



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

DETERMINACIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO HIDRO-METEOROLÓGICO EN  
ZONAS COSTERAS: APLICACIÓN EN EL ESTADO DE CAMPECHE

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

PRESENTA:  
MIREILLE DEL CARMEN ESCUDERO CASTILLO

TUTOR PRINCIPAL  
RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. MAYO 2016



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ESCALANTE SANDOVAL CARLOS A.

Secretario: DR. MENDOZA BALDWIN EDGAR GERARDO

Vocal: DR. SILVA CASARÍN RODOLFO

1 er. Suplente: DR. MARIÑO TAPIA ISMAEL DE JESÚS

2 d o. Suplente: DR. RODRÍGUEZ VALDÉS ALEJANDRO

Lugar donde se realizó la tesis:

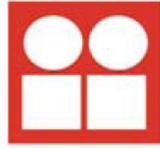
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, CIUDAD DE MÉXICO

**TUTOR DE TESIS:**

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

-----  
**FIRMA**





**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**



### *Agradecimientos*

Gracias al tutor de este trabajo, el Dr. Rodolfo Silva Casarín, y al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por su tiempo, dedicación, paciencia, confianza, consejos y oportunidades para mejorar mi formación académica, transmitiéndome su pasión por la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico prestado, así como al programa de Becas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Gracias a mis amigos del Grupo, a Cesia, Valeria, Regina, Erika, Itxaso, Anahí, Violeta, Miguel Delgadillo, Poncho, Erick, Jair, Gibrán, Santiago, Mario, Musmé, Ligia, Emigdio, Guillermo, Francisco, Gerardo, Isaac, Chucho, Xavi, José Hoil, Germán, Edgar Salazar, Sebas, Dalila, Monique, Abril, Raúl, Ana Meneses y Miguel Laverde, por acompañarme durante esta etapa creando un ambiente de trabajo de complicidad y confianza.

Gracias a Cuau, Victor Manuel, Rubí, Ale, Pati y Brenda, por su convivencia y amistad.

Gracias a Angie, por ser mi gran amiga y confidente.

Gracias a Yazmin, Jill, Icela, Celia, Chela y Dolores, por abrirme las puertas como una más de su familia.

Gracias a Carmen, Pablo e Ivonne por su amistad y vivencias compartidas.

Gracias a mis amigos de clase de inglés del Cele, Karla, Mercedes, Nassim y, en especial, al que fue nuestro profesor Luis Cabrera, por esos momentos inolvidables de diversión y aprendizaje.

Gracias a mis amigos de Brasil, Karol, Rafa, Anderson, Antonio, Cicero y el profesor Dr. Pedro De Souza Pereira por el tiempo y experiencias compartidas durante mi estancia de investigación.

Gracias a mis amigos de Cancún, Tere, Isaías, Raúl, Elvira y Enrique por su cálida acogida.

Gracias a mis amigos de España que siempre llevo en el corazón, José Pascual, José Carlos, Jessica, Joaquín, Ana, Alicia, Maria Pilar, Marisa y Adriana.

Gracias a mis padres y a mi hermana, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión. Gracias.

Ciudad de México, Mayo de 2016.

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 0. Motivación y Síntesis.....	1
Capítulo 1. Estado del arte.....	7
Capítulo 2. Metodología.....	31
Capítulo 3. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen y Cancún. Métodos.....	65
Capítulo 4. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen y Cancún. Resultados.....	97
Capítulo 5. Tratamiento del riesgo en Isla del Carmen.....	129
Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	139
Anexos	
Bibliografía	



## ÍNDICE MEMORIA

0.1. Motivación y objetivos principales del estudio	1
0.2. Síntesis del estudio .....	5
1.1. Definición de riesgo .....	7
1.2. Metodologías de evaluación y tratamiento del riesgo .....	8
1.2.1. Metodologías tradicionales de evaluación del riesgo .....	8
1.2.2. Evaluación cuantitativa del riesgo .....	9
1.2.3. Representación del análisis y tratamiento del riesgo .....	12
1.3. Riesgo como probabilidad y consecuencias .....	14
1.3.1. Evaluación de la probabilidad .....	14
1.3.2. Evaluación de las consecuencias .....	15
1.3.3. Integración de probabilidad y consecuencias en definición de riesgo .....	28
1.4. Definición de la evolución temporal del riesgo .....	30
1.5. Análisis espacial del riesgo .....	30
2.1. Esquema general y fundamentos .....	31
2.2. Pérdida de vidas humanas y lesiones .....	32
2.3. Otras perturbaciones sociales (enfermedades e infecciones) .....	39
2.4. Pérdidas medioambientales .....	43
2.4.1. Evaluación de pérdidas sobre el ecosistema de manglar .....	45
2.5. Dificultad de recuperación después de la inundación .....	57
2.6. Análisis de sensibilidad de los modelos de evaluación de pérdidas intangibles directas propuestos .....	58
2.6.1. Análisis escenarios-modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones .....	58
2.6.2. Análisis escenarios-modelo de pérdidas sociales directas (enfermedades e infecciones) .....	60
2.6.3. Análisis escenarios-pérdidas medioambientales .....	62
3.1. Aplicación general de metodología en Isla del Carmen y Cancún .....	65
3.2. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen .....	68
3.2.1. Análisis de elementos ‘Fuente’ .....	68

3.2.2. Análisis de elementos ‘Trayectoria’ .....	70
3.2.3. Análisis de las ‘Consecuencias’ sobre los ‘Receptores’ .....	72
3.3. Evaluación de riesgos en Cancún .....	89
3.3.1. Análisis de elementos ‘Fuente’ .....	89
3.3.2. Análisis de elementos ‘Trayectoria’ .....	90
3.3.3. Análisis de las ‘Consecuencias’ sobre el ‘Receptor’ .....	93
4.1. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen .....	97
4.1.1. Análisis del peligro de erosión e inundación.....	97
4.1.2. Análisis de consecuencias .....	105
4.2. Evaluación de riesgos en Cancún .....	126
4.2.1. Análisis de peligros .....	126
4.2.2. Análisis de consecuencias .....	128
5.1. Playa de Isla del Carmen .....	129
5.1.1. Diagnóstico del estado.....	129
5.1.2. Tratamiento del riesgo de erosión en la playa de Isla del Carmen .....	131
5.2. Ciudad del Carmen .....	131
5.2.1. Diagnóstico por daños físicos (edificios y bienes) .....	131
5.2.2. Diagnóstico por posibles problemas de salud por contaminación.....	134
5.2.3. Diagnóstico por pérdida de vidas humanas y lesiones .....	135
5.2.4. Tratamiento del riesgo de inundación en Ciudad del Carmen.....	136
5.3. Ecosistema de manglar de Isla del Carmen .....	137
5.3.1. Diagnóstico del estado.....	137
5.3.2. Tratamiento del riesgo de inundación en el ecosistema de manglar .....	137
6.1. Conclusiones.....	139
6.2. Futuras líneas de investigación.....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 0.1. Isla del Carmen e isla barrera de Cancún: dos zonas costeras en riesgo hidrometeorológico en México. ....	2
Figura 0.2. (a) Expansión de Ciudad del Carmen; (b) Crecimiento de la zona hotelera de Cancún. ....	3
Figura 0.3. (a) Estructuras de protección en Isla del Carmen ( <i>fotos propias, Abril 2012</i> ); (b) Estructuras de protección en Cancún. ....	3
Figura 0.4. (a) Área marginal en Ciudad del Carmen; (b) Desarrollo de lujo en Cancún. ....	4
Figura 1.1. El triángulo de riesgo de inundación ( <i>modificado de Crichton, 2001</i> ). ....	9
Figura 1.2. Esquema del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en el análisis del riesgo de inundación por marea de tormenta ( <i>modificado de Oumeraci et al., 2015</i> ). ..	12
Figura 1.3. Método de la matriz de riesgo ( <i>FEMA, 1997</i> ). ....	12
Figura 1.4. Representación genérica del análisis de riesgo ( <i>modificado de Faber &amp; Stewart, 2003</i> ). ....	12
Figura 1.5. Árbol de decisiones: (a) “pre-análisis” y “análisis posterior”; (b) “análisis pre-posterior” ( <i>modificado de Faber &amp; Stewart, 2003</i> ). ....	13
Figura 1.6. Diagrama de modelo para evaluación y gestión del riesgo, proyecto THESEUS ( <i>modificado de Zanuttigh et al., 2014</i> ). ....	14
Figura 1.7. Clasificación de los daños de inundación ( <i>modificado de Jonkman et al., 2008</i> ). ....	16
Figura 1.8. Clasificación de los daños de inundación ( <i>modificado de Dassanayake et al., 2010</i> ). ....	16
Figura 1.9. Clasificación de los daños de inundación, objeto de análisis de la investigación. ....	17
Figura 1.10. Modelo de evaluación de pérdida de vidas ( <i>modificado de Burzel et al., 2015</i> ). ....	21
Figura 1.11. Esquema general de pérdida de vidas debido a inundación ( <i>modificado de Jonkman et al., 2008</i> ). ....	22
Figura 1.12. Zonas de peligro en la estimación de pérdida de vidas por abertura de brecha en estructuras de defensa ( <i>modificado de Jonkman &amp; Vrijling, 2008</i> ). ....	23
Figura 1.13. Metodología para la evaluación de las pérdidas medioambientales ( <i>modificado de Dassanayake et al., 2015</i> ). ....	26

Figura 1.14. Metodología general para la estimación de los daños directos e indirectos ( <i>modificado de Ujeyl &amp; Rose, 2015</i> ). .....	28
Figura 1.15. Funciones de valores: (a) pérdidas económicas; (b) lesiones físicas; (c) pérdida de vidas ( <i>modificado de Dassayanake et al., 2015</i> ). .....	29
Figura 2.1. Diagrama general de modelo para la evaluación y gestión del riesgo. 31	
Figura 2.2. Categorías de consecuencias por inundación analizadas en la investigación ( <i>en rojo, aquéllas en las que se aportan nuevos métodos de evaluación</i> ). .....	32
Figura 2.3. Curvas teóricas de Inestabilidad de Momento y Fricción (persona $m=75$ kg; $L=1.75$ m; $g=9.81$ m/s <sup>2</sup> ; $\alpha=75^\circ$ ; $C_D=1.1$ ; $B=0.4$ m; $\mu=0.5$ ; $\rho=1000$ kg/m <sup>3</sup> ( <i>modificado de Jonkman &amp; Penning-Rowsell, 2008</i> )). .....	35
Figura 2.4. Modelo de Pérdidas humanas y lesiones. ....	37
Figura 2.5. Modelo de pérdidas de salud por el contacto directo con agua contaminada. ...	41
Figura 2.6. Diagrama de evaluación de pérdidas medioambientales. ....	44
Figura 2.7. Distribución global de manglares en el mundo, y su delimitación en 6 regiones biogeográficas (Spalding et al., 2010). .....	46
Figura 2.8. Función de fragilidad vs la tensión de flexión por incidencia del tsunami ( <i>modificado de Yanagisawa et al., 2009</i> ). .....	53
Figura 2.9. Relación entre profundidad de inundación de tsunami; tasa de supervivencia (inverso de probabilidad de daño) de la selva de manglar; y tasa de reducción de la profundidad de inundación del tsunami por la selva de manglar (servicio ambiental de protección costera) ( <i>modificado de Yanagisawa et al., 2009</i> ). .....	53
Figura 2.10. Método para evaluar la probabilidad de daño e impacto en el servicio ambiental de protección costera de los árboles de manglar, debido a las características del flujo de inundación. ....	54
Figura 2.11. Parámetros de resiliencia seleccionados frente a una inundación; en los sectores residencial, turístico, industrial, comercial e infraestructura. ....	58
Figura 2.12. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones: escenario optimista, medio y pesimista. ....	60
Figura 2.13. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por problemas de salud: escenario optimista, medio y pesimista. ....	62
Figura 2.14. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar: escenario optimista, medio y pesimista. ....	64

Figura 3.1. Esquema de la aplicación del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en Isla del Carmen. ....	66
Figura 3.2. Esquema de la aplicación del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en Cancún. ....	67
Figura 3.3. División del receptor en celdas cuadradas de 50 m, para evaluación de riesgos en Isla del Carmen. ....	67
Figura 3.4. División del receptor en celdas cuadradas de 50 m, para evaluación de riesgo en Cancún. ....	68
Figura 3.5. Resultados Monte Carlo en los próximos 10, 20, 30 y 50 años: (a) Altura de ola significativa; (b) Marea de tormenta. ....	69
Figura 3.6. Mallas de cálculo utilizadas en la aplicación del modelo numérico XBeach en Isla del Carmen. ....	71
Figura 3.7. Distribución de clases de rugosidad en Isla del Carmen, en función de los usos del suelo. ....	71
Figura 3.8. Usos del suelo en Ciudad del Carmen. ....	73
Figura 3.9. Categorías de daños/pérdidas analizadas en Ciudad del Carmen ( <i>en azul</i> ). ....	73
Figura 3.10. Viviendas típicas en Ciudad del Carmen. ....	74
Figura 3.11. Vivienda en condiciones precarias en Ciudad del Carmen. ....	74
Figura 3.12. Viviendas habitadas con suelo de tierra en Ciudad del Carmen. ....	74
Figura 3.13. Clases de pérdidas económicas de acuerdo con la cantidad y naturaleza de los bienes en el interior de las viviendas. ....	75
Figura 3.14. Curva para estimar las pérdidas sobre la estructura de vivienda de un piso con planta baja ( <i>modificado de Davis &amp; Skaggs, 1992</i> ). ....	76
Figura 3.15. Curva para estimar las pérdidas sobre los bienes en el interior (viviendas de un piso con planta baja) ( <i>modificado de Davis &amp; Skaggs, 1992</i> ). ....	76
Figura 3.16. Fuentes de contaminación en Ciudad del Carmen. ....	77
Figura 3.17. Distribución del número de personas por manzana en Ciudad del Carmen. ...	77
Figura 3.18. Distribución de población vulnerable, por manzana en Ciudad del Carmen: (a) Niños; (b) Ancianos. ....	78
Figura 3.19. Distribución del número de personas que padecen algún tipo de discapacidad, por manzana en Ciudad del Carmen. ....	78

Figura 3.20. Distribución del número de personas definidas población económicamente activa (PEA), por manzana en Ciudad del Carmen. ....	80
Figura 3.21. Distribución de zonas marginales en Ciudad del Carmen. ....	80
Figura 3.22. Distribución de drenaje pluvial en las manzanas de Ciudad del Carmen. ....	81
Figura 3.23. Distribución de ecosistemas en Isla del Carmen. ....	81
Figura 3.24. Categoría de pérdidas analizadas en el ecosistema de manglar, en Isla del Carmen ( <i>en azul</i> ). ....	82
Figura 3.25. Diagrama de evaluación de pérdidas medioambientales. ....	82
Figura 3.26. Distribución de tipologías de manglar en Isla del Carmen. ....	83
Figura 3.27. Resultados Monte Carlo para la altura de ola significativa, en los próximos 10 años. ....	90
Figura 3.28. Mallas de detalle utilizadas en la aplicación del modelo numérico XBeach en la isla barrera de Cancún. ....	91
Figura 3.29. Zonificación en la isla barrera de Cancún de acuerdo con las distintas clases de rugosidad establecidas. ....	92
Figura 3.30. Distribución de usos del suelo en la isla barrera de Cancún. ....	93
Figura 3.31. Categoría de pérdidas analizadas en Cancún ( <i>en azul</i> ). ....	94
Figura 3.32. Curvas de daños definidas en el sector turístico de Cancún. ....	95
Figura 3.33. Distribución de parámetros de resiliencia del sector turístico de Cancún: (a) N° cuartos en los hoteles; (b) N° empleados de los hoteles. ....	96
Figura 4.1. Mallas de detalle para análisis de resultados en Isla del Carmen. Ubicación de playas populares. ....	98
Figura 4.2. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados de “Nortes”. ....	98
Figura 4.3. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados de huracanes. ....	99
Figura 4.4. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 5 años. ....	99
Figura 4.5. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 10 años. ....	100
Figura 4.6. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 30 años. ....	100

Figura 4.7. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 50 años.....	100
Figura 4.8. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para el escenario seleccionado para un periodo de retorno de 100 años.....	101
Figura 4.9. Categorías de daños/pérdidas analizadas en Ciudad del Carmen ( <i>en azul</i> ). ....	105
Figura 4.10. Edificios-tipo definidos en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos en formato celda 50 m.....	106
Figura 4.11. Clases de pérdidas económicas de acuerdo con la cantidad y naturaleza de los bienes en el interior de las viviendas: (a) datos por manzana; (b) datos en formato celda 50 m. ....	107
Figura 4.12. Daños físicos a edificios- Tr= 30 años N.....	108
Figura 4.13. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas - Tr= 30 años N.....	108
Figura 4.14. Daños físicos a edificios- Tr= 50 años N.....	108
Figura 4.15. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas- Tr= 50 años N.....	109
Figura 4.16. Daños físicos a edificios- Tr= 100 años N.....	109
Figura 4.17. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas- Tr= 100 años N. ....	109
Figura 4.18. Área considerada en el análisis de posibles problemas de salud por contacto directo con agua contaminada de inundación (datos en formato celda 50 m).....	110
Figura 4.19. Fuentes de contaminación identificadas en Ciudad del Carmen.....	110
Figura 4.20. Número de residentes por celda de 50 m. ....	110
Figura 4.21. Número de niños por celda de 50 m. ....	111
Figura 4.22. Número de ancianos por celda de 50 m. ....	111
Figura 4.23. Número de discapacitados por celda de 50 m.....	111
Figura 4.24. Parámetro de vulnerabilidad de la población.....	112
Figura 4.25. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de alta posibilidad de evacuación.....	112
Figura 4.26. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de riesgo medio por posibilidad de evacuación.....	113
Figura 4.27. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de dificultad de evacuar el área. ....	113
Figura 4.28. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 10 años NW.....	114

Figura 4.29. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 30 años N.....	114
Figura 4.30. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 50 años NW.....	114
Figura 4.31. Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación- Tr= 30 años N ( <i>AV1 -riesgo bajo por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación</i> ). .....	115
Figura 4.32. Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación- Tr= 30 años N ( <i>AV3 -riesgo alto por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación</i> ). .....	115
Figura 4.33. Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación- Tr= 100 años N.....	115
Figura 4.34. Área analizada por posible pérdida de vidas humanas y lesiones debido a un evento de inundación.....	116
Figura 4.35. N° de personas en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.....	116
Figura 4.36. N° de niños en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.....	117
Figura 4.37. N° de ancianos en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.....	117
Figura 4.38. N° de discapacitados en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m. ....	118
Figura 4.39. Parámetro de vulnerabilidad de la población.....	118
Figura 4.40. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de alta posibilidad de evacuación.....	119
Figura 4.41. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de riesgo medio por posibilidad de evacuación.....	119
Figura 4.42. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de dificultad de evacuar el área.....	119
Figura 4.43. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N ( <i>AV1 -riesgo bajo por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación</i> ). ...	120
Figura 4.44. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N ( <i>AV2 -riesgo medio por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación</i> ). ..	120
Figura 4.45. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N ( <i>AV3 -riesgo alto por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación</i> ). ....	120

Figura 4.46. N° de personas definidas población económicamente activa (PEA) en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m. ....	121
Figura 4.47. Clases sociales definidas en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m. ....	122
Figura 4.48. Drenaje pluvial en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m. ....	123
Figura 4.49. Altura de inundación asociada en Ciudad del Carmen- Norte Desfavorable 1. ....	123
Figura 4.50. Altura de inundación asociada en Ciudad del Carmen- Tr= 30 años N. ....	124
Figura 4.51. Distribución de tipologías de manglar en Isla del Carmen, por celdas de 50 m. ....	124
Figura 4.52. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Norte Desfavorable 1. ....	125
Figura 4.53. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Huracán Janet. ....	125
Figura 4.54. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Huracán Roxanne. ....	126
Figura 4.55. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Tr= 30 años N. ....	126
Figura 4.56. Altura de ola significativa correspondiente al escenario simulado en Cancún. ....	127
Figura 4.57. Altura de inundación en Cancún: (a) datos ASCII; (b) datos convertidos a formato celda 50 m. ....	127
Figura 4.58. Distribución de los daños físicos (por celda cuadrada de 50 m) en la zona hotelera de Cancún. ....	128
Figura 4.59. Distribución de parámetros de resiliencia del sector turístico de Cancún: (a) N° cuartos en los hoteles; (b) N° empleados de los hoteles. ....	129
Figura 5.1. Estado de la playa en 2012, y localización de las secciones de playa a estabilizar. ....	130
Figura 5.2. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y las condiciones precarias de las viviendas (sin cimientos) (en negro). ....	132
Figura 5.3. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y las condiciones precarias de las viviendas (sin cimientos)- en los escenario donde prácticamente toda la ciudad es afectada. ....	132

Figura 5.4. Topografía en Ciudad del Carmen. ....	132
Figura 5.5. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y mayor disponibilidad de bienes en el interior de las viviendas (en negro)...	133
Figura 5.6. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y mayor disponibilidad de bienes en el interior de las viviendas (en negro)- en los escenarios donde prácticamente toda la ciudad es afectada. ....	133
Figura 5.7. Áreas identificadas por mayores problemas de salud debido a la naturaleza del área y la concentración de mayor densidad de población vulnerable (en amarillo)-escenarios norte desfavorable 1, huracán Janet y huracán Roxanne. ....	134
Figura 5.8. Áreas identificadas por mayores problemas de salud debido a la naturaleza del área (en la zona inferior), y por naturaleza del área y una mayor población vulnerable en el resto (junto al arroyo La Caleta y zona oriental) (en amarillo)- escenarios con marea de tormenta de 1 a 1.3 m. ....	135
Figura 5.9. Áreas identificadas por mayor posibilidad de pérdida de vidas y lesiones debido a la naturaleza del área (en amarillo) y la combinación de ésta con una mayor altura de inundación (en negro).....	135
Figura 5.10. Áreas identificadas por mayor posibilidad de pérdida de vidas y lesiones debido a la naturaleza del área (en amarillo) y la combinación de ésta con una mayor altura de inundación (en negro)- en los casos más donde prácticamente toda la ciudad es afectada. ....	136
Figura 5.11. Áreas identificadas por presentar inundación en la mayoría de los escenarios de simulación analizados (en azul).....	137
Figura 5.12. Grado de daño estimado sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación - Tr= 30 años N.....	138

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Enfermedades transmitidas por el agua; parámetros relacionados con la vulnerabilidad de la población de ser afectada ( <i>modificado de Alderman et al., 2012</i> ).....	24
Tabla 1.2. Consecuencias en la salud de las inundaciones (indirectas): inmediatas, corto y largo plazo ( <i>modificado de Du et al., 2010</i> ).....	27
Tabla 1.3. Impactos indirectos de las inundaciones en la salud; parámetros relacionados con la vulnerabilidad de la población de ser afectada ( <i>Alderman et al., 2012</i> ).....	27
Tabla 2.1. Valores y factores propuestos para determinar el nivel de riesgo entre áreas, de acuerdo con su naturaleza ( <i>modificado de Zanuttigh et al., 2014</i> ).....	33
Tabla 2.2. Factor de escombros (DF) en función de la velocidad del flujo ( <i>modificado de Burzel et al., 2012</i> ). ....	36
Tabla 2.3. Valores de los factores PV1 y PV2. ....	38
Tabla 2.4. Valores del índice de peligro (HR) en función de la altura de inundación (h)....	42
Tabla 2.5. Regiones biogeográficas definidas de acuerdo con la distribución de manglar en el mundo ( <i>Duke et al., 1998</i> ). ....	46
Tabla 2.6. Clasificación de algunas especies de manglar en 6 grupos en función de su tolerancia a la salinidad ( <i>modificado de Joshi &amp; Ghose, 2003; Ukpong, 1991</i> ).....	50
Tabla 2.7. Criterios para evaluar el grado de daño sobre el ecosistema de manglar por factor de impacto de salinidad. ....	51
Tabla 2.8. Evaluación del impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema de manglar, de acuerdo al tipo de adaptación de las raíces. ....	55
Tabla 2.9. Método para evaluar el impacto de la acumulación de sedimento/erosión en el ecosistema de manglar.....	56
Tabla 2.10. Valoración del parámetro índice de calidad (IC) del ecosistema, por su estado antes de ser amenazado.....	56
Tabla 2.11. Factor limitante profundidad vs periodo inundación, en función del tipo de raíz. ....	57
Tabla 2.12. Valores asignados a los pesos, en función del tipo de raíz de las especies de manglar. ....	57
Tabla 2.13. Valores asignados a las variables del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones, en el análisis de escenarios. ....	59
Tabla 2.14. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones: escenario optimista, medio y pesimista. ....	59

Tabla 2.15. Valores asignados a las variables del modelo de pérdidas por problemas de salud, en el análisis de escenarios.....	61
Tabla 2.16. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida por problemas de salud: escenario optimista, medio y pesimista. ....	61
Tabla 2.17. Valores asignados a las variables del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar, en el análisis de escenarios.....	63
Tabla 2.18. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar: escenario optimista, medio y pesimista. ....	64
Tabla 3.1. Parámetros de oleaje y marea de tormenta (a 28 m de profundidad) del “Norte” típico y de los dos “Nortes” más desfavorables identificados en el periodo de 1948 a 2010. ....	69
Tabla 3.2. Parámetros de oleaje y marea de tormenta (a 28 m de profundidad) de las series de datos espectrales simuladas, correspondientes a las características más desfavorables de los ciclones tropicales que con mayor energía han alcanzado la costa de Isla del Carmen en el periodo de 1948 a 2010. ....	69
Tabla 3.3. Características de oleaje y marea de tormenta de los escenarios simulados para periodo de retorno (Tr) de 5, 10, 30, 50 y 100 años. ....	70
Tabla 3.4. Coeficientes de rugosidad definidos para cada clase. ....	72
Tabla 3.5. Distribución y estado de conservación de tipologías de manglar en Isla del Carmen. ....	84
Tabla 3.6. Clasificación de las especies de manglar en Isla del Carmen, por su respuesta a la salinidad.....	85
Tabla 3.7. Clasificación de la tipología de manglar en Isla del Carmen, por su respuesta a la salinidad.....	86
Tabla 3.8. Diámetro promedio de especies de manglar en el Estero Pargo, en Isla del Carmen. ....	86
Tabla 3.9. Diámetro promedio de especies de manglar en Ciudad del Carmen.....	86
Tabla 3.10. Características estructurales adoptadas en el manglar de Isla del Carmen. ....	87
Tabla 3.11. Evaluación del impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema de manglar, de acuerdo al tipo de adaptación de las raíces.....	87
Tabla 3.12. Evaluación del impacto de la acumulación de sedimento/erosión en el ecosistema de manglar.....	88
Tabla 3.13. Valoración del parámetro índice de calidad (IC) del ecosistema, por su estado antes de ser amenazado.....	88

Tabla 3.14. Valores asignados a los pesos, en función del tipo de raíz de las especies de manglar. ....	89
Tabla 3.15. Coeficientes de rugosidad definidos para cada clase. ....	92
Tabla 4.1. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios simulados de Nortes. .	102
Tabla 4.2. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de huracanes Brenda, Dean, Inez y Hilda. ....	103
Tabla 4.3. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de huracanes Isidore, Janet y Roxanne. ....	103
Tabla 4.4. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de periodos de retorno de 5 y 10 años. ....	104
Tabla 4.5. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de periodos de retorno de 30, 50 y 100 años. ....	104



**MEMORIA**

---



## **Capítulo 0**

### **MOTIVACIÓN Y SÍNTESIS**

---



## **Capítulo 0**

### **MOTIVACIÓN Y SÍNTESIS**

#### **0.1. Motivación y objetivos principales del estudio**

El proceso de evaluación de riesgos se ha convertido en una componente esencial del Manejo Integral de la Zonas Costeras (MIZC), principio que fue asentado en 1992 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo como el enfoque más adecuado para el desarrollo sustentable de los recursos naturales, socio-económicos y culturales de las costas (Moreno-Casasola & Peresbarbosa, 2006). Los programas desarrollados para tal fin contemplan también la importancia de incorporar medidas anticipadas para prevenir posibles riesgos y minimizar pérdidas y daños.

En la última década, el creciente interés en el análisis de riesgos viene motivado por la evidencia de incremento en la magnitud de los peligros naturales que amenazan a la costa y en la densidad de población asentada en la zona costera, lo que supone un mayor nivel de riesgo (Vellinga & Klein, 1993; Ballinger et al., 1994; Zerger et al., 2002; Duxbury & Dickinson, 2007).

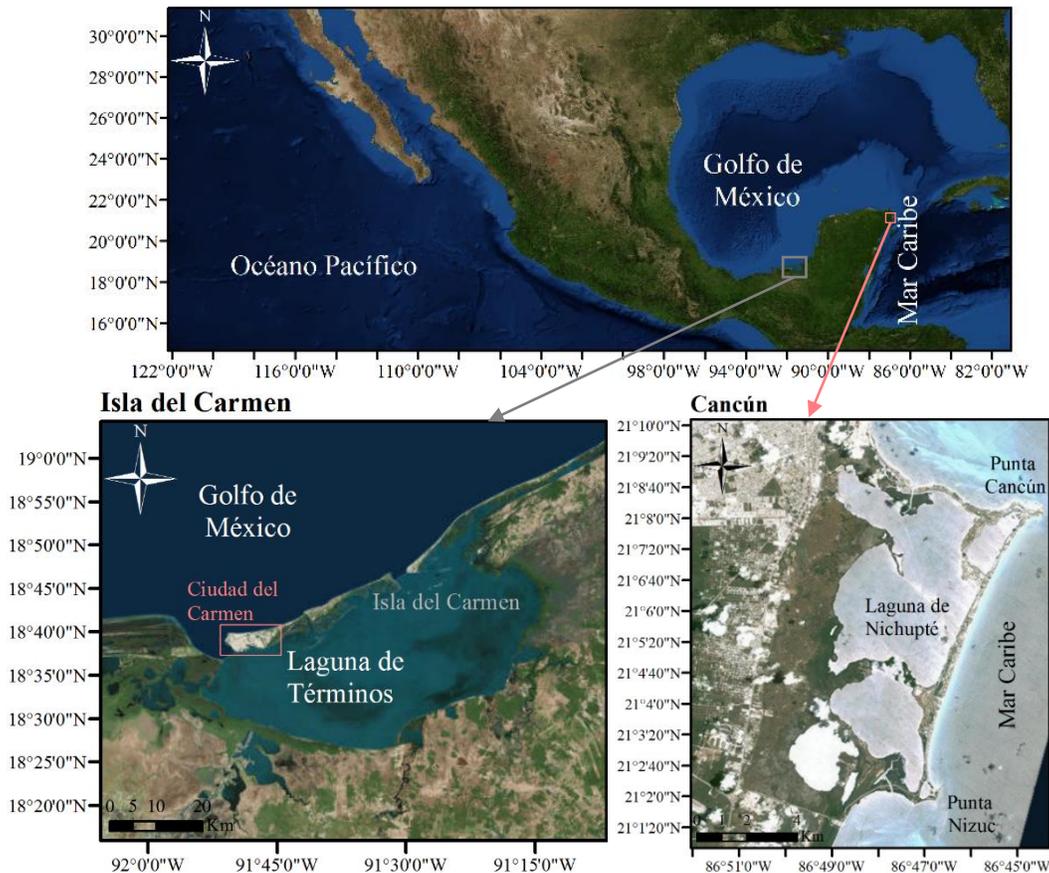
Como consecuencia, una extensa literatura trata el tema de evaluación de riesgos, centrándose principalmente en la evaluación del riesgo de inundación y erosión costera que resulta directamente de la ocurrencia de eventos naturales extremos. Sin embargo, la mayoría de las metodologías de evaluación propuestas son específicas a las condiciones y datos disponibles de cada país, sociedad o localización; y pocos son los estudios que presentan metodologías factibles y efectivas que conduzcan a la integración del análisis de riesgo en todos los niveles y que sean aplicables o adaptables a las costas de todo el mundo.

Entre los aspectos considerados en la evaluación de riesgos, los socioeconómicos han sido los más frecuentemente analizados y, en particular aquellos que pueden ser cuantificados en términos monetarios, como las pérdidas y daños tangibles. Menos atención se ha prestado a los aspectos intangibles, como son la pérdida de vidas humanas y las pérdidas medioambientales, debido a la mayor dificultad en su evaluación dada por la

subjetividad e interconexión entre impactos (Walker et al., 2006) y a la falta de consciencia que aún prevalece (en algunos sitios) respecto de la importancia de preservar el futuro del medio ambiente. Sin embargo, varios autores reconocen la importancia de incluir esta categoría de daños en la evaluación (Green & Penning-Rowell, 1989; FEMA, 1997; Dassanayake et al., 2010; Oumeraci et al., 2015).

Además, en la literatura revisada, pocas metodologías plantean la evaluación conjunta de los aspectos sociales, económicos y medioambientales; y todavía menos estudios contemplan la integración de todas las categorías de pérdidas (tangibles e intangibles) en una única estimación del riesgo.

Un ejemplo de esta problemática se encuentra en México, donde apenas ha comenzado un auge por el análisis de riesgos a pesar de su extensa línea de costa (alrededor de 11,122 km, según INEGI, 2003), que además es altamente vulnerable a la amenaza de ciclones tropicales. En particular, Isla del Carmen (en el Golfo de México) y la isla barrera de Cancún (en el Mar Caribe) (Fig. 0.1) son dos sitios de gran importancia para México desde el punto de vista social y ambiental, que están en continua situación de riesgo por la ocurrencia anual de fenómenos hidro-meteorológicos extremos.



**Figura. 0.1. Isla del Carmen e isla barrera de Cancún: dos zonas costeras en riesgo hidro-meteorológico en México.**

La intervención humana ha afectado, desde hace décadas, la resiliencia de ambos sistemas lagunares ante la ocurrencia de eventos extremos al impedir el balance natural de sedimentos y drenaje en condiciones de tormenta, alterando así su equilibrio. Algunas de estas actuaciones son: la construcción de edificios e infraestructura sobre el cordón dunar que protegía antiguamente las islas; la expansión urbana de Ciudad del Carmen; la rigidización de lo que hoy es zona hotelera de Cancún (Fig. 0.2); la adopción de medidas inadecuadas para proteger la zona costera (Fig. 0.3) y la degradación de la vegetación dunar.

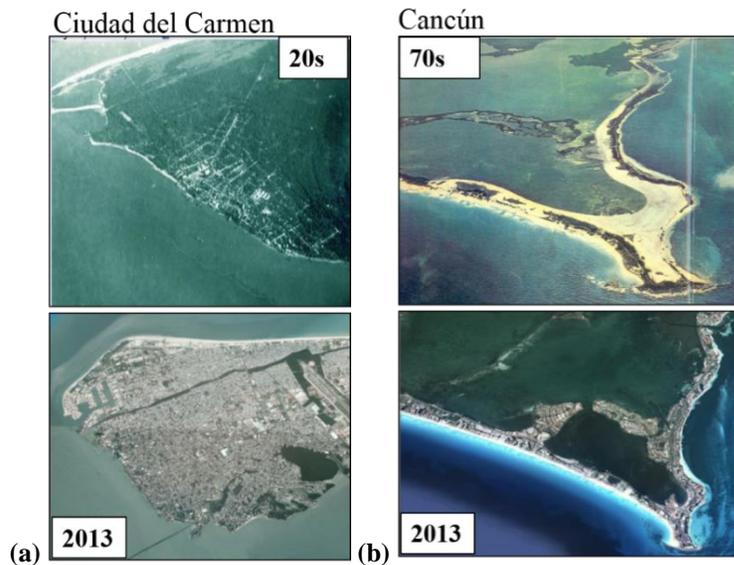


Figura 0.2. (a) Expansión de Ciudad del Carmen; (b) Crecimiento de la zona hotelera de Cancún.

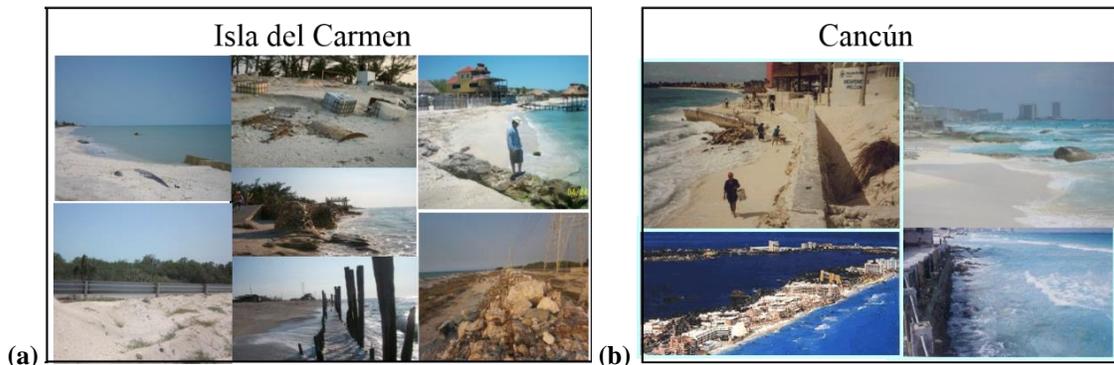


Figura 0.3. (a) Estructuras de protección en Isla del Carmen (fotos propias, Abril 2012); (b) Estructuras de protección en Cancún.

Estas modificaciones, junto a la ausencia de aporte externo de sedimentos y la baja cota topográfica de las islas han ocasionado procesos de erosión crónica en sus playas, apertura de brechas con intercambio de agua entre el mar y las lagunas, inundación de la zona junto a la playa y, en global, importantes daños y pérdidas.

Por tanto, se deduce la importancia particular de realizar un adecuado análisis de riesgo en las zonas costeras de Isla del Carmen y Cancún; para preservar el ecosistema que todavía se encuentre en condiciones adecuadas en Isla del Carmen, y para prevenir y/o reducir los daños que las tormentas pueden causar sobre la población y turistas de Ciudad del Carmen y Cancún.

En lo que se refiere al estudio de vulnerabilidad social, Ciudad del Carmen y Cancún son dos áreas socio-económicamente muy diferentes; el contraste entre las consecuencias de desigualdad social, inadecuada planeación de la estructura urbana, y la calidad del material de construcción de algunas viviendas y servicios asociados en Ciudad del Carmen (reflejado en la presencia de varias zonas marginales en toda la ciudad) comparado con el lujoso complejo turístico de la isla barrera de Cancún (Fig. 0.4), facilita la definición e integración de una metodología aplicable a zonas costeras muy diversas (que comparten características comunes o no) expuestas a peligros similares.

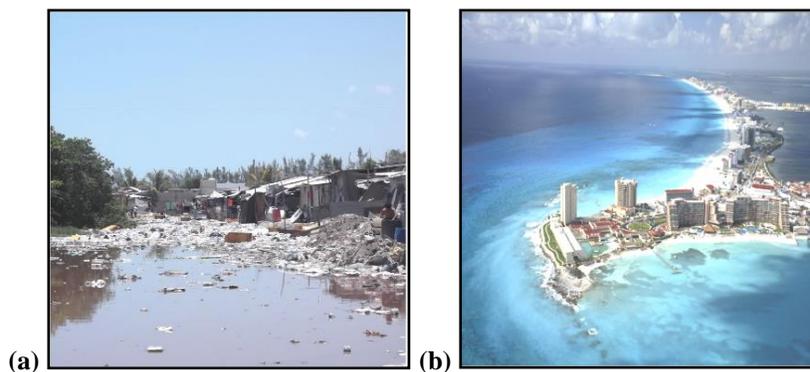


Figura 0.4. (a) Área marginal en Ciudad del Carmen; (b) Desarrollo de lujo en Cancún.

