4	
Otro: (anotar)	5	
No sabe	9	

23. ¿Ha podido dormir por la inundación o durante ella?

Sí (1) No (2)

¿Por qué? _____

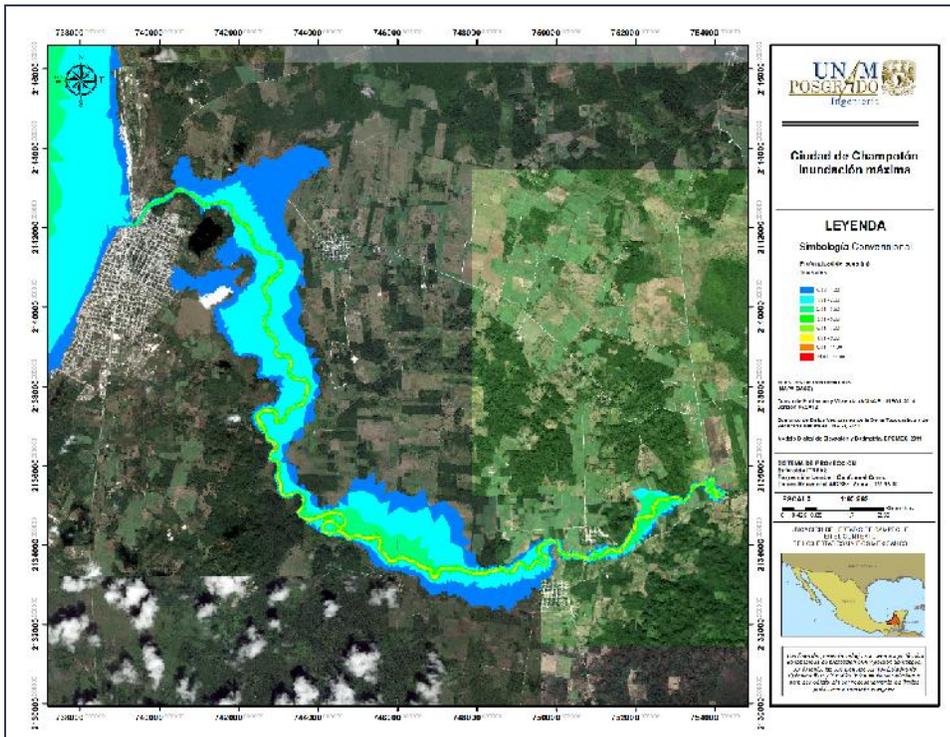
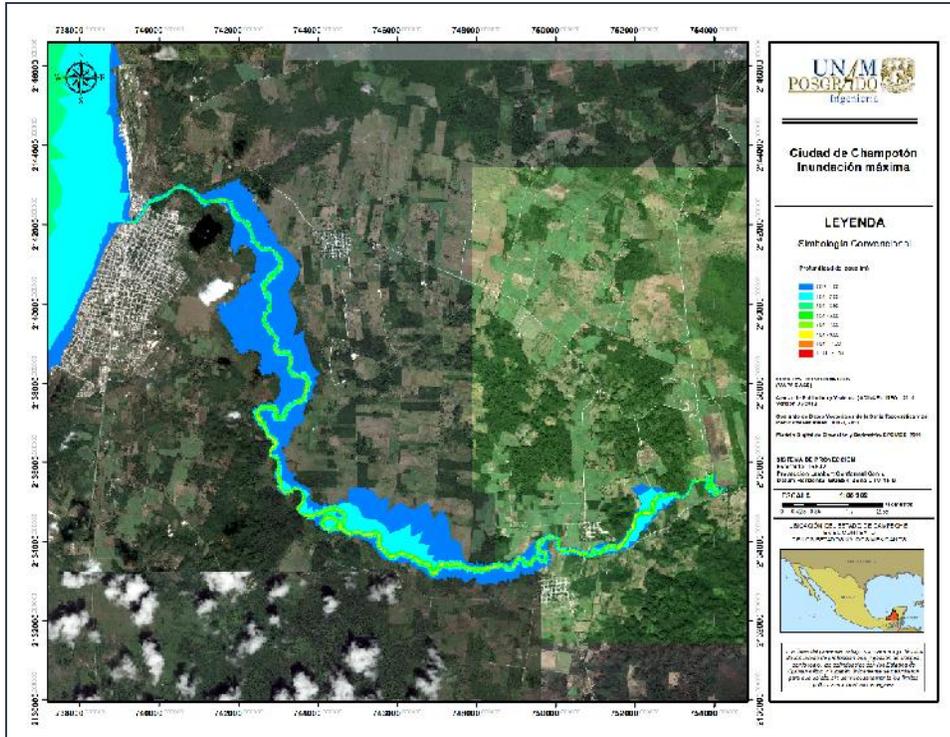
Preocupación/Intranquilos	1
Temor/Miedo	2
Angustia	3
Tensión	4
Mal olor	5
Humedad	6
Culebras	7

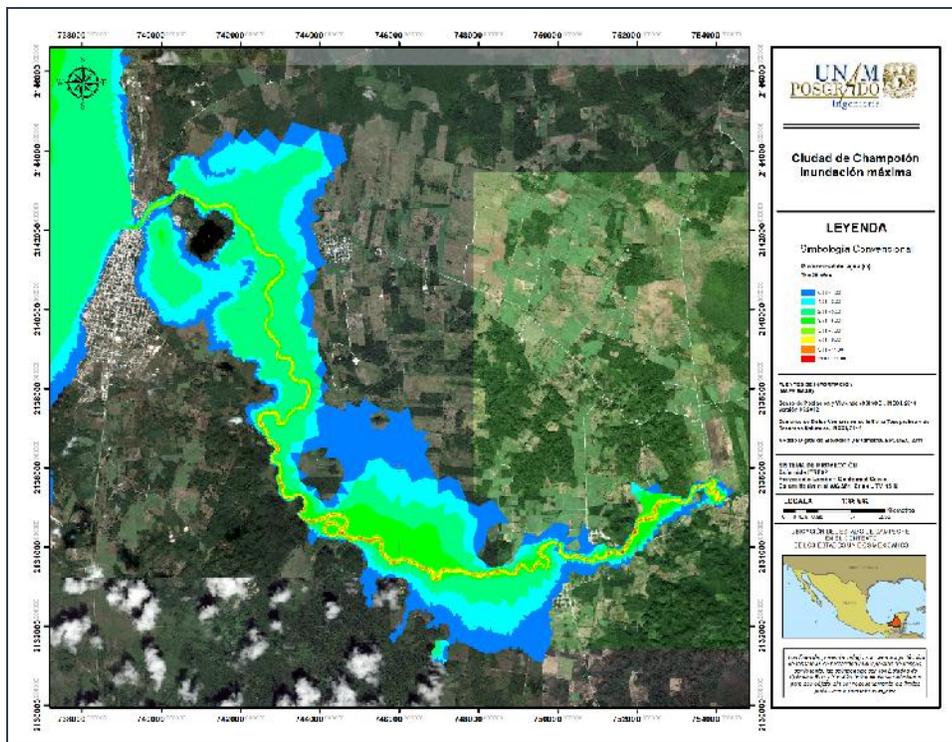
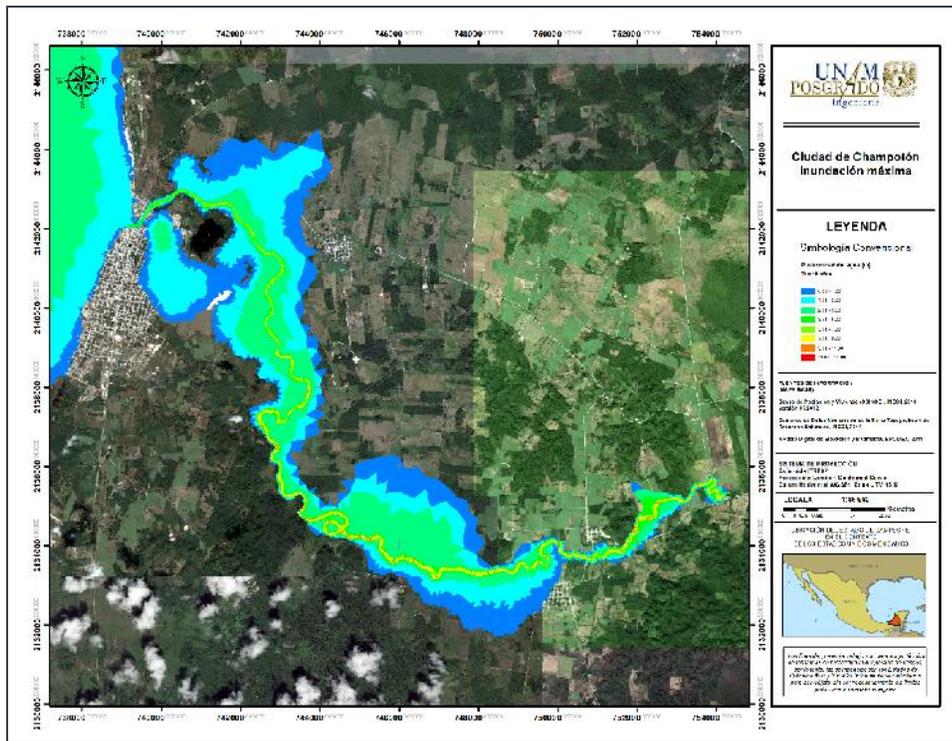
24. ¿Cuenta con algún servicio médico?