Con todo lo expuesto anteriormente, se plantea como **objetivo general** de la investigación obtener una metodología para la determinación y mitigación de los riesgos hidro-meteorológicos en la zona costera de Isla del Carmen y Cancún (considerando aspectos socioeconómicos y medioambientales en Isla del Carmen, y únicamente socioeconómicos en la zona hotelera de Cancún), cuya aplicación pueda extenderse al resto de zonas costeras a nivel nacional e internacional. Las aportaciones a la metodología se centran en la implementación de herramientas y modelos para la integración de categorías de daños que no han sido todavía tan desarrollados por las metodologías actuales, como son: las pérdidas que los peligros pueden ocasionar en el ecosistema localizado en zonas costeras, los posibles impactos en la salud por inundaciones, o aspectos relacionados con la resiliencia del sistema (i.e. capacidad de recuperación después de una inundación).

Como **objetivos particulares** se analizan potenciales escenarios de riesgo de erosión e inundación en Isla del Carmen y Cancún debido a los peligros de oleaje, viento y marea de tormenta, destacando especialmente la aplicación de las nuevas herramientas propuestas; y se construyen mapas de índices cuantitativos de riesgo. Por último, se establecen medidas

de mitigación y reducción del riesgo en Isla del Carmen, y se analizan potenciales escenarios de riesgo teniendo en cuenta estas medidas.

## **0.2. Síntesis del estudio**

En el Capítulo 1, se presenta el estado del arte relacionado con el tema de riesgo, mediante la revisión de diversas definiciones del mismo, metodologías de evaluación y tratamiento de riesgo, modelos numéricos involucrados, análisis e incorporación de diversas categorías de daños por inundación en la definición de riesgo, e integración espacial y temporal del riesgo.

En el Capítulo 2, se describe la metodología propuesta para evaluar y mitigar el riesgo hidro-meteorológico en las zonas costeras; basada en resultados de las metodologías más recientes establecidas, incluye modelos adicionales para evaluar pérdidas medioambientales, daños en la salud o cuantificar la resiliencia del receptor ante el peligro de erosión y/o inundación.

En el Capítulo 3, se describen los métodos utilizados para la aplicación de la metodología de evaluación de riesgos propuesta en Isla del Carmen y Cancún. En Isla del Carmen se analizan potenciales escenarios de peligro de erosión e inundación debido al oleaje, viento y marea de tormenta; y en Cancún se reproduce el peligro de un evento con características similares a las del huracán Wilma, el huracán más devastador que ha afectado la costa de Cancún en los últimos años (en Octubre de 2005).

En el Capítulo 4, se presentan los resultados de la evaluación de riesgos descrita en el Capítulo 3. En Isla del Carmen se analizan daños socioeconómicos y medioambientales asociados a los peligros seleccionados, y la integración de éstos con los peligros en la definición de riesgo. En Cancún se evalúan los daños físicos sobre la infraestructura y bienes de la zona hotelera por los peligros descritos en el Capítulo 3.

En el Capítulo 5, se proponen medidas de mitigación y reducción del riesgo en Isla del Carmen, y se analizan potenciales escenarios de riesgo teniendo en cuenta estas medidas.

En el Capítulo 6 se resumen las conclusiones alcanzadas, y se plantean futuras líneas de investigación.



# **Capítulo 1**

## **ESTADO DEL ARTE**

---



# Capítulo 1

## ESTADO DEL ARTE

### 1.1. Definición de riesgo

“El término de riesgo en relación a peligro de inundación fue introducido por Knight, en 1921” (Balica et al., 2013). Se trata de un concepto que ha evolucionado en el tiempo para ser definido de forma más precisa y desde diversos puntos de vista, a menudo éstos influenciados por las necesidades particulares involucradas en cada proceso de toma de decisiones. El resultado es la existencia de varias definiciones de riesgo que atienden a diferentes aspectos de seguridad, económicos, sociales y medioambientales. Algunas de éstas son:

Pérdidas esperadas (muertes, personas afectadas, daños a la propiedad o actividad económica perturbada), debido a la ocurrencia de un peligro concreto, en un área y periodo determinados. El riesgo se puede expresar de forma matemática como el producto de la amenaza y la vulnerabilidad (DHA, 1992).

Riesgo implica exposición a probabilidad de pérdida o daño (Morgan & Henrion, 1990).

Riesgo es una medida que combina la magnitud y probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso (Adams, 1995).

Riesgo = Impacto de un peligro x Elementos en riesgo x Vulnerabilidad de los elementos en riesgo (Kelman, 2003).

Riesgo = Peligro x Vulnerabilidad x Valor del área amenazada / Preparación (De La Cruz- Reyna, 1996).

Riesgo es la exposición real de un elemento con cierto valor humano a un peligro, y es considerado a menudo como la combinación de probabilidad y pérdida asociada (Smith, 1996).

Riesgo puede ser definido como la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado; pero se describe mejor como la probabilidad de que un peligro contribuya a la ocurrencia de un desastre potencial (Stenchion, 1997).

Riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un peligro, donde peligro = amenaza potencial a los humanos y su bienestar (Brooks, 2003).

Riesgo es función de la probabilidad y la magnitud de diferentes impactos (IPCC, 2003)

Riesgo es la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un daño y la severidad de ese daño (ISO/EC, 1999)

Riesgo es la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento particular y el impacto que ese evento podría causar en caso de ocurrencia. Por lo tanto, el riesgo tiene dos componentes: la posibilidad (o probabilidad) de que ocurra un evento y el impacto (o consecuencia) asociado a ese evento (Wallingford, 2002).

Riesgo es la probabilidad de que se produzca una pérdida, y depende de tres elementos: peligro, vulnerabilidad y exposición (Thywissen, 2006; Crichton, 2008).

Riesgo= Probabilidad x Consecuencia (Helm, 1996; Samuels, 2009; Apel et al., 2006; Roode, 2008; Bellomo, 2008; Burzel et al., 2010; Balica et al., 2013; Oumeraci et al., 2015).

De todas estas definiciones, la última es la que ha sido generalmente adoptada por las metodologías y estudios más recientes de evaluación de riesgo.

## **1.2. Metodologías de evaluación y tratamiento del riesgo**

Las metodologías de evaluación de riesgo, al igual que el concepto de riesgo, se han adaptado a las necesidades de los tomadores de decisiones; y a los avances tecnológicos, condiciones y datos disponibles en cada época, sociedad y localización. A continuación se describen algunos de los enfoques encontrados en la literatura.

### **1.2.1. Metodologías tradicionales de evaluación del riesgo**

Las metodologías más tradicionales expresan el riesgo en términos cualitativos a partir de datos de consulta pública a la sociedad; como es el “análisis de preferencias reveladas” y el “análisis de preferencias expresadas”. En el “análisis de preferencias reveladas” las autoridades establecen o “revelan” los niveles de riesgo aceptables cuando consideran que la sociedad ha alcanzado un equilibrio óptimo entre los riesgos y beneficios asociados a una actividad específica, y asumen que la aceptación del riesgo es similar en los diferentes ámbitos de la vida y para cada tipo de peligro y riesgo. Por otro lado, el “análisis de preferencias expresadas” se considera una mejora de la anterior por ser la sociedad la que “expresa” los niveles de riesgo que considera aceptables de acuerdo con sus niveles de

seguridad preferidos, adaptándolos a cada escenario de riesgo e incluyendo en el análisis las relaciones de contexto implícitas en cada proceso de interrogación sobre sus preferencias (FLOODsite).

### 1.2.2. Evaluación cuantitativa del riesgo

Otras metodologías expresan el riesgo de una forma más precisa mediante valoraciones cuantitativas. Algunas de éstas son:

#### *Triángulo de riesgo de inundación*

Se trata de la representación del concepto de riesgo en forma de un triángulo, y ha sido una metodología utilizada principalmente para evaluar el riesgo de inundaciones (Crichton, 2001; Granger, 2003). Riesgo es definido en función de la probabilidad de ocurrencia del peligro, la exposición a ese peligro, y la vulnerabilidad de los receptores a ser afectados por el mismo (Thywissen, 2006) (Fig. 1.1).



Figura 1.1. El triángulo de riesgo de inundación (modificado de Crichton, 2001).

#### *Índices de vulnerabilidad costera*

Los índices de vulnerabilidad costera (IVC) se basan en la agrupación compleja de un conjunto de factores para identificar el riesgo asociado a un peligro costero concreto. Algunos de estos índices han sido obtenidos en función de la erosión costera (Ricketts, 1986; Vittal Hedge & Radhakrishnan Reju, 2007), la variación del nivel del mar (Gornitz & Kanciruk, 1989; Gornitz et al., 1997; Pendleton et al., 2010), ciertos factores ecológicos y culturales (Dal-Cin & Simeoni, 1994); o en función de la vulnerabilidad social, económica, medioambiental y física (y sus interacciones) frente a inundaciones (Balica et al., 2013).

Otros estudios desarrollan índices de vulnerabilidad integrados para diferentes tipos de peligros naturales (King, 2001; Fekete, 2009; Kaplan et al., 2009).

#### *Riesgo de peligros múltiples costeros*

La evaluación de riesgo se realiza en función de determinados factores costeros. Un ejemplo es el Índice de Riesgo de Desastre de Huracanes (HDRI, Hurricane Disaster Risk Index), desarrollado para comparar el riesgo de desastres en caso de huracanes en los condados de la costa de Estados Unidos (Davidson & Lambert, 2001). Está formado por

una componente económica (el índice económico de riesgo de desastres de huracanes); y una componente que atiende a los daños físicos sobre la sociedad o pérdida de vidas humanas. El valor final de cada índice se obtiene como combinación de varios indicadores escalares, afectados por pesos de acuerdo con la importancia relativa de cada indicador en el concepto que es medido.

#### *Otros índices de riesgo*

González, 2010 propone la definición del “Índice de Riesgo por Inundaciones (IRI)” como una función del riesgo físico y la vulnerabilidad existente. El Índice de Riesgo por Inundaciones para cada unidad de análisis,  $x$ , del territorio a evaluar es expresado mediante la Ec. (1.1).

$$IRI_x = IRFI_x (1 + IVP_x) \quad (1.1)$$

donde:  $IRFI_x$ , es el “Índice de Riesgo Físico”, basado en descriptores de daño o afectación física en el territorio de análisis y su sociedad; y  $IVP_x$ , es el “Índice de Vulnerabilidad Prevaleciente”, el cual engloba la exposición y susceptibilidad física, fragilidad socio- económica y falta de resiliencia.

#### *Análisis coste-beneficio*

Se trata de una metodología utilizada durante más de 50 años para cuantificar en términos monetarios los costes y beneficios asociados a la realización de un proyecto viable; incluyendo incluso factores que no pueden cuantificarse económicamente de forma satisfactoria, como son los factores sociales y medioambientales. El análisis coste-beneficio examina si los beneficios totales que se obtienen de la aplicación de una actividad encaminada a reducir el riesgo, evaluados en términos monetarios, exceden los costes derivados de la utilización de los recursos necesarios para su realización. Entre los proyectos de investigación que mencionan y analizan esta metodología están FLOOsite; ASFPM, 2007; ADAPT, 2008.

#### *Análisis multi-criterio*

El análisis multi-criterio es considerado actualmente una herramienta para la toma de decisiones más que una metodología de evaluación de riesgo. La evaluación permite integrar criterios económicos, sociales y medioambientales en una única estimación del riesgo, donde cada criterio se pondera mediante la inclusión de pesos para considerar la importancia relativa de cada componente en la evaluación del riesgo total.

En ocasiones, el “análisis multi-criterio” es combinado con el “análisis coste-beneficio” para mejorar la evaluación de los aspectos no-monetarios (p.e. en el proyecto ADAPT, 2008). Otros estudios que aplican las técnicas multi-criterio son: Tkach & Simonovic, 1997; Bana et al., 2004; Brouwer & Van Ek, 2004; RPA, 2004; Meyer et al., 2007.

*Modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias (SPRC Model, por sus siglas en inglés: Source-Pathway-Receptor-Consequences Model)*

Es un modelo conceptual que trata de representar de forma simple los sistemas y procesos involucrados en la ocurrencia del riesgo, el cual es finalmente expresado como una consecuencia particular. Es una de las metodologías más recientes que se han desarrollado para la evaluación del riesgo y su aplicación permite el análisis de las componentes social y medioambiental del riesgo. Algunos estudios donde se menciona esta metodología son DEFRA, 2004; Evans et al., 2004; Thorne et al., 2007; FLOODsite; Naulin et al., 2011; Jha et al., 2011; Narayan et al., 2011; Silva et al., 2014; Zanuttigh et al., 2014; Oumeraci et al., 2015.

Los elementos que componen el modelo son:

Fuentes (*Source*): se refiere a los factores climáticos que provocan la iniciación del evento: erosión, inundación o cualquier otra amenaza a la seguridad o estabilidad en la interfaz tierra-agua. Por ejemplo, la marea de tormenta, el oleaje o el viento.

Trayectoria (*Pathway*): describe las principales variables y procesos que controlan el peligro en el camino que recorre desde la *fuentes* iniciadora del mismo hasta alcanzar al *receptor*. Incluye tantos elementos naturales como de origen humano, como son los procesos morfológicos de inundación y aquéllos relacionados con el comportamiento y modos de fallo de los sistemas de defensa (rebase, procesos de iniciación y crecimiento de fisuras o brechas, o la inundación de la zona situada en el trasdós del sistema de defensa).

Receptor (*Receptor*): son todas las entidades físicas expuestas a la amenaza, como población, bienes, propiedades, infraestructura o medioambiente.

Consecuencias (*Consequences*): representa los efectos adversos físicos, sociales, institucionales, económicos o medioambientales ocasionados por la ocurrencia de un peligro.

El establecimiento y definición de estos elementos varía con la escala y contexto de la investigación, presentando en ocasiones superposición espacial y temporal (Hall et al., 2003).

Un ejemplo de aplicación del modelo se presenta en la Fig. 1.2 para evaluar el riesgo de inundación por marea de tormenta sobre una población localizada junto a la playa.

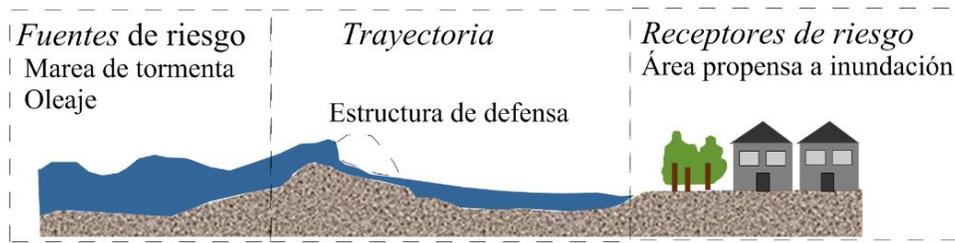


Figura 1.2. Esquema del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en el análisis del riesgo de inundación por marea de tormenta (modificado de Oumeraci et al., 2015).

### 1.2.3. Representación del análisis y tratamiento del riesgo

En este apartado se presenta en forma de diagrama la estructura general de cuatro metodologías que incluyen junto al proceso de evaluación de riesgos la adopción de medidas para su tratamiento.

#### La matriz de riesgo

El método de la matriz de riesgo, desarrollado por Arthur D. Little, Cambridge, MA, se compone de los siete pasos representados en la Fig. 1.3 (FEMA, 1997). El método incluye la realización de controles y revisiones para mantener el riesgo a un nivel aceptable.

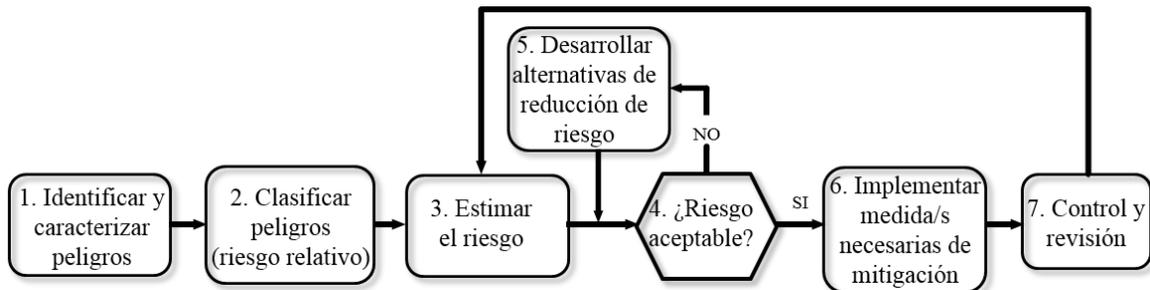


Figura 1.3. Método de la matriz de riesgo (FEMA, 1997).

#### Representación genérica del análisis de riesgo

El diagrama presentado por Faber & Stewart, 2003 (Fig. 1.4) es una representación del análisis de riesgo basado en el código de Australia/Nueva Zelanda en gestión del riesgo.

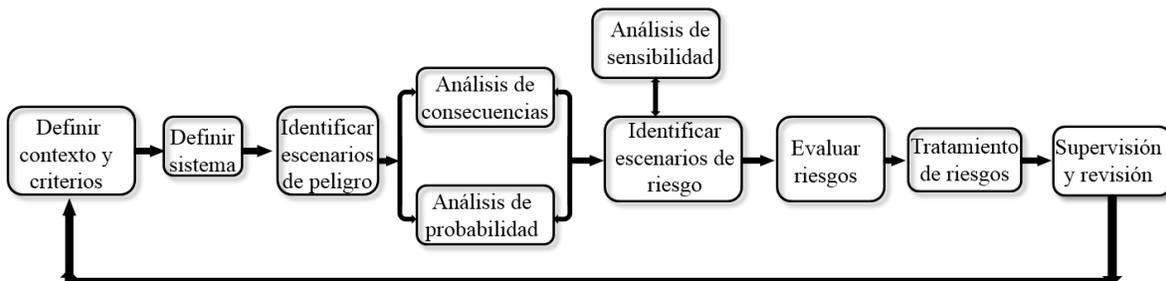


Figura 1.4. Representación genérica del análisis de riesgo (modificado de Faber & Stewart, 2003).

Análisis pre, posterior y pre-posterior

Faber & Stewart, 2003 describen el “pre-análisis” como la evaluación más simple de riesgo a realizar antes de cualquier decisión y/o actividad. Su estructura viene esquematizada en el árbol de decisiones mostrado en la Fig. 1.5a, y riesgo es definido en términos de utilidad esperada por la Ec. (1.2).

$$R = E[U] = \sum_{i=1}^n P_i C_i \quad (1.2)$$

donde: R, es el riesgo en cada actividad/opción; U, es la utilidad;  $P_i$ , es la probabilidad de la rama  $i$ ; y  $C_i$ , es la consecuencia del evento de la rama  $i$ .

El “análisis posterior” tiene la misma estructura que el “pre-análisis” (Fig. 1.5a), con la diferencia de que en este análisis se contempla la evaluación del riesgo del “nuevo” problema tras haber aplicado medidas de reducción, mitigación y/o información adicional del riesgo. Estos cambios quedan reflejados en las probabilidades ramificadas y/o consecuencias en el árbol de decisiones. Por último, el “análisis pre-posterior” permite la evaluación de riesgo de las actividades que pueden realizarse en el futuro (Fig. 1.5b).

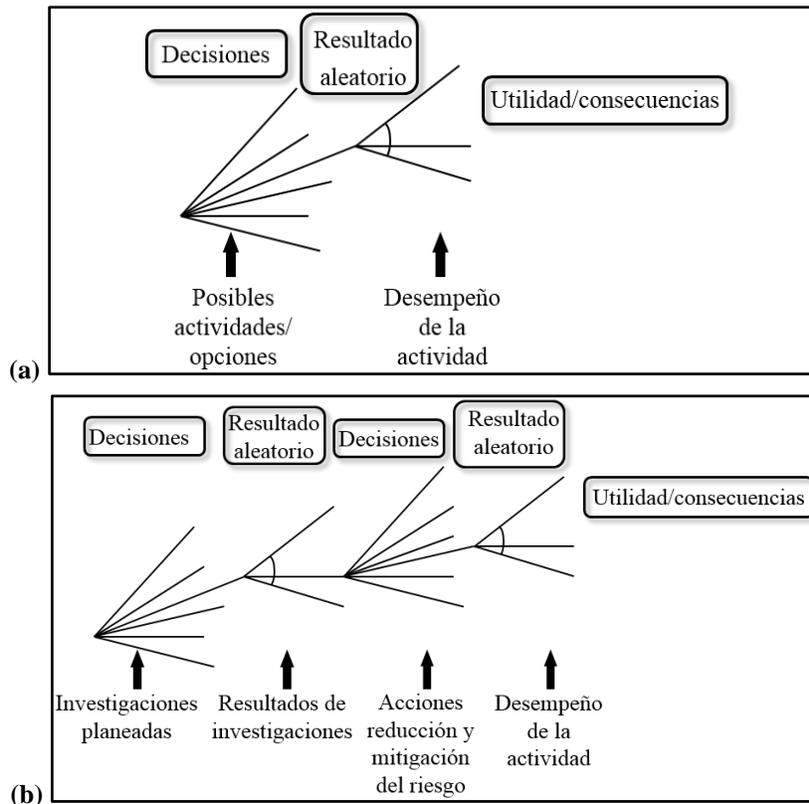


Figura 1.5. Árbol de decisiones: (a) “pre-análisis” y “análisis posterior”; (b) “análisis pre-posterior” (modificado de Faber & Stewart, 2003).

### Modelo integrado para la toma de decisiones, proyecto THESEUS

Zanuttigh et al., 2014 propone una herramienta para el análisis rápido (o en fase preliminar de cualquier estudio) del riesgo presente, a corto o largo plazo; y el desarrollo de estrategias de mitigación que permitan el planeamiento a largo plazo sostenible. Se compone de varios modelos simplificados que integran aspectos económicos, sociales y medioambientales en una plataforma común. La herramienta presenta limitaciones en términos de inclusión del concepto de resiliencia, como es la posibilidad de recuperación de la población después de una catástrofe o la influencia que puede tener una mayor conciencia de la sociedad en la disminución del tiempo de evacuación. La Fig. 1.6 muestra la estructura del modelo en el nivel más sintético.

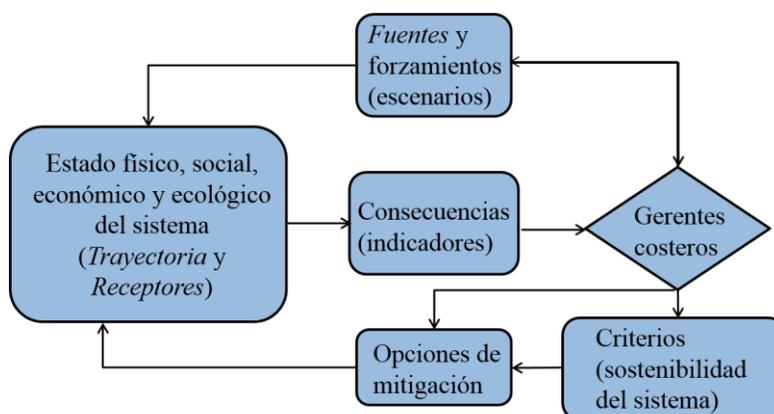


Figura 1.6. Diagrama de modelo para evaluación y gestión del riesgo, proyecto THESEUS (modificado de Zanuttigh et al., 2014).

## 1.3. Riesgo como probabilidad y consecuencias

### 1.3.1. Evaluación de la probabilidad

Este término hace referencia al *peligro* o *probabilidad* de ocurrencia de un evento dañino. Su análisis suele ofrecer una estimación de la extensión e intensidad de los parámetros que definen el peligro (p.e. la altura de inundación o la erosión), para varios escenarios de riesgo; y su probabilidad asociada.

El análisis incluye la realización de estudios meteorológicos e hidráulicos, con frecuencia apoyados en modelos numéricos para reproducir y simular los principales procesos en cada escenario de riesgo. En la aplicación de la metodología Fuente-Trayectoria-Receptor- Consecuencias, el peligro sobre el *Receptor* viene representado por el análisis de los elementos *Fuente* y *Trayectoria*. Por ejemplo, en el análisis de las *Fuentes* de peligro los modelos ‘Wavewatch III model’ (Tolman, 2014), ‘Hurac’ o ‘WAM’ (Silva et al., 2007) permiten obtener las características de oleaje a partir de datos de viento a una determinada distancia de la costa de interés. Por otro lado, modelos numéricos que pueden ayudar a caracterizar los elementos *Trayectoria* son: modelos hidrodinámicos como

‘Delft3D’ (Hydraulics, 1999), ‘Ref/Dif’ (Kirby & Dalrymple, 1994), ‘WAPO’ (Silva et al., 2005); modelos de evolución de la morfología costera como ‘GEOMBEST’ (Stolper et al., 2005), Baquerizo & Losada, 2008; modelos hidrodinámicos y morfodinámicos como ‘XBeach’ (Roelvink et al., 2010); modelos para predecir procesos de iniciación de fisuras o brechas inducidos por el oleaje como ‘BRES’, ‘Deich\_P’, ‘SIMBA’, ‘Fire\_bird’ o ‘HR BREACH’ (FLOODsite); o modelos de inundación como ‘Sobek 1D2D’ (Dhondia & Stelling, 2004) o ‘Kalypso-RMA’ (Schrage et al., 2009).

### **1.3.2. Evaluación de las consecuencias**

Las consecuencias de la ocurrencia de un peligro sobre los *receptores*, o entidades físicas expuestas a la amenaza, son generalmente evaluadas en términos de daños o pérdidas. Este término incluye la evaluación de la vulnerabilidad del receptor.

Entre las clasificaciones encontradas en la literatura, la mayoría de los estudios utilizan la clasificación de Smith & Ward, 1998 que establece dos categorías principales de daños: tangibles e intangibles (Merz et al., 2004; Schanze et al., 2007; Jonkman et al., 2008; Dassanayake et al. 2010; Balica et al., 2013; Smith, 2013). Las pérdidas son consideradas tangibles o intangibles dependiendo si pueden o no ser directamente evaluadas en términos monetarios. Pérdidas directas son aquellas que ocurren por el contacto físico del agua de inundación; mientras que los daños indirectos son inducidos por los impactos directos (dentro o fuera del área inundada). La Fig. 1.7 y Fig. 1.8 muestran las clasificaciones propuestas por Jonkman et al., 2008 y Dassanayake et al., 2010, respectivamente, para evaluar los daños de inundación.

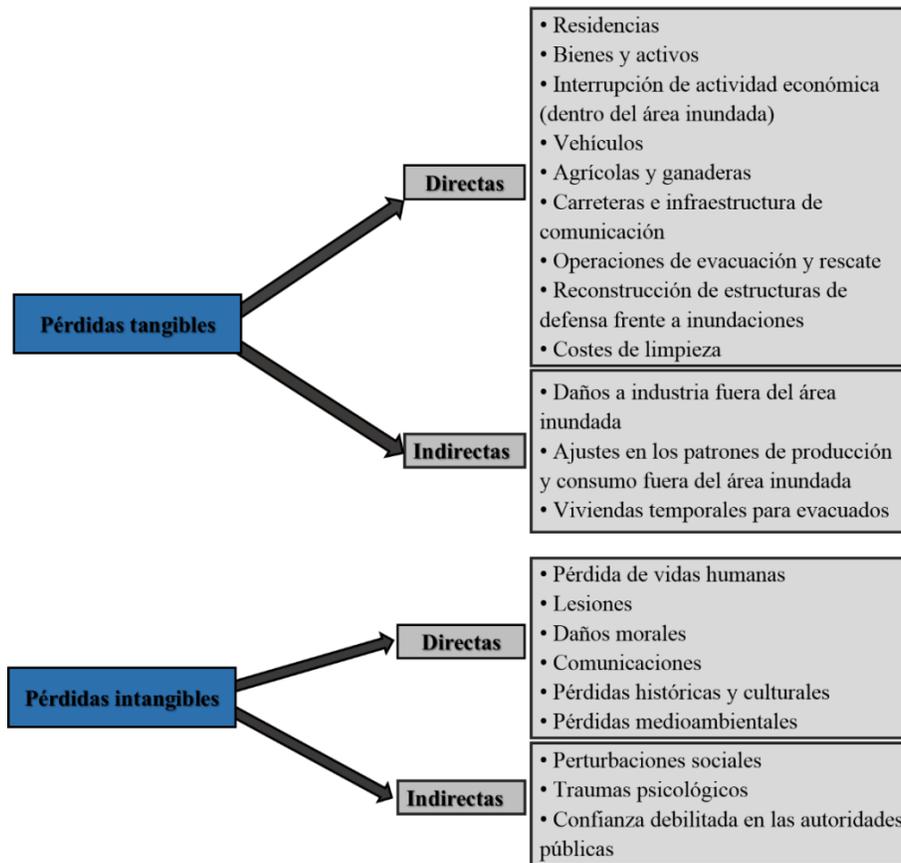


Figura 1.7. Clasificación de los daños de inundación (modificado de Jonkman et al., 2008).

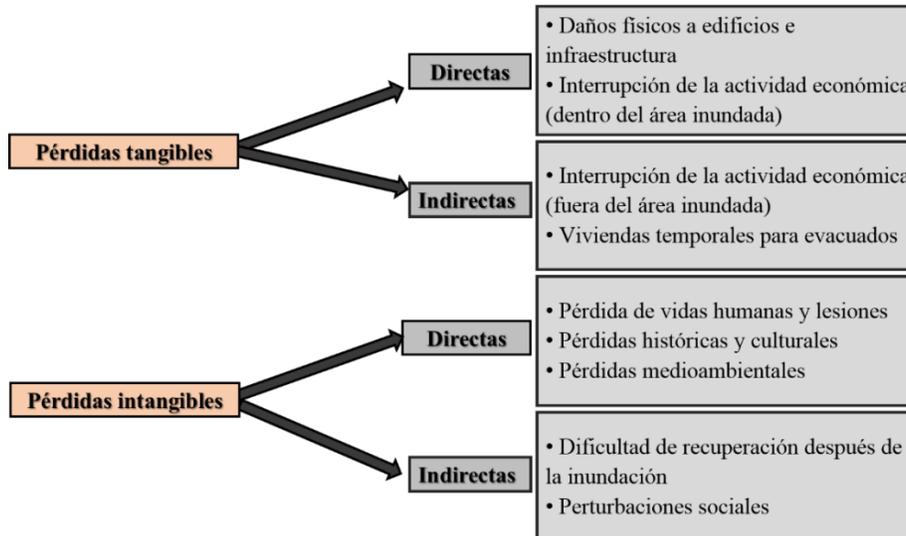
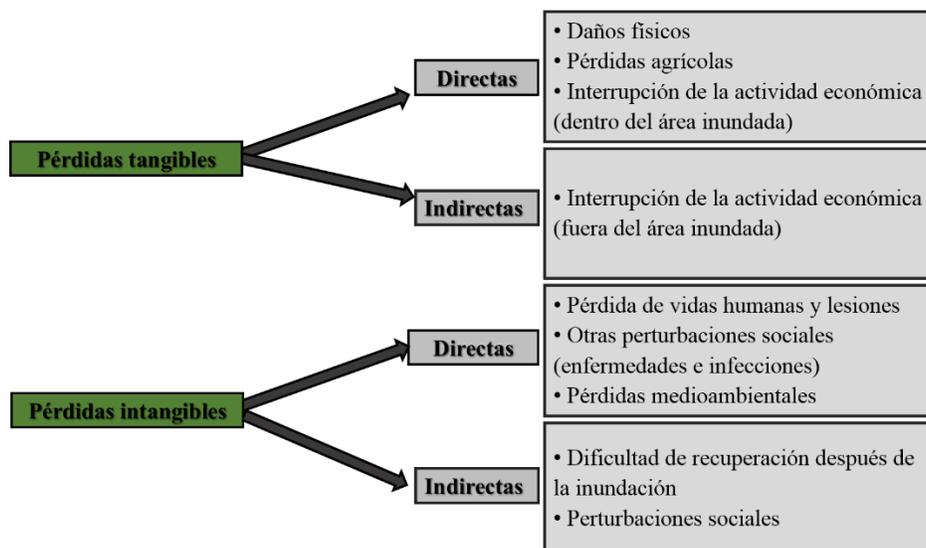


Figura 1.8. Clasificación de los daños de inundación (modificado de Dassanayake et al., 2010).

Con base en estas dos clasificaciones, en la Fig. 1.9 se muestran las categorías de pérdidas que son contempladas en la investigación.



**Figura 1.9. Clasificación de los daños de inundación, objeto de análisis de la investigación.**

En los siguientes apartados se describen algunos métodos planteados en la literatura para evaluar cada tipología de daños; algunos de los cuales se aplicarán posteriormente en Isla del Carmen y Cancún, y otros servirán de base para la propuesta de nuevas herramientas.

#### *Pérdidas Tangibles (directas)*

- Daños físicos (infraestructura, edificios, bienes y activos)

Las curvas de daños se han convertido en un método internacionalmente aceptado para evaluar los daños físicos directos de inundación (Hammond et al., 2014). Fueron propuestas en USA en los años 60's (Tsakiris et al., 2009); y expresan el daño en función de la altura de inundación, generalmente mediante la utilización de datos históricos de inundaciones, datos sintéticos o información de aseguradoras (Nadal et al., 2009). Con el tiempo, su definición ha permitido incluir diferentes categorías de uso del suelo, tipologías de edificios e infraestructura, bienes en el interior de las viviendas y activos industriales. Además, estas funciones han sido integradas en diversas herramientas y modelos para facilitar su construcción e incorporación en el análisis de riesgo. Algunas de éstas son: modelo HAZUS-MH (Scawthorn et al., 2006); FloReTo (Manojlovic & Pasche, 2007); Ujeyl & Rose, 2015.

Aunque algunos estudios han tratado de incorporar, en la definición de las curvas, otros parámetros adicionales a la profundidad de inundación como la velocidad del flujo (Nadal et al., 2009) o la duración (Lekuthai & Vongvisessomjai, 2001), todavía las funciones más utilizadas dependen únicamente de la altura de inundación.

En general, se definen funciones de daños en los siguientes sectores:

1. Residencial (edificios y bienes): las curvas de daños son obtenidas para edificios-tipo, que representan viviendas con propiedades estructurales similares (principalmente tipo de vivienda y material de construcción) (Kowalewski & Ujeyl, 2012). Además, se definen funciones de acuerdo con los bienes en el interior de las viviendas.

Ujeyl & Rose, 2015 definen edificios-tipo de acuerdo con la tipología de edificio, ocupación de la planta baja y revestimiento del edificio. El daño potencial, obtenido para edificios y bienes de forma separada, queda definido en función de los costes de recuperación y reemplazo.

Kang et al., 2005 plantea la introducción de parámetros como el valor del suelo, gasto familiar o impuestos para extender la aplicación de las curvas de daños del sector residencial entre regiones.

2. Comercial e Industrial (edificios y activos): las curvas de daños son definidas en función del número de empleados, considerando este parámetro un indicador del tamaño de la industria (Ujeyl & Rose, 2015).

3. Hoteles y centros de ocio (edificios y bienes): las curvas son calculadas para edificios-tipo, como en el sector residencial (Batika & Gourbesville, 2011).

4. Otras instalaciones públicas y culturales (edificios y bienes): las funciones son derivadas en sectores de educación o salud, entre otros (Batika & Gourbesville, 2011).

- Pérdidas agrícolas

Las pérdidas agrícolas suelen estar expresadas en función del valor económico de la superficie de tierra perdida. Förster et al., 2008 definen las pérdidas anuales esperadas de superficie cultivada o pastizal mediante una aproximación desagregada por meses, Ec. (1.3); y un enfoque anual, Ec. (1.4).

$$ED = MV \cdot \sum_{m=1}^{12} PM_m \cdot DI_m \quad (1.3)$$

$$ED = MV \cdot RD \cdot PA \quad (1.4)$$

donde: ED, son los daños esperados en pérdidas monetarias (€ ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>); MV, es el valor de mercado (€ ha<sup>-1</sup>); PM<sub>m</sub>, es la probabilidad de inundación cada 100 años para un mes en particular *m* (a<sup>-1</sup>); DI<sub>m</sub>, es el factor de impacto en los cultivos para el mes *m* (%); RD, son los costes de daños relativos (%); y PA, probabilidad de inundación cada 100 años (a<sup>-1</sup>).

Posteriormente, con base en los resultados de Förster et al., 2008, Balica et al., 2013 proponen la estimación de las pérdidas agrícolas en función de la cosecha por unidad de área y el área de cultivo mediante la Ec. (1.5).

$$ED = MV \cdot Y \cdot A \cdot DI \quad (1.5)$$

donde: ED, son los daños esperados en pérdidas monetarias (€); MV, es el valor de mercado (€ ha<sup>-1</sup>); Y, es la cosecha por unidad de área; A, es el área de cultivo (ha); DI, es el factor de impacto (%).

- Interrupción de la actividad económica (dentro del área inundada)

En los sectores industrial y comercial, la pérdida total es obtenida mediante la evaluación de la pérdida económica por cada día de inactividad.

En el sector turístico, la pérdida es cuantificada a partir del número de cuartos de hotel y el coeficiente de ocupación, el cuál varía con la categoría del hotel y la estación del año.

#### *Pérdidas Tangibles (indirectas)*

- Interrupción de la actividad económica (fuera del área inundada)

Jonkman et al., 2008 proponen un modelo tipo IO (Input-Output) para evaluar los daños debido a la interrupción de las actividades económicas fuera del área afectada por la inundación, de acuerdo al impacto sobre el sistema económico de las actividades interconectadas con el área inundada temporalmente no disponible.

Otro modelo es el desarrollado por Hallegatte, 2008, un modelo económico sectorial (modelo Input-Output Regional Adaptativo) para la evaluación de las pérdidas indirectas determinadas por la interacción entre industrias de acuerdo con la oferta y demanda de bienes de consumo intermedios.

#### *Pérdidas Intangibles (directas)*

- Pérdidas de Vidas Humanas y Lesiones

La investigación sobre la pérdida de vidas y lesiones físicas ha recibido especial atención sobre todo en Países Bajos y Reino Unido (Penning-Rowell, 2005; Jonkman et al., 2008, entre otros).

Alderman et al., 2012 realizan una revisión de estudios relacionados con esta categoría de pérdidas, de los que se obtienen las siguientes conclusiones:

(a) Evidencias de mortalidad muestran dependencia con los recursos económicos de la población, las características de las viviendas (material de construcción), edad, sexo y raza. Así, de acuerdo con los recursos económicos de la población: en clase social media/alta, los hombres más pobres de piel de color, los vagabundos urbanos y la población con enfermedades crónicas muestran una mayor vulnerabilidad; mientras que las niñas y ancianas son la población más vulnerable observada en sociedad de clase baja.

(b) Posibles lesiones por un evento de inundación son: cortes, caídas, golpes por caída de escombros u objetos que se mueven rápidamente en aguas de la inundación, y lesiones por vehículos de motor. Los jóvenes de mediana edad varones presentan mayor riesgo por ser los que más activamente participan en la ayuda y esfuerzos de limpieza.