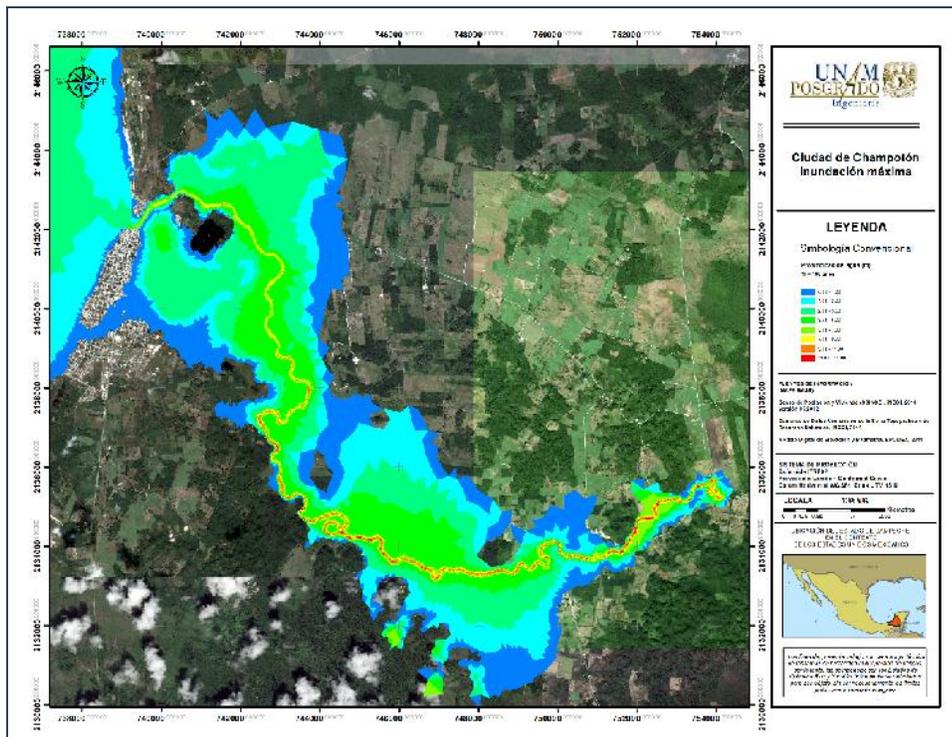
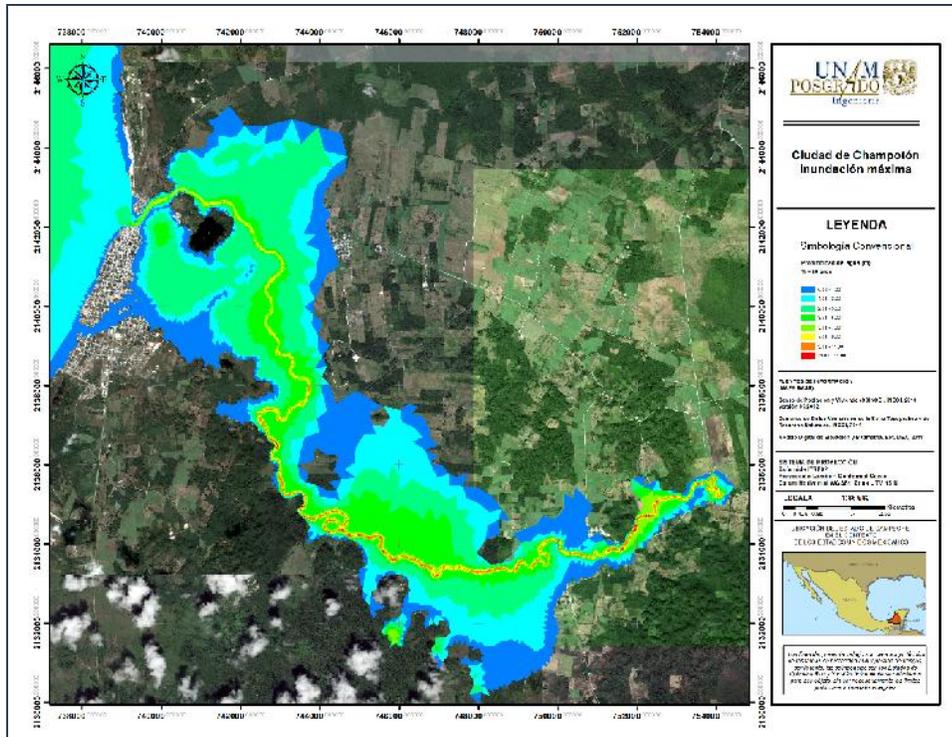
Ninguno	1	
IMSS	2	
ISSSTE	3	
Seguro Popular	4	
Cruz Roja	5	
Clínica	6	
Otro: (anotar)	7	
No sabe	9	

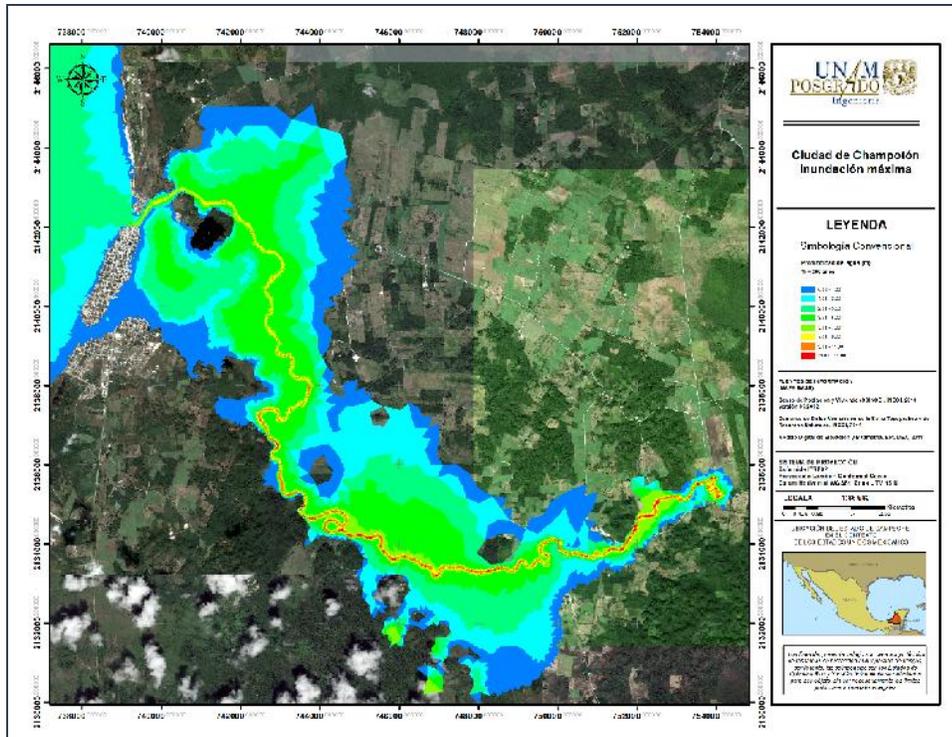
Agadecer la atención prestada, despedirse y si lo solicita dejar los datos de contacto