(c) El riesgo de muerte o lesiones en un condado aumentó en un 42 % con cada incremento unitario en representación de una población socialmente vulnerable.

(d) Las inundaciones más severas e inesperadas pusieron en mayor riesgo de daño y fatalidad a los ancianos y a aquéllos que necesitaban asistencia para evacuar o los que se mostraron reacios a abandonar su hogar.

(e) Un tercio de las muertes ocurrieron en las áreas inundadas dentro de residencias no afectadas por la inundación, debido a deshidratación/insolación, infarto/derrame cerebral, u otras causas asociadas con falta de atención médica.

En cuanto a los métodos para estimar el número de fallecidos debido a un evento de inundación, Jonkman et al., 2008 establecen una clasificación de modelos propuestos por varios autores en función del campo de aplicación, base de datos y parámetros incluidos en la evaluación, de la que se extraen las siguientes conclusiones:

(a) Algunos autores establecen la relación únicamente en función de la altura de inundación; mientras que otros estudios incluyen además de la altura de inundación, la tasa de incremento de la profundidad de agua y la velocidad del flujo de inundación.

(b) Por otro lado, análisis que reconocen la importancia de introducir la posibilidad de alerta y evacuación junto a características de la inundación son TNO (además de incluir la profundidad de agua, velocidad y posible colapso de los edificios); Sugimoto et al., 2003 y Koshimura et al., 2006 (junto a la altura de inundación y velocidad del flujo); Waarts, 1992 (adicionalmente a la altura de inundación, velocidad, tasa de incremento de altura de inundación y colapso de los edificios).

(c) Otros autores incluyen parámetros de vulnerabilidad de la población: IPET, 2007 relaciona las posibles pérdidas por abertura de brecha en un dique con la altura de inundación, posibilidad de evacuación, refugio y edad de las personas expuestas; Ramsbottom et al., (2003, 2004) establecen la relación con todas las variables anteriormente mencionadas y algunas características de vulnerabilidad de la población, estimando el número de muertes y personas lesionadas físicamente.

(d) Abt et al., 1989 introducen en la evaluación la profundidad de agua, velocidad del flujo y características de las personas (peso, altura y vestimenta).

(e) En general, las personas pueden sufrir pérdida de estabilidad en el flujo cuando el producto profundidad-velocidad está en el rango de  $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$  a  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Por otro lado, Dassanayake et al., 2010 resaltan la metodología propuesta por Penning-Rowsell et al., 2005 como la más comprensiva para estimar no sólo el número de posibles fallecidos por un evento de inundación sino también por ofrecer una estimación del número de lesionados. Por ello, desarrollaron un modelo basado en esta metodología que posteriormente fue implementado por Burzel et al., 2015 para su análisis espacial. El modelo se compone de los siete sub-módulos mostrados en la Fig. 1.10; con datos de

entrada características de las personas expuestas (residentes, población más vulnerable como ancianos, enfermos o discapacitados), características del área propensa a inundación (tipología de edificios, medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación), y características de la inundación (altura de inundación, velocidad del flujo, presencia de escombros). La variable de salida es el número de vidas perdidas o el número de lesionados por la inundación.

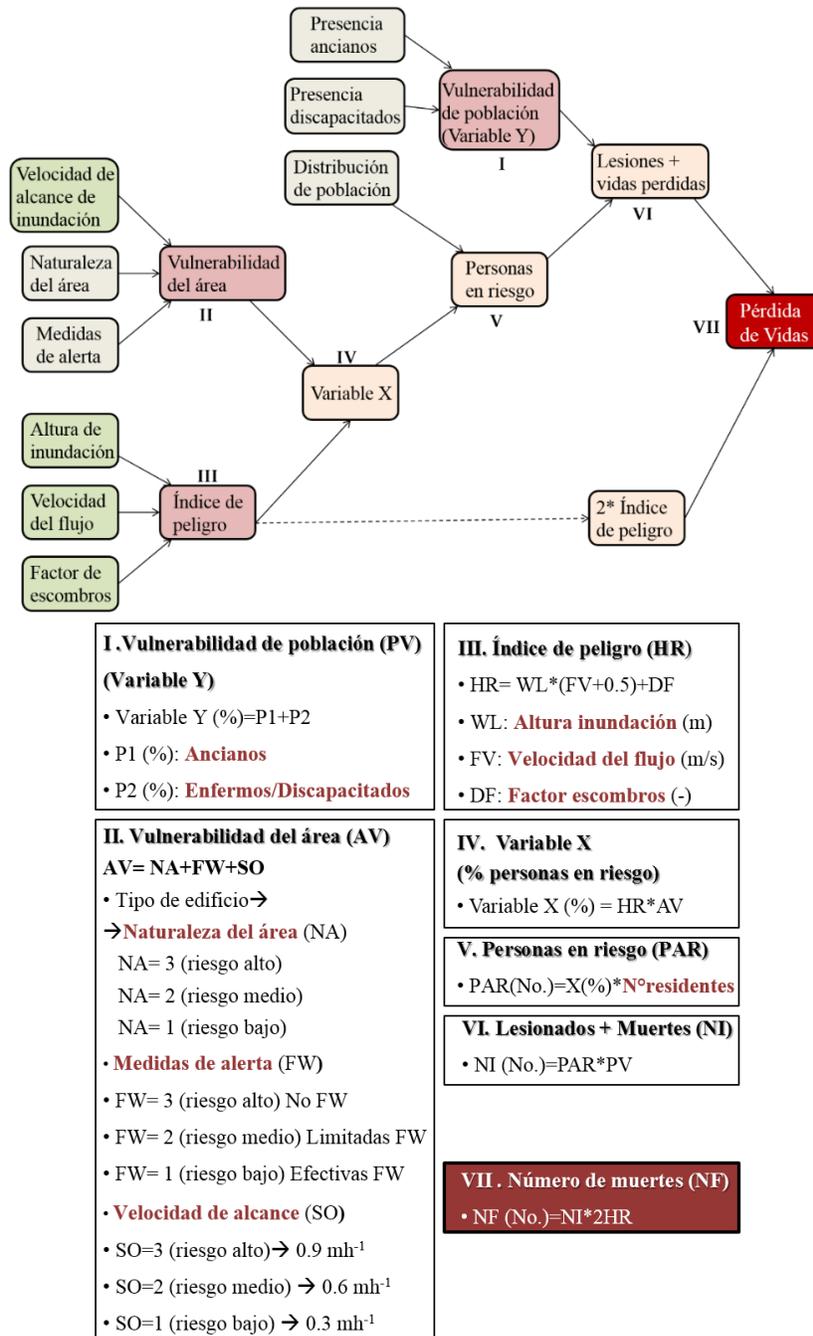
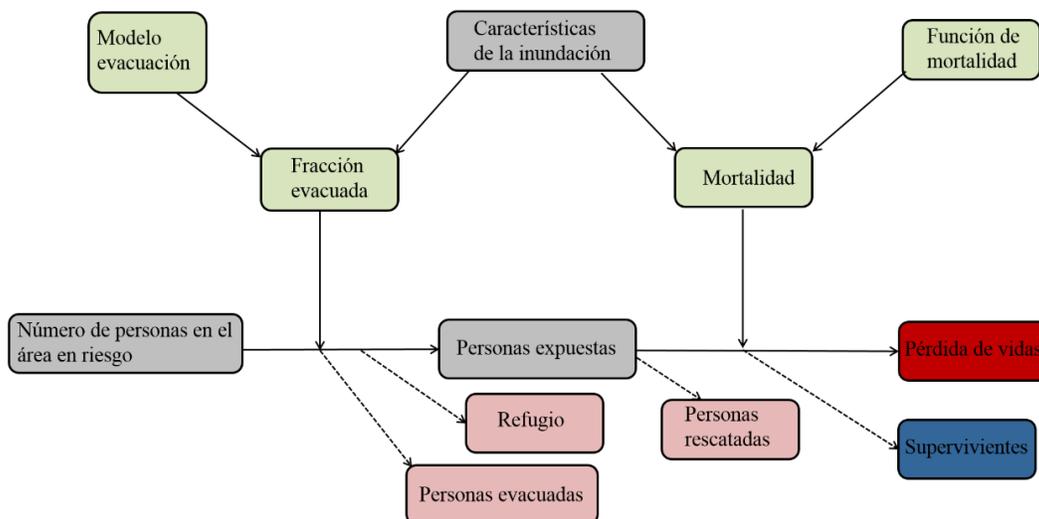


Figura 1.10. Modelo de evaluación de pérdida de vidas (modificado de Burzel et al., 2015).

Otro método reciente es el desarrollado por Jonkman et al., 2008 para la estimación de la pérdida de vidas por inundación en áreas de baja cota topográfica debido al brechamiento o abertura de fisuras en las estructuras de defensa. Es un método desarrollado en los Países Bajos pero pensado para ser aplicado a nivel mundial, con una base empírica sólida y validado con datos reales de inundación (Jonkman et al., 2008).

El esquema general del modelo se muestra en la Fig. 1.11.



**Figura 1.11.** Esquema general de pérdida de vidas debido a inundación (modificado de Jonkman et al., 2008).

Se compone de tres pasos principales:

1. Análisis de las características de la inundación: profundidad de agua, tasa de incremento de la altura de inundación y velocidad del flujo.
2. Estimación del número de personas expuestas (incluyendo la posibilidad de refugio, evacuación y rescate).

De acuerdo con los parámetros de inundación y la posibilidad de refugio se definen 3 zonas de peligro similar de afección (Fig. 1.12):

- (a) “Zona de abertura de brecha”: caracterizada por alta velocidad del flujo, alta posibilidad de colapso de edificios e inestabilidad.
- (b) “Zona con rápido crecimiento de altura de inundación”: disminuye la posibilidad de refugio.
- (c) “Zona de remanso”: evolución lenta de la inundación y, por tanto, mayor posibilidad de refugio.

Además, en cada una de estas 3 regiones se delimitan otras subregiones con características homogéneas de inundación (p.e. en la Fig. 1.12 cada número representa una de estas localizaciones).

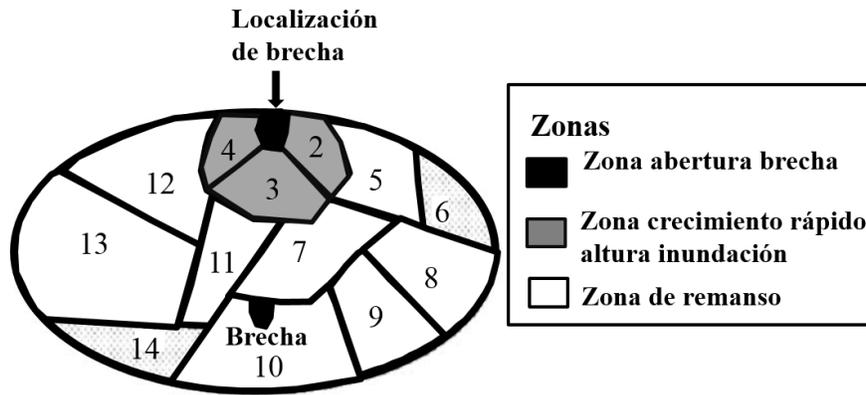


Figura 1.12. Zonas de peligro en la estimación de pérdida de vidas por apertura de brecha en estructuras de defensa (modificado de Jonkman & Vrijling, 2008).

3. Evaluación de la mortalidad entre las personas expuestas a la inundación. Se definen funciones de mortalidad en cada zona de acuerdo con las características de la inundación (profundidad de agua, velocidad) y otros factores como el posible colapso de los edificios. El número de fatalidades viene expresado mediante la Ec. (1.6).

$$N = F_D \cdot N_{EXP} \quad (1.6)$$

donde: N, es el número de fatalidades;  $F_D$ , es la mortalidad de la población expuesta; y  $N_{EXP}$ , es el número de personas expuestas.

- Otras perturbaciones sociales (enfermedades e infecciones)

Otros posibles efectos directos por las inundaciones en la salud son infecciones en piel y ojos o envenenamiento por contaminación química (a corto plazo), y enfermedades crónicas (a largo plazo) (Du et al., 2010).

Aunque los impactos en la salud por contaminación química detonada por las inundaciones podrían ser mayores en las poblaciones cercanas a áreas industriales o agrícolas impactadas por la inundación, varios autores coinciden en que la relación entre inundación, contaminación y efectos en la salud es todavía poco concluyente y necesita de mayor investigación científica (Alderman et al., 2012).

Alderman et al., 2012 también analizan posibles enfermedades que pueden ser transmitidas por el agua de inundación, y proponen algunos parámetros para definir la susceptibilidad de las poblaciones de ser afectadas (Tabla 1.1).

Enfermedades transmitidas por el agua	
Tipo	Parámetros que afectan a la vulnerabilidad
Enfermedades gastrointestinales	- Países recursos económicos Bajos: Higiene; Provisión agua potable - Países recursos económicos altos: Profundidad de inundación; densidad población; condiciones antihigiénicas
Infecciones respiratorias y en la piel	Personas susceptibles: p.e. asmáticos y niños
Leptospirosis: enfermedad febril epidémica, por contacto directo con áreas contaminadas con orina de roedores infectados.	Densidad de población Condiciones de drenaje no adecuadas (barrios marginales)

**Tabla 1.1. Enfermedades transmitidas por el agua; parámetros relacionados con la vulnerabilidad de la población de ser afectada (modificado de Alderman et al., 2012).**

- Pérdidas Medioambientales

Dassayanake et al., 2015, en el proyecto XtremRISK (Oumeraci et al., 2015), evalúan los daños medioambientales en términos de pérdidas y éstas en función del cambio que pueden sufrir los servicios ambientales de cada ecosistema. La metodología se compone de dos pasos principales (Fig. 1.13):

1. Identificación de los ecosistemas presentes en el área de estudio, y definición de sus servicios ambientales.

La metodología utiliza la clasificación de los servicios ambientales propuesta por Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005; que define los servicios de los ecosistemas de acuerdo con los beneficios proporcionados para los humanos en cuatro categorías:

(a) Servicios de aprovisionamiento (productos que son obtenidos de los ecosistemas): comida, agua, productos farmacéuticos, entre otros.

(b) Servicios de regulación (beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema): mantenimiento de la calidad del aire, regulación del clima, regulación del agua, control de erosión, protección frente a tormentas, etc.

(c) Servicios culturales (beneficios no-materiales obtenidos de los ecosistemas): espiritual y religioso, valor educacional, valor estético, recreacional y ecoturismo.

(d) Servicios de apoyo (servicios necesarios para producción de otros servicios del ecosistema): formación del suelo, producción primaria, ciclo de nutrientes.

Esta última clasificación no es contemplada en el modelo por estar considerada de forma indirecta en el resto.

2. Estimación del porcentaje de cambio de los servicios ambientales de los ecosistemas, para cada escenario de simulación; en función de factores de impacto específicos del ecosistema mediante la Ec. (1.7).

$$\Delta ES_{\text{total}} = a \cdot \Delta ES_{\text{erosión}} + b \cdot \Delta ES h_{\text{inundación}} + c \cdot \Delta ES_{\text{duración}} + d \cdot \Delta ES_{\text{contaminación}} \quad (1.7)$$

donde:

$\Delta ES_{\text{total}}$ , es el cambio total de los servicios ambientales.

$\Delta ES_{\text{erosión}}$ , hace referencia al cambio por erosión que sufre el ecosistema debido a la inundación.

$\Delta ES h_{\text{inundación}}$ , es el cambio debido a la profundidad de inundación, Ec. (1.8). La altura típica de cada ecosistema es considerada como un parámetro crítico, mientras que la inundación parcial se considera que no daña el ecosistema.

$$\Delta ES_{h_{\text{inundación}}} = \frac{h_{\text{inundación}}}{h_{\text{inundación\_crítica}}} \quad (1.8)$$

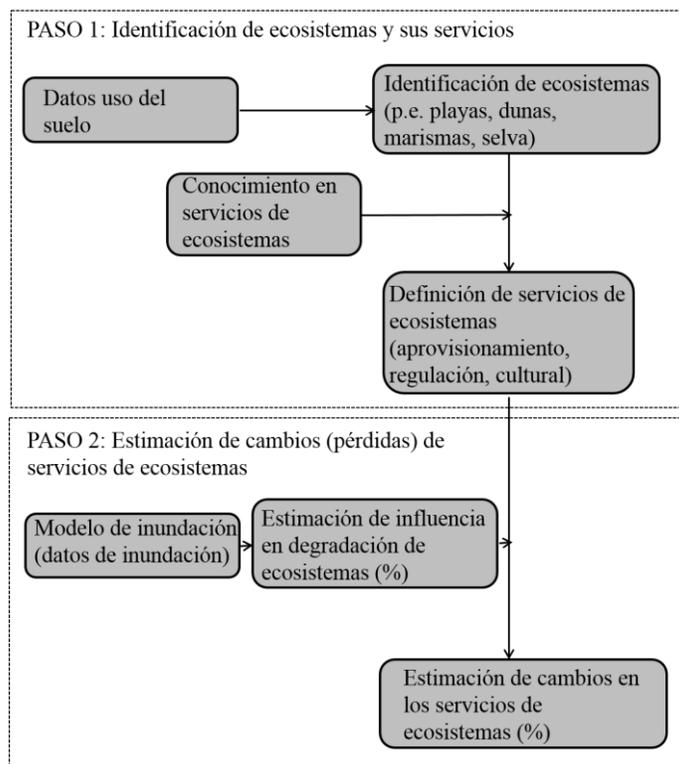
$\Delta ES_{\text{duración}}$ , es el factor de influencia de la duración de la inundación. Se propone su estimación en función de valores de evaporación e infiltración para cada ecosistema, Ec. (1.9).

$$\Delta ES_{\text{duración}} = \frac{h_{\text{inundación}}}{\text{evaporación} + \text{infiltración}} \quad (1.9)$$

$\Delta ES_{\text{contaminación}}$ , es el factor que tiene en cuenta la posible contaminación por intrusión salina, considerado como el principal contaminante en caso de inundación, mediante la Ec. (1.10).

$$\Delta ES_{\text{contaminación}} = \frac{\text{intrusión\_salina}}{\text{intrusión\_salina\_crítica}} \quad (1.10)$$

a, b, c y d son pesos que incorporan la importancia relativa de cada factor en el cambio total de los servicios del ecosistema. Esta metodología propone su determinación mediante el método conocido como “Método de Comparación Por Pares” (*Pairwise Comparison Method, PCM*), derivado de análisis multi-criterio.



**Figura 1.13. Metodología para la evaluación de las pérdidas medioambientales (modificado de Dassanayake et al., 2015).**

Finalmente, el riesgo sobre cada ecosistema viene expresado como el producto de las pérdidas y la probabilidad de ocurrencia del escenario en particular.

Varios estudios proponen métodos de valoración monetaria de los bienes y servicios medioambientales. Algunos de éstos son: el método de la valoración contingente, precios hedónicos o el método del Coste del Viaje. Estos métodos son integrados en herramientas que facilitan la evaluación de los servicios de los ecosistemas, como InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), MIMES (Multi-scale Integrated Models of Ecosystem Services), y ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services) (Dassayanake et al., 2010).

#### *Pérdidas Intangibles (indirectas)*

- Dificultad de recuperación después de la inundación

Mediante esta categoría de pérdidas se analiza la resiliencia del receptor frente a un evento de inundación. Es un concepto que todavía se está analizando para incluirlo como una componente importante en las herramientas para evaluar el riesgo; evaluando, por ejemplo, cómo influiría una mayor conciencia del riesgo de la población en la rapidez de evacuación (Zanutigh et al., 2014).

- Perturbaciones sociales indirectas

Du et al., 2010 presentan una clasificación de los posibles impactos indirectos en la salud por las inundaciones, estableciendo una división en inmediatos, a corto y largo plazo. Además propone algunas estrategias que pueden ayudar en su mitigación y/o reducción (Tabla 1.2).

Inmediatos		Corto plazo		Largo plazo	
Impactos	Estrategias	Impactos	Estrategias	Impactos	Estrategias
Por desplazamiento de pacientes, discapacitados, ancianos, niños, etc (p.e. ataque al corazón, enfermedad, deterioro)	- Rescate - Servicios de salud seguros	Enfermedades transmisibles: - Vectores (p.e. malaria, dengue o fiebre amarilla) - Infecciosas - Mordeduras de animales	- Agua y alimentos limpios - Eliminación de residuos - Atención de refugiados - Programa de inmunización	- Malnutrición	- Recuperación económica - Ayuda y programas de asistencia

**Tabla 1.2. Consecuencias en la salud de las inundaciones (indirectas): inmediatas, corto y largo plazo (modificado de Du et al., 2010).**

Alderman et al., 2012 relacionan algunos de estos impactos con parámetros que pueden influir en la vulnerabilidad de la población afectada (Tabla 1.3).

Impactos indirectos de las inundaciones sobre la salud	
Tipo	Parámetros que afectan a la vulnerabilidad
Enfermedades transmitidas por vectores	- Aumento de la exposición (dormir en la calle; multitudes; vagabundos; pobre infraestructura de los países sin desarrollo) - Poca higiene
Malnutrición	- Personas susceptibles: mujeres, niños, ancianos, enfermos - Pobreza

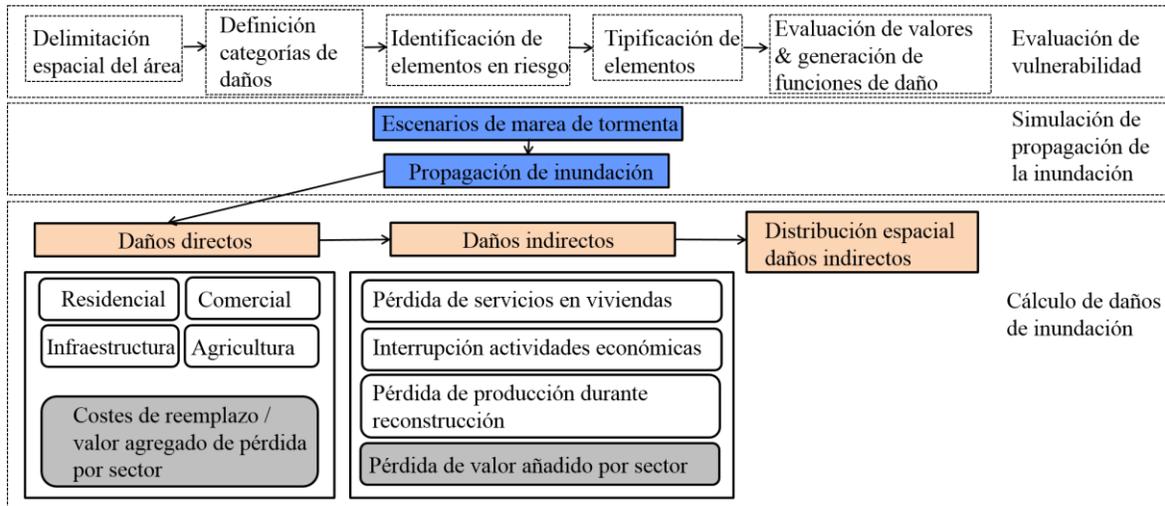
**Tabla 1.3. Impactos indirectos de las inundaciones en la salud; parámetros relacionados con la vulnerabilidad de la población de ser afectada (Alderman et al., 2012).**

Alderman et al., 2012 resaltan la importancia de adoptar medidas preventivas y llevar a cabo planes de adaptación para reducir la mortalidad y morbilidad después de una inundación. Algunas medidas son: en países de bajos recursos, la promoción del crecimiento económico equitativo y sostenible para lograr el fomento de la capacidad adaptativa de la población; en países de recursos altos, la eficacia de las medidas de prevención (p.e. sistemas de alerta temprana) y difusión de éstas en áreas más lejanas.

### 1.3.3. Integración de probabilidad y consecuencias en definición de riesgo

La definición de riesgo en una única estimación conlleva a la integración de todas las categorías de pérdidas en la misma unidad de medida (monetaria o no-monetaria) y en una sola valoración, para ser posteriormente combinada con la probabilidad de ocurrencia del peligro. Entre las pocas metodologías que proponen la integración de todas las categorías de pérdidas en una única estimación del riesgo (en términos monetarios o no-monetarios) se encuentran los estudios del proyecto THESEUS (Zanuttigh et al., 2014) o el proyecto XtremRisK (Oumeraci et al., 2015).

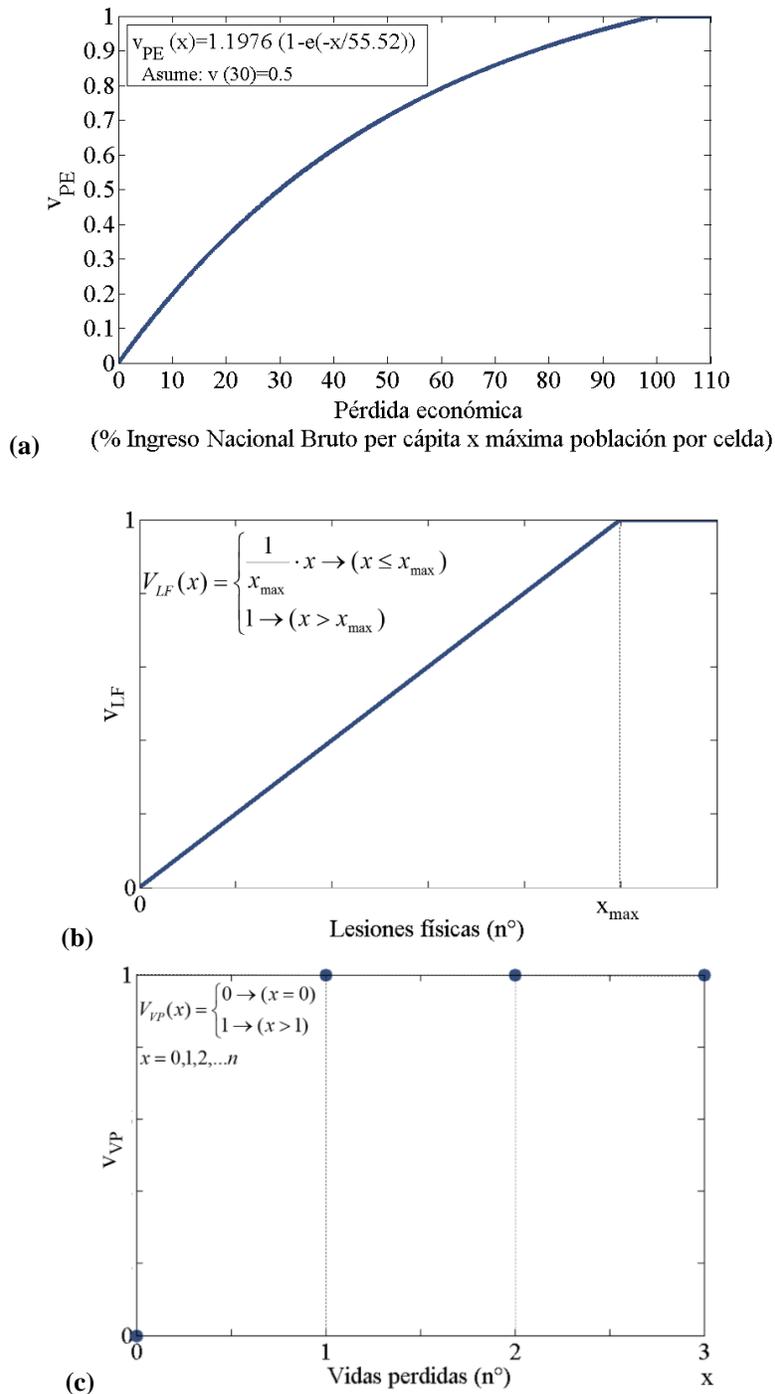
Ujeyl & Rose, 2015 proponen una metodología para integrar los daños directos sobre residencias, comercios, agricultura e infraestructura; e indirectos por interrupción de las actividades económicas fuera del área inundada y la pérdida de servicios en las viviendas (Fig. 1.14).



**Figura 1.14. Metodología general para la estimación de los daños directos e indirectos (modificado de Ujeyl & Rose, 2015).**

En el proyecto XtremRisK (Oumeraci et al., 2015), Dassanayake et al., 2015 proponen una metodología para integrar las pérdidas tangibles e intangibles basada en el análisis multi-criterio (teoría Multi Atributo, *MAUT por sus siglas en inglés ‘Multi Attribute Utility Theory’*). Esta metodología se compone de tres pasos principales:

1. En cada categoría, las pérdidas son definidas en una escala de 0 a 1 (proceso de estandarización) mediante la aplicación de funciones de valores. Dassanayake et al., 2015 proponen tres funciones para normalizar las pérdidas económicas (Fig. 1.15a), el número de afectados por lesiones físicas (Fig. 1.15b), y el número de vidas perdidas (Fig. 1.15c).



**Figura 1.15. Funciones de valores: (a) pérdidas económicas; (b) lesiones físicas; (c) pérdida de vidas (modificado de Dassayanake et al., 2015).**

2. Se asignan pesos para cada categoría de pérdidas, de acuerdo con la importancia relativa de cada una en las pérdidas totales (p.e. mediante la aplicación del Método de Comparación Por Pares).

3. Los valores estandarizados y ponderados son agregados en una única valoración de pérdidas totales, mediante la Ec. (1.11). De acuerdo con estos valores, se establecen varias clases o niveles (cada uno englobando determinados rangos de valores agregados de pérdidas) de acuerdo con la severidad de las pérdidas totales.

$$U = \sum_j w_j \cdot u_j \quad (1.11)$$

donde: U, es el valor total de las pérdidas;  $u_j$ , es el valor estandarizado de las pérdidas de la categoría j; y  $w_j$ , es el peso de la categoría j ( $\sum_j w_j = 1$ ).

#### **1.4. Definición de la evolución temporal del riesgo**

La evolución temporal del riesgo ha sido contemplada en algunos estudios mediante la introducción de futuros escenarios de simulación, proyección de crecimiento o cambio de la población y características económicas; y evaluación del riesgo futuro tras la introducción de diversas opciones de tratamiento (Dawson et al., 2009; Zanuttigh et al., 2014).

#### **1.5. Análisis espacial del riesgo**

Burzel et al., 2015, como parte del proyecto XtremRisk (Oumeraci et al., 2015), proponen el análisis espacial del riesgo mediante el análisis por celdas (‘Cell-based Risk Assessment-CRA’). La metodología consiste en 3 pasos principales:

1. El área de estudio es dividida en celdas uniformes. El tamaño de celda es función de la escala, datos, recursos y tiempo disponibles.
2. Los datos de entrada del modelo son convertidos a formato celda mediante las herramientas de geoprocésamiento de ArcMap.
3. El modelo de riesgo es implementado en submódulos con las herramientas de geoprocésamiento conocidas como ‘ModelBuilder’ en ArcMap, para agilizar el proceso; y es aplicado en todas las celdas del sitio de estudio.

## **Capítulo 2**

### **METODOLOGÍA**

---



## Capítulo 2

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Esquema general y fundamentos

La Fig. 2.1 muestra el esquema general de la metodología que se propone para la evaluación y gestión del riesgo de erosión e inundación en zonas costeras.

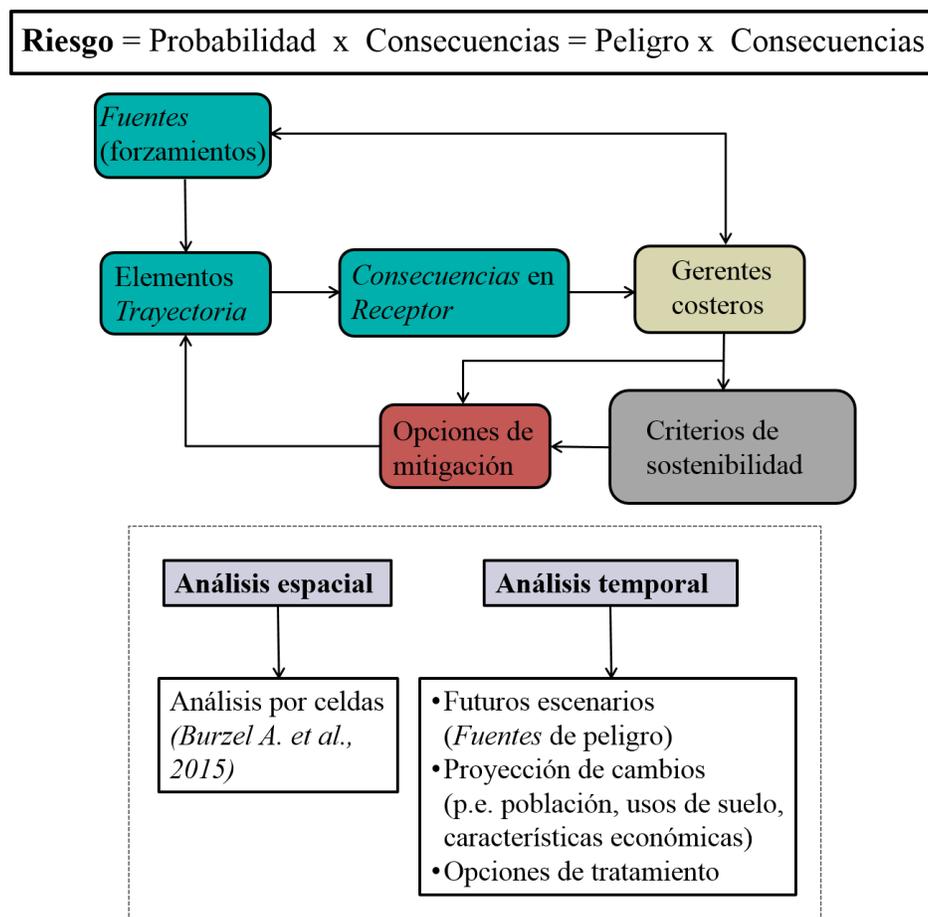


Figura 2.1. Diagrama general de modelo para la evaluación y gestión del riesgo.

El diagrama se basa en la estructura de la metodología propuesta por Zanuttigh et al., 2014; e integra la definición de riesgo como combinación de probabilidad y consecuencias, el concepto SPRC, la adopción de medidas de mitigación para mantener el riesgo a un nivel aceptable a corto plazo o el planeamiento a largo plazo sostenible, la evaluación espacial del riesgo mediante el análisis por celdas y la evolución temporal del mismo mediante la incorporación en el análisis de la posible variación de las características de alguno o varios de los elementos que componen el riesgo (elementos Fuente, Trayectoria o las características del Receptor).

Las principales aportaciones de este trabajo a la metodología se centran en la evaluación de pérdidas por afectación del ecosistema localizado en zonas costeras, la estimación de posibles impactos en la salud por las inundaciones, y el análisis de parámetros relacionados con la resiliencia de los receptores. En la Fig. 2.2 se resaltan en rojo las categorías que engloban estas nuevas herramientas de evaluación, junto al resto de daños contemplados en la investigación.

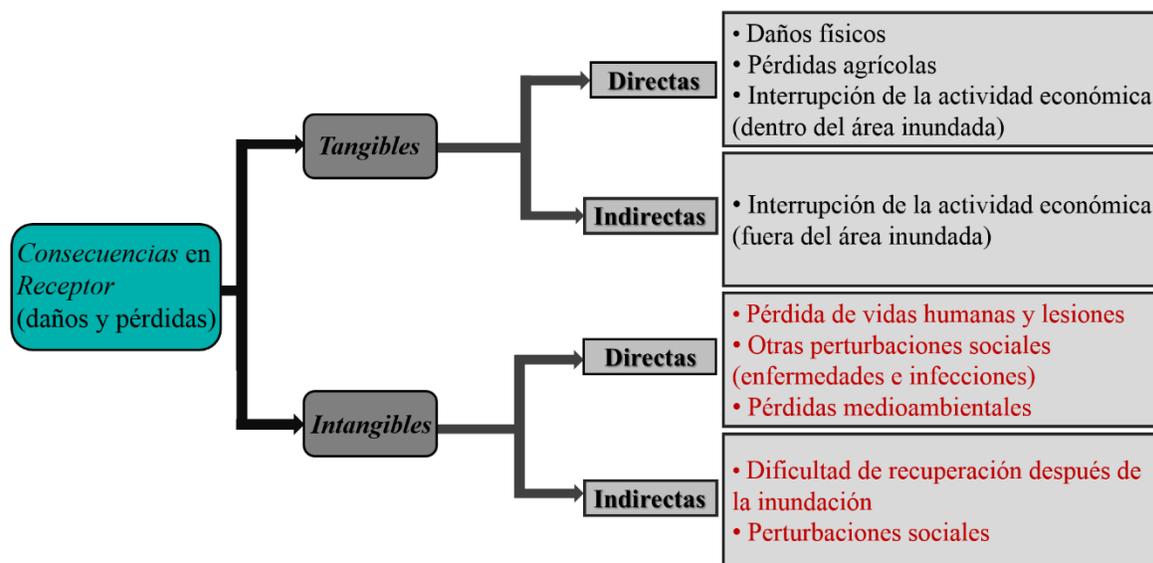


Figura 2.2. Categorías de consecuencias por inundación analizadas en la investigación (en rojo, aquellas en las que se aportan nuevos métodos de evaluación).

En los siguientes apartados se describe el fundamento y aplicación de estos modelos.

## 2.2. Pérdida de vidas humanas y lesiones

Los fundamentos principales de la metodología se basan en el modelo propuesto por Burzel et al., 2015, con la incorporación de algunas modificaciones en lo que se refiere a la definición de la población que es considerada susceptible de sufrir mayores daños, la valoración de la vulnerabilidad del área de acuerdo con su naturaleza y la definición del índice de peligro en función de las características del flujo de inundación. Esto es:

(a) Población vulnerable (módulo I, Fig. 2.4)

Burzel et al., 2015 definen población vulnerable a aquella compuesta por ancianos y enfermos/discapacitados por su mayor dificultad de evacuar en caso de inundación; sin embargo, Jonkman & Penning-Rowsell, 2008 consideran que el cuerpo de un niño puede perder estabilidad en el agua de inundación (en cuanto a caída por deslizamiento y vuelco) tan pronto como los ancianos. Por tanto, el modelo que se propone extiende la definición de población vulnerable para incluir a los niños (< 14 años).

Otros autores que consideran los niños como población vulnerable por peligro de inundación son Flanagan et al., 2011; o Zanuttigh et al., 2014.

(b) Vulnerabilidad del área de acuerdo con su naturaleza (módulo II, Fig. 2.4)

Burzel et al., 2015 determinan 3 niveles de riesgo de acuerdo con las características del área; por ejemplo, la estructura de los edificios es utilizada como un parámetro indicativo de zonas de diferente vulnerabilidad de la población de ser afectada por la inundación.

Por otro lado, Zanuttigh et al., 2014 determinan la vulnerabilidad entre áreas en función del uso del suelo y tres escenarios principales: día, noche o periodo turístico (Tabla 2.1).

NA (Naturaleza del Área)	Estación turística	Día	Noche
Área residencial	2	1	3
Área turística	3	2	1
Industria	2	3	2
Área comunitaria o religiosa	2	3	1
Área educacional	1	3	1
Centro ciudad	3	3	3
Aparcamientos y áreas verdes	1	1	1
1 (riesgo bajo); 2 (riesgo medio); 3 (riesgo alto)			

**Tabla 2.1. Valores y factores propuestos para determinar el nivel de riesgo entre áreas, de acuerdo con su naturaleza (modificado de Zanuttigh et al., 2014).**

Dependiendo de las características particulares del área y el periodo de análisis se seleccionan los criterios más adecuados para establecer el nivel de riesgo entre las distintas zonas.

(c) Índice de peligro (módulo III, Fig. 2.4)

Burzel et al., 2015 utilizan la definición semicuantitativa de índice de peligro propuesta por Ramsbottom et al., 2004 y Penning-Rowsell et al., 2005 mediante la Ec. (2.1).

$$HR = WL \cdot (FV + 0.5) + DF \quad (2.1)$$

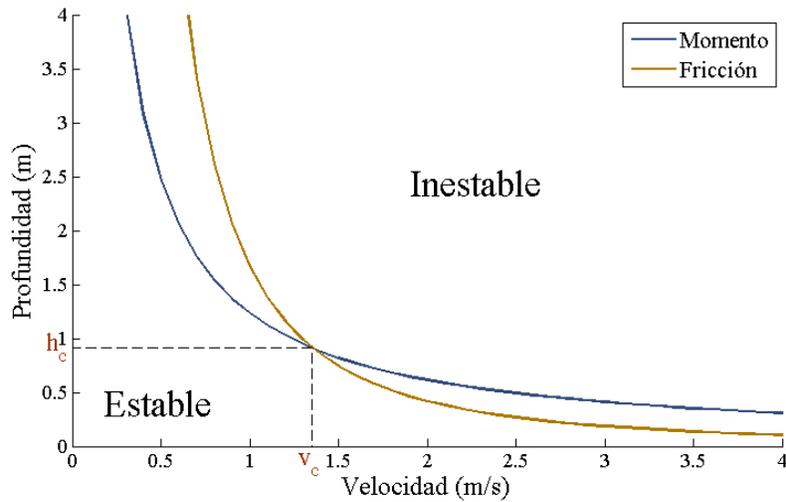
donde: HR, es el índice de peligro; WL, es la profundidad de agua; FV, es la velocidad del flujo; DF, es el factor de escombros.

Varios autores analizan, mediante experimentos, la respuesta de inestabilidad del cuerpo humano a la combinación de una determinada velocidad del flujo y altura de inundación (Jonkman & Penning-Rowsell, 2008; Chanson et al., 2014, entre otros). Se distinguen dos mecanismos principales que causan inestabilidad: inestabilidad de momento (a vuelco), que muestra una relación física con el producto velocidad-profundidad de inundación, Ec. (2.2); e inestabilidad de fricción (a deslizamiento), más vinculada al producto de la profundidad y el cuadrado de la velocidad del flujo (Jonkman & Penning-Rowsell, 2008), Ec. (2.3). Según estos últimos autores, los efectos de inestabilidad de fricción parecen ocurrir antes que la inestabilidad de momento, en condiciones de poca profundidad de inundación y alta velocidad del flujo; y vienen influenciados, junto a los parámetros del flujo, por las características del individuo (peso y altura) y la superficie del fondo (fricción y pendiente). La Fig. 2.3 muestra las curvas teóricas de inestabilidad para las características promedio de un hombre adulto, superficie de pendiente pronunciada y un valor conservativo de fricción. Estas relaciones no consideran niveles de turbulencia ni posible arrastre de escombros por el agua de inundación (troncos, árboles, papeleras, contenedores, etc), además de corresponder a condiciones ideales de vestimenta asegurada y buenas condiciones de luz.

$$hv_c = C_M m^{0.5}; C_M = \sqrt{\left( \frac{2g \cos(\alpha)L}{C_D B \rho} \right)} \quad (2.2)$$

$$hv_c^2 = C_F m; C_F = \frac{2\mu g}{C_D B \rho} \quad (2.3)$$

donde: h, es la profundidad de agua (m);  $v_c$ , es la velocidad crítica que produce inestabilidad (m/s); m, es el peso (kg); g, es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ );  $\alpha$ , es el ángulo de inclinación de la pendiente del fondo ( $^\circ$ ); L, es la altura (m);  $C_D$ , es el coeficiente de arrastre; B, es el ancho medio del cuerpo expuesto de forma normal al flujo;  $\rho$ , es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ).



**Figura 2.3. Curvas teóricas de Inestabilidad de Momento y Fricción (persona  $m=75$  kg;  $L=1.75$  m;  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>;  $\alpha=75^\circ$ ;  $C_D=1.1$ ;  $B=0.4$  m;  $\mu=0.5$ ;  $\rho=1000$  kg/m<sup>3</sup> (modificado de Jonkman & Penning-Rowse, 2008).**

Por otro lado, Chanson et al., 2014 analizan la respuesta de trabajadores en agua de inundación (hombres, de altura entre 1.75-1.79 m y peso entre 75 y 120 kg). De los resultados obtienen una relación entre la velocidad del flujo y la profundidad de inundación que considera ambos tipos de inestabilidad de forma conjunta, más conservativa que la propuesta por Jonkman & Penning-Rowse, 2008 y, a diferencia de ésta, que contempla niveles altos de turbulencia y condiciones más desfavorables de luz. El límite de estabilidad viene dado por la Ec. (2.4); que también ignora el posible arrastre de escombros y corresponde a condiciones de vestimenta asegurada.

$$V_i < 4 - 10d \quad \text{para } d \leq 0.3 \text{ m} \quad (2.4)$$

donde:  $d$ , es la profundidad de agua de inundación (m);  $V_i$ , es la velocidad instantánea del flujo (m/s).

Con lo expuesto anteriormente, se propone que el índice de peligro sea proporcional a los parámetros del flujo de la misma forma en que se relacionan éstos con la pérdida de estabilidad de fricción ( $hV^2$ ), ya que la inestabilidad a deslizamiento parece ocurrir antes que la pérdida de estabilidad de momento (Jonkman & Penning-Rowse, 2008); incluyendo un factor adicional (DF) para incorporar el peligro por el posible arrastre de escombros. Además, la definición de este índice contempla el criterio de estabilidad planteado por Chanson et al., 2014, asumiendo que si las características de la inundación se encuentran dentro del rango definido por éste solamente el transporte de escombros por el flujo puede ser causa de peligro de daño. Así, el índice de peligro queda definido por tres parámetros: altura de inundación, velocidad del flujo y un factor de escombros, Ec. (2.5).

$$HR = h \cdot V^2 + DF \rightarrow \{h \geq 0.3m \& V > (4 - 10h)\}$$

$$HR = DF \rightarrow \{h \leq 0.3m \& V \leq (4 - 10h)\} \quad (2.5)$$

donde: HR, es el índice de peligro; h, es la profundidad de agua de inundación (m); V, es la velocidad del flujo (m/s); DF, es el factor de escombros.

El factor de escombros se define en función de la velocidad del flujo, como proponen Burzel et al., 2012 (Tabla 2.2). La forma de integrarlo en la expresión del índice de peligro, sumando con el resto de parámetros en vez de multiplicando como proponen Zanuttigh et al., 2014 ( $HR = N \cdot h \cdot V \cdot DF$ ), tiene como objetivo darle coherencia al resultado cuando la velocidad del flujo se encuentra entre 0 y 1 (DF=1, según Tabla 2.2) y la profundidad de inundación es superior a 0.3 m (inestabilidad por altura de inundación y velocidad del flujo) siendo en este caso el índice de peligro mayor que el definido cuando las características del flujo cumplen la condición de estabilidad ( $HR = DF$ ).

V (m/s)	Factor Escombros
V = 0	0 (improbable)
0 < V < 1	1 (probable)
V > 1	2 (muy probable)

**Tabla 2.2. Factor de escombros (DF) en función de la velocidad del flujo (modificado de Burzel et al., 2012).**

Así, la Fig. 2.4 muestra el diagrama de aplicación del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones que se propone tras integrar las modificaciones descritas anteriormente. El módulo del esquema propuesto por Burzel et al., 2015 (módulo VII), donde se obtiene el número de muertes a partir de la estimación conjunta de fallecidos y lesionados, no se ha considerado por la diversidad de otras condiciones locales que pueden influir en este resultado.

Zahran et al., 2008 analizan diferentes eventos de inundación en Texas durante un periodo de 4 años y determinan, mediante la aplicación de un modelo de regresión, la influencia de varios parámetros sobre el número de personas afectadas; entre los que se encuentran algunos de los seleccionados de entrada al modelo propuesto. Los resultados indican que la probabilidad de pérdidas aumenta con el nivel de daño producido por las inundaciones sobre las propiedades, la densidad de población y la presencia de población vulnerable.

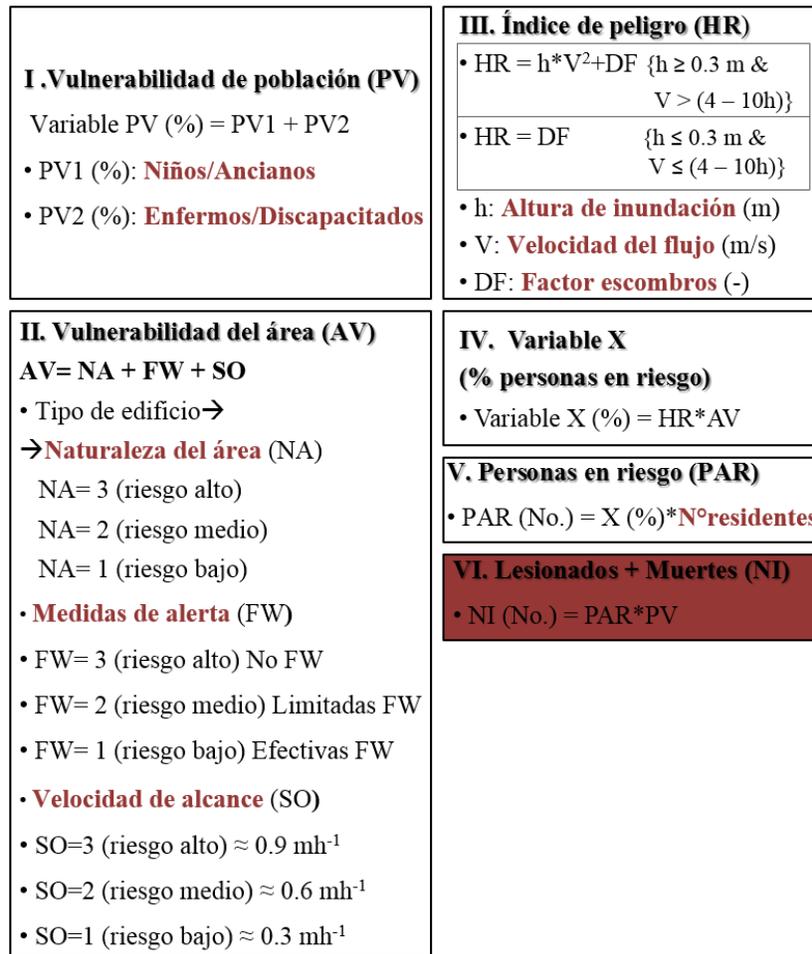


Figura 2.4. Modelo de Pérdidas humanas y lesiones.

A pesar de la incertidumbre del modelo, en la forma de combinar las diferentes variables, la tendencia de fluctuación de las pérdidas de acuerdo con la relación establecida permite destacar e identificar las zonas más susceptibles a sufrir estos daños.

A continuación se describen los parámetros que componen cada módulo y el criterio de valoración adoptado para su integración con el resto en el modelo.

#### I. Vulnerabilidad de la población (PV)

La vulnerabilidad de la población se plantea como combinación de dos factores, atendiendo a la edad de la población o a la existencia de enfermos o discapacitados, Ec. (2.6).

$$PV(\%) = PV1 + PV2 \quad (2.6)$$

donde: PV1, es el factor que indica la presencia de niños o ancianos, en relación a un valor medio de referencia de esta población en el área de análisis (%); PV2, es el factor que

indica la presencia de enfermos o discapacitados (%), en relación a un valor medio de referencia de esta población en el área de análisis.

De acuerdo con Burzel et al., 2012, los valores propuestos para estos índices se muestran en la Tabla 2.3. De éstos, por ejemplo, el valor de 50 % (presencia Alta de PV1/PV2) trata de resaltar las regiones donde se localiza una densidad de población vulnerable superior al valor medio que se distribuye en el área.

Presencia	Baja	Media	Alta
PV1 (%)	10	25	50
PV2 (%)	10	25	50

**Tabla 2.3. Valores de los factores PV1 y PV2.**

## II. Vulnerabilidad del área (AV)

Este parámetro se define en función de tres factores de acuerdo con las características del área que determinan una diferente susceptibilidad relativa de la población de ser amenazada; y la posibilidad de evacuación, refugio o rescate dada por la existencia de medidas de alerta y/o la velocidad de alcance de la inundación, Ec. (2.7). La puntuación que se asigna a cada parámetro varía de 1 a 3, como especificado en la Fig. 2.4, de acuerdo con tres niveles de riesgo relativo establecido (alto, medio o bajo).

$$AV = NA + FW + SO \quad (2.7)$$

donde: AV, es el parámetro de vulnerabilidad del área; NA, es el factor que contempla la naturaleza del área; FW, es el factor que introduce la existencia o no de medidas de alerta; SO, es el factor que atiende a la velocidad de llegada de la inundación al receptor.

## III. Índice de peligro (HR)

Este parámetro se describió anteriormente y queda definido mediante la Ec. (2.8), en función de la altura de inundación, velocidad del flujo y posible presencia de escombros.

$$HR = h \cdot V^2 + DF \rightarrow \left\{ h \geq 0.3m \& V > (4 - 10h) \right\}$$
$$HR = DF \rightarrow \left\{ h \leq 0.3m \& V \leq (4 - 10h) \right\} \quad (2.8)$$

donde: HR, es el índice de peligro; h, es la profundidad de agua de inundación (m); V, es la velocidad del flujo (m/s); DF, es el factor de escombros.

## IV. Variable X (% personas en riesgo)

Esta variable evalúa de forma conjunta el peligro dado por las características del flujo de inundación y la vulnerabilidad del área, mediante la Ec. (2.9).

$$X(\%) = HR \cdot AV \quad (2.9)$$

donde: X, estima el porcentaje de personas en riesgo (%); HR, es el índice de peligro; AV, es el parámetro de vulnerabilidad del área.

Si en el cálculo de este parámetro se obtiene un valor superior o igual a 100 %, se considera que la totalidad de la población que ocupa el área se encuentra en riesgo.

#### V. Personas en riesgo

El número de personas en riesgo se obtiene al considerar el número de residentes en cada celda de análisis, junto al porcentaje de personas obtenido del parámetro anterior, Ec. (2.10).

$$PAR(N^\circ) = X(\%) \cdot N^\circ \text{residentes} \quad (2.10)$$

donde: PAR, es el parámetro de estimación del número de personas en riesgo ( $N^\circ$ ); X, es el porcentaje de personas en riesgo (%);  $N^\circ$ residentes, es el número de personas en cada celda de análisis.

#### VI. Lesionados + Muertes (NI)

Por último, el número de personas afectadas se evalúa como una proporción del número de personas en riesgo de acuerdo con la población vulnerable en el área, Ec. (2.11).

$$NI(N^\circ) = PAR \cdot PV \quad (2.11)$$

donde: NI, es el parámetro que estima el número de afectados por la inundación ( $N^\circ$ ); PAR, es el número de personas en riesgo ( $N^\circ$ ); PV, es el índice que cuantifica la presencia de población vulnerable (%).

### 2.3. Otras perturbaciones sociales (enfermedades e infecciones)

En el análisis de literatura realizado en el capítulo anterior, algunos autores confirman que la relación entre inundación, contaminación y efectos en la salud todavía es cuestionable. Sin embargo, varios parámetros han sido reconocidos por su influencia en la vulnerabilidad de contraer enfermedades, infecciones en piel/ojos o de envenenamiento por contacto directo con agua contaminada (Alderman et al., 2012). Éstos son:

- (a) Densidad de población.
- (b) Condiciones de drenaje no adecuadas (p.e. en barrios marginales).
- (c) Condiciones de higiene; provisión de agua potable.
- (d) Población susceptible: niños, asmáticos.
- (e) Profundidad de inundación.

A partir de estos factores y utilizando algunas de las variables y relaciones incluidas en el modelo de pérdida de vidas y lesiones propuesto anteriormente, por considerar una influencia similar en algunos aspectos; se propone un modelo para evaluar el número de

personas que pueden resultar afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación (Fig. 2.5).

Las fuentes de contaminación que se consideran son:

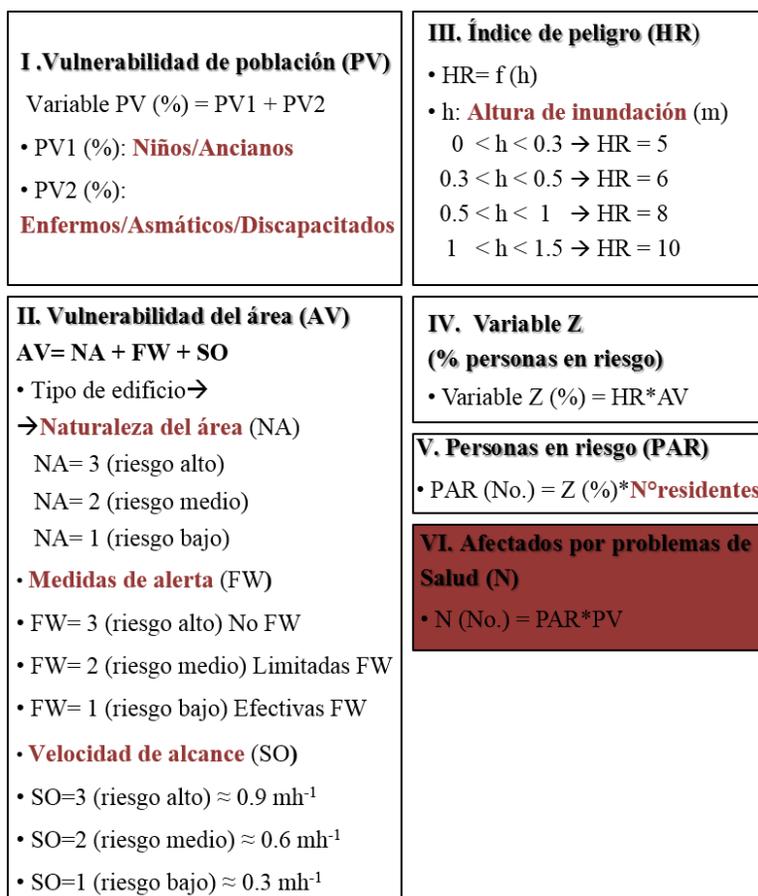
1. Áreas de usos del suelo incompatibles (p.e. presencia de zona de viviendas e industrial).
2. Basureros, plantas de tratamiento de aguas residuales y cementerios.
3. Viviendas sin servicios de drenaje adecuados.
4. Zona de relleno junto a cuerpos de agua estancados, que ocasionan problemas de condiciones de salubridad.

La población en riesgo se define en un radio de influencia medido desde la fuente de contaminación, el cual es dependiente del tamaño y naturaleza de la fuente. El modelo únicamente se aplica en esta región.

Los parámetros adoptados del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones son: la contemplación de medidas de alerta y velocidad de llegada de la inundación, por la posibilidad de evacuación antes de que el agua contaminada alcance al receptor; y la consideración de los enfermos/discapacitados y ancianos como población vulnerable, por su mayor dificultad de evacuar y susceptibilidad a contraer enfermedades e infecciones. También se utiliza un concepto similar al seguido en el esquema de pérdida de vidas para agrupar las distintas variables.

Las variables mencionadas anteriormente por su influencia en la vulnerabilidad de la población a estos daños quedan consideradas en los siguientes módulos del modelo:

- (a) Densidad de población: en la evaluación del número de personas en riesgo (módulo V).
- (b) Condiciones de drenaje no adecuadas (p.e. en barrios marginales): en la definición de fuente de contaminación y valoración de la naturaleza del área (módulo II).
- (c) Condiciones de higiene; provisión de agua potable: en la evaluación de acuerdo con la naturaleza del área (módulo II).
- (d) Población susceptible: niños, asmáticos: en la definición de población vulnerable (módulo I). Además se incluyen en esta categoría los ancianos, discapacitados y población con enfermedades previas.
- (e) Profundidad de inundación: en la definición del índice de peligro (módulo III).



**Figura 2.5. Modelo de pérdidas de salud por el contacto directo con agua contaminada.**

A continuación se describen los parámetros de cada módulo y el criterio propuesto para su valoración.

### *I. Vulnerabilidad de población (PV)*

La población vulnerable queda definida mediante la Ec. (2.6), adoptando los criterios determinados en el modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones. El modelo contempla, junto a los enfermos y los discapacitados, las personas asmáticas como población susceptible de sufrir mayores daños.

### *II. Vulnerabilidad del área (AV)*

La vulnerabilidad del área es definida de forma similar a la planteada para el modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones, mediante la combinación de los tres factores que atienden a las características del área, medidas de alerta y posibilidad de evacuación por la velocidad de avance de la inundación, Ec. (2.7).

En el establecimiento de las distintas zonas de acuerdo con la naturaleza más o menos vulnerable del área son contemplados criterios como las condiciones de higiene, la

provisión de agua potable o condiciones de drenaje de acuerdo con las características de las viviendas.

### III. Índice de peligro (HR)

El índice de peligro se define en función de la altura de inundación hasta una profundidad máxima de 1.5 m. Para una altura de agua superior se acepta una probabilidad alta de pérdida de vidas y, por tanto, no se considera oportuna la aplicación de este modelo. Además esta altura es la que alcanzan en promedio los niños (población considerada vulnerable).

Los valores del índice de peligro propuestos en función de la altura de inundación quedan definidos en la Tabla 2.4.

h (m)	HR
0.0 < h < 0.3	5
0.3 < h < 0.5	6
0.5 < h < 1.0	8
1.0 < h < 1.5	10

**Tabla 2.4. Valores del índice de peligro (HR) en función de la altura de inundación (h).**

### IV. Variable Z (% personas en riesgo)

Esta variable evalúa de forma conjunta el peligro dado por las características del flujo de inundación y la vulnerabilidad del área, mediante la Ec. (2.12).

$$Z(\%) = HR \cdot AV \quad (2.12)$$

donde: Z, estima el porcentaje de personas en riesgo (%); HR, es el índice de peligro; AV, es el parámetro de vulnerabilidad del área.

### V. Personas en riesgo (PAR)

El número de personas en riesgo se define de acuerdo al porcentaje en cada celda de análisis y el número de residentes como Ec. (2.13).

$$PAR(N^\circ) = Z(\%) \cdot N^\circ \text{residentes} \quad (2.13)$$

donde: PAR, es el parámetro de estimación del número de personas en riesgo (N°); Z, es el porcentaje de personas en riesgo (%); N°residentes, es el número de personas en cada celda de análisis.

### VI. Afectados por problemas de salud

Así, el número de personas afectadas por problemas de salud es estimado como una proporción de la población vulnerable en el área de influencia del agua contaminada, Ec. (2.14).

$$N(N^\circ) = PAR \cdot PV \quad (2.14)$$

donde: N, es el parámetro que estima el número de afectados (N°); PAR, es el número de personas en riesgo (N°); PV, es el índice que cuantifica la presencia de población vulnerable (%).

La evaluación de esta tipología de daños facilita la identificación de posibles impactos indirectos en la salud, como enfermedades transmisibles por vectores (p.e. malaria, dengue o fiebre amarilla) o infecciones. Las áreas que pueden resultar más afectadas son aquellas que carecen de agua y alimentos limpios o viviendas inadecuadas con mayor exposición, como zonas marginales; o las próximas a basureros, por los residuos que son arrastrados.

#### **2.4. Pérdidas medioambientales**

Los daños debidos a los peligros de erosión e inundación sobre el ecosistema localizado en zonas costeras se evalúan en términos de pérdidas por la posible afección o cambio de los servicios ambientales que los mismos proporcionan en cada sitio en particular. La metodología que se plantea se basa en los fundamentos generales del modelo propuesto por Dassayanake et al., 2015; e incorpora la definición de nuevos factores de amenaza y otros relacionados con la resiliencia de los ecosistemas.

Se analiza en detalle la aplicación de la metodología al ecosistema de manglar; examinando la tipología de especies que lo componen, su distribución en el mundo en función de varios factores y escalas espaciales, y la diferente capacidad de adaptación de las mismas a las fluctuaciones de los factores de amenaza.

La Fig. 2.6 muestra el esquema general de la metodología, que se compone de dos pasos principales:

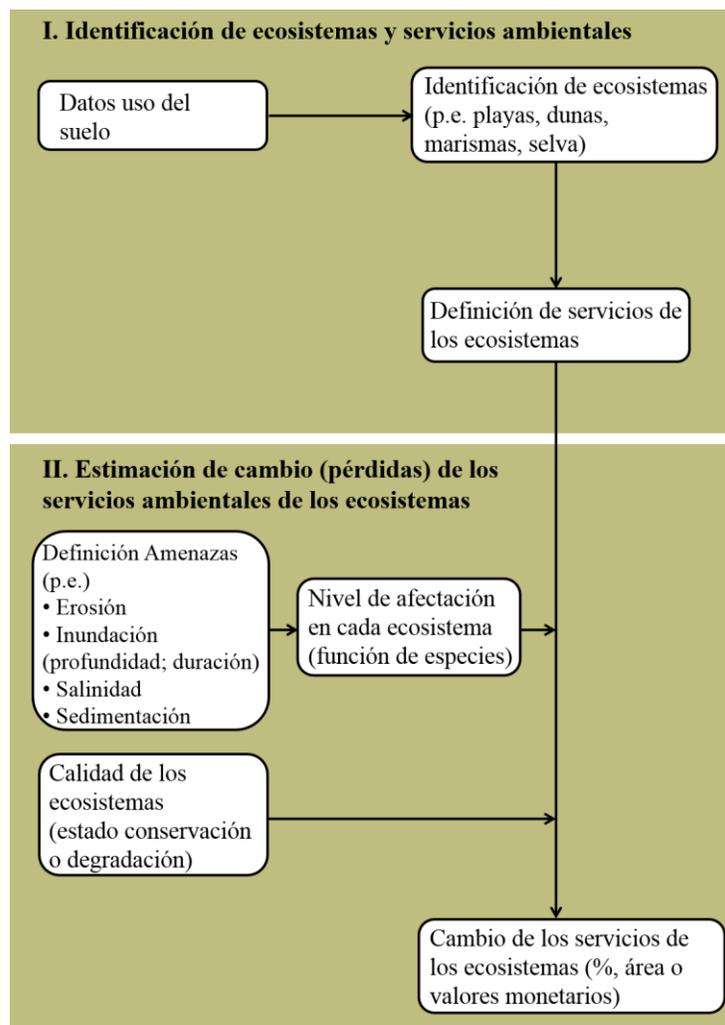


Figura 2.6. Diagrama de evaluación de pérdidas medioambientales.

1. Identificación de los ecosistemas presentes en el área de estudio, y definición de sus servicios ambientales.

De acuerdo con la clasificación de servicios ambientales de MEA, 2005 se consideran los siguientes servicios ambientales:

(a) Servicios de aprovisionamiento (productos que son obtenidos de los ecosistemas): comida, agua, productos farmacéuticos, entre otros.

(b) Servicios de regulación (beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema): mantenimiento de la calidad del aire, regulación del clima, regulación del agua, control de erosión, protección frente a tormentas, etc.

(c) Servicios culturales (beneficios no-materiales obtenidos de los ecosistemas): espiritual y religioso, valor educacional, valor estético, recreacional y ecoturismo.

2. Estimación del porcentaje de cambio de los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas, para cada escenario de simulación, mediante la Ec. (2.15). Esta expresión considera que los servicios ambientales varían directamente con los parámetros de impacto o amenazas; y de forma inversa con la calidad del ecosistema antes de ser amenazado, en términos de estado de conservación o severidad del daño si se encuentra degradado, debido a la relación de ésta con la capacidad de respuesta o de adaptación de un ecosistema al estrés de amenaza (Selvam & Karunagaran, 2004).

$$\Delta ES_{total} = f(Tasa_{extinción}) \rightarrow Tasa_{extinción} = \frac{\sum_j a_j \cdot Amenaza_j}{IC} \quad (2.15)$$

donde:  $\Delta ES_{total}$ , es el cambio total de los servicios ambientales (de 0 a 100 %; ó probabilidad de daño en rango de 0 a 1);  $Tasa_{extinción}$ , hace referencia al grado de daño estimado por las amenazas sobre el ecosistema;  $Amenaza_j$ , es cada uno de los factores de impacto sobre el ecosistema;  $IC$ , es el índice de calidad del ecosistema;  $a_j$ , son los pesos que introducen la influencia relativa de cada factor de amenaza en el cambio de los servicios ambientales del ecosistema.

Como fue propuesto por Dassayanake et al., 2010, el cambio de los servicios ambientales estimado en porcentaje se puede convertir en unidades de área equivalente al considerar el tamaño de celda de análisis; o en unidades monetarias, a partir de la aplicación de métodos de valoración monetaria de los bienes y servicios medioambientales.

Finalmente, el riesgo sobre cada ecosistema viene expresado como el producto de las pérdidas y la probabilidad de ocurrencia del escenario en particular.

A continuación se describe la aplicación de la metodología en el ecosistema de manglar;

#### **2.4.1. Evaluación de pérdidas sobre el ecosistema de manglar**

La aplicación de la metodología se analiza sobre la superficie de manglar que puede encontrarse en todo el mundo. Por ello, se identifican las distintas especies, factores que determinan su distribución a nivel mundial, los parámetros de impacto por peligros de erosión e inundación, y la susceptibilidad entre las distintas especies de ser afectadas por estos factores.

Se trata de un ecosistema característico de las zonas tropicales con condiciones favorables de desarrollo en las costas con abundante precipitación (Feller & Sitnik, 1996). Otros parámetros que intervienen en la distribución de superficie de manglar son el pH, sedimentación, fluctuación de marea, tamaño de cuenca, longitud de estuario, salinidad o nivel de energía combinada de sedimentos y olas (Joshi & Ghose, 2003; Selvam & Karunagaran, 2004; Gattenlöhner et al., 2007).

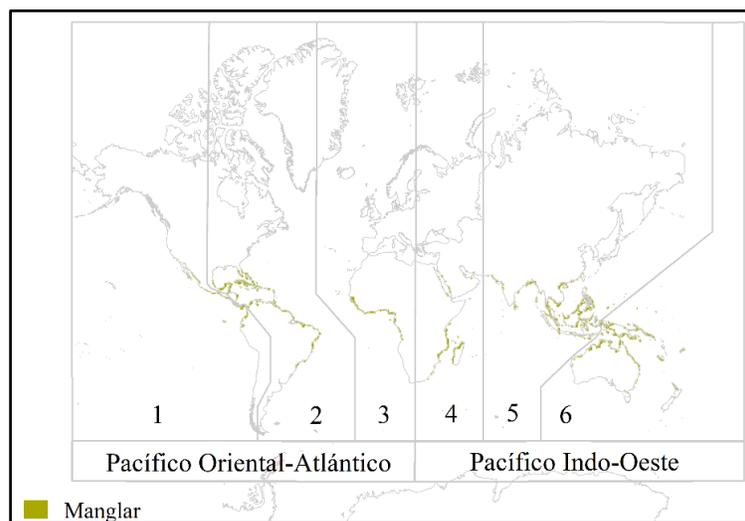
De acuerdo con Duke et al., 1998, se puede considerar que los factores de distribución de manglar actúan en todo el mundo en cuatro escalas geográficas generales: global, regional, estuarina e intermareal. La importancia relativa de estos factores en cada marco geográfico, de acuerdo con los diferentes gradientes medioambientales, determina la riqueza y distribución de especies; y, con ello, las funciones y beneficios de los manglares en cada ámbito.

Duke et al., 1998 distinguen un total de 70 especies de manglar, agrupadas en 28 géneros. Su distribución en el mundo permite establecer 2 hemisferios globales en cuanto a diversidad de especies (Fig. 2.7): la región del Pacífico Oriental-Atlántico (AEP- ‘the Atlantic East Pacific’), con 15 especies; y la región del Pacífico Indo-Oeste (IWP- ‘the Indo-West Pacific’), con 59 especies (Tabla I.1, en Anexo I). A nivel regional se identifican 6 regiones biogeográficas (Tabla 2.5), con un número de 13, 11, 8, 11, 51 y 47 especies en cada región (de oeste a este, respectivamente).

Regiones biogeográficas	
1	América Occidental y Pacífico Oriental
2	América Oriental y El Caribe
3	África Occidental
4	África Oriental y Madagascar
5	Indo-Malasia y Asia
6	Oceanía y Pacífico Occidental

**Tabla 2.5. Regiones biogeográficas definidas de acuerdo con la distribución de manglar en el mundo (Duke et al., 1998).**

La Fig. 2.7 muestra la distribución de manglares en el mundo, publicada en el Atlas Mundial de Manglares (2010) (Spalding et al., 2010).



**Figura 2.7. Distribución global de manglares en el mundo, y su delimitación en 6 regiones biogeográficas (Spalding et al., 2010).**

A escala estuarina, en los estuarios dominados por agua dulce, Duke et al., 1998 establecen 3 zonas principales de distribución de especies (aguas abajo, intermedia y aguas arriba); cada una ocupando aproximadamente un tercio desde la boca del estuario hasta el límite tierra adentro del manglar. Estas zonas se caracterizan por un determinado rango de salinidad, tolerado por las especies que la ocupan de acuerdo con su resistencia fisiológica a la salinidad; y que varía para cada sistema estuarino de acuerdo con parámetros como fluctuación de marea, área de la cuenca o estación (seca o lluvias).

Por otro lado, Selvam & Karunagaran, 2004 dividen los estuarios (también los dominados por abundante agua dulce) en 5 zonas generales, en función del rango de salinidad: Euhalina, Polyhalina, Mesohalina, Oligohalina y Limnética. Considera que la mayoría de las especies de manglar están ausentes en las condiciones más extremas (Euhalina, con salinidad superior a 30 ‰; y Limnética, con salinidad inferior a 0.5 ‰), mientras que las otras tres zonas son ocupadas por un grupo de especies de manglar dominante.

Por último, a escala de perfil intermareal se clasifican las especies en baja, media o alta intermareal (Duke et al., 1998).

En el Anexo I se incluye la clasificación de especies realizada por Duke et al., 1998, en las escalas definidas anteriormente (Tablas I.2 y I.3). En estas tablas además se especifican dos características estructurales de cada especie de manglar: la forma biológica (árbol, arbusto, palma o helecho) y la tipología de raíz aérea desarrollada por algunas especies (raíces zancudas, neumatóforos, raíces tabulares o tablares, y raíces con forma de rodilla).

Siguiendo la metodología propuesta anteriormente, y una vez identificado el ecosistema de manglar, se definen los servicios ambientales que se van a analizar. De la clasificación presentada anteriormente, algunos servicios ambientales únicamente se contemplan en la evaluación cuando se produce la pérdida total del ecosistema por erosión o cuando el área sobrevive ante los impactos (no se producen daños severos); éstos son:

- Servicios de aprovisionamiento (productos que son obtenidos de los ecosistemas): comida, agua, productos farmacéuticos, etc.
- Servicios de regulación: mantenimiento de la calidad del aire, regulación del clima, regulación del agua.
- Servicios culturales: espiritual y religioso, valor educacional.

En cambio, otros servicios ambientales se analizan en función del nivel de destrucción estimado por los peligros de inundación, como:

- Servicios de regulación: control de erosión, protección frente a tormentas.
- Servicios culturales: valor estético, recreacional y ecoturismo.

En cuanto a la identificación de las amenazas, se definen 5 factores principales de impacto sobre la superficie de manglar por la incidencia de tormentas e inundaciones: cambios en salinidad, energía de grandes olas, periodo y profundidad de inundación, y enterramiento de raíces por acumulación de sedimentos (Bunt, 1996; Joshi & Ghose, 2003; Selvam & Karunakaran, 2004; Gilman et al., 2006; McLeod & Salm, 2006; Gattenlöhner et al., 2007; Krauss et al., 2014). Cada especie de manglar tiene una cierta tolerancia a la variación de estos factores de impacto (Joshi & Ghose, 2003; McLeod & Salm, 2006; Selvam & Karunakaran, 2004), la cual permite categorizarlas de acuerdo con su mayor o menor capacidad de responder a cambios en estos parámetros manteniendo sus funciones (resiliencia). Algunos autores confirman que la resiliencia ecológica es mayor en los sistemas multi-especies de manglares (Blasco et al., 1996, en McLeod & Salm, 2006).

De acuerdo con los factores de impacto por flujo de inundación, la expresión propuesta anteriormente para estimar el cambio de los servicios ambientales de los ecosistemas queda particularizada para el ecosistema de manglar mediante la Ec. (2.16).

$$\begin{aligned} \Delta ES_{total} = f(Tasa_{extinción}) \rightarrow Tasa_{extinción} &= \frac{\sum_j a_j \cdot Amenaza_j}{IC} \rightarrow \\ \rightarrow Tasa_{extinción} &= \frac{a \cdot \Delta ES_{salinidad} + b \cdot \Delta ES_{h,u} + c \cdot \Delta ES_{dur} + d \cdot \Delta ES_{sed/eros}}{IC} \end{aligned} \quad (2.16)$$

donde:

$\Delta ES_{total}$ , es el cambio total de los servicios ambientales.

$Tasa_{extinción}$ , hace referencia al grado de daño estimado por las amenazas sobre el ecosistema.

$\Delta ES_{salinidad}$ , hace referencia al cambio que sufre el ecosistema por variaciones en la concentración de salinidad.

$\Delta ES_{h,u}$ , es el cambio debido al impacto de la profundidad de inundación y velocidad del flujo.

$\Delta ES_{dur}$ , es el factor de influencia de la duración de la inundación.

$\Delta ES_{sed/eros}$ , hace referencia a la afectación del manglar por acumulación de sedimentos arrastrados por la inundación en las raíces; o por erosión del terreno que ocupa el manglar debido al flujo de inundación.

IC, es el índice de calidad del ecosistema de manglar antes de ser amenazado, en términos de estado de conservación o severidad del daño si se encuentra degradado.

a, b, c, d son pesos que incorporan la importancia relativa de cada factor en el cambio total de los servicios del ecosistema.

Una vez identificados los factores de impacto y conocida la calidad del ecosistema, se determina el nivel de afectación de cada amenaza sobre la superficie de manglar, el cual es dependiente de la tipología de especies. Una vez estimado el grado de daño (o tasa de extinción) se determina la influencia de éste sobre los diferentes servicios ambientales contemplados en la evaluación.

### *Salinidad*

Las especies de manglar se caracterizan por tener un rango óptimo de salinidad para su crecimiento y supervivencia (donde logran el nivel más alto de competencia y adaptación frente a otras especies), y un rango extremo de salinidad que son capaces de tolerar (Feller & Sitnik, 1996); Joshi & Ghose, 2003). De acuerdo con esta tolerancia, Feller & Sitnik, 1996 distingue dos grupos de manglar: un grupo con tolerancia muy amplia (2 o 3 veces la salinidad del agua de mar); el segundo grupo limitado a salinidad inferior a 40 ‰. Ninguna especie de manglar puede soportar una salinidad del suelo superior a 90 ‰ (Selvam & Karunagaran, 2004).