A.2 Resultados modelación hidráulica del río Champotón









A.3 Contenidos en viviendas de la ciudad de Champotón

A.3.1 Electrónicos

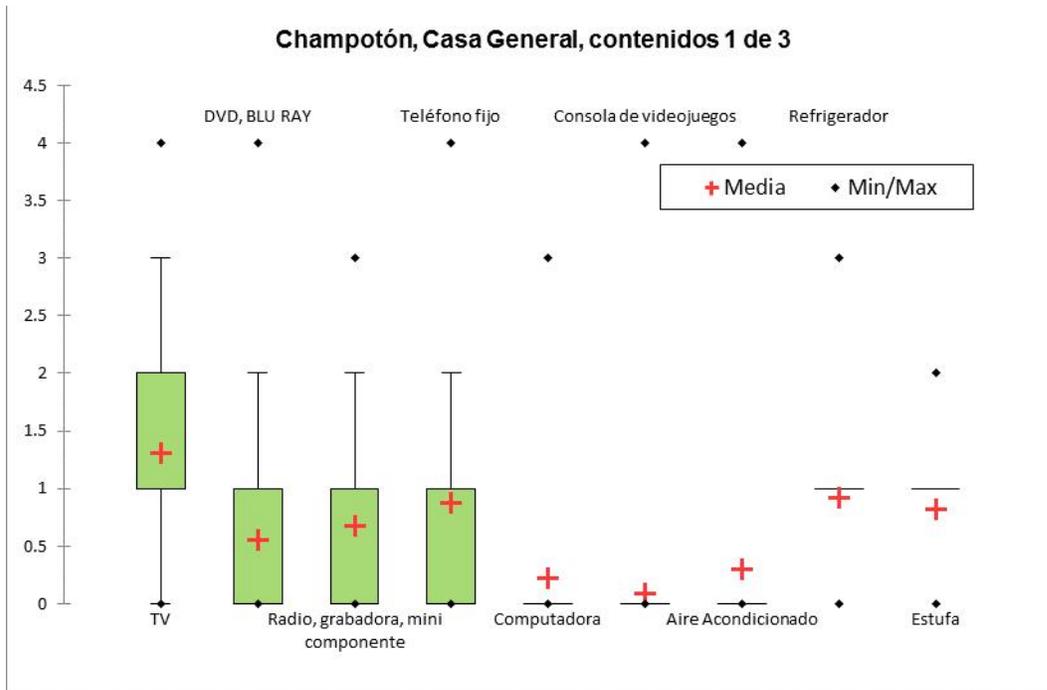


Figura 65. Casa General, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

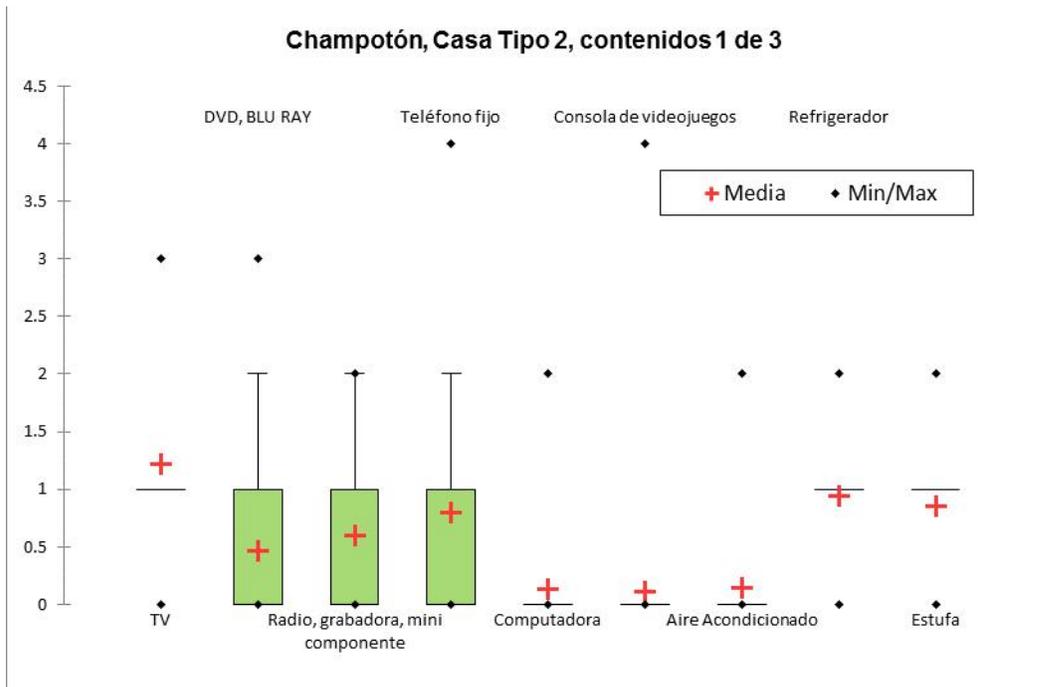


Figura 66. Casa Tipo 2, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

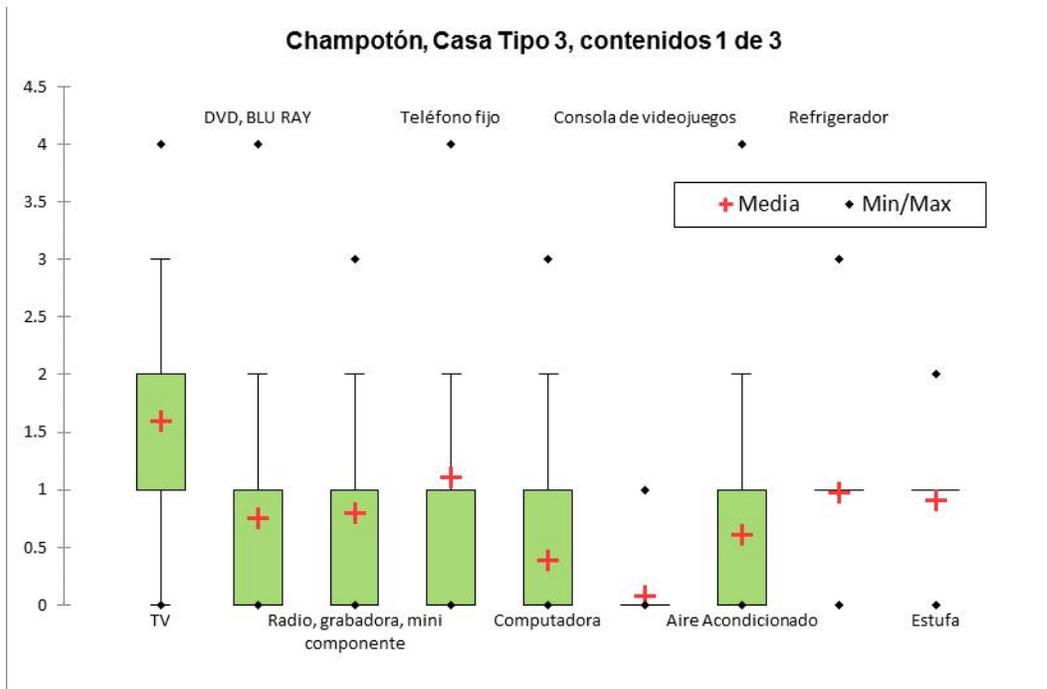


Figura 67. Casa Tipo 3, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

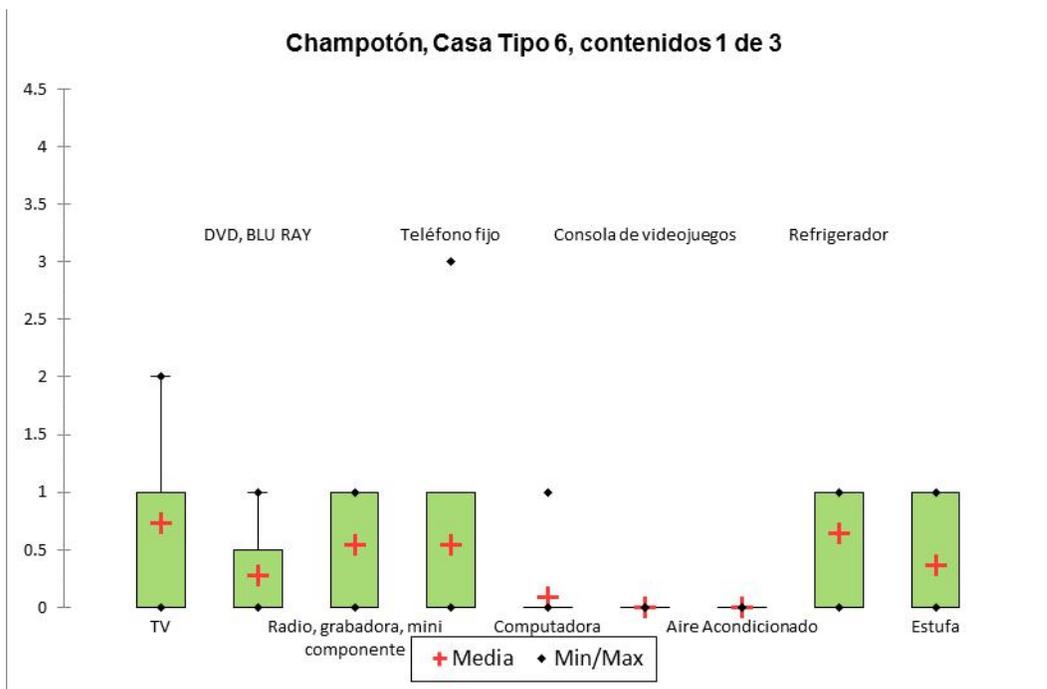


Figura 68. Casa Tipo 6, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos



Figura 69. Casa Tipo 7, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

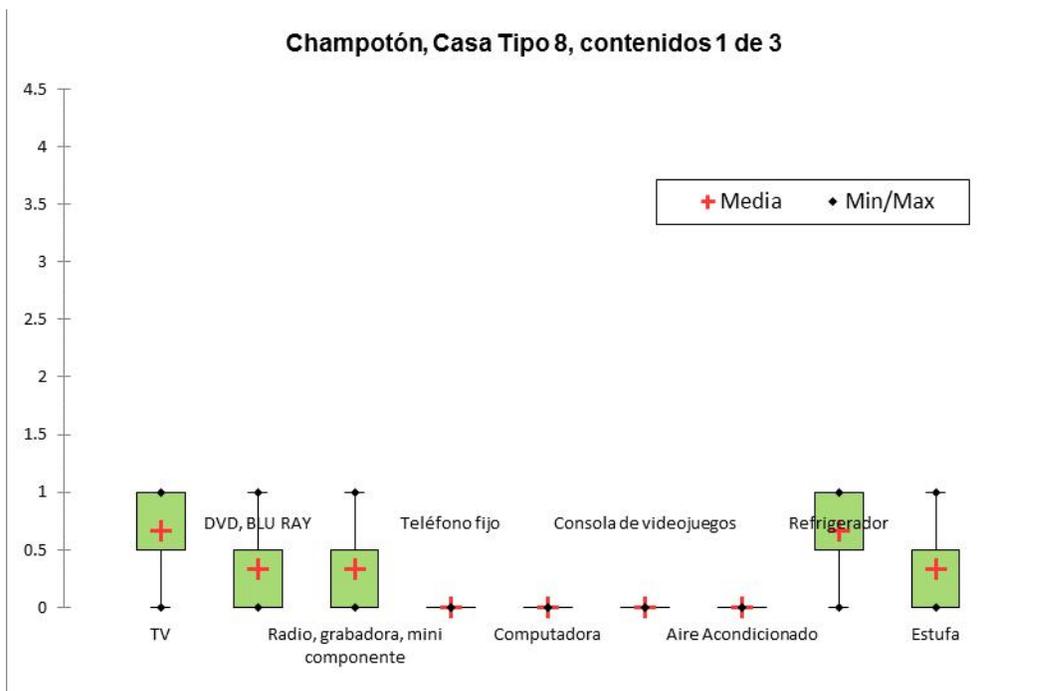


Figura 70. Casa Tipo 8, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

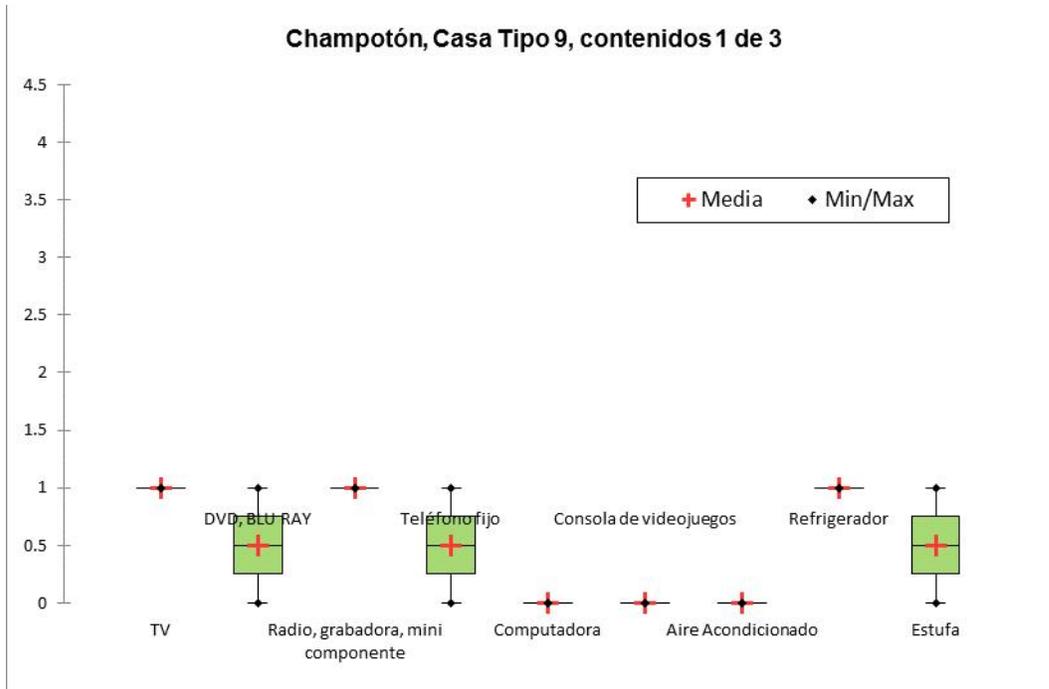


Figura 71. Casa Tipo 9, Champotón, Contenidos: aparatos electrónicos

A.3.2 Muebles y aparatos electrónicos varios

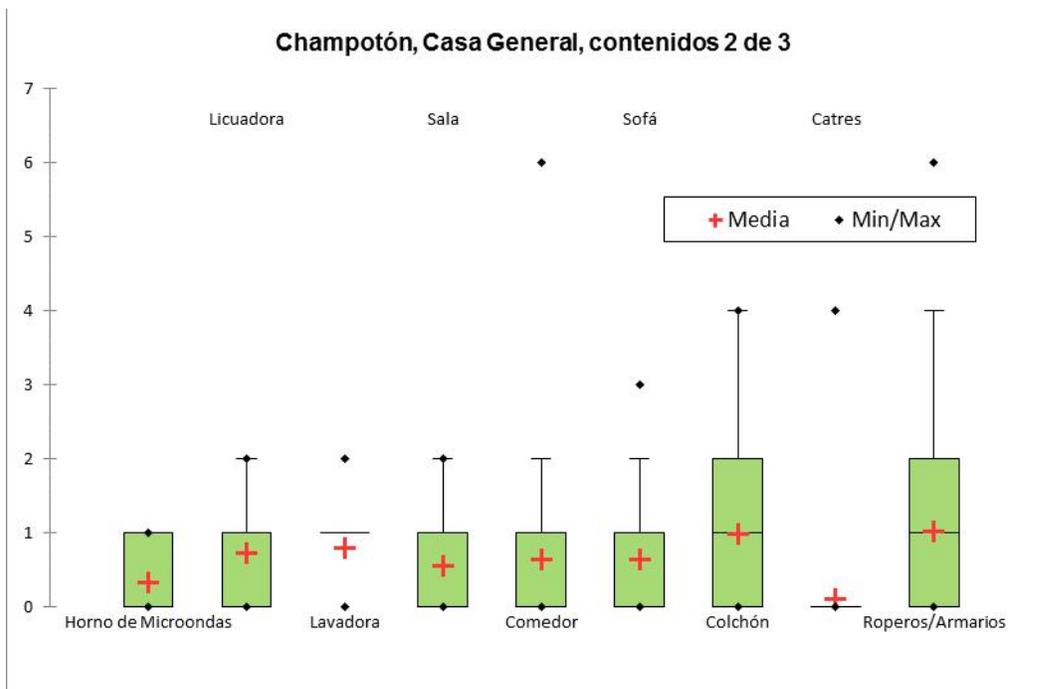


Figura 72. Casa General, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

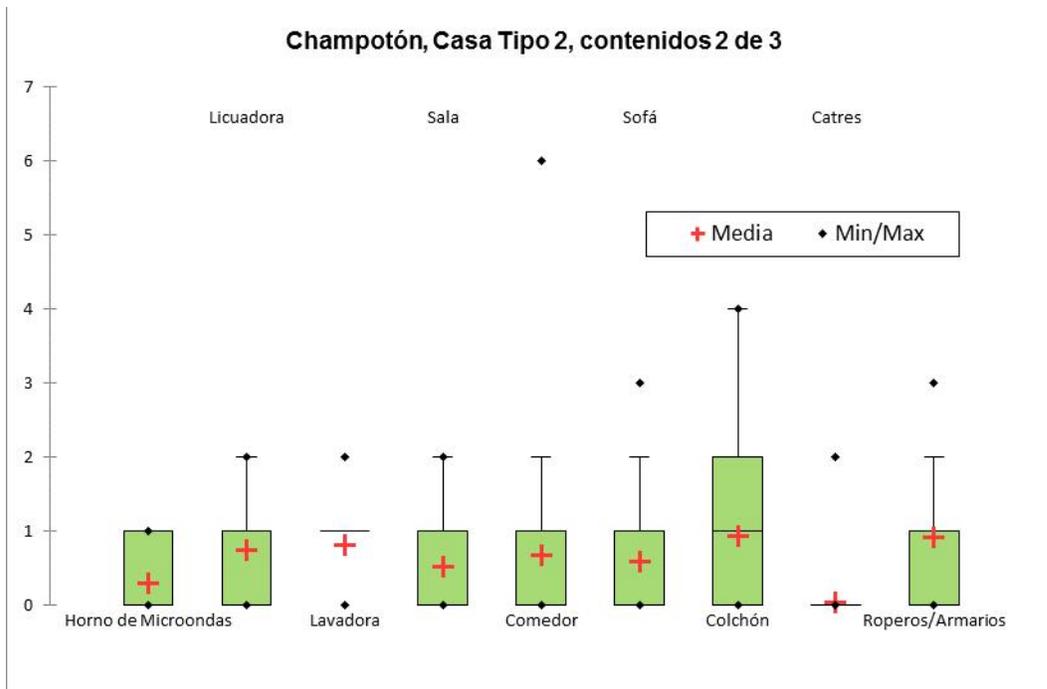


Figura 73. Casa Tipo 2, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

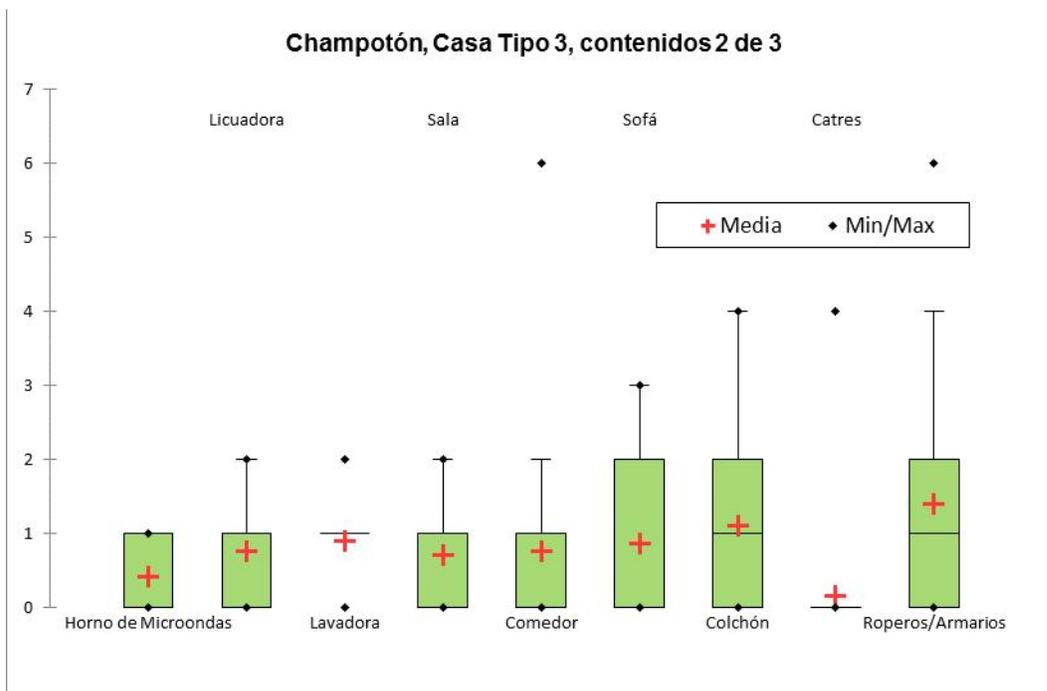


Figura 74. Casa Tipo 3, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

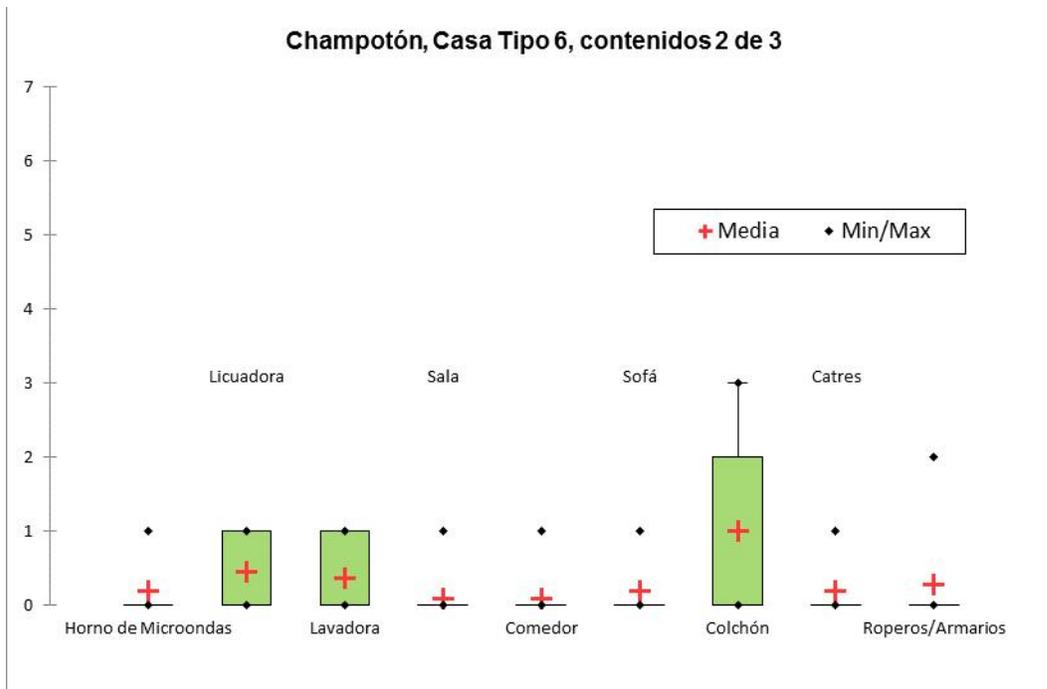


Figura 75. Casa Tipo 6, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

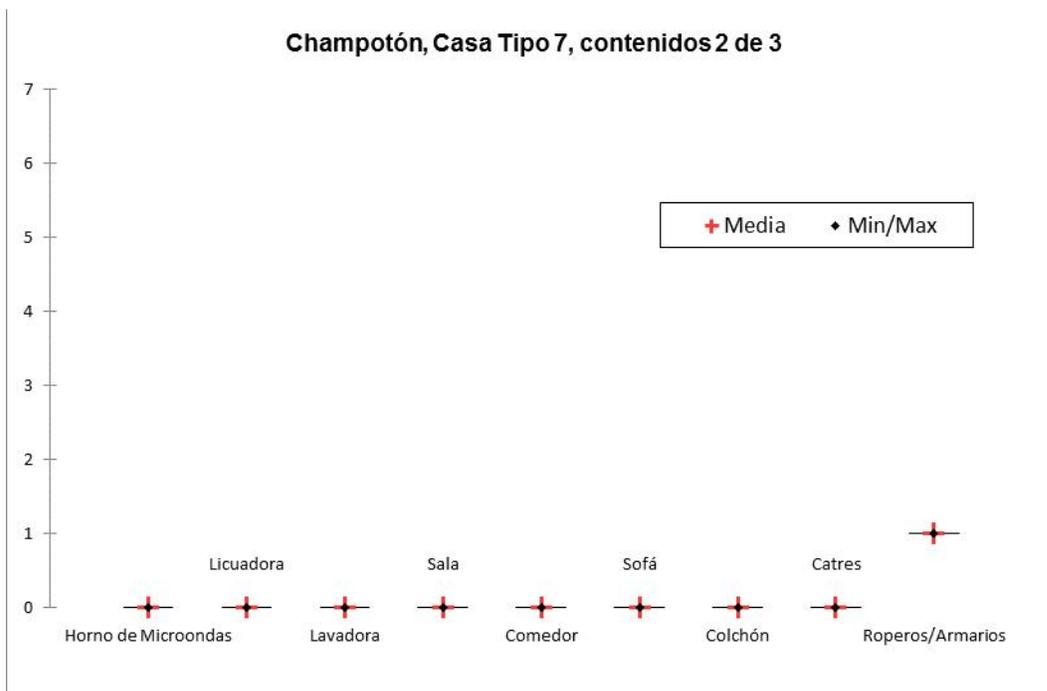


Figura 76. Casa Tipo 7, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos



Figura 77. Casa Tipo 8, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

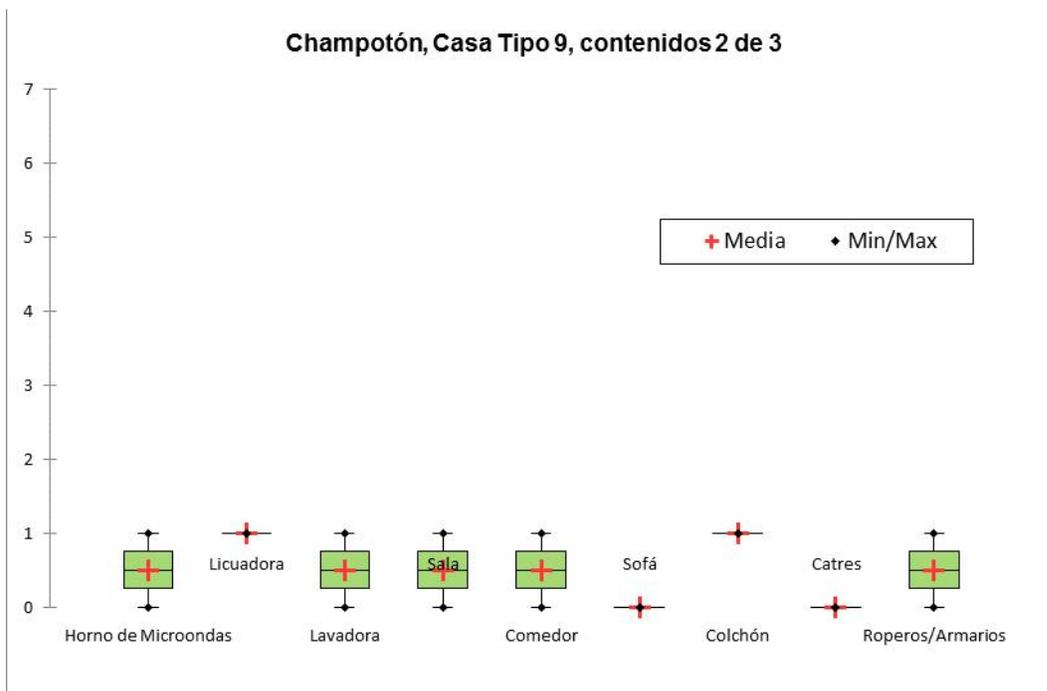


Figura 78. Casa Tipo 9, Champotón, Contenidos: muebles y electrónicos

A.3.3 Muebles

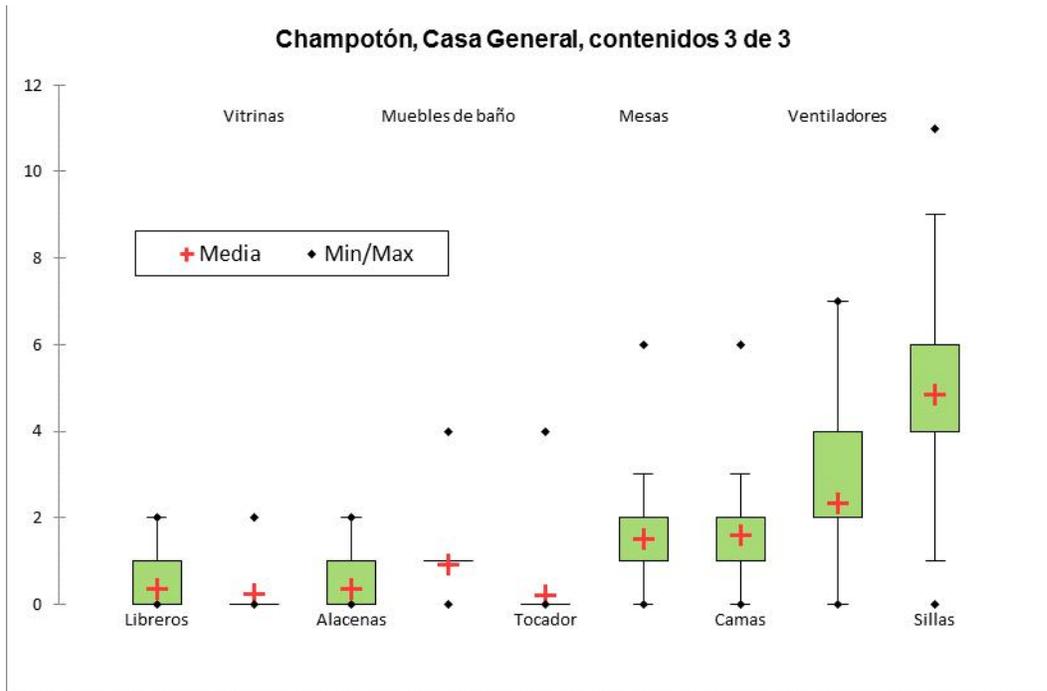