Algunos mecanismos que desarrollan los manglares que soportan altas condiciones de salinidad son: exclusión de la sal mediante las raíces, eliminación del exceso de sal por secreción y tolerancia a altas concentraciones de sal a través de los tejidos de la planta (Moreno-Casasola & Infante, 2009). Moreno-Casasola & Infante, 2009 compara la tolerancia de cuatro tipologías de manglar a la salinidad: mangle rojo (*Rhizophora mangle*), negro (*Avicennia germinans*), blanco (*Laguncularia racemosa*) y botoncillo (*Conocarpus erectus*). De todos ellos, el mangle negro es el más resistente a altas condiciones de salinidad debido a los neumatóforos que puede desarrollar, que le permiten tener partes de las raíces en contacto con el aire y respirar; el mangle blanco, aunque también tiene neumatóforos, es menos tolerante que el negro a la salinidad; el mangle rojo puede evitar que penetre la sal en su interior, por exclusión en sus raíces, pero su máximo desarrollo se da en un rango inferior al 9% de salinidad; y el mangle botoncillo es el que menos adaptaciones tiene para soportar la salinidad.

Whittaker (1967) (en Joshi & Ghose, 2003) y Ukpong, 1991 distinguen 6 grupos de especies en función de la salinidad:

- (1) Especies que dominan y ocurren casi exclusivamente bajo las condiciones más cercanas que limitan el factor de salinidad.
- (2) Especies de ocurrencia similar pero con amplitud más extensa que las del grupo 1.
- (3) Especies que son especialmente frecuentes cerca del valor medio del gradiente de salinidad.
- (4) Especies que dominan en el gradiente donde la salinidad es abundante.
- (5) Especies que ocurren casi exclusivamente en los valores más altos de salinidad.

(0) Especies que son indiferentes a la salinidad y tienen una amplitud muy extensa.

En la Tabla 2.6 se incluyen algunas especies de manglar agrupadas en estas 6 categorías, junto a las características estructurales que Duke et al., 1998 definen para estas especies. Se observa la capacidad de desarrollar raíces aéreas de determinadas especies tolerantes a altas concentraciones de salinidad; pero también la presencia de otras en la misma categoría que no disponen de esta característica. Sería necesario analizar el tipo de adaptación a la salinidad de estas últimas, lo cual queda fuera del alcance de la investigación.

Género	Especies	Forma	Raíces sobre el suelo	Grupo	Pérdida funcionalidad salinidad $\geq 30$ ‰ (rango de 0 a 1)
Acanthus	<i>ilicifolius</i>	S	-	0	0
Acrostichum	<i>aureum</i>	F	-	0	0
Avicennia	<i>germinans</i>	T	P	0	0
Avicennia	<i>marina</i>	S/T	P	4	0
Avicennia	<i>officinalis</i>	T	P	4	0
Laguncularia	<i>racemosa</i>	S/T	k	4	0
Nypa	<i>fruticans</i>	P	-	4	0
Rhizophora	<i>x harrisonii</i>	T	R	4	0
Aegialitis	<i>rotundifolia</i>	S	-	3	1
Rhizophora	<i>mangle</i>	S/T	R	3	0.5
Rhizophora	<i>racemosa</i>	T	R	2	0.72
Aegiceras	<i>corniculatum</i>	S	-	1	1
Ceriops	<i>decandra</i>	S/T	B	1	1
Excoecaria	<i>agallocha</i>	T	K	1	1

Forma: T=árbol; S=arbusto; P=palma; F=helecho  
 Raíces: R=raíces zancudas; P=neumatóforos; B=raíces tabulares o tablares;  
 K=raíces en forma de rodilla

**Tabla 2.6. Clasificación de algunas especies de manglar en 6 grupos en función de su tolerancia a la salinidad (modificado de Joshi & Ghose, 2003; Ukpong, 1991).**

Ukpong, 1991 y Joshi & Ghose, 2003 analizan la evolución de la cobertura de especies de manglar sujetas a diferentes gradientes de salinidad del suelo; a partir de la cual se obtiene la pérdida (en relación a la máxima extensión asociada a la salinidad óptima de cada especie) cuando la salinidad es superior a 30-35 ‰ (salinidad promedio de los océanos). La disminución en la distribución de especies se traduce en pérdida de funcionalidad del ecosistema por muerte de algunas especies. En la Tabla 2.7 se incluyen estos valores, y se observa claramente cómo las especies que tienen una amplitud ecológica

extensa (grupo 0) y las que dominan donde el gradiente de salinidad es abundante (grupo 4) no son afectadas; lo contrario ocurre para las especies del grupo 1 (dominan y ocurren casi exclusivamente bajo las condiciones más cercanas que limitan el factor de salinidad). Una situación intermedia se obtiene para las clases 2 y 3, donde la fluctuación de las pérdidas varía de 0.72 a 1, con una mejor adaptación de las especies que desarrollan raíces aéreas (raíces zancudas, en este caso).

Con todo lo expuesto anteriormente, en la Tabla 2.7 se definen los criterios para evaluar el grado de daño debido al factor de impacto de salinidad, en función del grupo ecológico al que pertenecen las especies. Es importante destacar la favorable adaptación a los cambios de salinidad de las especies que disponen de raíces aéreas, tipología raíces zancudas y neumatóforos.

Grupo	Mecanismos para soportar alta salinidad	Pérdida funcionalidad salinidad $\geq 30$ ‰ (rango de 0 a 1)
0	-	0
5	-	0
4	-	0
3	Sin adaptación	1
	Con adaptación	0.5
2	Sin adaptación	1
	Con adaptación	0.72
1	-	1

**Tabla 2.7. Criterios para evaluar el grado de daño sobre el ecosistema de manglar por factor de impacto de salinidad.**

#### *Profundidad de inundación y velocidad del flujo*

La profundidad de inundación puede disminuir la productividad, fotosíntesis, y supervivencia (Ellison, 2000, en Lee et al., 2014). Generalmente reduce las tasas de acumulación en la raíz debido a las condiciones de bajo oxígeno (McKee et al., 2007, en Krauss et al., 2014); y puede fomentar el desarrollo de estructuras de raíces aéreas (Turner et al., 1995), especialmente donde hay escasez de sedimento (McKee et al., 2007; Gilman et al., 2008; McKee, 2011, en Krauss et al., 2014).

El efecto del impacto del flujo de inundación (profundidad de inundación y velocidad de corriente del flujo) contra la superficie de manglar se define con base en los resultados de Yanagisawa et al., 2009, mediante el análisis del máximo momento de flexión de los árboles de manglar debido al choque del flujo. Yanagisawa et al., 2009 realizaron observaciones en un bosque de manglar después del paso de un tsunami en Tailandia, y

encontraron que el patrón de destrucción del manglar varía significativamente con el género, diámetro del tallo y magnitud del flujo de inundación del fenómeno.

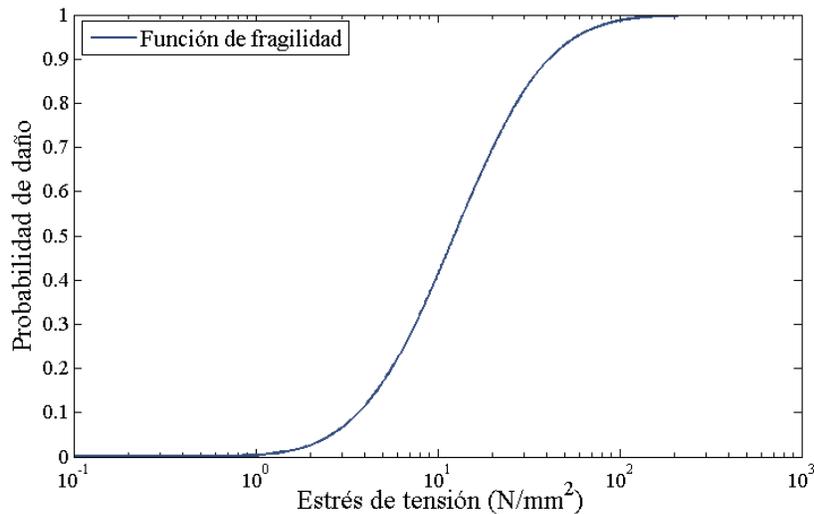
De las especies de manglar analizadas, *Rhizophora*, *Bruguiera* y *Avicennia*: las asociadas con el género *Rhizophora* (con raíces zancudas gruesas) son afectadas principalmente en el tallo, en el límite superior de las raíces, y raramente son arrancadas antes de quedar gravemente afectadas por el tsunami; los manglares del género *Bruguiera* (raíces tabulares- en forma de rodilla) son más fácilmente arrancados por el tsunami; y el género *Avicennia* (que desarrolla neumatóforos) muestra una tasa mayor de destrucción que el género *Rhizophora* (Yanagisawa et al., 2009).

El género *Rhizophora* presenta una relación creciente de la tasa de supervivencia con el diámetro del tallo; mientras que no se puede establecer una relación clara para las especies del género *Bruguiera*, pues para el mismo tamaño de tallo se presenta tanto supervivencia como destrucción de árboles de manglar. En general, se establece que la tipología de género *Bruguiera* es más sensible que el manglar de especies *Rhizophora* (Yanagisawa et al., 2009).

Yanagisawa et al., 2009 define la resistencia de un árbol de manglar (género *Rhizophora*) en función de la tensión de flexión causada por el momento de flexión máximo, de acuerdo con la Ec. (2.17). A partir de esta relación propone una función de fragilidad, aproximada por una función de distribución log-normal, que permite estimar la probabilidad de daño cuando el estrés de tensión varía de 0.1 a 1000 Nmm<sup>-2</sup> y el diámetro del tallo es inferior a 0.8 m (Fig. 2.8).

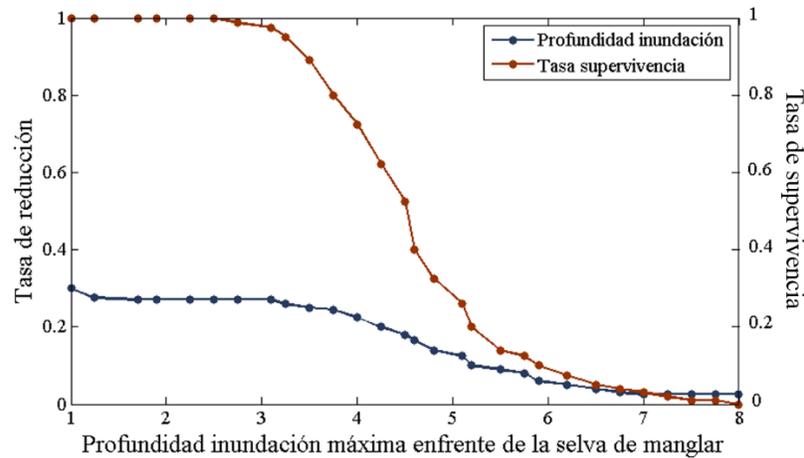
$$\sigma_t = C \cdot \frac{(h - H_R)^2}{d_T^2} u^2 \quad (2.17)$$

donde:  $\sigma_t$ , es la tensión de flexión (Nm<sup>-2</sup>); C, es una constante [= (8C<sub>D</sub>ρ)/π ≈ 2.55x10<sup>3</sup>, con C<sub>D</sub> (coeficiente de arrastre); ρ (densidad del agua)]; h, es la profundidad de inundación (m); H<sub>R</sub>, es la altura de las raíces (m); u, es la velocidad de corriente del flujo (m/s); d<sub>T</sub>, es el diámetro del tallo (m).



**Figura 2.8. Función de fragilidad vs la tensión de flexión por incidencia del tsunami (modificado de Yanagisawa et al., 2009).**

Yanagisawa et al., 2009, analiza también la relación entre la profundidad de inundación del tsunami de la ola incidente (en la línea de costa); la tasa de supervivencia total de la selva de manglar de especies *Rhizophora*; y la tasa de reducción de la profundidad de inundación del tsunami por la selva de manglar (asumiendo diámetro del tallo de 15 cm, extensión de manglar de 400 m de ancho, y densidad de 0.2 árboles  $\text{m}^{-2}$  (Fig. 2.9).



**Figura 2.9. Relación entre profundidad de inundación de tsunami; tasa de supervivencia (inverso de probabilidad de daño) de la selva de manglar; y tasa de reducción de la profundidad de inundación del tsunami por la selva de manglar (servicio ambiental de protección costera) (modificado de Yanagisawa et al., 2009).**

Otros autores que confirman que las especies de género *Rhizophora* son más resistentes al flujo de inundación (en cuanto a nivel de profundidad y periodo que pueden permanecer inundados) son Moreno-Casasola & Infante, 2009, por el tamaño de los zancos de las raíces. Los neumatóforos no son tan altos como las raíces zancudas y, por ello, soportan niveles más bajos de inundación. La especie de mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*)

tiene peor adaptación a la inundación que el resto; y no dispone de la capacidad de desarrollar raíces aéreas (Moreno-Casasola & Infante, 2009).

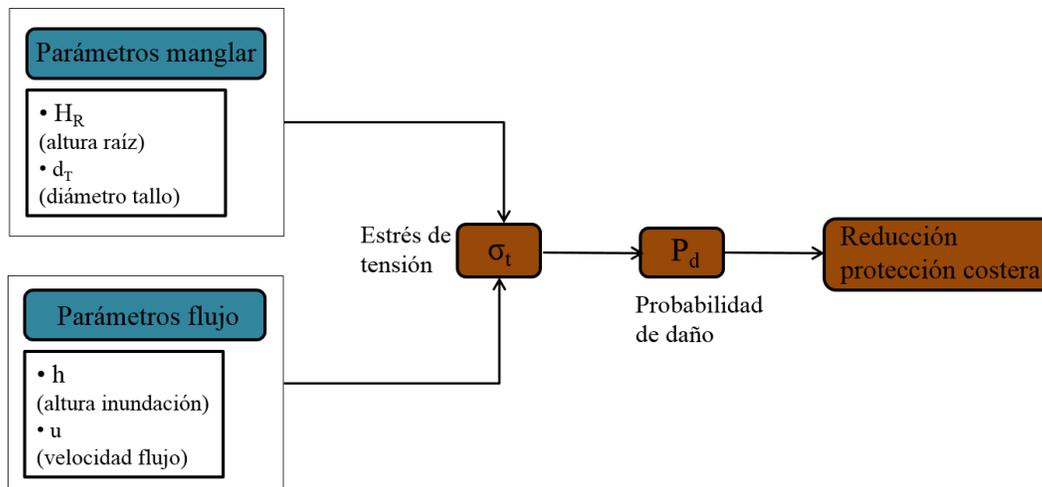
McKee, 1996 ordena las especies de manglar *R. mangle* (raíces zancudas), *A. germinans* (neumatóforos) y *L. racemosa* (raíces con forma de rodilla) de mayor a menor resistencia a tensión como: *R. mangle*, *A. germinans*, *L. racemosa*.

Ye et al., 2003, encuentra que la especie *Kandelia Candel* (raíces tabulares) está menos adaptada a la profundidad que al periodo de inundación; mientras que en *Bruguiera gymnorrhiza* (raíces tabulares-raíces en forma de rodilla) ocurre lo contrario. Por tanto, se extrae que las raíces en forma de rodilla aportan mayor resistencia a tensión de inundación que el tipo de raíz tabular.

Así, con base en lo expuesto anteriormente, se propone la evaluación del daño por la profundidad y velocidad de inundación en función de la respuesta de las distintas especies a la tensión de flexión por inundación. Ésta se define de acuerdo con su capacidad de desarrollar o no raíces aéreas y, en su caso, de la tipología de éstas; de mayor a menor resistencia como raíces zancudas > neumatóforos > raíces con forma de rodilla > raíces tabulares > sin capacidad de desarrollar raíces aéreas.

En forma de diagrama, en la Fig. 2.10 se presenta el modelo propuesto para estimar la probabilidad de daño de los árboles de manglar debido a esta amenaza, y la consecuencia de este daño en la afectación del servicio ambiental de protección costera.

Aunque la metodología está particularizada al género *Rhizophora*, se plantea la extensión de su aplicación al resto de especies de manglar por la posibilidad de incorporar la resistencia relativa entre especies mencionada anteriormente mediante el término  $H_R$ .



**Figura 2.10. Método para evaluar la probabilidad de daño e impacto en el servicio ambiental de protección costera de los árboles de manglar, debido a las características del flujo de inundación.**

El concepto presentado en el diagrama anterior (Fig. 2.10) se utiliza para integrar la influencia del resto de amenazas y estado de conservación del ecosistema en la afectación

de los servicios ambientales. Esto es, la tasa de extinción (o probabilidad de daño) evaluada mediante la consideración de todas las amenazas, estado de conservación del ecosistema y propuesta de asignación de valores descrita anteriormente, es traducida en una tasa de afectación del servicio ambiental de análisis en particular (p.e. mediante la función presentada en la Fig. 2.9 para el servicio ambiental de protección costera).

#### *Periodo de inundación*

De acuerdo con Moreno-Casasola & Infante, 2009, los zancos que pueden desarrollar en sus raíces algunas especies de manglar (p.e. mangle rojo) le permiten respirar a través de sus poros y así tolerar niveles de inundación durante largos periodos, de hasta todo el año; en cambio, los neumatóforos (p.e. mangle blanco) adaptados por otras especies admiten un periodo más corto de tolerancia a la inundación. El mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), que no desarrolla raíces aéreas, todavía ofrece una menor resistencia.

Por otro lado, Lu et al., 2013 observan, de experimentos, que la especie *Avicennia marina* (desarrolla neumatóforos) se encuentra más limitada en su supervivencia por la profundidad de inundación que por la duración; al igual que *Kandelia candel* (desarrolla raíces tabulares), ésta según el estudio de Ye et al., 2003. Sin embargo, *Bruguiera gymnorrhiza* (desarrolla raíces tabulares-en forma de rodilla) está más limitada por el periodo de inundación que por el nivel de inundación (Ye et al., 2003).

De lo presentado anteriormente, se comprueba la resistencia que ofrecen las adaptaciones de raíces de algunas especies para soportar condiciones de baja cantidad de oxígeno, y así tolerar e incluso evitar el estrés.

Por tanto, se propone la utilización de esta característica del manglar para evaluar el posible impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema, que afectaría así a sus servicios ambientales. En la Tabla 2.8 se presenta la valoración adoptada.

Adaptación	Categoría	Valoración (rango de 0 a 1)
Raíz Aérea	Raíces zancudas	0
	Neumatóforos	0.2
	Raíces tabulares	0.6
	Raíces en forma de rodilla	0.8
	Sin esta adaptación	1

**Tabla 2.8. Evaluación del impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema de manglar, de acuerdo al tipo de adaptación de las raíces.**

#### *Acumulación de sedimentos/erosión*

El exceso de sedimento puede producir el enterramiento de la estructura raíz del manglar, interrumpiendo el intercambio de gas, matando el tejido de las raíces y los árboles

(Ellison, 1999; Selvam & Karunagaran, 2004; Krauss et al., 2014). Sin embargo, todavía no hay suficientes datos para establecer tolerancias específicas (Ellison, 1999).

Las raíces aéreas que desarrollan algunas especies ayudan a hacer frente a sedimento excesivo y aumentan la capacidad de anclaje en caso de erosión (Saenger, 2002). Por ello, se consideran las especies que disponen de esta capacidad de adaptación más resilientes frente al peligro de sedimentación y de erosión. En la Tabla 2.9 se especifican los valores asignados a cada criterio para evaluar el impacto.

Parámetros	Categoría	Puntuación (rango de 0 a 1)
Raíz Aérea	Sí	0
	No	1

**Tabla 2.9. Método para evaluar el impacto de la acumulación de sedimento/erosión en el ecosistema de manglar.**

#### *Índice de calidad del ecosistema*

Como se menciona en apartados anteriores, mediante este índice se trata de incorporar la influencia del estado del ecosistema antes de ser amenazado por su relación con la capacidad de respuesta al estrés de amenaza. Se propone la valoración de acuerdo con tres estados del ecosistema por su condición biológica: sano, parcialmente degradado y degradado (Tabla 2.10); de forma que el escenario más desfavorable (daño=100 % o probabilidad de daño=1) se produzca si el ecosistema está degradado.

Un ecosistema se considera que está degradado si la modificación de su estructura y funcionamiento originales por una perturbación limitan su capacidad de autoregeneración (<http://www.inecc.gob.mx/>).

Estado del ecosistema	Puntuación
Sano	1.4
Parcialmente degradado	1.2
Degradado	1

**Tabla 2.10. Valoración del parámetro índice de calidad (IC) del ecosistema, por su estado antes de ser amenazado.**

#### *Importancia relativa de los factores de impacto en el cambio total de los servicios del ecosistema*

La influencia relativa de cada amenaza en el cambio total de los servicios ambientales viene considerada, en la Ec. (2.18), mediante los pesos a, b, c y d; los cuales varían con la tipología de especies de manglar. En la Tabla 2.11 se muestran los factores (profundidad vs

periodo de inundación) que limitan a las especies de acuerdo al tipo de raíz aérea desarrollada; extraído de las conclusiones anteriores del análisis de varias especies.

Tipo de raíz	Profundidad inundación	Periodo inundación
Zancudas	-	-
Neumatóforos	X	
Tabulares	X	
En forma de rodilla		X

**Tabla 2.11. Factor limitante profundidad vs periodo inundación, en función del tipo de raíz.**

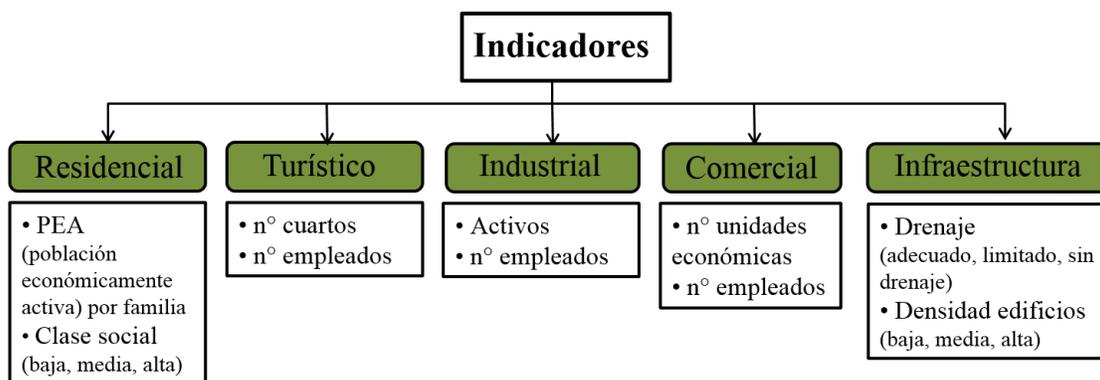
Se propone la valoración de pesos definida en la Tabla 2.12 en función del análisis realizado previamente, a falta de otros datos que permitan conocer con mayor precisión la importancia relativa de los distintos parámetros de amenaza considerados en el grado de daño total sobre el ecosistema. En la tipología de especies con raíz en forma de rodilla los pesos se ponderan con el mismo valor (aunque el periodo parece ser más limitante que la profundidad de inundación) debido a que el factor de impacto que considera la profundidad de inundación incorpora de forma conjunta la velocidad del flujo.

Tipo de raíz	a (salinidad)	b (h,u)	c (dur)	d (sed/eros)
Zancudas	0.25	0.25	0.25	0.25
Neumatóforos	0.25	0.30	0.20	0.25
Tabulares	0.25	0.30	0.20	0.25
En forma de rodilla	0.25	0.25	0.25	0.25
Sin raíz aérea	0.25	0.25	0.25	0.25

**Tabla 2.12. Valores asignados a los pesos, en función del tipo de raíz de las especies de manglar.**

## 2.5. Dificultad de recuperación después de la inundación

Se han analizado los factores que pueden estar relacionados con la resiliencia de los receptores del peligro, definida como la capacidad de éstos para responder y hacer frente a las pérdidas o daños provocados por una inundación, recuperando así sus funciones. En la Fig. 2.11 se incluyen los parámetros seleccionados en los sectores: residencial, turístico, industrial, comercial y de infraestructura.



**Figura 2.11. Parámetros de resiliencia seleccionados frente a una inundación; en los sectores residencial, turístico, industrial, comercial e infraestructura.**

## 2.6. Análisis de sensibilidad de los modelos de evaluación de pérdidas intangibles directas propuestos

Mediante el análisis de sensibilidad se determina el cambio del valor de los indicadores ante la variación de las distintas variables independientes que componen el modelo. El método seleccionado es el *análisis de escenarios*, por la posibilidad que ofrece de poder analizar la variación de todas las variables al mismo tiempo. Se definen 3 escenarios: optimista, medio y pesimista.

A continuación se muestran los resultados del análisis para cada uno de los modelos de evaluación propuestos.

### 2.6.1. Análisis escenarios-modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones

La Tabla 2.13 muestra los valores asignados (por celda de 50 m) a las distintas variables que conforman el modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones en los tres escenarios seleccionados. Los valores se definen de acuerdo con las características de inundación ( $h$ , altura de inundación;  $v$ , velocidad del flujo) y de la población identificados en Ciudad del Carmen.

Los resultados de la aplicación del modelo vienen recogidos en la Tabla 2.14, y su representación gráfica en la Fig. 2.12. Destaca el aumento del porcentaje de afectados estimado (99 %) con la introducción en el modelo de características tan desfavorables del flujo de inundación en el escenario pesimista ( $h=4$ ;  $v=1.5$  m/s) y la consideración de no posibilidad de evacuar el área, refugio o rescate.

Escenarios	PV1 (%)	PV2 (%)	NA	FW	SO	h (m)	v (m/s)	DF	n° residentes
Optimista	10	10	1	1	1	0.5	0.5	0	11
Medio	25	25	2	2	2	1.5	1	1	50
Pesimista	50	50	3	3	3	4	1.5	2	437

**Tabla 2.13. Valores asignados a las variables del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones, en el análisis de escenarios.**

Escenarios	I. PV (%)	II. AV	III. HR	IV. Variable X (% personas en riesgo)	V. Personas en riesgo (N°)	VI. Lesionados + Muertes (N°)
Optimista	20	3	0.13	0.4	0	0
Medio	50	6	2.5	15	8	4
Pesimista	100	9	11	99	433	433

**Tabla 2.14. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones: escenario optimista, medio y pesimista.**

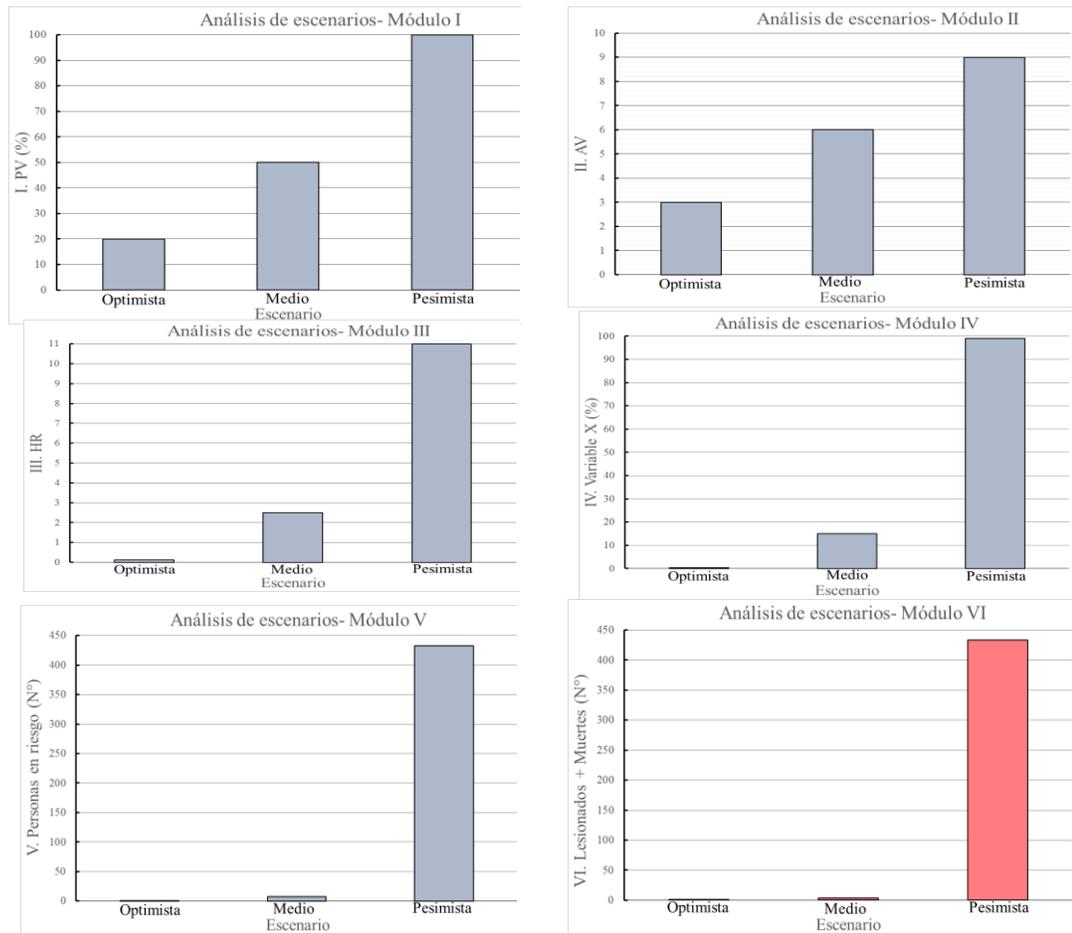


Figura 2.12. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones: escenario optimista, medio y pesimista.

### 2.6.2. Análisis escenarios-modelo de pérdidas sociales directas (enfermedades e infecciones)

En la Tabla 2.15 se incluyen los valores seleccionados en el análisis del modelo de pérdidas por problemas de salud. Estos valores también son extraídos del análisis de las características de inundación (h, altura de inundación) y de la población de Ciudad del Carmen.

Los resultados de la aplicación del modelo vienen recogidos en la Tabla 2.16, y su representación gráfica en la Fig. 2.13. Para el escenario más desfavorable se obtiene una estimación del 90 % de población afectada, comparado con un 48 % asociado al escenario de riesgo medio. Este resultado muestra la sensibilidad del modelo, de forma similar al modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones, a la variación de la altura de inundación

(h=1 m vs h=1.5 m) y las características del área en cuanto a la posibilidad de que la población pueda evitar ser afectada.

Escenarios	PV1 (%)	PV2 (%)	NA	FW	SO	h (m)	n° residentes
Optimista	10	10	1	1	1	0.5	11
Medio	25	25	2	2	2	1	50
Pesimista	50	50	3	3	3	1.5	437

**Tabla 2.15. Valores asignados a las variables del modelo de pérdidas por problemas de salud, en el análisis de escenarios.**

Escenarios	I. PV (%)	II. AV	III. HR	IV. Variable Z (% personas en riesgo)	V. Personas en riesgo (N°)	VI. Afectados por problemas de salud (N°)
Optimista (O)	20	3	6	18	2	1.0
Medio (M)	50	6	8	48	24	12
Pesimista (P)	100	9	10	90	393	393

**Tabla 2.16. Resultados de la aplicación del modelo de pérdida por problemas de salud: escenario optimista, medio y pesimista.**

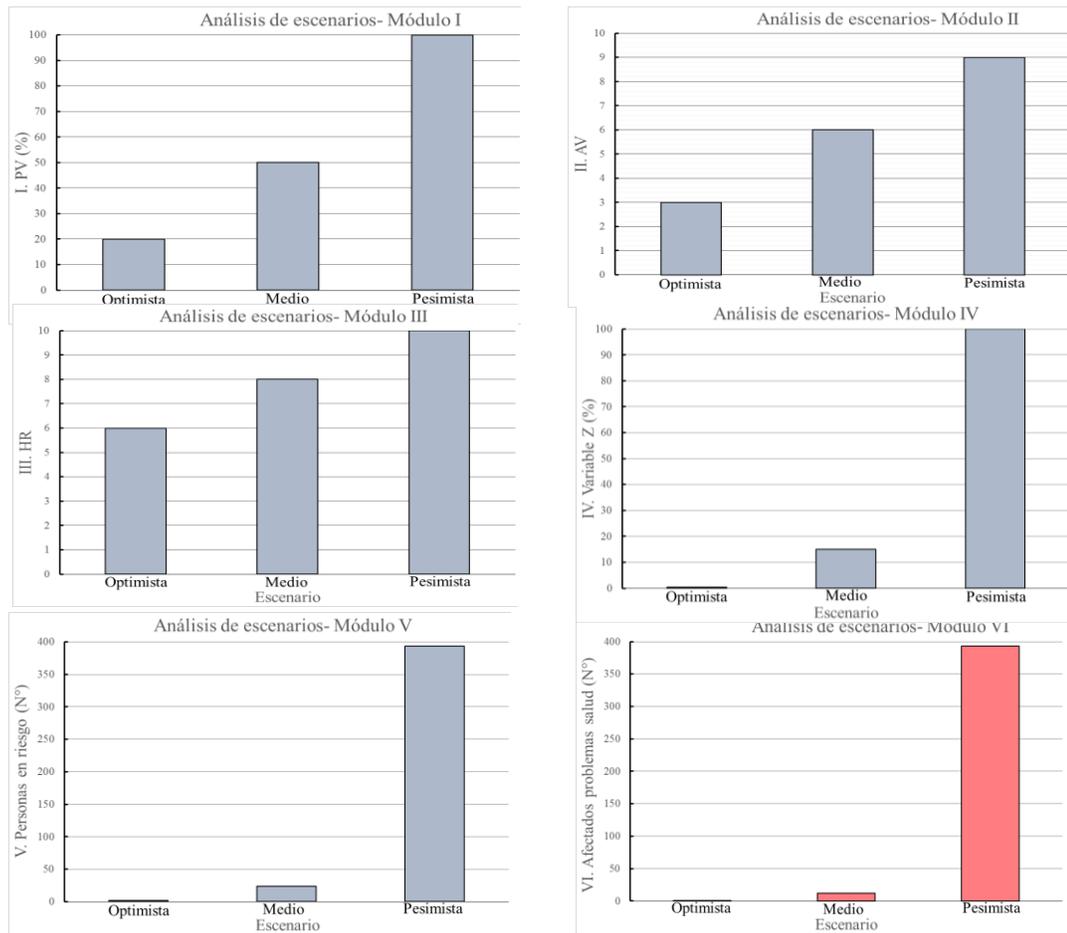


Figura 2.13. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por problemas de salud: escenario optimista, medio y pesimista.

### 2.6.3. Análisis escenarios-pérdidas medioambientales

Para el análisis de la sensibilidad del modelo de pérdidas medioambientales se definen 6 escenarios: 3 escenarios de acuerdo con las características del ecosistema de manglar de Isla del Carmen (O1; M1; P1); y los otros 3 escenarios bajo la consideración de la presencia de manglar sin capacidad de desarrollar raíces aéreas y, por tanto, más susceptibles a sufrir mayores daños que los que disponen de esta característica (O2; M2; P2). En la Tabla 2.17 se incluyen los valores definidos en cada escenario; y en la Tabla 2.18 (y su visualización en la Fig. 2.14) los resultados de la aplicación del modelo.

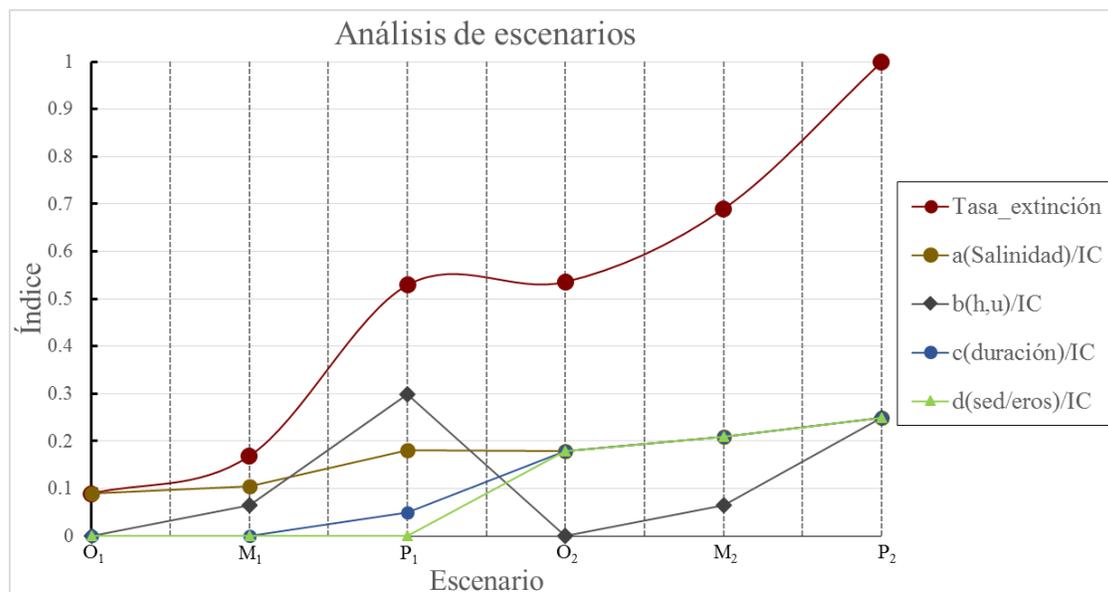
Se observa que el índice de grado de daño (o tasa de extinción) resultante para los 6 escenarios varía prácticamente en todo el rango definido (de 0 a 1), lo que muestra la validez del indicador para representar la diferente susceptibilidad de una amplia variedad de tipologías de manglar frente a un evento de inundación.

Variables	Escenarios Tipología manglar Isla del Carmen (raíces aéreas)			Escenarios Tipología manglar (sin raíces aéreas)		
	Optimista (O1)	Medio (M1)	Pesimista (P1)	Optimista (O2)	Medio (M2)	Pesimista (P2)
h (m) Altura inundación	0.30	1.5	5.4	0.30	1.5	5.4
Hr (m) Altura raíz aérea	0.40	0.20	0.20	0	0	0
u (m/s) Velocidad flujo	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
dr (m) Diámetro tallo	0.10	0.05	0.04	0.10	0.05	0.04
$\Delta ES_{sed/eros}$	0	0	0	1	1	1
$\Delta ES_{duración}$	0	0	0.2	1	1	1
$\Delta ES_{salinidad}$	0.5	0.5	0.72	1	1	1
IC	1.4	1.2	1	1.4	1.2	1
a	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
b	0.25	0.25	0.30	0.25	0.25	0.25
c	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
d	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

**Tabla 2.17. Valores asignados a las variables del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar, en el análisis de escenarios.**

Índice	Escenario					
	Optimista (O1)	Medio (M1)	Pesimista (P1)	Optimista (O2)	Medio (M2)	Pesimista (P2)
Tasa_extinción (rango de 0 a 1)	0.09	0.17	0.53	0.54	0.69	0.99
(a.ΔESsalinidad)/IC	0.09	0.10	0.18	0.18	0.21	0.25
(b.ΔES,h,u)/IC	0	0.06	0.30	0	0.06	0.25
(c.ΔESdur)/IC	0	0	0.05	0.18	0.21	0.25
(d.ΔESsed/eros)/IC	0	0	0	0.18	0.21	0.25

**Tabla 2.18. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar: escenario optimista, medio y pesimista.**



**Figura 2.14. Resultados de la aplicación del modelo de pérdidas por daños en el ecosistema de manglar: escenario optimista, medio y pesimista.**

## **Capítulo 3**

### **EVALUACIÓN DE RIESGOS EN ISLA DEL CARMEN Y CANCÚN. MÉTODOS**

---

---



## Capítulo 3

### EVALUACIÓN DE RIESGOS

#### EN ISLA DEL CARMEN Y CANCUN. MÉTODOS

##### 3.1. Aplicación general de metodología en Isla del Carmen y Cancún

De acuerdo con la metodología propuesta en el capítulo anterior, se aplica el modelo conceptual Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias (SPRC). La Fig. 3.1 muestra el esquema general de aplicación del modelo en Isla del Carmen y la Fig. 3.2 el correspondiente a la evaluación de riesgos en Cancún, mediante los cuales se analizan potenciales escenarios de riesgo de erosión e inundación debido a los peligros que amenazan en la costa.