Figura 79. Casa General, Champotón, Contenidos: muebles

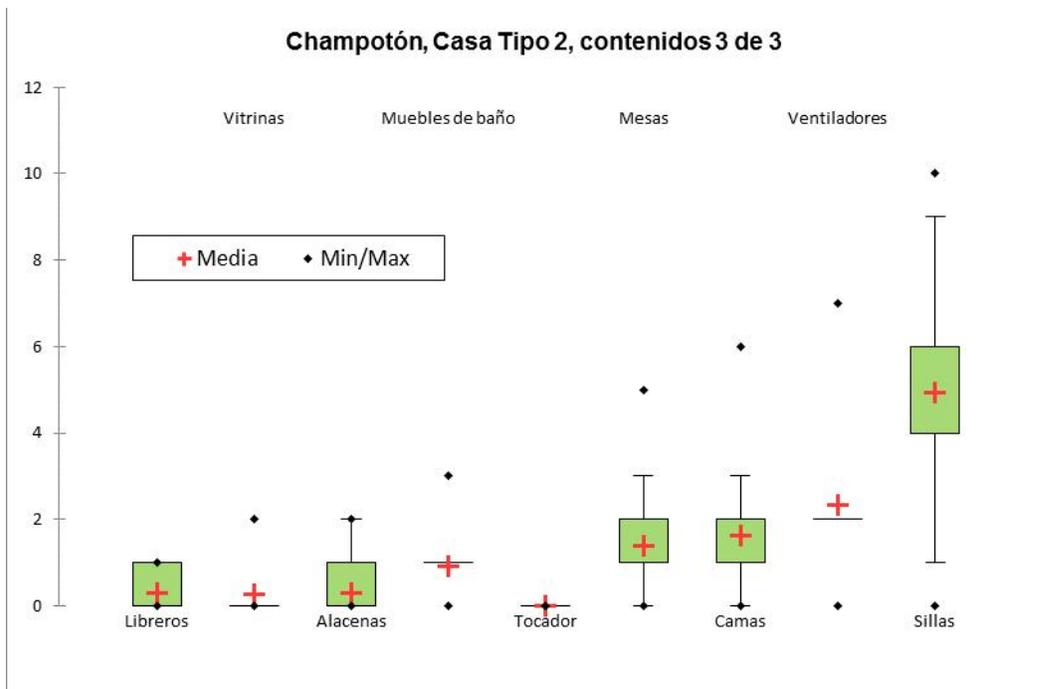


Figura 80. Casa Tipo 2, Champotón, Contenidos: muebles

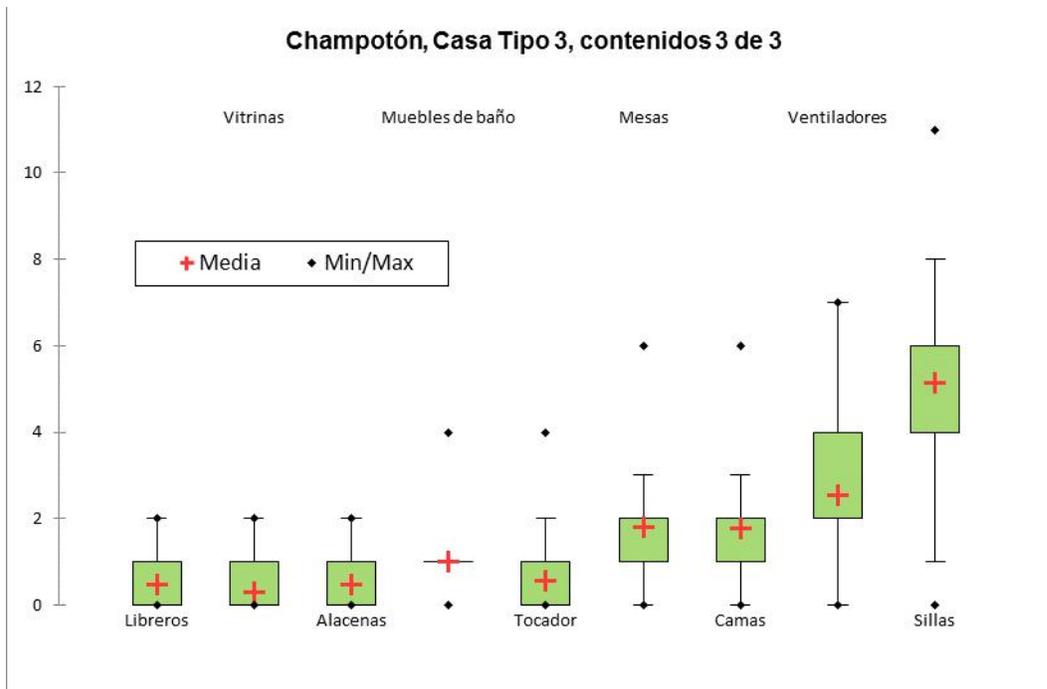


Figura 81. Casa Tipo 3, Champotón, Contenidos: muebles

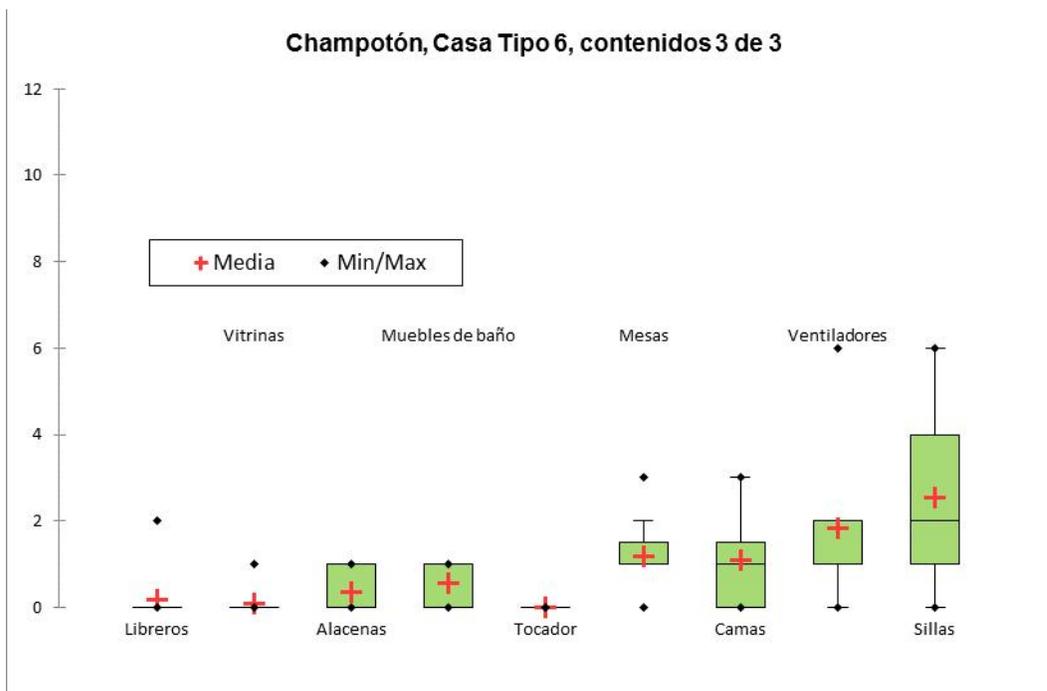


Figura 82. Casa Tipo 6, Champotón, Contenidos: muebles



Figura 83. Casa Tipo 7, Champotón, Contenidos: muebles

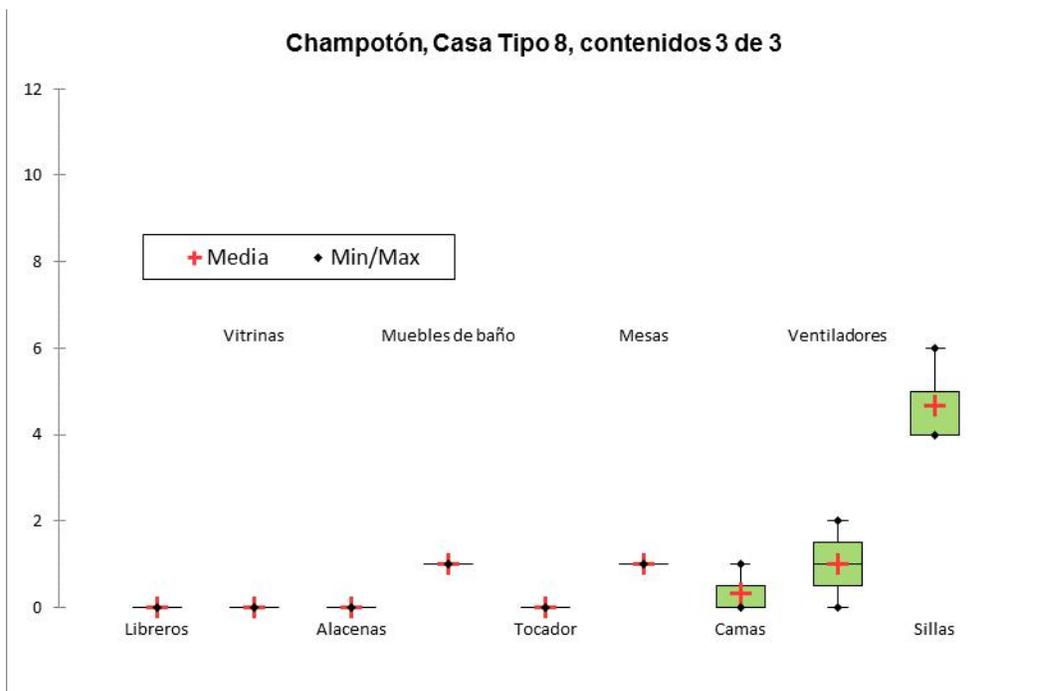


Figura 84. Casa Tipo 8, Champotón, Contenidos: muebles

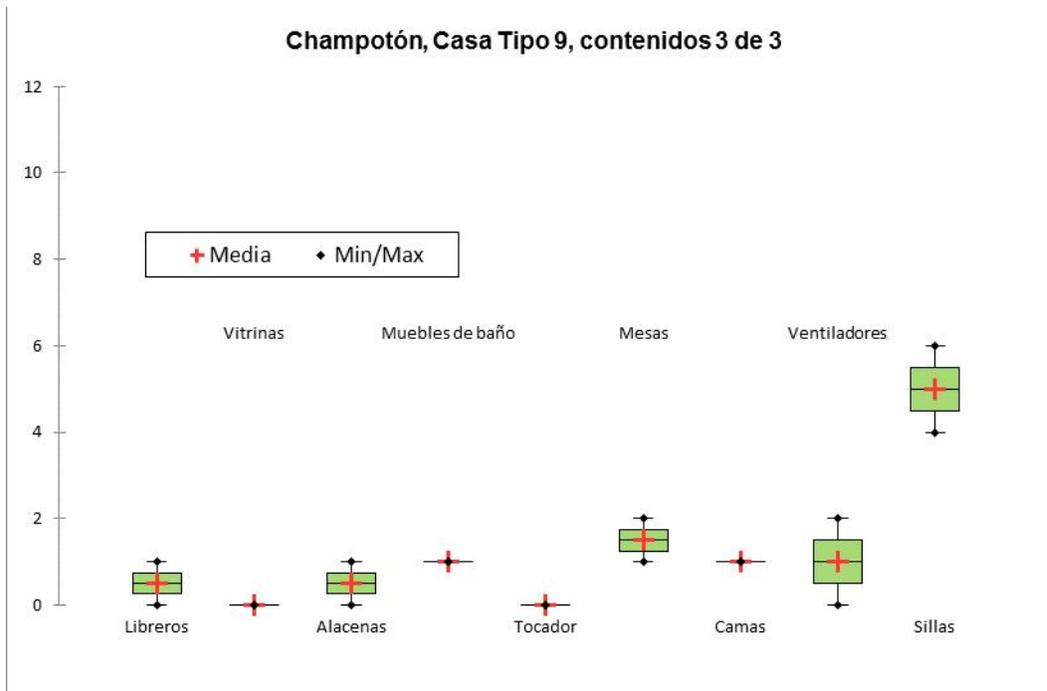


Figura 85. Casa Tipo 9, Champotón, Contenidos: muebles

A.4 Daños agrícolas

Mes		Enero	Febrero	marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octubre	Nov	Diciembre
Pmes		0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028
% I Daño (4-7D)		10	20	50	100	5	5	10	20	50	100	5	5
Costo Producción (\$/ha)		5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00	5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00