En Isla del Carmen se consideran dos receptores de riesgo: la población (y sus bienes) y la infraestructura urbana y edificios de Ciudad del Carmen (Receptor 1), donde se evalúan aspectos socioeconómicos; y el ecosistema de manglar (Receptor 2), para analizar posibles pérdidas por amenazas en la costa.

En Cancún se evalúa el riesgo de inundación sobre la infraestructura y bienes de la zona hotelera debido a un peligro con características similares al huracán Wilma.

Riesgo queda definido como la combinación de la probabilidad y las consecuencias de la ocurrencia de un peligro, expresado en la forma de la Ec. (3.1).

$$R = P \cdot D \tag{3.1}$$

donde: P, es la probabilidad de ocurrencia de un evento; y D, hace referencia a las consecuencias, en términos de daños o pérdidas, sobre las entidades físicas expuestas a la amenaza.

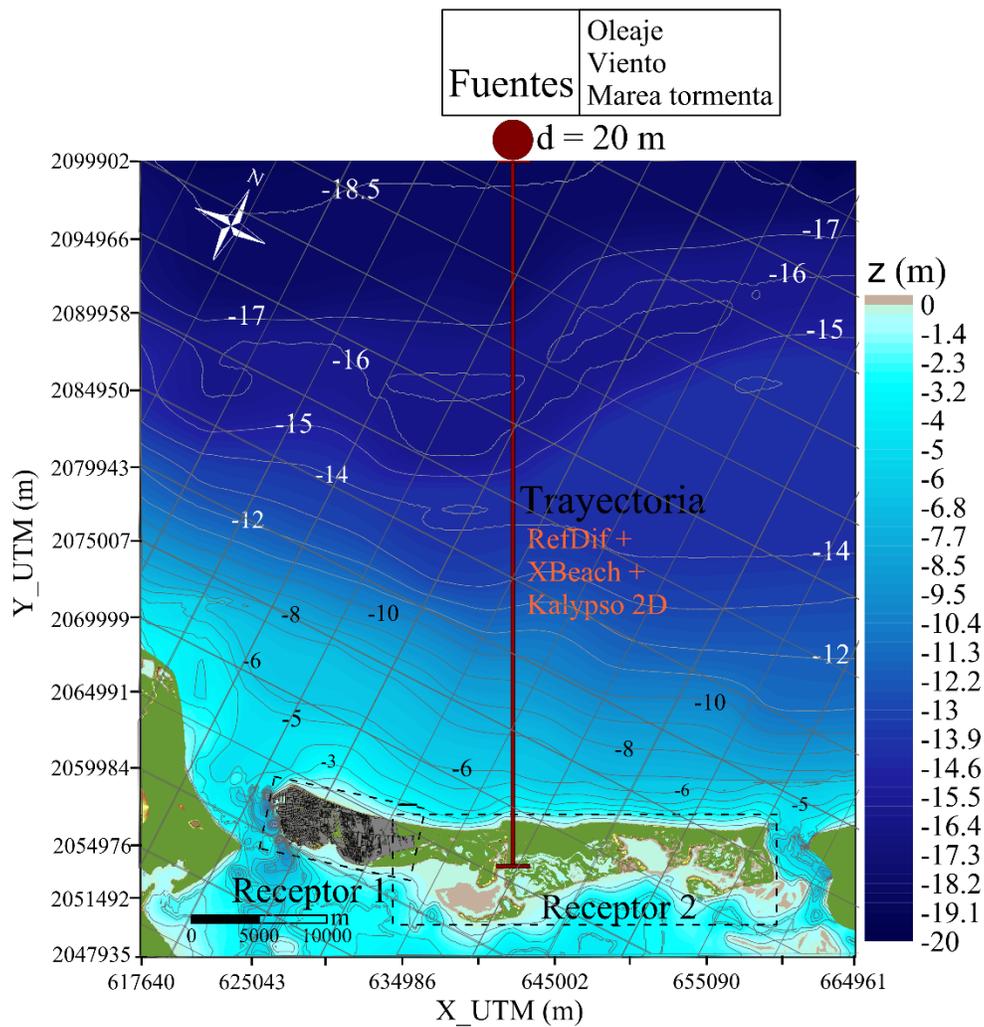
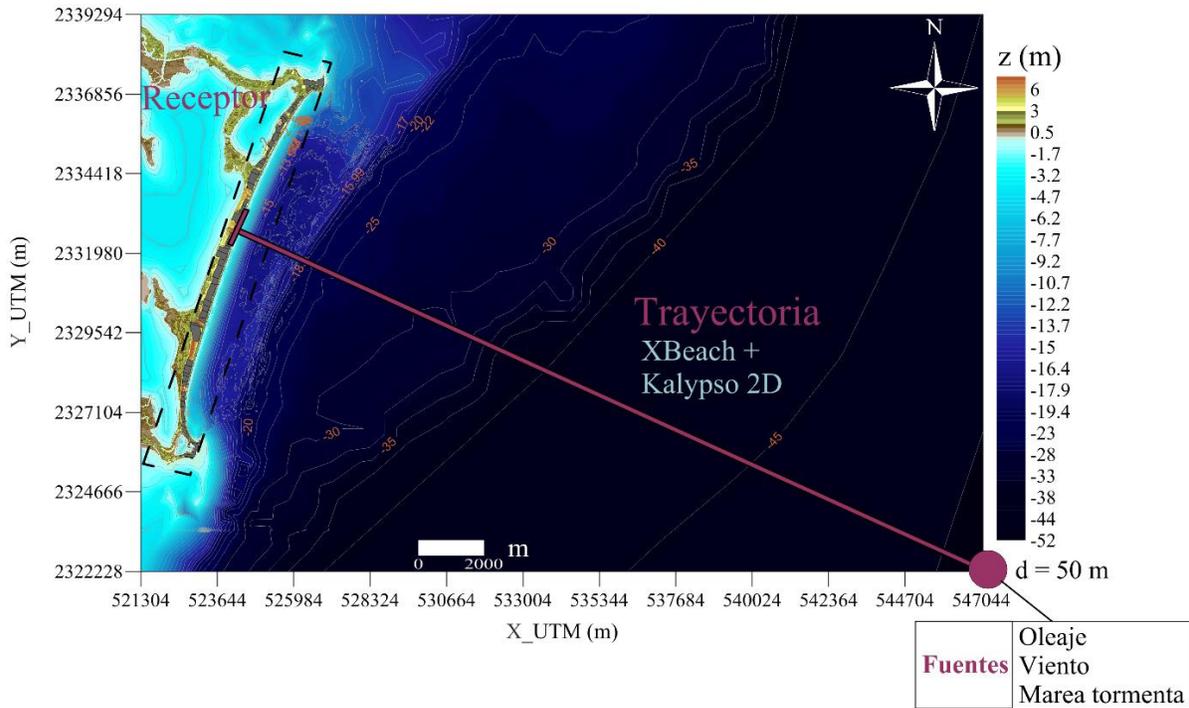
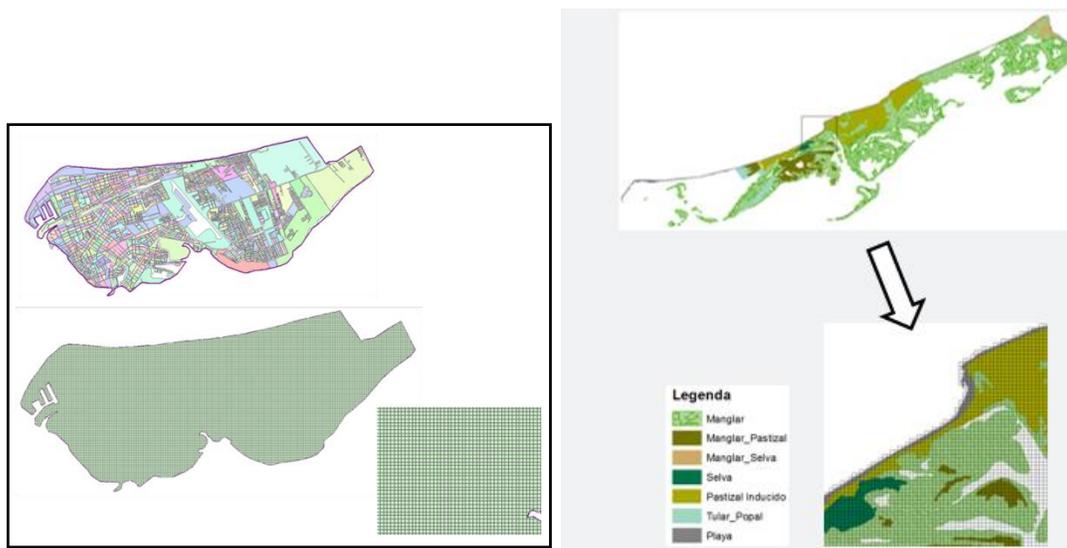


Figura 3.1. Esquema de la aplicación del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en Isla del Carmen.

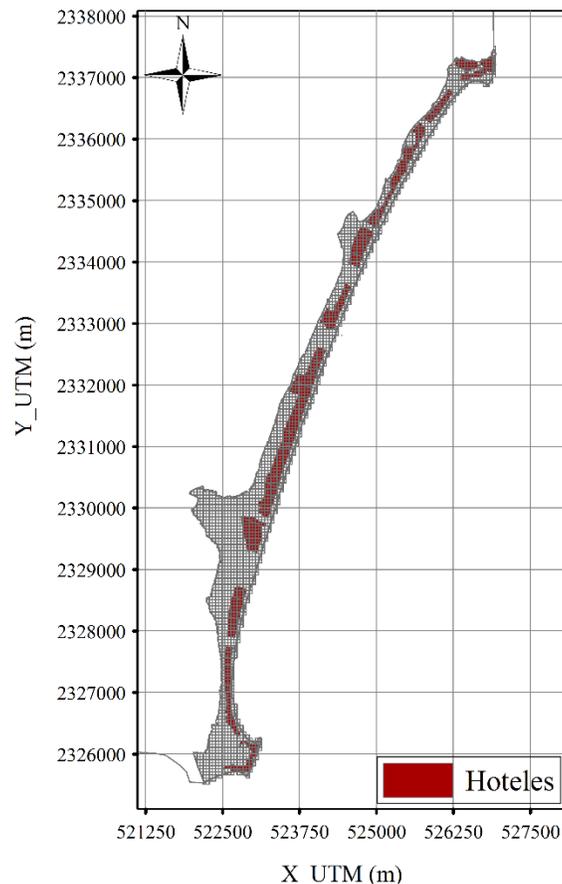


**Figura 3.2. Esquema de la aplicación del modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias en Cancún.**

El análisis espacial del riesgo, de acuerdo con la metodología de Burzel et al., 2015, se aplica mediante la selección de un tamaño de celda de 50 m tanto en Isla del Carmen como en Cancún. Este parámetro viene dado por la escala espacial del análisis (micro-escala) y los datos disponibles (información por manzana de uso del suelo en Ciudad del Carmen y a escala de edificio de los hoteles de Cancún). En la Fig. 3.3 y Fig. 3.4 se muestra esta división en celdas de la superficie de Isla del Carmen y Cancún, respectivamente.



**Figura 3.3. División del receptor en celdas cuadradas de 50 m, para evaluación de riesgos en Isla del Carmen.**



**Figura 3.4. División del receptor en celdas cuadradas de 50 m, para evaluación de riesgo en Cancún.**

A continuación se describe la metodología seguida para caracterizar los distintos elementos del modelo SPRC en las dos zonas de estudio.

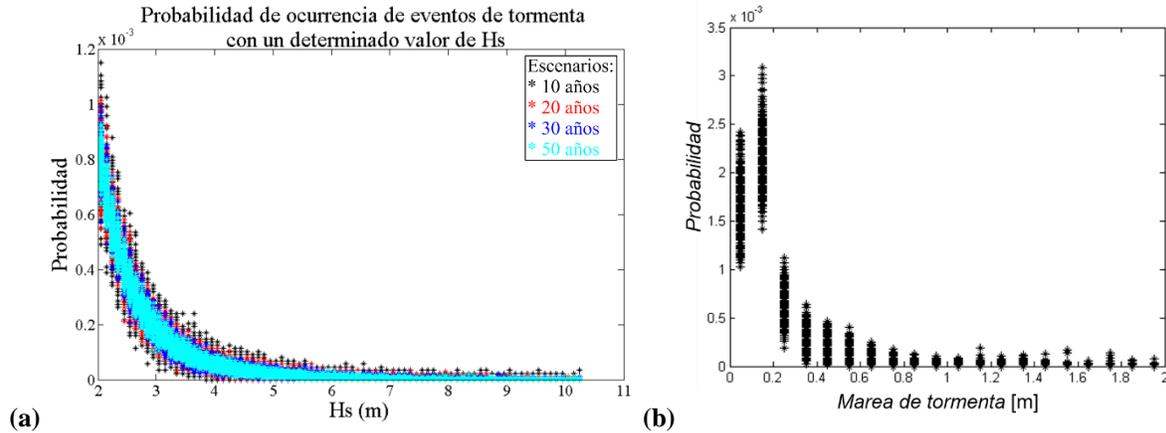
## **3.2. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen**

### **3.2.1. Análisis de elementos ‘Fuente’**

Las fuentes de riesgo consideradas son el oleaje, el viento y el nivel del mar en condiciones de tormenta. En el Anexo II se describen las bases de datos y los parámetros utilizados para su caracterización.

Mediante el método de simulación Monte Carlo se obtiene la probabilidad de ocurrencia de estas fuentes de riesgo en los escenarios de interés seleccionados: los próximos 10, 20, 30 y 50 años. El método utiliza el análisis estadístico de parámetros de los eventos de tormenta ocurridos en el periodo de análisis; como son la altura de ola significativa, la velocidad del viento, el número de tormentas por año y su duración (tanto la media de las tormentas ocurridas en un año como la duración individual de cada una de las tormentas del registro). La estimación de la marea de tormenta se obtiene para una determinada velocidad y dirección del viento. La Fig. 3.5 muestra los resultados de la simulación Monte Carlo para

la altura de ola significativa (Fig. 3.5a) y la marea de tormenta (Fig. 3.5b) en los distintos escenarios. En el Anexo II se describe con detalle el proceso seguido para la programación y aplicación del método.



**Figura 3.5. Resultados Monte Carlo en los próximos 10, 20, 30 y 50 años: (a) Altura de ola significativa; (b) Marea de tormenta.**

Los casos de simulación seleccionados para el análisis de riesgo corresponden a características representativas de “Nortes” (Tabla 3.1) y huracanes (Tabla 3.2) en el área, y de eventos de tormenta asociados a varios periodos de retorno (Tabla 3.3).

Norte	Duración (h)	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pmed</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT <sub>med</sub> (m)	MT <sub>max</sub> (m)
Típico	25	2.3	11.5	325	0.3	0.3
Desfavorable1	39	4.8	10.4	327	0.4	0.8
Desfavorable2	6	4.9	8.5	8.4	0.2	0.3

**Tabla 3.1. Parámetros de oleaje y marea de tormenta (a 28 m de profundidad) del “Norte” típico y de los dos “Nortes” más desfavorables identificados en el periodo de 1948 a 2010.**

Ciclón tropical	Fecha inicio tormenta	Duración (h)	H <sub>rms</sub> (m)	H <sub>smax</sub> (m)	T <sub>pmedio</sub> (s)	T <sub>pmax</sub> (s)	Dir <sub>media</sub> (°N)	MT <sub>media</sub> (m)	MT <sub>max</sub> (m)
Hilda	16 Sep 1955	23	4	5	7.5	8.6	340	0.2	0.3
Janet	28 Sep 1955	15	7.7	10.3	10.5	12.4	32	0.5	0.8
Inez	7 Oct 1966	17	2.5	2.9	8	8.6	328	0.13	0.16
Brenda	20 Ago 1973	30	5	7.8	8.1	10.8	354	0.3	0.5
Roxanne	11 Oct 1995	44	4.7	6.3	10.4	13.6	326	0.4	0.8
Isidore	22 Sep 2002	30	4.6	6.5	8	9.9	306	0.1	0.23
Dean	21 Ago 2007	11	6.8	8.6	9.8	11.3	0	0.1	0.4

**Tabla 3.2. Parámetros de oleaje y marea de tormenta (a 28 m de profundidad) de las series de datos espectrales simuladas, correspondientes a las características más desfavorables de los ciclones tropicales que con mayor energía han alcanzado la costa de Isla del Carmen en el periodo de 1948 a 2010.**

Tr (años)	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pméd</sub> (s)	Duración media (h)	V <sub>v</sub> (m/s)	Marea de tormenta (m)			
					NE	N	NW	WNW
5	4.5	8	5	15.8	0.31	0.45	0.37	0.25
10	5.4	9	5.5	18.8	0.42	0.60	0.50	0.35
30	7.4	10.5	2	25.0	0.67	1.00	0.85	-
50	8.5	11	2	28.7	0.85	1.28	1.10	-
100	10.2	12	1	34.6	-	1.80	-	-

**Tabla 3.3. Características de oleaje y marea de tormenta de los escenarios simulados para periodo de retorno (Tr) de 5, 10, 30, 50 y 100 años.**

### 3.2.2. Análisis de elementos ‘Trayectoria’

La caracterización de estos elementos se realiza mediante simulación numérica, utilizando los modelos Refdif (Kirby & Dalrymple, 1994), XBeach (Roelvink et al. 2010) y Kalypso 2D (Belger et al., 2008) (Fig. 3.1).

El modelo Refdif, que resuelve procesos de asomeramiento y refracción, se utiliza para aproximar las condiciones de oleaje y nivel del mar de 28 a 6 m de profundidad; profundidad a partir de la cual se aplica el modelo XBeach para simular adecuadamente los procesos hidrodinámicos y morfológicos en las zonas de rotura, rompientes, de vaivén y playa (resuelve procesos de overwash, avalancha y abertura de brecha, entre otros).

En la aplicación del modelo Refdif se utiliza una única malla de cálculo que abarca toda el área, con una resolución de celdas de 25 x 25 m (en direcciones perpendicular y paralela a la costa); mientras que en el modelo XBeach se requiere de total de 8 mallas para cubrir todo el litoral de Isla del Carmen, con un tamaño de celda de 10 x 20 m (en x e y; direcciones perpendicular y paralela a la costa, respectivamente). La Fig. 3.6 muestra la disposición de las mallas de aplicación de Xbeach.

En cuanto al modelo de inundación, Kalypso 2D se aplica desde el límite exterior de la playa tierra adentro para propagar la inundación en todo el dominio del receptor. Este modelo permite considerar la rugosidad de los distintos obstáculos que puede encontrar el agua de inundación en su propagación. En particular, en Isla del Carmen se establecen 12 zonas de rugosidad de acuerdo con los distintos usos del suelo en el área (Fig. 3.7). El coeficiente de rugosidad asignado a cada una de las clases (Tabla 3.4) se establece con base en valores publicados en los manuales alemanes de diseño hidráulico BWK y DVWK (Järvelä, 2004).

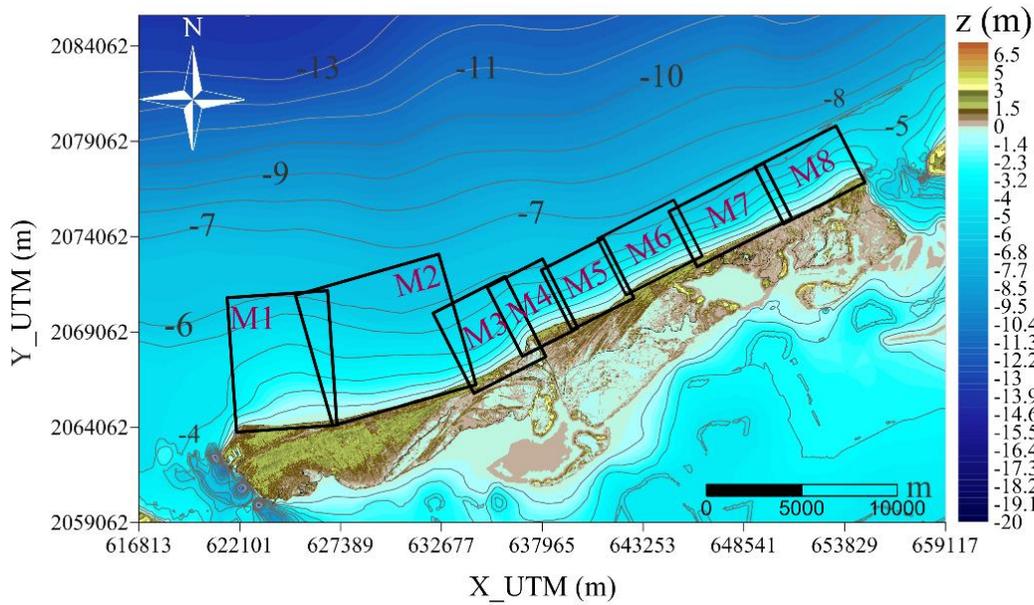


Figura 3.6. Mallas de cálculo utilizadas en la aplicación del modelo numérico XBeach en Isla del Carmen.

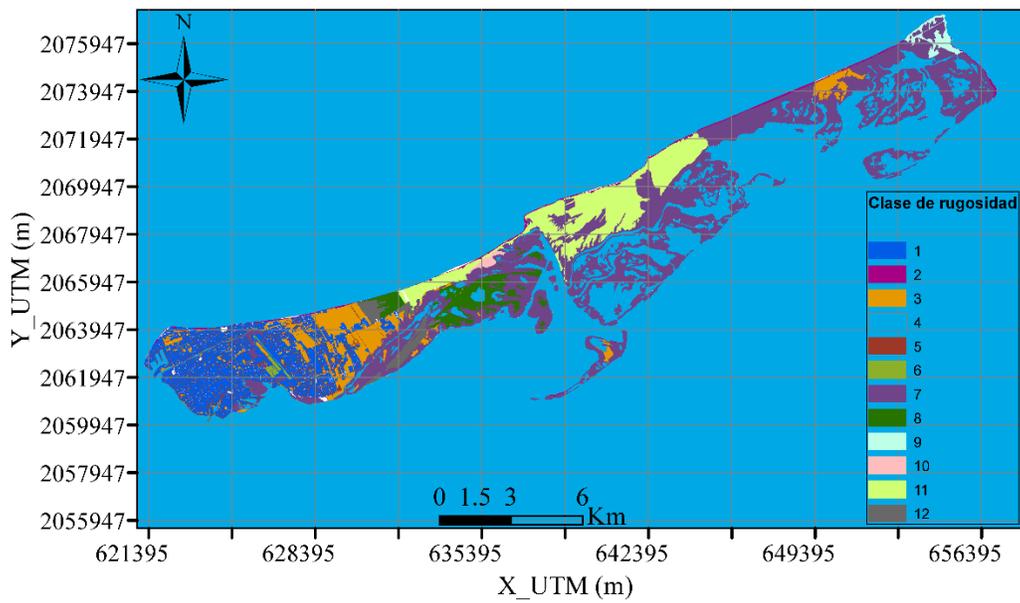


Figura 3.7. Distribución de clases de rugosidad en Isla del Carmen, en función de los usos del suelo.

Clase de rugosidad	Categoría	ks (m)
1	Hormigón (concreto)	0.013
2	Playa	1.50E-04
3	Hierba	0.2
4	Agua	0.12
5	Asfalto	0.05
6	Camellón	0.6
7	Manglar	0.24
8	Manglar-Pastizal	0.137
9	Manglar-Selva	0.24
10	Selva	0.24
11	Pastizal Cultivado	0.003
12	Tular-Popal	0.2

**Tabla 3.4. Coeficientes de rugosidad definidos para cada clase.**

Los archivos de salida de los modelos numéricos tienen formato de conjuntos de datos ASCII. De acuerdo con la metodología propuesta para realizar el análisis espacial, estos valores son transferidos a cada una de las celdas en que queda dividida el área de estudio.

### **3.2.3. Análisis de las ‘Consecuencias’ sobre los ‘Receptores’**

#### ***Ciudad del Carmen***

Los usos del suelo en Ciudad del Carmen se obtienen de la recopilación de información de diversas fuentes, principalmente: cartografía urbana de 2009 del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), información digitalizada de Google Earth e información por manzanas del censo de población y vivienda de 2010 proporcionada por INEGI a través del sistema para la consulta de información censal (SCINCE, 2010). Se observa, en la Fig. 3.8, un uso del suelo principalmente enfocado a la vivienda y, en menor importancia, al uso industrial y sector servicios (esencialmente aquellos relacionados con la industria petrolera).

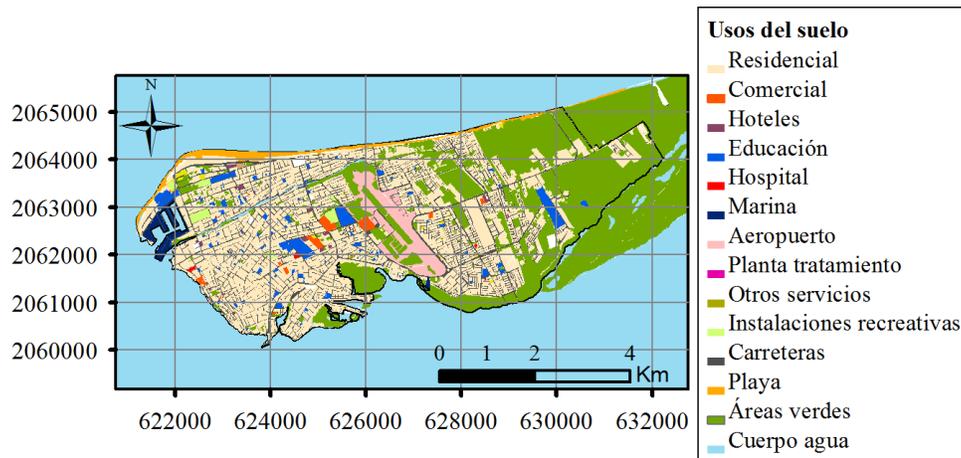


Figura 3.8. Usos del suelo en Ciudad del Carmen.

En la Fig. 3.9 se resaltan en azul las categorías de daños y/o pérdidas contempladas en la evaluación.

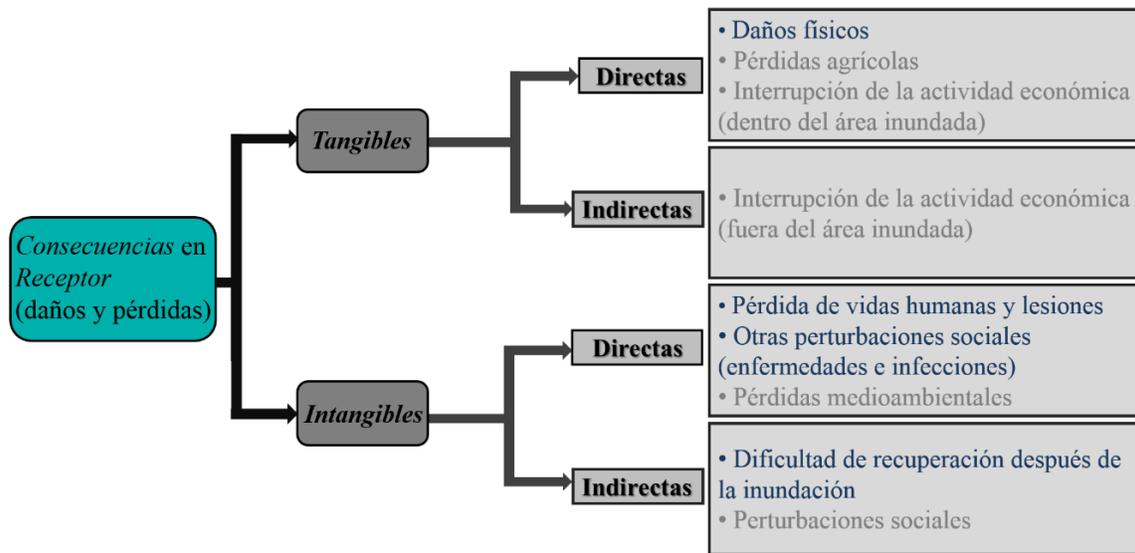


Figura 3.9. Categorías de daños/pérdidas analizadas en Ciudad del Carmen (en azul).

A continuación se describe la aplicación en Ciudad del Carmen de las metodologías propuestas (en Capítulos 1 y 2) para analizar cada una de estas categorías de pérdidas.

- Daños físicos (edificios y bienes)

Se estiman los daños físicos sobre los edificios y bienes del sector residencial de Ciudad del Carmen mediante la utilización de curvas de daños en función de la altura de inundación.

Se definen edificios-tipo en Ciudad del Carmen, principalmente de acuerdo al tipo de vivienda, número de plantas y material de construcción.

Atendiendo al número de plantas, la tipología de viviendas es prácticamente homogénea en toda la ciudad, ya que el 82.6 % de las viviendas son casas independientes de una o dos plantas (PDU, 2009). La Fig. 3.10 muestra dos de las viviendas típicas de la ciudad.

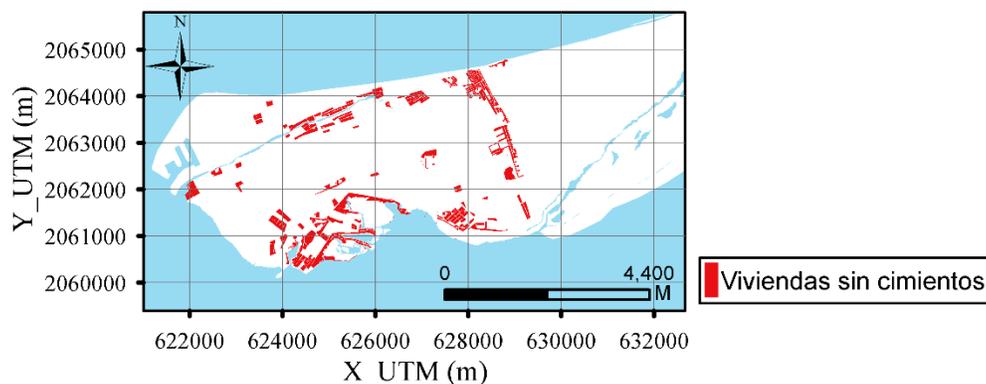


**Figura 3.10. Viviendas típicas en Ciudad del Carmen.**

Además, existe una considerable proporción de viviendas construidas con materiales provisionales de lámina de cartón y plásticos. En zona del arroyo La Caleta predomina este tipo de viviendas (PDU, 2009), Fig. 3.11. La consideración de este tipo de vivienda se hace a partir de información conocida de la distribución del número de viviendas habitadas con suelo de tierra (SCINCE, 2010), (Fig. 3.12).



**Figura 3.11. Vivienda en condiciones precarias en Ciudad del Carmen.**

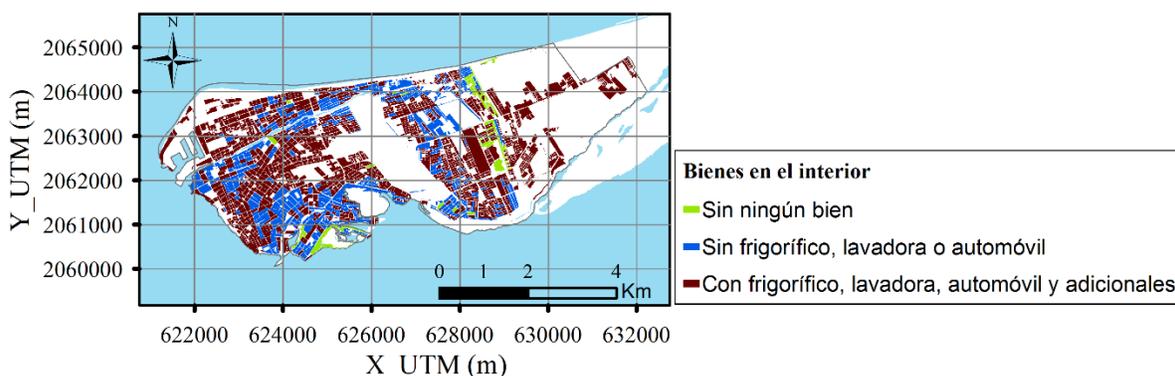


**Figura 3.12. Viviendas habitadas con suelo de tierra en Ciudad del Carmen.**

Por tanto, se consideran dos edificios-tipo representativos en Ciudad del Carmen: casas de dos plantas (1 piso y planta baja) y viviendas con suelo de tierra.

En cuanto a la pérdida de bienes muebles, se dispone de información del censo de 2010 en Ciudad del Carmen en relación a los bienes y servicios en el interior de las viviendas (SCINCE, 2010). Se definen tres clases de pérdida económica de acuerdo con la cantidad y naturaleza de los bienes existentes por vivienda (Fig. 3.13):

1. Viviendas que no disponen de ningún bien (Clase 1).
2. Viviendas que no disponen de bienes “básicos” como refrigerador, lavadora o automóvil (Clase 2).
3. Viviendas que contienen bienes “básicos”, y algunas de ellas además incluyen bienes englobados en el grupo de tecnologías de la información y la comunicación (Clase 3).



**Figura 3.13. Clases de pérdidas económicas de acuerdo con la cantidad y naturaleza de los bienes en el interior de las viviendas.**

Los daños a la estructura de los edificios y pérdidas por bienes en el interior de las viviendas se estiman de forma separada mediante la utilización de dos funciones independientes. Debido a la falta de registros de daños asociados a eventos reales de inundación en Ciudad del Carmen, se adoptan dos de las funciones utilizadas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE) para viviendas de un piso con planta baja (Davis & Skaggs, 1992) (en Fig. 3.14 y Fig. 3.15 para estructura y bienes, respectivamente). Estas funciones son asignadas a las viviendas tipo de dos plantas en Ciudad del Carmen, para evaluar los daños sobre los edificios; y a aquéllas englobadas en la Clase 3 por la naturaleza de sus bienes. Se adopta un daño de 20, 50 y 100 % sobre las viviendas con suelo de tierra para una altura de inundación inferior a 0.3 m, de 0.3 a 1 m, y superior a 1 m, respectivamente; y la función de referencia definida en la Fig. 3.15 multiplicada por un factor de 0.90 para la consideración de las pérdidas por bienes en el interior de las viviendas de Clase 2. Esta valoración no se contempla en las viviendas sin ningún bien (Clase 1).

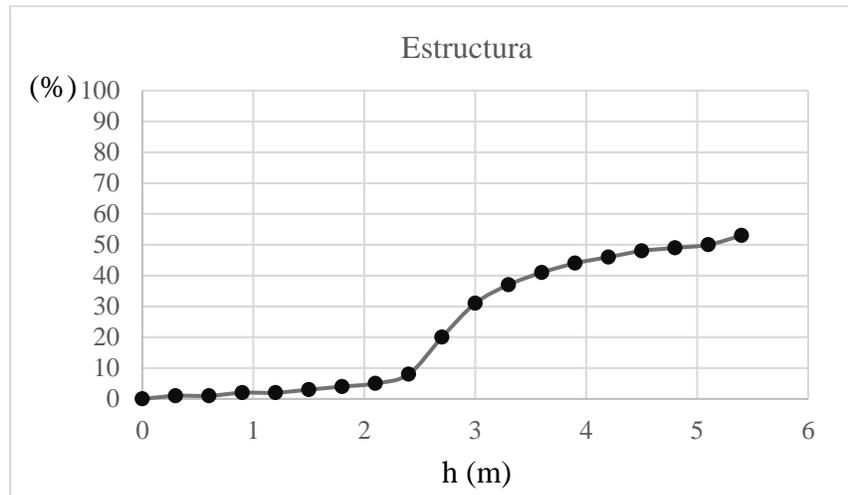


Figura 3.14. Curva para estimar las pérdidas sobre la estructura de vivienda de un piso con planta baja (modificado de Davis & Skaggs, 1992).

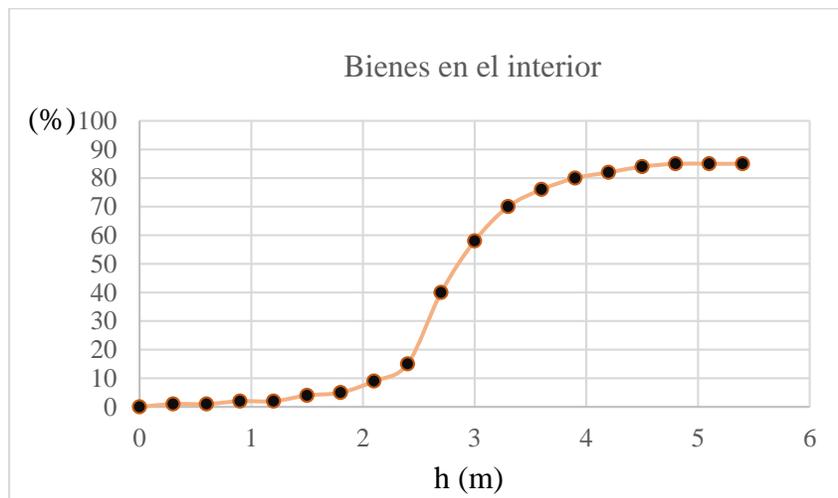


Figura 3.15. Curva para estimar las pérdidas sobre los bienes en el interior (viviendas de un piso con planta baja) (modificado de Davis & Skaggs, 1992).

- Otras perturbaciones sociales (enfermedades e infecciones)

Mediante esta categoría de daños se evalúa el número de personas que pueden resultar afectadas por el contacto directo con agua contaminada de inundación. Para ello, se aplica el modelo propuesto en el Capítulo 2, una vez definidas las cuatro fuentes principales de contaminación en Ciudad del Carmen (Fig. 3.16):

1. Áreas de usos del suelo incompatibles (uso residencial e industrial), por la presencia de instalaciones portuarias y plantas de tratamiento de aguas residuales.
2. Cementerios.

3. Viviendas sin servicios de drenaje adecuados: en zona de falta de drenaje sanitario se tiene contaminación del manto freático, lo que hace a la población más vulnerable a sufrir problemas de salud por la ocurrencia de inundaciones.

4. Zona de relleno junto a cuerpos de agua estancadas (junto al arroyo La Caleta), que ocasiona problema de condiciones de salubridad.

La población en riesgo se define en un radio de influencia de 100 m medido desde la fuente de contaminación, a falta de un análisis más preciso del área que puede resultar afectada por cada fuente de contaminación. El modelo únicamente se aplica en esta región.

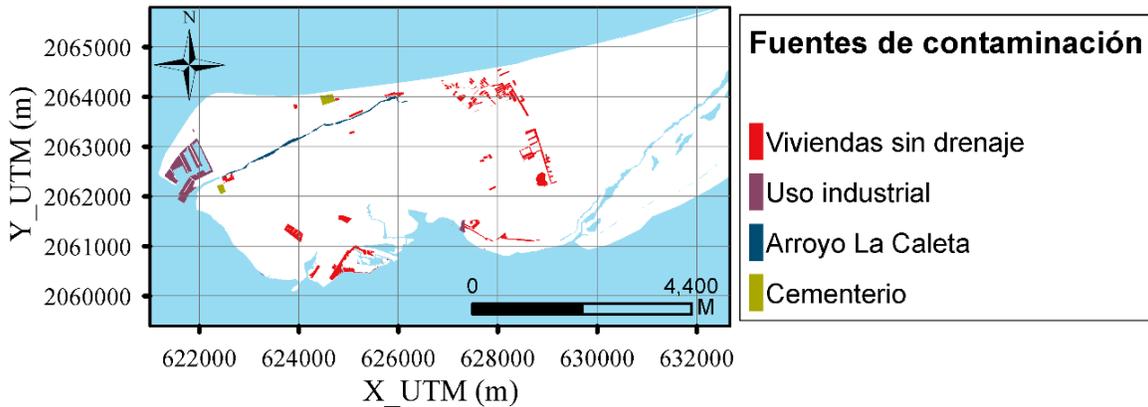


Figura 3.16. Fuentes de contaminación en Ciudad del Carmen.

Se definen los datos de entrada al modelo:

1. Población: número de residentes (Fig. 3.17) y población vulnerable (niños y ancianos, en Fig. 3.18; enfermos, asmáticos o discapacitados, en Fig. 3.19).

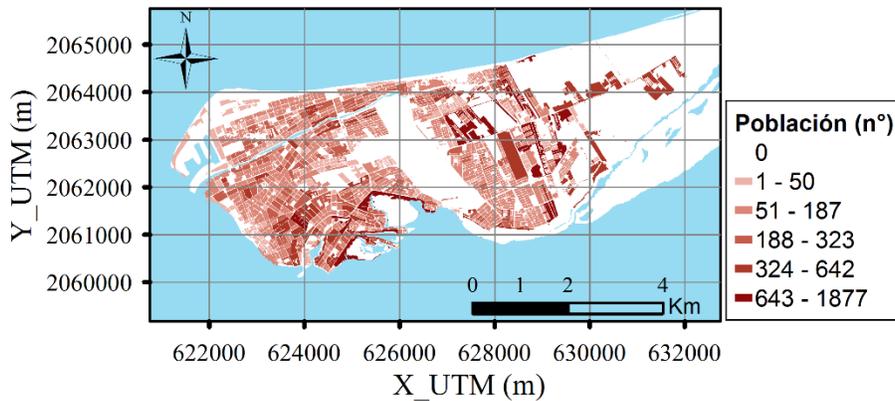


Figura 3.17. Distribución del número de personas por manzana en Ciudad del Carmen.

(a) Niños (edad inferior o igual a 14 años) y ancianos (edad inferior o igual a 60 años)

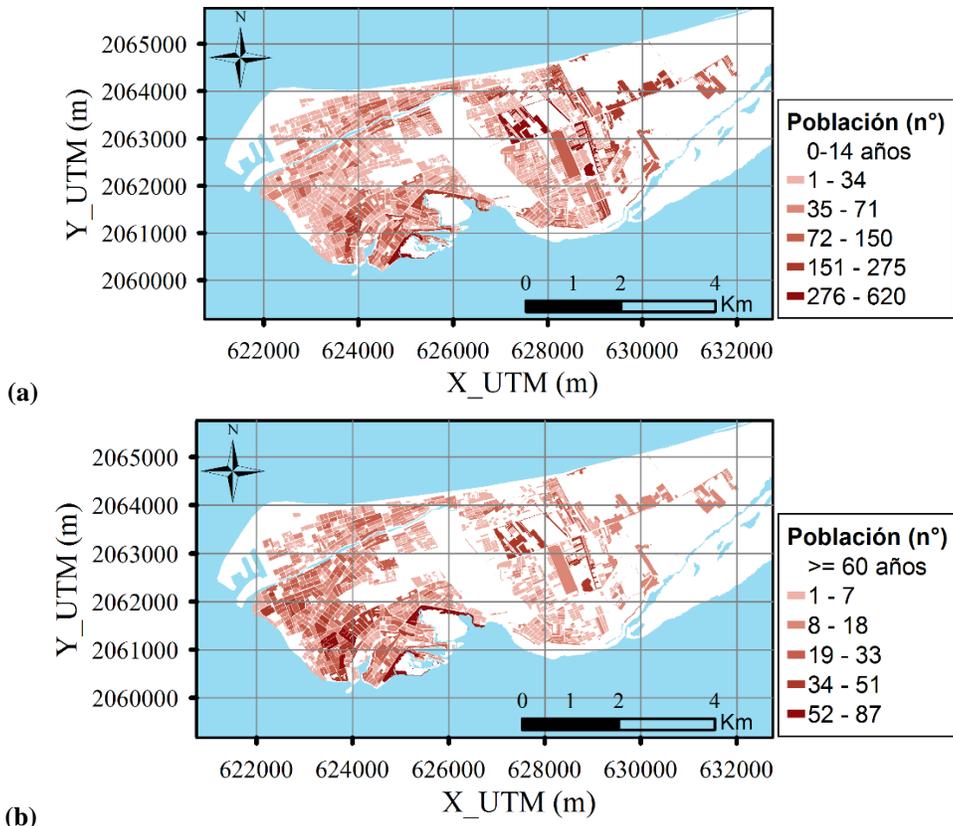


Figura 3.18. Distribución de población vulnerable, por manzana en Ciudad del Carmen: (a) Niños; (b) Ancianos.

(b) Enfermos/asmáticos/discapacitados

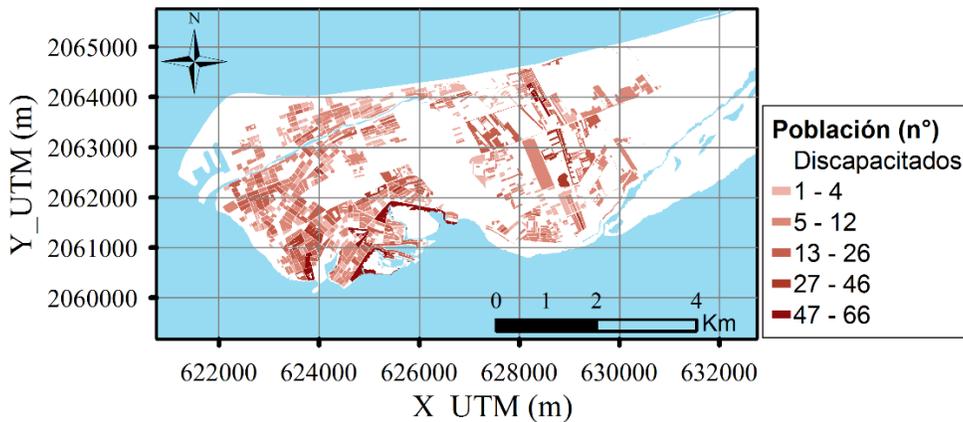


Figura 3.19. Distribución del número de personas que padecen algún tipo de discapacidad, por manzana en Ciudad del Carmen.

2. Definición de las clases de riesgo de acuerdo con la naturaleza del área:

De acuerdo con lo presentado anteriormente, se establecen dos categorías para evaluar el área en riesgo en relación a la estructura de los edificios: riesgo alto en las áreas ocupadas con viviendas con suelo de tierra y riesgo medio en el resto.

3. Contemplación de medidas de alerta por la posibilidad de evacuación, refugio y/o rescate.

Se consideran varios escenarios, teniendo o no en cuenta estas medidas.

4. Características de la inundación: velocidad de llegada de la inundación y altura de inundación.

Se evalúan a partir de los resultados de altura de inundación de cada escenario de simulación.

- Pérdida de vidas humanas y lesiones

En el modelo definido para evaluar este tipo de pérdidas algunos parámetros de entrada son comunes a los del modelo de pérdidas por problemas de salud (descrito anteriormente). Estos son: parte de la población vulnerable (niños/ancianos; enfermos/discapacitados), las distintas áreas establecidas de acuerdo con su vulnerabilidad, el número de residentes, la velocidad de llegada de la inundación y la altura de inundación. Otros datos a introducir y que dependen de las características del escenario de análisis en particular son la velocidad del flujo y el factor de escombros.

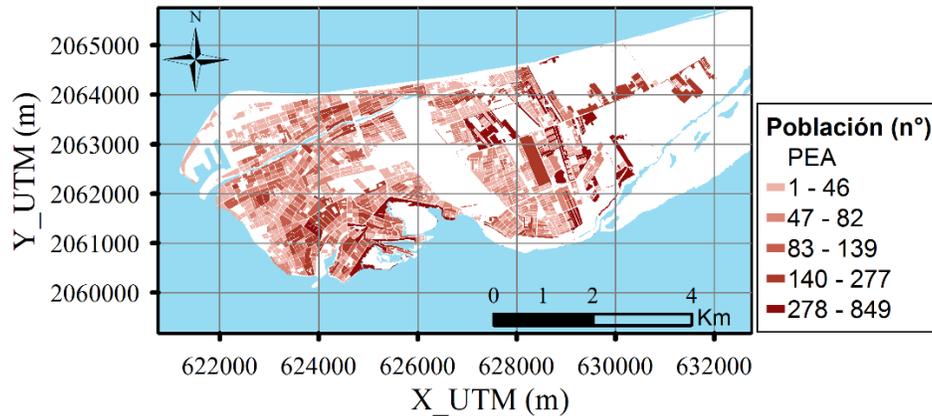
Dificultad de recuperación después de la inundación

*Población*

La resiliencia de la sociedad ante la ocurrencia de una inundación, en lo que se refiere al aspecto económico, se evalúa mediante la consideración de dos parámetros (definidos en el Capítulo 2): la población económicamente activa por familia (PEA) y la clase social a la que pertenece (baja, media o alta). A continuación se describe la distribución de estos parámetros en Ciudad del Carmen.

(a) Población Económicamente Activa (PEA) por familia (Fig. 3.20)

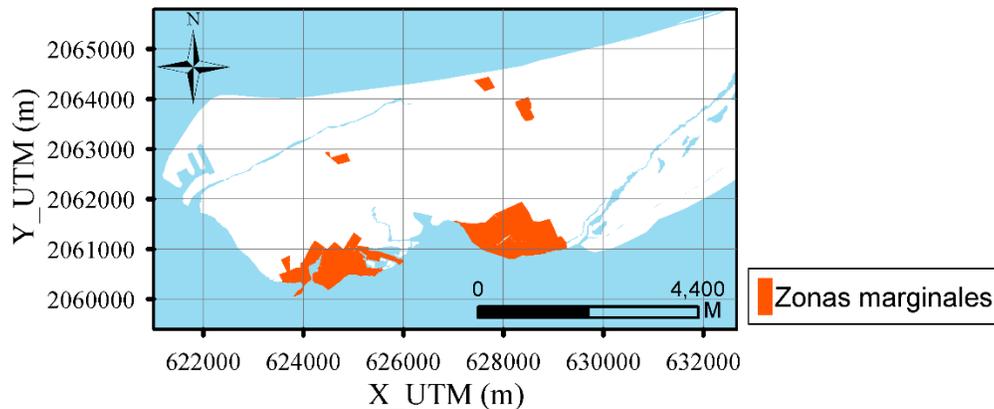
Se define como el número de personas que trabajan en cada vivienda y sostienen las necesidades integrantes de la familia. Se considera que la llegada de un huracán puede provocar la pérdida de empleos y, por tanto, que la capacidad de cada familia de salir adelante ante estas condiciones aumenta con el número de integrantes de la familia que trabajan al aportar un mejor sustento familiar.



**Figura 3.20. Distribución del número de personas definidas población económicamente activa (PEA), por manzana en Ciudad del Carmen.**

(b) Clase social a la que pertenece cada familia (baja, media o alta)

Se conocen las colonias de Ciudad del Carmen con mayor grado de marginación: Tierra y Libertad, Bivalvo, 23 de Julio, Las Pilas, Isla de Tris, Renovación, Manigua, Limonar, Puntilla, Caracol, Emiliano Zapata y Lomas de Holché (PDU, 2009), Fig. (3.21). En estas zonas, la población tiene mayor dificultad para reconstruir sus viviendas cuando son afectadas por los efectos de una inundación.



**Figura 3.21. Distribución de zonas marginales en Ciudad del Carmen.**

Con la información disponible en Ciudad del Carmen se consideran dos clases sociales principales: baja, en las zonas marginales; y media en el resto.

### *Infraestructura*

Se evalúa la posibilidad de funcionamiento habitual de la infraestructura después de una inundación de acuerdo con las condiciones de drenaje en las vialidades (adecuado, limitado, sin drenaje) y la densidad de los edificios (baja, media, alta). De esta forma se analiza el tiempo de duración de una inundación.

En Ciudad del Carmen, se conoce la disponibilidad de drenaje pluvial por manzanas (SCINCE, 2010), y se observa que gran parte de las vialidades carece de este servicio (Fig. 3.22).

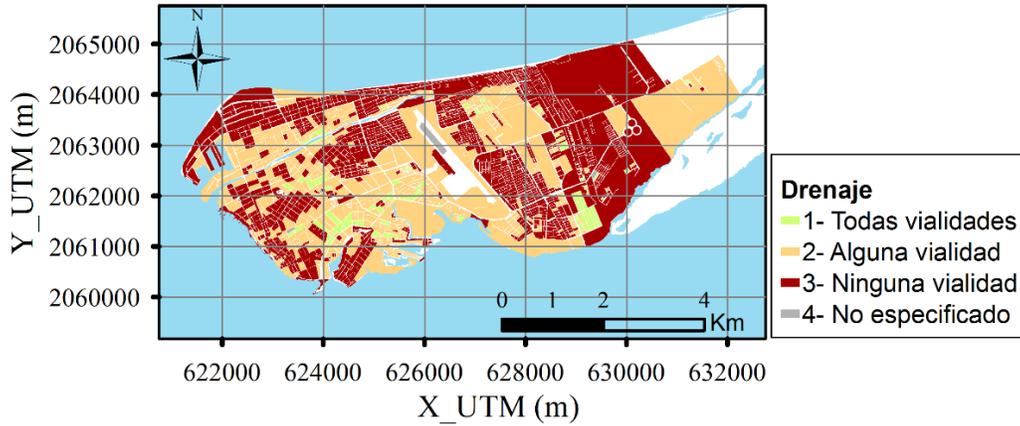


Figura 3.22. Distribución de drenaje pluvial en las manzanas de Ciudad del Carmen.

### *Ecosistema de manglar de Isla del Carmen*

La Fig. 3.23 muestra la distribución de ecosistemas en Isla del Carmen, donde se observa la predominancia de extensión de área de manglar (5013 Ha, alrededor del 68% de la superficie ocupada por todos los ecosistemas, de acuerdo con información de CONABIO, 2013, en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

El ecosistema de manglar es seleccionado como receptor en la aplicación del modelo propuesto en el Capítulo 2 para evaluar posibles pérdidas medioambientales por amenazas en la costa (pérdidas intangibles directas, Fig. 3.24).

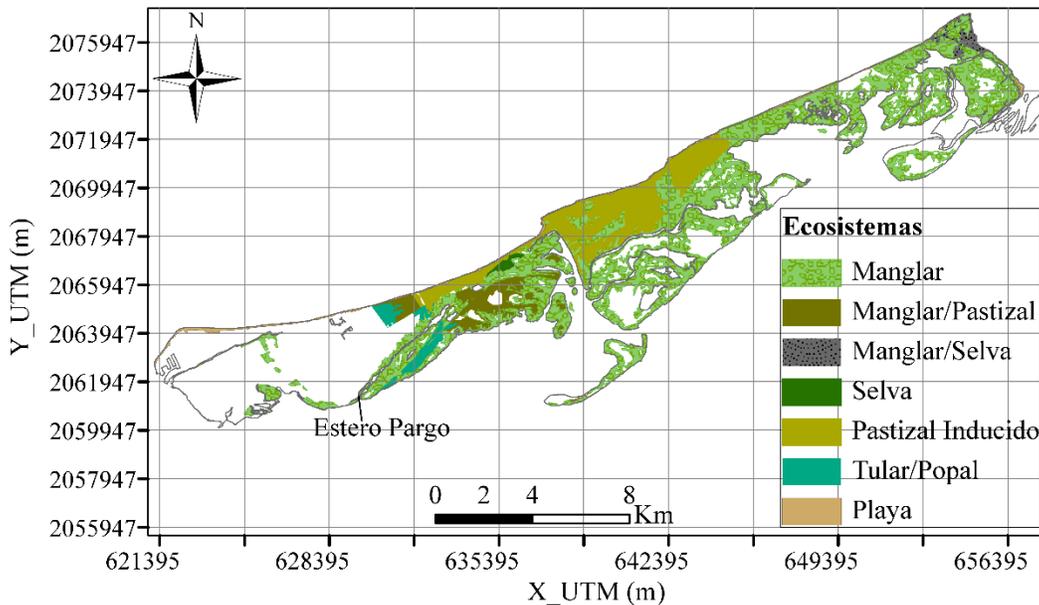


Figura 3.23. Distribución de ecosistemas en Isla del Carmen.

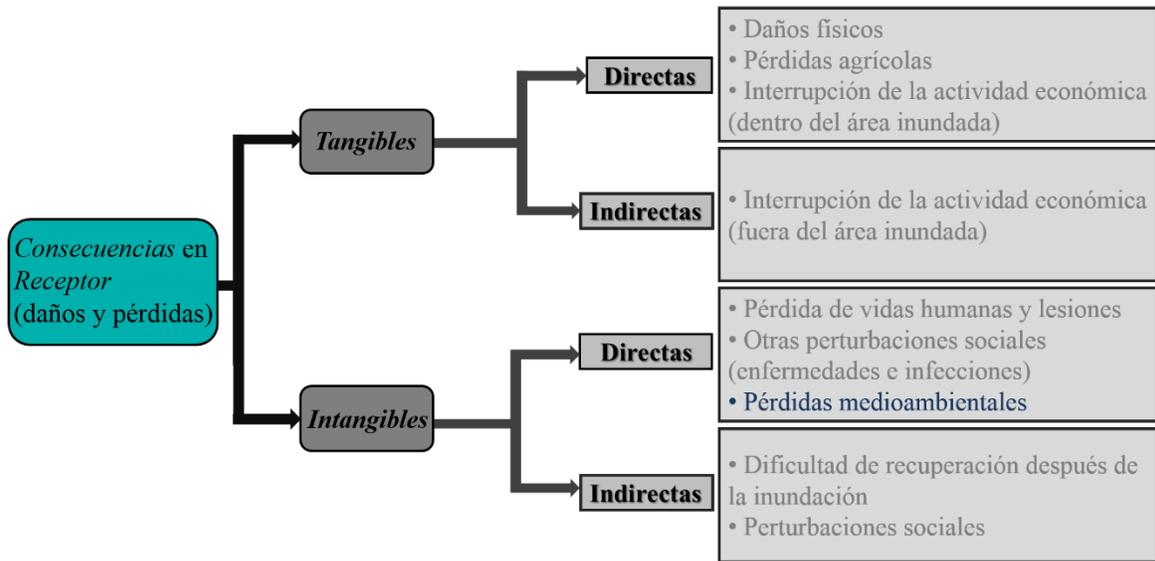


Figura 3.24. Categoría de pérdidas analizadas en el ecosistema de manglar, en Isla del Carmen (en azul).

Siguiendo la metodología de evaluación de pérdidas medioambientales propuesta en el Capítulo 2 (Fig. 3.25), a continuación se definen los distintos parámetros de entrada al modelo en su aplicación sobre la superficie de manglar de Isla del Carmen.

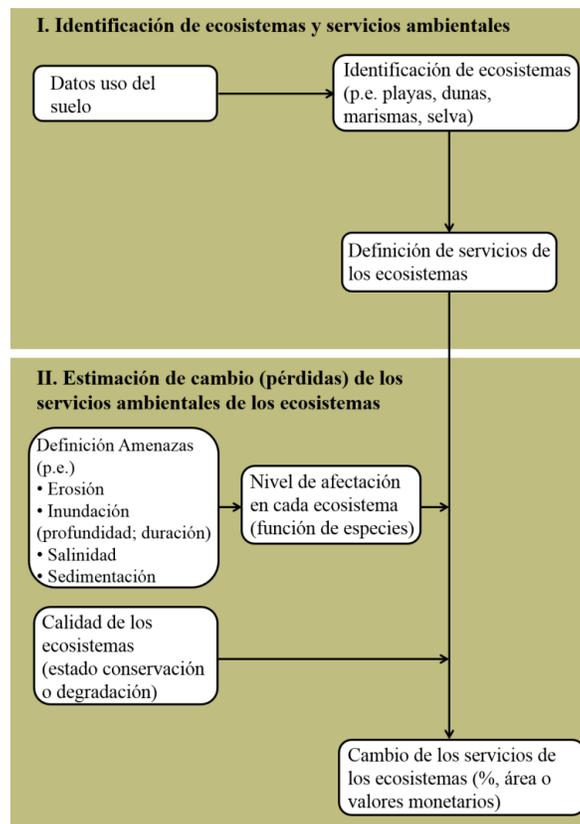


Figura 3.25. Diagrama de evaluación de pérdidas medioambientales.

## I. Identificación de ecosistemas y servicios ambientales

### (a) Identificación de ecosistemas

La superficie de manglar en Isla del Carmen se compone principalmente de: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia Racemosa* (mangle blanco) y *Avicennia germinans* (mangle negro) (PDU, 2009; Rodríguez-Zúñiga et al., 2013). Son especies catalogadas como “especies con requerimiento de protección especial”, de acuerdo con la NOM-059-2001-SEMARNAT (PMOET, 2009).

Pérez-Ceballos et al., 2013 muestran como resultado del “Proyecto Piloto de Conservación y Restauración de Manglares” una actualización de la distribución de manglares presentada anteriormente; mediante la incorporación de áreas inundadas con manglar muerto no consideradas por Rodríguez-Zúñiga et al., 2013, la especificación de la tipología y estado de los distintos manglares (Fig. 3.26). En la Tabla 3.5 se especifican las especies dominantes en cada una de las clases establecidas; la altura de los árboles y/o arbustos; el estado de conservación; y la cobertura. Se observa la mayor cobertura de manglar de la franja o cuenca dominada por *Avicennia germinans* (Ag), seguida por extensión de *Rhizophora mangle* (Rm) y, finalmente, la especie *Laguncularia racemosa* (Lr).

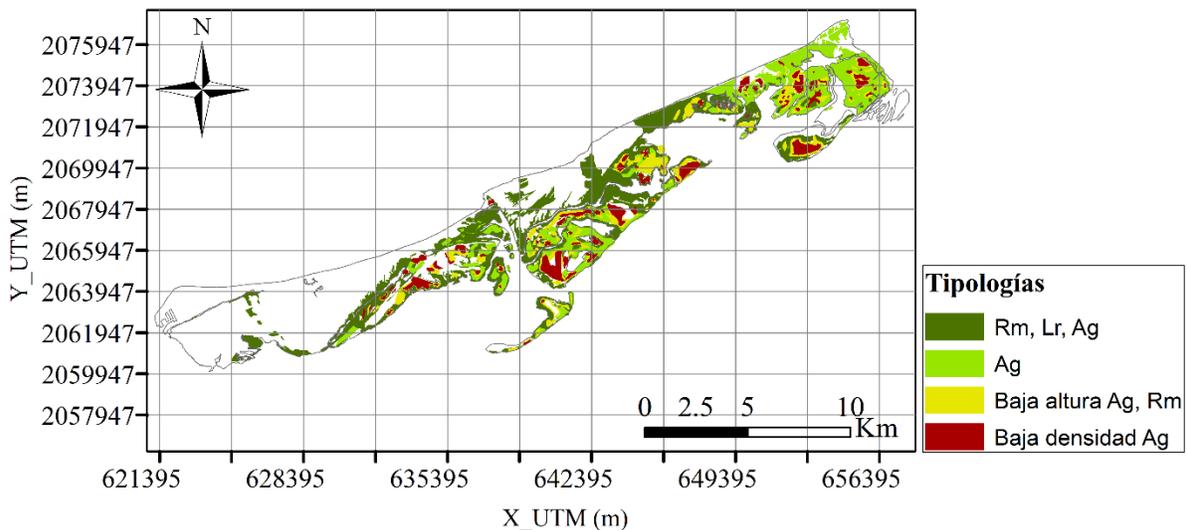


Figura 3.26. Distribución de tipologías de manglar en Isla del Carmen.

Tipología	Dominancia de especies	Altura árboles/arbustos (m)	Estado de vegetación	Área (ha)	Cobertura (%)
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm); seguidos por <i>Laguncularia racemosa</i> (Lr); y <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	6 a 8	Bien desarrollada Buena condición ecológica	2098	35
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	4 a 6	Bien desarrollada Buena condición ecológica	2247	38
Cuenca chapararro Ag, Rm	Dominados por Ag	1 a 2	Regular condición ecológica	846	14
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	< 1	Mala condición ecológica	738	12

**Tabla 3.5. Distribución y estado de conservación de tipologías de manglar en Isla del Carmen.**

(b) Definición de los servicios ambientales de los ecosistemas

Algunos de los servicios ambientales del ecosistema de manglar identificados en Isla del Carmen, de acuerdo con Rodríguez-Zúñiga et al., 2013 son:

1. Protección de la línea de costa, prevención de inundaciones, barreras de huracanes e intrusión salina.
2. Sumideros de carbono y fijación de nitrógeno (sistemas altamente eficientes para la mitigación del efecto del calentamiento global asociado al cambio climático).
3. Mantenimiento de la calidad del agua: reducen el nivel de contaminantes en el agua.
4. Hábitat de una variada fauna silvestre y algunas especies de importancia comercial.
5. Valor económico como productores de madera y leña, y como atractivo turístico y cultural.

De todos ellos, se selecciona el servicio ambiental de protección costera para la estimación de la afección en cada escenario de riesgo.

II. Estimación de cambio (pérdidas) de los servicios ambientales de los ecosistemas

El cambio de los servicios ambientales de los ecosistemas viene definido por la Ec. (3.2), mediante la cual se evalúa el impacto del nivel de salinidad, parámetros de inundación (altura, velocidad y duración), y la afectación por acumulación de sedimentos o erosión.

$$\Delta ES_{total} = f(Tasa_{extinción}) \rightarrow Tasa_{extinción} = \frac{\sum_j a_j \cdot Amenaza_j}{IC} \rightarrow$$

$$\rightarrow Tasa_{extinción} = \frac{a \cdot \Delta ES_{salinidad} + b \cdot \Delta ES_{h,u} + c \cdot \Delta ES_{dur} + d \cdot \Delta ES_{sed/eros}}{IC} \quad (3.2)$$

donde:

$\Delta ES_{total}$ , es el cambio total de los servicios ambientales.

$Tasa_{extinción}$ , hace referencia al grado de daño estimado por las amenazas sobre el ecosistema.

$\Delta ES_{salinidad}$ , hace referencia al cambio que sufre el ecosistema por variaciones en la concentración de salinidad.

$\Delta ES_{h,u}$ , es el cambio debido al impacto de la profundidad de inundación y velocidad del flujo.

$\Delta ES_{dur}$ , es el factor de influencia de la duración de la inundación.

$\Delta ES_{sed/eros}$ , hace referencia a la afectación del manglar por acumulación de sedimentos en las raíces; o por erosión del terreno que ocupa.

IC, es el índice de calidad del ecosistema de manglar

a, b, c, d son pesos que incorporan la importancia relativa de cada factor en el cambio total de los servicios del ecosistema.

En los siguientes apartados se determina el nivel de afectación de cada factor de impacto sobre el ecosistema, en función de la distribución de las distintas especies de manglar en el área.

### Salinidad

En la Tabla 3.6 se muestra la categorización de las especies de manglar identificadas en Isla del Carmen por su respuesta a la salinidad, de acuerdo con la clasificación y parámetros establecidos en el Capítulo 2.

Género	Especies	Forma	Raíces sobre el suelo	Grupo	Pérdida funcionalidad salinidad $\geq 30$ ‰
Avicennia	<i>germinans</i>	T	P	0	0
Laguncularia	<i>racemosa</i>	S/T	k	4	0
Rhizophora	<i>mangle</i>	S/T	R	3	0.5

Forma: T=árbol; S=arbusto; P=palma; F=helecho  
 Raíces: R=raíces zancudas; P=neumatóforos; B=raíces tabulares/tablares; K=raíces en forma de rodilla

**Tabla 3.6. Clasificación de las especies de manglar en Isla del Carmen, por su respuesta a la salinidad.**

Así, con la información incluida en la Tabla 3.6 y conocida la especie dominante de cada clase de manglar se realiza la valoración de pérdida de funcionalidad en todo el ecosistema distribuido en la Isla (Tabla 3.7).

Tipología	Dominancia de especies	Pérdida funcionalidad salinidad $\geq 30$ ‰
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	0.5
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	0
Cuenca chaparro Ag, Rm	Dominados por Ag	0
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	0

**Tabla 3.7. Clasificación de la tipología de manglar en Isla del Carmen, por su respuesta a la salinidad.**

#### *Profundidad de inundación y velocidad del flujo*

Los parámetros de entrada al método propuesto (en el Capítulo 2) para evaluar la probabilidad de daño debido a las características del flujo de inundación son:

- Parámetros del manglar:  $H_R$  (altura de la raíz);  $d_T$  (diámetro del tallo)  $\rightarrow$  en función de la especie.

En cuanto al diámetro del tallo, no se conoce esta información en todo el manglar distribuido en Isla del Carmen pero se dispone de algunos valores medios localizados en el Estero Pargo (cuya ubicación se indica en Fig. 3.23) obtenidos de Villalobos-Zapata et al., 1999 (Tabla 3.8); y otros en Ciudad del Carmen (Marín & Martín, 2015), en Tabla 3.9.

Género	Especies	Raíces sobre el suelo	Diámetro promedio (cm)
Estero Pargo	<i>R. mangle</i>	R	5.1
	<i>A. germinans</i>	P	5.3
	<i>L. racemosa</i>	k	6.5

**Tabla 3.8. Diámetro promedio de especies de manglar en el Estero Pargo, en Isla del Carmen.**

Especies	Altura promedio (m)	Diámetro promedio (cm)
<i>R. mangle</i>	1.7	4
<i>A. germinans</i>	2.4	4
<i>L. racemosa</i>	3.5	6.2

**Tabla 3.9. Diámetro promedio de especies de manglar en Ciudad del Carmen.**

Los valores de diámetro presentados anteriormente se adoptan para los manglares con altura de hasta 6 m, mientras que para la clase de altura superior (6 a 8 m) se asigna un diámetro superior (10 cm).

En cuanto a la altura de las raíces, tampoco se dispone de esta información en Isla del Carmen por lo que se decide asignar una altura orientativa de 40 cm al género con raíces zancudas (*R. mangle*); 20 cm a los que disponen de neumatóforos (*A. germinans*); y 0 cm al resto con el fin de reflejar la resistencia a tensión relativa de las distintas especies propuesta por McKee, 1996 en función de la tipología de raíz.

Con base en lo presentado anteriormente, en la Tabla 3.10 se incluyen las características estructurales asumidas para las distintas clases de manglar en la Isla.

Tipología	Dominancia de especies	Altura de raíz (m)	Diámetro del tallo (m)
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	0.40	0.10
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	0.20	0.05
Cuenca chaparro Ag, Rm	Dominados por Ag	0.20	0.04
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	0.20	0.04

**Tabla 3.10. Características estructurales adoptadas en el manglar de Isla del Carmen.**

- Parámetros del flujo: h (altura de inundación): viene definida para cada escenario de simulación; u (velocidad del flujo): se asume una velocidad del flujo de 0.5 m/s.

#### *Periodo de inundación*

El tipo de adaptación de las raíces también es utilizado como parámetro para evaluar el impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema de manglar, como propuesto en el Capítulo 2. Asignando esta valoración de acuerdo con las distintas clases establecidas en la Isla, se obtiene una estimación de esta amenaza en toda la extensión de manglar (Tabla 3.11).

Tipología	Dominancia de especies	Raíces sobre el suelo	Valoración
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	Raíces zancudas	0
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	Neumatóforos	0.2
Cuenca chaparro Ag, Rm	Dominados por Ag	Neumatóforos	0.2
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	Neumatóforos	0.2

**Tabla 3.11. Evaluación del impacto del periodo de inundación sobre el ecosistema de manglar, de acuerdo al tipo de adaptación de las raíces.**

### Acumulación de sedimentos/erosión

En cuanto al posible impacto por acumulación de sedimento/erosión, la distribución de valores es uniforme en toda la superficie de manglar, al considerar únicamente el criterio dado por la posibilidad o no de que las especies desarrollen raíces aéreas como tipo de adaptación a esta amenaza (Tabla 3.12).

Tipología	Dominancia de especies	Raíces sobre el suelo	Valoración
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	Raíces zancudas	0
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	Neumatóforos	0
Cuenca chaparro Ag, Rm	Dominados por Ag	Neumatóforos	0
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	Neumatóforos	0

**Tabla 3.12. Evaluación del impacto de la acumulación de sedimento/erosión en el ecosistema de manglar.**

### Índice de calidad del ecosistema

En la Tabla 3.13 se muestra la puntuación asignada de acuerdo al estado de conservación o degradación del ecosistema en las clases establecidas en Isla del Carmen.

Tipología	Dominancia de especies	Estado de conservación	Puntuación
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	Buena condición ecológica	1.4
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	Buena condición ecológica	1.4
Cuenca chaparro Ag, Rm	Dominados por Ag	Regular condición ecológica	1.2
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	Mala condición ecológica	1
Sano: 1   Parcialmente degradado: 0.75   Degradado: 0.5			

**Tabla 3.13. Valoración del parámetro índice de calidad (IC) del ecosistema, por su estado antes de ser amenazado.**

### Importancia relativa de los factores de impacto en el cambio total de los servicios del ecosistema

Con base en los valores propuestos para los pesos (a, b, c y d) en el Capítulo 2, en la Tabla 3.14 se incluye la puntuación para las distintas tipologías de manglar en la Isla.

Tipología	Dominancia de especies	Raíces sobre el suelo	a	b	c	d
Franja o cuenca Rm, Lr, Ag	Dominados por <i>Rhizophora mangle</i> (Rm) y <i>Laguncularia</i> (Lr)	Raíces zancudas	0.25	0.25	0.25	0.25
Franja o cuenca Ag	Dominados por <i>Avicennia germinans</i> (Ag)	Neumatóforos	0.25	0.30	0.20	0.25
Cuenca chaparero Ag, Rm	Dominados por Ag	Neumatóforos	0.25	0.30	0.20	0.25
Cuenca baja densidad Ag	Dominados por Ag (baja densidad)	Neumatóforos	0.25	0.30	0.20	0.25
Raíces zancudas: a (0.25)   b (0.25)   c (0.25)   d (0.25) Neumatóforos: a (0.25)   b (0.30)   c (0.20)   d (0.25) Raíces tabulares: a (0.25)   b (0.30)   c (0.20)   d (0.25) Raíces en forma de rodilla: a (0.25)   b (0.25)   c (0.25)   d (0.25) Sin raíz aérea: a (0.25)   b (0.25)   c (0.25)   d (0.25)						

**Tabla 3.14. Valores asignados a los pesos, en función del tipo de raíz de las especies de manglar.**

### 3.3. Evaluación de riesgos en Cancún

#### 3.3.1. Análisis de elementos ‘Fuente’

Isla del Carmen y Cancún son afectados por los fenómenos naturales de forma similar y, por tanto, las fuentes de riesgo consideradas en Cancún son también el oleaje, el viento y la marea de tormenta. En el Anexo II se incluye la descripción de las bases de datos; los parámetros analizados; y del montaje y aplicación del método Monte Carlo.

El escenario de riesgo seleccionado trata de reproducir la ocurrencia, en los próximos 10 años, de un evento con las características de oleaje y nivel del mar más desfavorables registradas durante el paso del huracán Wilma (Octubre de 2005). Éstas son, de acuerdo con datos de reanálisis de oleaje y viento a 50 m de profundidad (Silva et al., 2007):  $H_s=12.5$  m;  $T_p=13.9$  s;  $Mareatormenta=2.5$  m; Dirección:  $142^\circ$  (medido en sentido horario desde el Norte); Duración=21 h.

La Fig. 3.27 muestra los resultados de la simulación Monte Carlo para la altura de ola significativa, en escenario de los próximos 10 años.

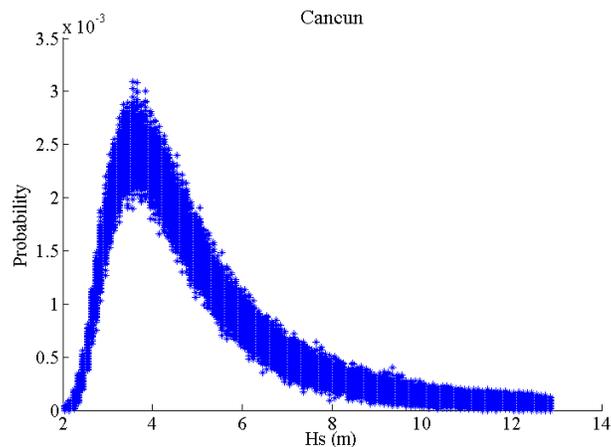
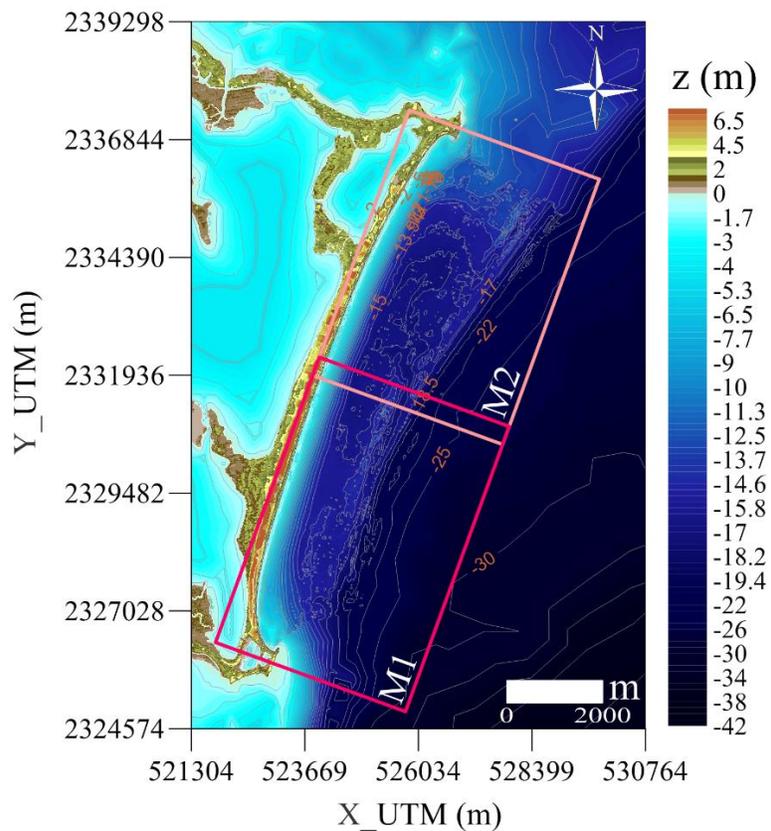


Figura 3.27. Resultados Monte Carlo para la altura de ola significativa, en los próximos 10 años.