Tr	Área inundada (ha)	Daño (\$)											
2	1.9685	1145.23	2242.52	3789.67	4902.40	191.30	929.16	2652.51	8585.94	38097.86	70525.99	828.56	632.71
5	2.0113	2031.57	3978.08	6722.63	8696.55	339.35	1648.26	4705.39	15230.91	67583.21	125108.65	1469.81	1122.38
10	3.1550	2860.62	5601.48	9466.04	12245.48	477.84	2320.90	6625.59	21446.43	95162.92	176163.65	2069.62	1580.41
20	3.6747	3502.72	6858.79	11590.79	14994.12	585.09	2841.85	8112.78	26260.32	116523.31	215705.56	2534.17	1935.15
50	9.0178	3692.01	7229.45	12217.18	15804.42	616.71	2995.42	8551.21	27679.46	122820.38	227362.57	2671.12	2039.72
100	16.5697	5180.02	10143.17	17141.13	22174.16	865.27	4202.68	11997.64	38835.25	172321.32	318997.69	3747.68	2861.80
200	21.1385	5319.21	10415.72	17601.71	22769.98	888.52	4315.61	12320.02	39878.76	176951.58	327569.14	3848.38	2938.70
500	48.6625	6218.47	12176.59	20577.43	26619.44	1038.73	5045.20	14402.83	46620.61	206866.80	382947.59	4498.98	3435.51

Mes		Enero	Febrero	marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octubre	Nov	Diciembre
Pmes		0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028
% I Daño (8-11D)		10	20	50	100	5	5	10	20	50	100	5	5
Costo Producción (\$/ha)		5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00	5740.00	6596.00	7452.00	10252.00	2050.00	5500.00
Tr	Área inundada (ha)	Daño (\$)											
2	2.4655	68.56	134.25	363.00	586.98	11.45	55.63	158.80	514.01	3649.27	8444.32	49.60	37.88
5	4.0883	113.69	222.61	601.91	973.31	18.99	92.24	263.31	852.31	6051.08	14002.04	82.25	62.81
10	4.2093	117.05	229.20	619.74	1002.13	19.55	94.97	271.11	877.56	6230.27	14416.70	84.69	64.67
20	5.6057	155.88	305.24	825.32	1334.57	26.04	126.47	361.04	1168.67	8297.06	19199.18	112.78	86.12
50	14.0879	391.75	767.11	2074.16	3353.97	65.44	317.84	907.36	2937.03	20851.71	48250.32	283.43	216.43
100	27.2108	756.67	1481.67	4006.23	6478.19	126.39	613.91	1752.56	5672.87	40275.01	93195.34	547.44	418.04
200	39.9675	1111.41	2176.29	5884.39	9515.23	185.65	901.71	2574.18	8332.37	59156.34	136886.25	804.09	614.02
500	52.7974	1468.18	2874.89	7773.33	12569.70	245.24	1191.17	3400.51	11007.13	78146.01	180827.87	1062.21	811.13

A.5 Modelo lluvia-escurrencimiento (De Luna, 2016)

Los alcances del trabajo consideran sólo el desbordamiento del río, sin embargo, el efecto de la lluvia local combinado con el tipo de suelo genera acumulación del agua o encharcamientos, en zonas de cultivo donde el diseño del drenaje no es el adecuado por lo que también se producen daños. Por lo tanto, se recomienda utilizar un modelo lluvia-escurrencimiento para el análisis de zonas donde no existe influencia de las inundaciones por el desbordamiento del río. Se presentan a continuación modelaciones hidráulicas de la zona de estudio para el huracán Isidore (2002).