### 3.3.2. Análisis de elementos ‘Trayectoria’

Las fuentes de peligro frente a la costa de Cancún se obtienen a una profundidad de 50 m; y éstas son propagadas hasta el receptor mediante la utilización de dos modelos numéricos (XBeach y Kalypso 2D), Fig. 3.2.

XBeach se utiliza para aproximar el oleaje hasta la playa mediante la construcción de dos mallas concatenadas: una malla definida por un falso fondo de pendiente 1/50, con resolución de 40x40 m, desde una profundidad de 50 m hasta 30 m; y una malla de detalle desde ésta hasta el límite exterior de la playa, con una resolución de 10 x 20 m (en x e y; direcciones perpendicular y paralela a la costa, respectivamente). En la Fig. 3.28 se muestra la disposición de las 2 mallas de detalle necesarias para cubrir todo el litoral de Cancún.



**Figura 3.28.** Mallas de detalle utilizadas en la aplicación del modelo numérico XBeach en la isla barrera de Cancún.

Para la aplicación de Kalypso 2D, se definen 10 zonas de rugosidad de acuerdo con los usos del suelo en el área (Fig. 3.29). En la Tabla 3.15 vienen especificados los valores de rugosidad asignados en cada clase.

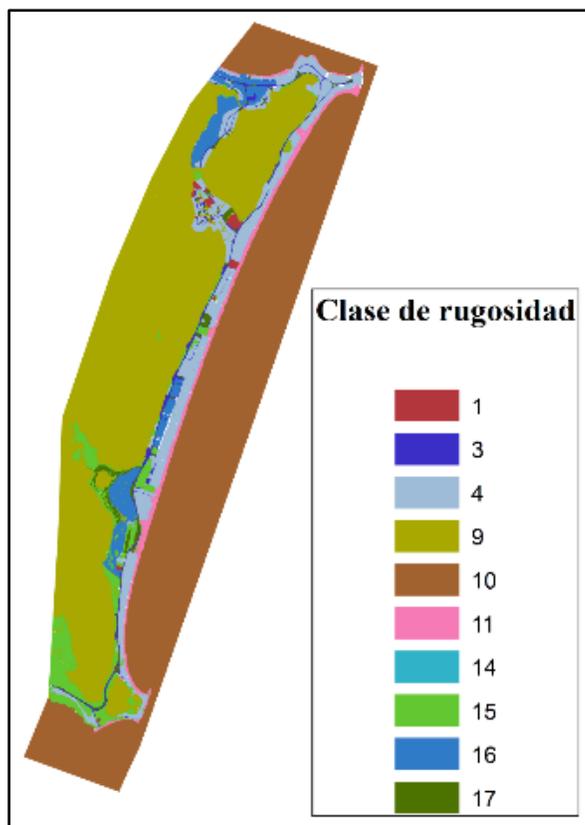


Figura 3.29. Zonificación en la isla barrera de Cancún de acuerdo con las distintas clases de rugosidad establecidas.

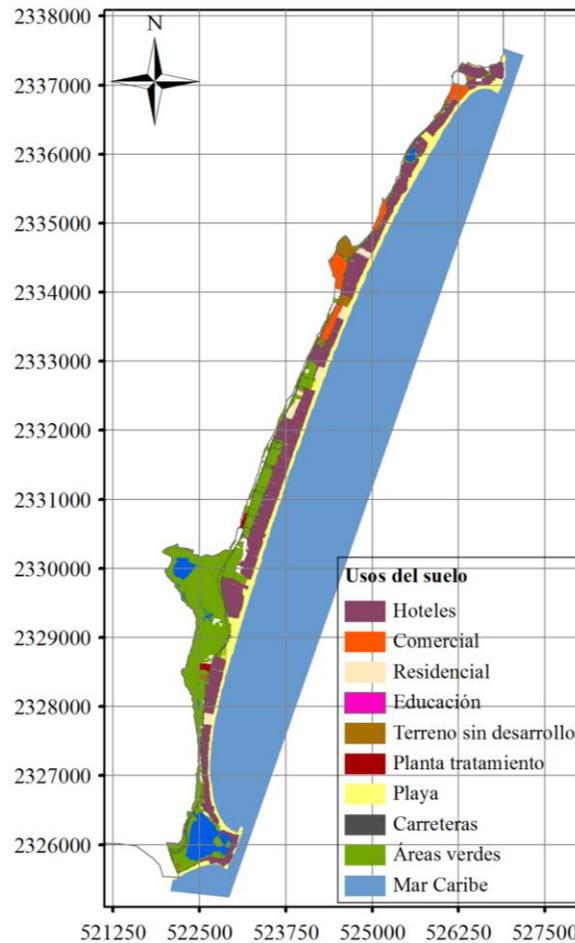
Clase de rugosidad	Categoría	ks (m)
1	Terreno no urbanizado	0.2
3	Asfalto	0.05
4	Hormigón	0.013
9	Lagos	0.12
10	Mar	0.12
11	Playa	1.50E-04
14	Selva	0.24
15	Manglar	0.24
16	Pastizal Cultivado	0.003
17	Otro Tipo Vegetación	0.2

Tabla 3.15. Coeficientes de rugosidad definidos para cada clase.

Al igual que en Isla del Carmen, los archivos de salida de Kalypso 1D2D son convertidos a formato celda mediante la utilización de las herramientas de geoprocésamiento de ArcMap.

### 3.3.3. Análisis de las ‘Consecuencias’ sobre el ‘Receptor’

La Fig. 3.30 muestra la distribución de usos del suelo en la isla barrera de Cancún, donde se observa la alta concentración de desarrollo turístico en el área.



**Figura 3.30. Distribución de usos del suelo en la isla barrera de Cancún.**

En Cancún, se evalúan los daños físicos sobre la infraestructura social y bienes de la zona hotelera; y la dificultad de recuperación después de la inundación (Fig. 3.31).

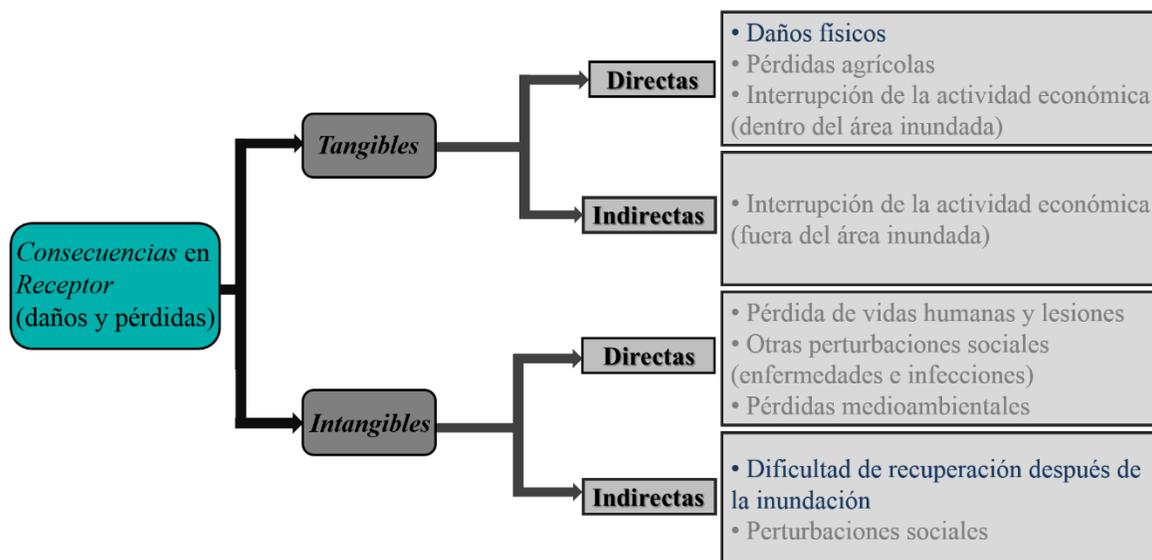


Figura 3.31. Categoría de pérdidas analizadas en Cancún (en azul).

El interés en la evaluación de estas clases de daños se debe a su importancia en el área; pues la eficacia de las medidas de evacuación, ya comprobada (el área fue evacuada dos días antes de la llegada del huracán Wilma), minimiza la posibilidad de pérdida de vidas, lesiones y problemas en la salud derivados de los eventos de inundación.

- Daños físicos (infraestructura social y bienes de la zona hotelera)

Se evalúan los daños físicos en el sector turístico de la zona hotelera mediante la construcción de funciones de daños. Estas curvas (Fig. 3.32) se construyen tomando como base las funciones del proyecto CORFU, 2012 (Hammond et al., 2014) y adaptándolas al caso de Cancún con los siguientes datos de daños ocasionados por el huracán Wilma:

(1) Valoración de los daños directos en infraestructura turística en el estado de Quintana Roo (millones de pesos).

(2) N° de cuartos de hotel en el estado y en la zona hotelera de Cancún → Estimación de pérdidas en Cancún.

(3) N° hoteles en Cancún → Estimación de pérdidas en Cancún por hotel.

(4) Superficie media en planta de un hotel en Cancún, suponiendo que los daños se producen en la planta baja → Estimación de pérdidas por m<sup>2</sup> de hotel en Cancún.

(5) Asignación de las pérdidas para una altura de inundación aproximada de 2 m (considerando la marea de tormenta estimada).

Se tienen evidencias que el nivel del agua alcanzó una altura entre 5 y 8 m, según información proporcionada por el servicio meteorológico nacional; y llegó hasta el tercer piso de los hoteles.

([http://www.lavozdegalicia.es/internacional/2005/10/22/0003\\_4184607.htm](http://www.lavozdegalicia.es/internacional/2005/10/22/0003_4184607.htm))

Con estos datos se estiman los daños por  $m^2$  para una altura de inundación de 2 m, y se asigna a la categoría de hotel de 3 estrellas. La diferencia para el resto de categorías (en función de la posible variación de la calidad y valor de los bienes, y material de construcción de los edificios) se establece en función de la diferencia en la tarifa media anual ofrecida por cada categoría de hotel (AHC, 2008).

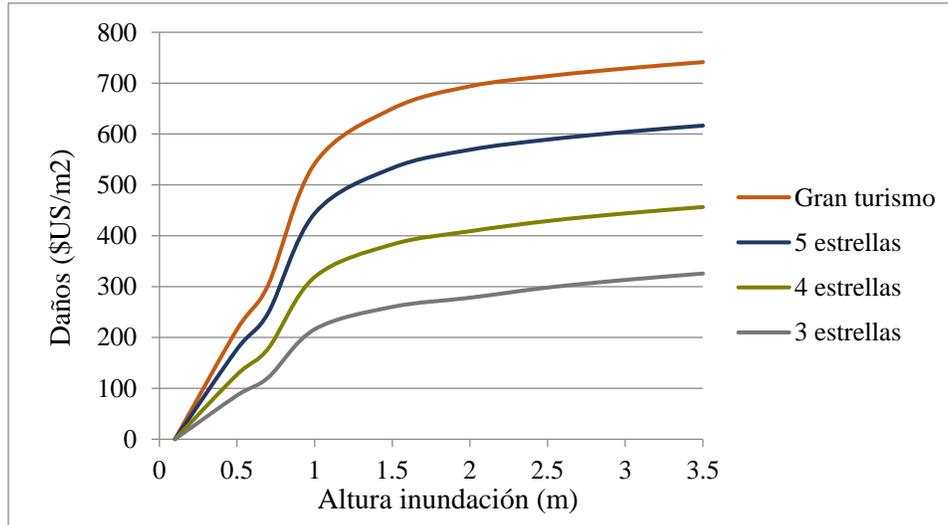
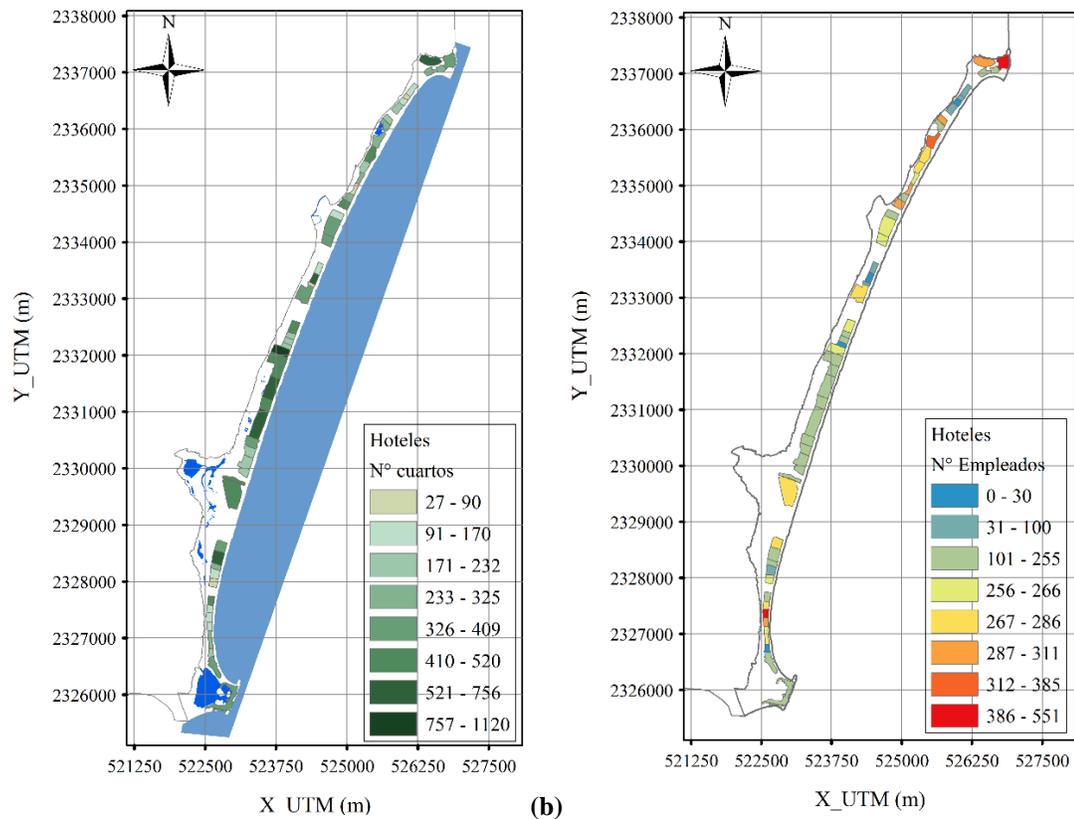


Figura 3.32. Curvas de daños definidas en el sector turístico de Cancún.

Se asume que una altura de inundación inferior a 10 cm no causa ningún daño y, por tanto, las curvas son cero desde este valor.

- Dificultad de recuperación después de la inundación

La resiliencia en el sector turístico se evalúa con base en la distribución de dos parámetros (definidos en el Capítulo 2): el número de cuartos y el número de empleados en cada hotel. En la Fig. 3.33 se muestra la distribución espacial de estos parámetros en el área, obtenida de información de los hoteles y del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas del año 2012 (DENUE) proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).



**Figura 3.33. Distribución de parámetros de resiliencia del sector turístico de Cancún: (a) N° cuartos en los hoteles; (b) N° empleados de los hoteles.**

## **Capítulo 4**

### **EVALUACIÓN DE RIESGOS EN ISLA DEL CARMEN Y CANCÚN. RESULTADOS**

---



## Capítulo 4

### EVALUACIÓN DE RIESGOS

#### EN ISLA DEL CARMEN Y CANCÚN. RESULTADOS

##### 4.1. Evaluación de riesgos en Isla del Carmen

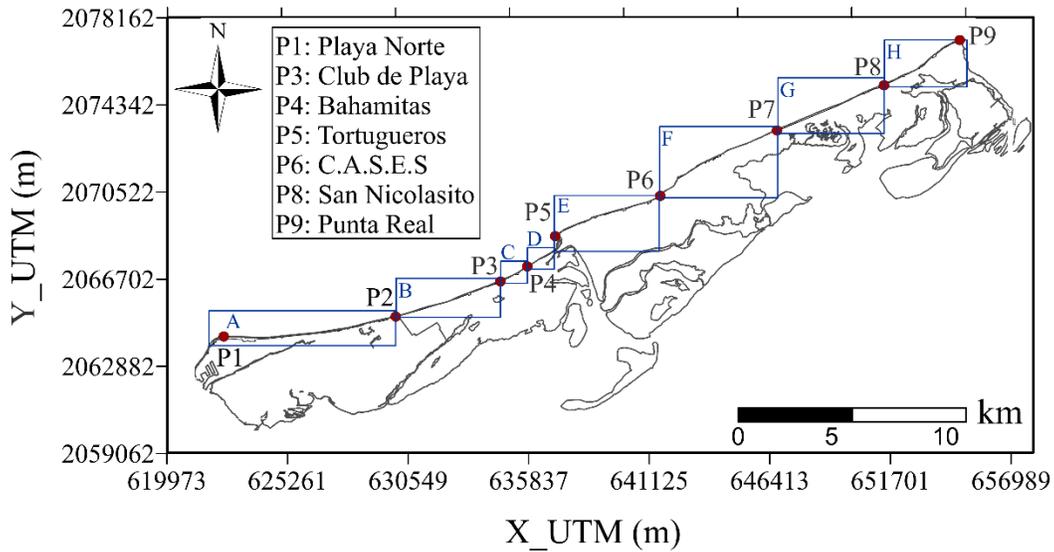
###### 4.1.1. Análisis del peligro de erosión e inundación

En el Anexo III se incluyen los resultados de altura de erosión e inundación en la playa para cada escenario de simulación. Como se comentó en el Capítulo 3, la altura de erosión se analiza únicamente en el área de playa seca; mientras que la altura de inundación se propaga desde el límite exterior de ésta hacia tierra adentro sobre los dos receptores de peligro considerados en la Isla.

###### *Peligro de inundación*

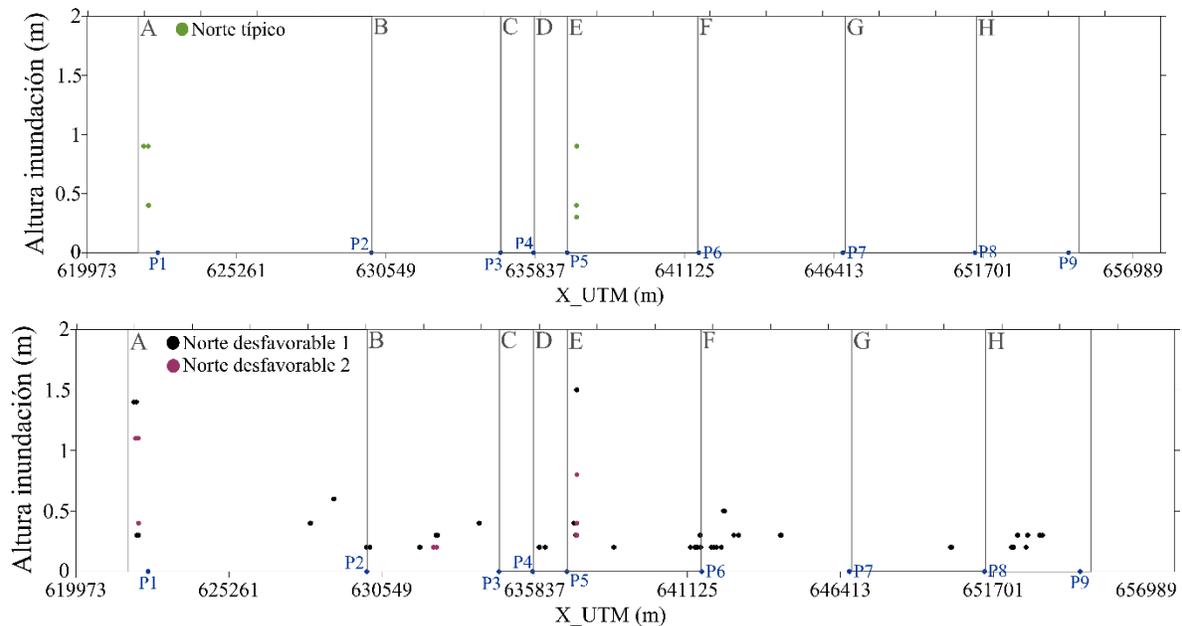
- Altura de inundación en la playa

La visualización de los resultados se realiza mediante 8 mallas distribuidas a lo largo del litoral. Algunas de estas mallas son delimitadas por la ubicación de playas populares identificadas en la zona (Fig. 4.1).

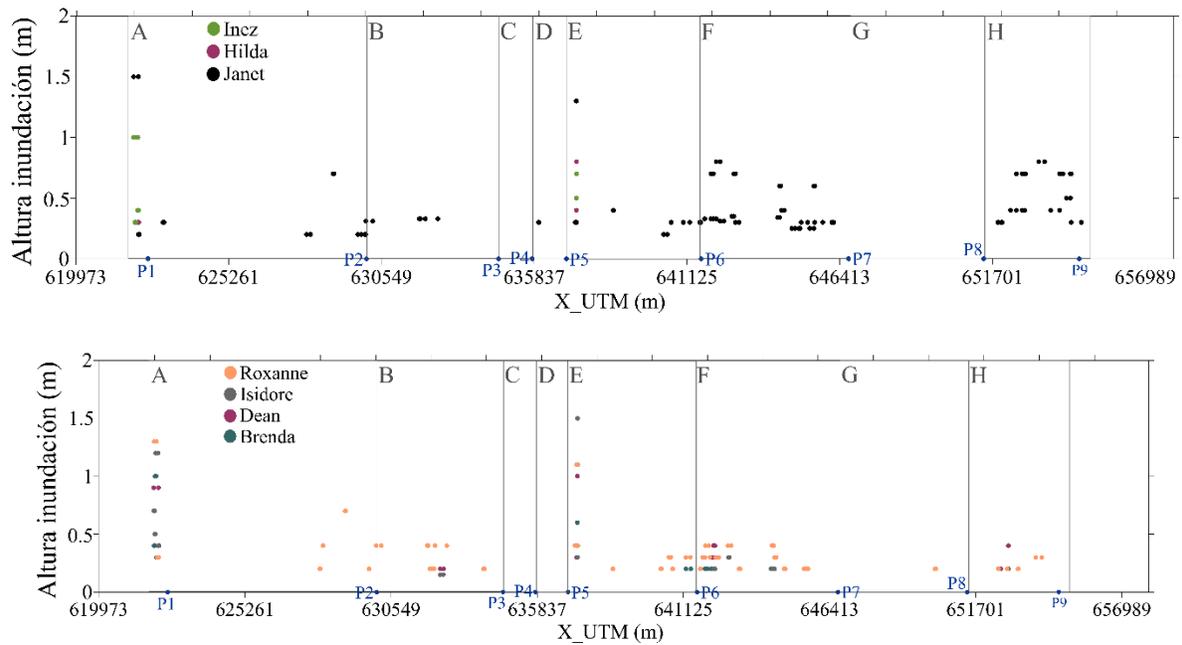


**Figura 4.1.** Mallas de detalle para análisis de resultados en Isla del Carmen. Ubicación de playas populares.

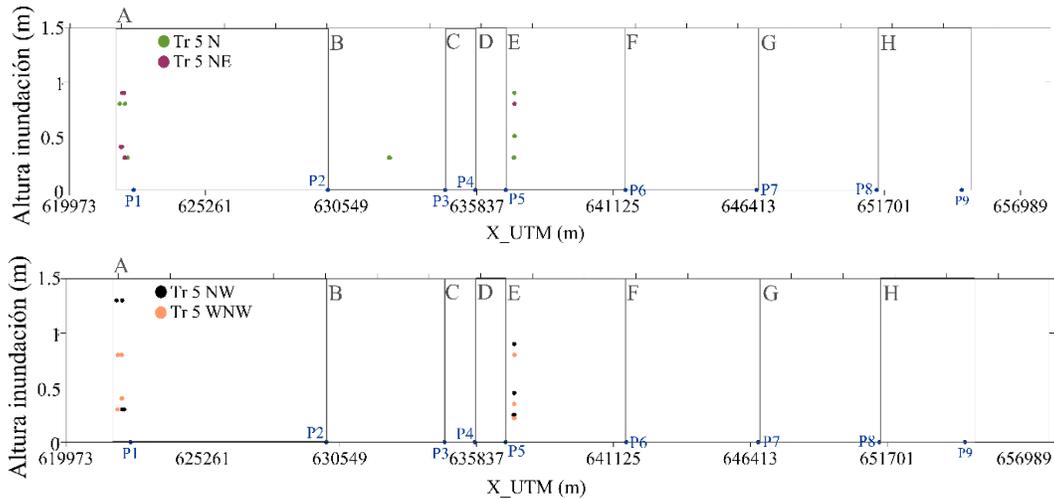
En las Fig. 4.2-4.8 se muestran las profundidades de inundación en el límite tierra adentro de la playa para cada escenario de simulación. Estos resultados, junto con la consideración de la cota topográfica en cada sección del litoral, son utilizados como datos de entrada del modelo de inundación.



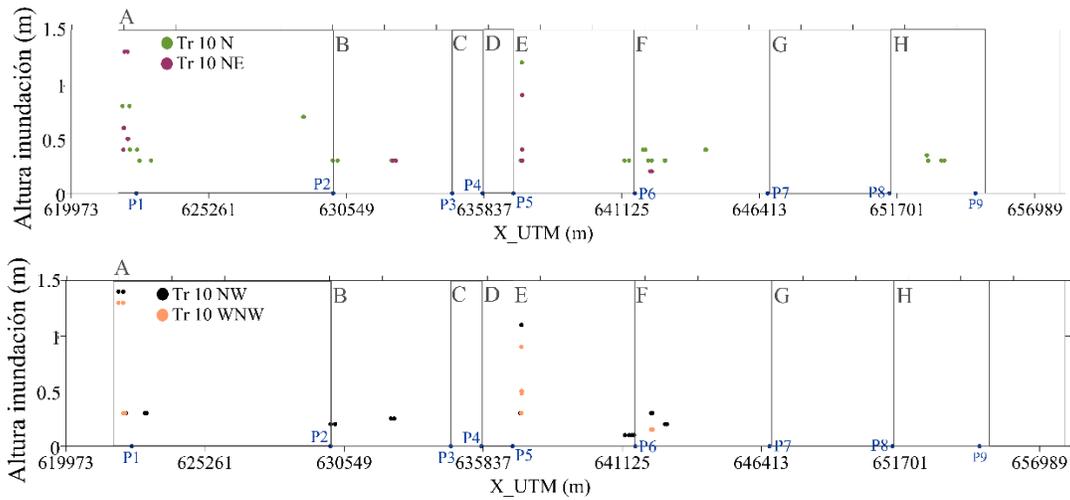
**Figura 4.2.** Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados de “Nortes”.



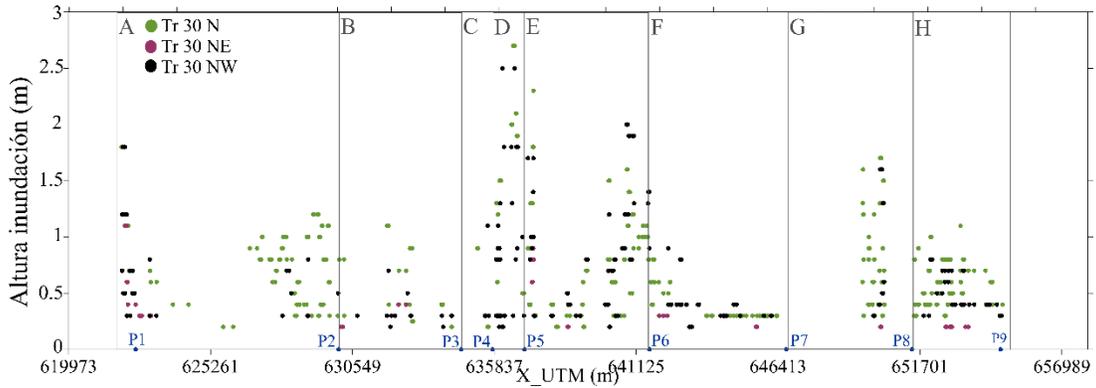
**Figura 4.3. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados de huracanes.**



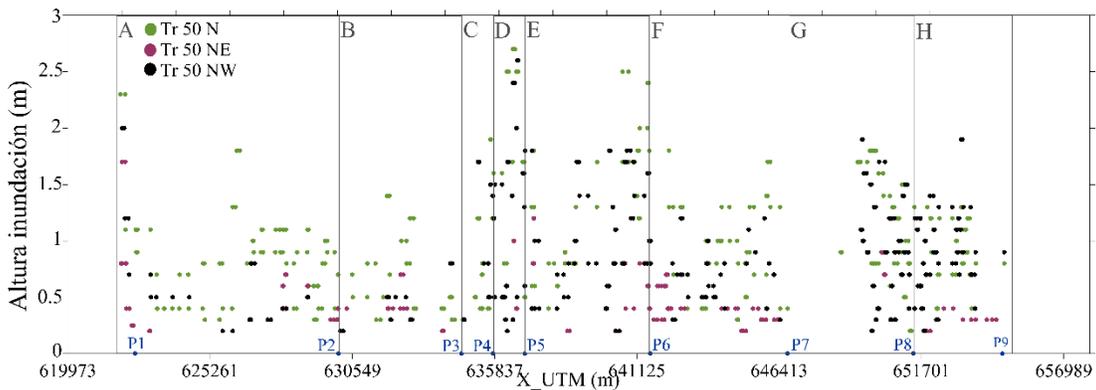
**Figura 4.4. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 5 años.**



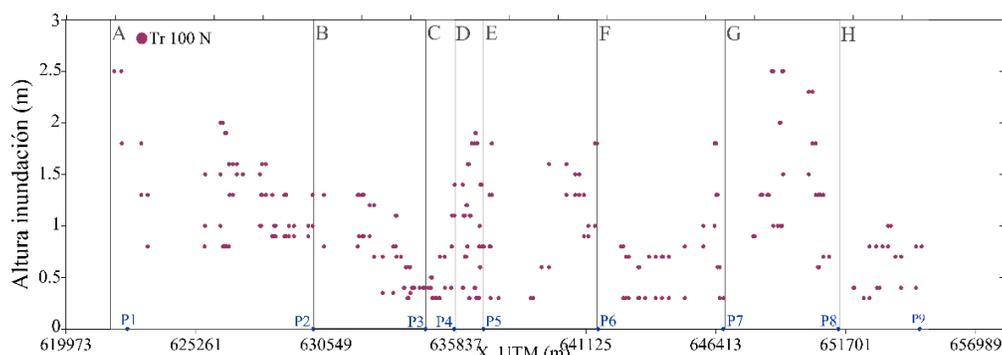
**Figura 4.5.** Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 10 años.



**Figura 4.6.** Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 30 años.



**Figura 4.7.** Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para los casos simulados asociados a periodo de retorno de 50 años.



**Figura 4.8. Altura de inundación en el límite exterior de la playa seca, para el escenario seleccionado para un periodo de retorno de 100 años.**

En general, se observa que playa Norte y Tortugueros son áreas afectadas en todos los escenarios. Durante los nortes que con mayor frecuencia ocurren (Norte Típico, con Hrms en torno a 2 m y marea de tormenta media de 0.3 m) estas dos playas parecen ser las únicas afectadas; mientras que en condiciones de nortes más desfavorables (Norte desfavorable 1/Norte desfavorable 2, con Hrms de 5 m y marea de tormenta de 0.4 a 0.8 m) la inundación se extiende a otras áreas con una profundidad media en torno a 0.5 m.

De los escenarios de huracanes seleccionados, el Huracán Roxanne y el Huracán Janet son los que ocasionan peligro de inundación en una mayor extensión debido a la mayor marea de tormenta asociada (de 0.4 a 0.8 m). Se produce una inundación media de 0.5 a 0.8 m en varias secciones del litoral y una altura de inundación máxima de 1 a 1.5 m en playa Norte y Tortugueros.

En cuanto a los eventos asociados a los diferentes periodos de retorno, los resultados correspondientes a periodo de retorno de 5 años son similares a los del norte Típico. Los eventos de periodo de retorno de 10 años presentan inundación en diferentes secciones del litoral, en orden decreciente de intensidad de peligro en direcciones NE, NW y WNW, destacando también las zonas de playa Norte y Tortugueros por su mayor afectación. Las áreas afectadas por los escenarios de periodos de retorno de 30 y 50 años son similares en las diferentes direcciones (N, NW y NE, de mayor a menor intensidad de peligro), entre las que se encuentran playa Norte, tramo de playa comprendido en mallas D y E y área junto a playa San Nicolasito (malla G). Por último, el escenario de simulación asociado a un periodo de retorno de 100 años muestra mayor profundidad de inundación frente a Ciudad del Carmen (altura de inundación de 1.5 m a 2 m), en el litoral entre playa Bahamitas y Tortugueros (malla D, con inundación máxima de 2 m) y alrededor de playa San Nicolasito (malla G, con una inundación máxima de 2.5 m).

En los Anexos IV y V se incluyen los resultados de la inundación propagada en Ciudad del Carmen y sobre el manglar de Isla del Carmen para cada escenario de simulación. La altura de inundación sobre el manglar, por las dimensiones del área, finalmente fue

obtenida como diferencia entre el nivel de la lámina de agua en el límite de la playa y los datos de elevación del terreno.

### ***Peligro de erosión***

El análisis de los resultados de erosión en la playa (Anexo III), obtenida en términos de altura de erosión como la diferencia entre la cota de elevación del terreno inicial y la correspondiente al instante final de la modelación numérica con XBeach, muestra varias zonas afectadas en la mayoría de los eventos de simulación analizados. Se obtiene una erosión máxima en torno a 0.2-0.4 m en el escenario de norte típico, y de 0.8 m debido a los nortes con características más desfavorables; de 1 a 2 m en algunos eventos de huracanes; y de 3 y 3.6 m para los eventos de periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente.

En las Tablas 4.1-4.5 se incluyen las zonas afectadas por erosión en cada escenario, y las secciones donde ésta se produce con mayor intensidad.

Evento	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pmed</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT (m)	A	B	C	D	E	F	G	H
Norte Típico	2.3	11.5	325	0.3	x	x	x	x	x	x		x
					playa Norte	630008- 631157 633000- 634600	Gen	Gen	Tortu	641571- 642000		
Norte Desf1	4.8	10.4	327	0.4	x	x	x	x	x	x	x	x
				0.8	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
Norte Desf2	4.9	8.5	8.4	0.2	x	x	x		x			
				0.3	playa Norte	633000- 634600	635100- 635787		Tortu			

\*Nota: Gen (General en todo el tramo); Tortu (playa Tortugueros).

**Tabla 4.1. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios simulados de Nortes.**

Evento	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pmed</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT (m)	A	B	C	D	E	F	G	H
Brenda	5	10	354	0.3	x	x	x	x	x	x	x	x
				0.5	playa Norte	633000-634600	Gen	Gen	Tortu		649500-651400	
Dean	6.8	9.8	0	0.1	x	x	x	x	x			x
				0.4	playa Norte	633000-634600	Club Playa	636000	Tortu			654300-Punta Real
Inez	2.5	8	328	0.1	x				x			
					playa Norte				Tortu			
Hilda	4	7.5	340	0.2	x				x			
				0.3	playa Norte				Tortu			

**Tabla 4.2. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de huracanes Brenda, Dean, Inez y Hilda.**

Evento	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pmed</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT (m)	A	B	C	D	E	F	G	H
Isidore	4.6	8	306	0.1	x	x	x	x	x	x		x
				0.3	playa Norte	633000-634600	Gen	Gen	Tortu	642000		654300-Punta Real
Janet	7.7	10.5	32	0.5	x	x	x	x	x	x	x	x
				0.8	playa Norte				Tortu		650000-652000	654300-Punta Real
Roxanne	4.7	13.6	326	0.4	x	x	x	x	x	x	x	x
				0.8	playa Norte	631157-632000 628813	633000-634600	635000	636377-636967	Tortu-639000	642000	

**Tabla 4.3. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de huracanes Isidore, Janet y Roxanne.**

Evento Tr (años)	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pm</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT (m)	A	B	C	D	E	F	G	H
5	4.5	8	N-NE- NW- WNW	0.25- 0.45	x		x	x	x			
					playa Norte		635000- 635787	636000- 636500	Tortu			
10	5.4	9	N-NE- NW- WNW	0.35- 0.60	x	x	x	x	x			
					playa Norte 627813- 629813		Gen	Gen	Tortu			

**Tabla 4.4. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de periodos de retorno de 5 y 10 años.**

Evento Tr (años)	H <sub>rms</sub> (m)	T <sub>pm</sub> (s)	Dir <sub>med</sub> (°N)	MT (m)	A	B	C	D	E	F	G	H
30	7.4	10.5	N-NE- NW	0.67-1	x	x	x	x	x	x	x	x
					playa Norte 626813- 629813	633000- 634600	Gen	Gen	Tortu	642000	649000- 651430	651432- 652200 652890- 653600 654000- Puerto Real
50	8.5	11	N-NE- NW	0.85- 1.28	x	x	x	x	x	x	x	x
					playa Norte- 623813 626813- 629813	631000- 632000 633000- 634600	Gen	Gen	Tortu	641571- 644107	649564- 651430	651432- 652200 652890- 653600 654000- Puerto Real
100	10.2	12	N	1.8	x	x	x	x	x	x	x	x
					Similar distribución que Tr= 50 años pero con mayor intensidad de erosión							

**Tabla 4.5. Zonas de playa afectadas por erosión en los escenarios de periodos de retorno de 30, 50 y 100 años.**

Es notable el incremento observado de la erosión con un aumento del periodo de oleaje y de la marea de tormenta. Para cada periodo de retorno, las zonas identificadas con mayor altura de erosión son similares en las distintas direcciones, y ésta aumenta con la intensidad

de la marea de tormenta del escenario en cuestión (marea de tormenta decreciente en direcciones N, NW, NE y WNW).

Se identifican varias zonas afectadas en la mayoría de los eventos de simulación. Éstas son: playa Norte, (X\_UTM entre 633000 y 634000), litoral contenido en mallas C y D y playa Tortugueros.

Las secciones de playa que han resultado más afectadas mediante simulación coinciden con las conclusiones del análisis realizado de historia de erosión a partir de fotografía aérea e imágenes satelitales (Escudero M. et al., 2014), cuyos resultados se adjuntan como parte del Anexo X. La comparación de los resultados de modelación del huracán Roxanne y el análisis de imágenes de video tomadas después del paso del fenómeno desde un helicóptero (Anexo X) muestra similares zonas afectadas por una mayor erosión, aunque la simulación no permite reproducir tan claramente la acumulación de sedimentos como la pérdida del mismo.

Aunque la playa Tortugueros ha sido identificada como una de las zonas amenazadas por erosión en todos los escenarios de simulación, otro análisis de evolución de línea de costa realizado en particular en esta playa (Anexo X) muestra un comportamiento cíclico de la evolución de la línea de costa en un periodo de 28 años (de 1985 a 2013).

En el siguiente apartado se analizan las consecuencias asociadas a estos peligros mediante la aplicación de la metodología y modelos descritos en los Capítulos 2 y 3.

#### 4.1.2. Análisis de consecuencias

##### *Ciudad del Carmen*

En la Fig. 4.9 se muestran las categorías de daños y/o pérdidas contempladas Ciudad de Carmen.

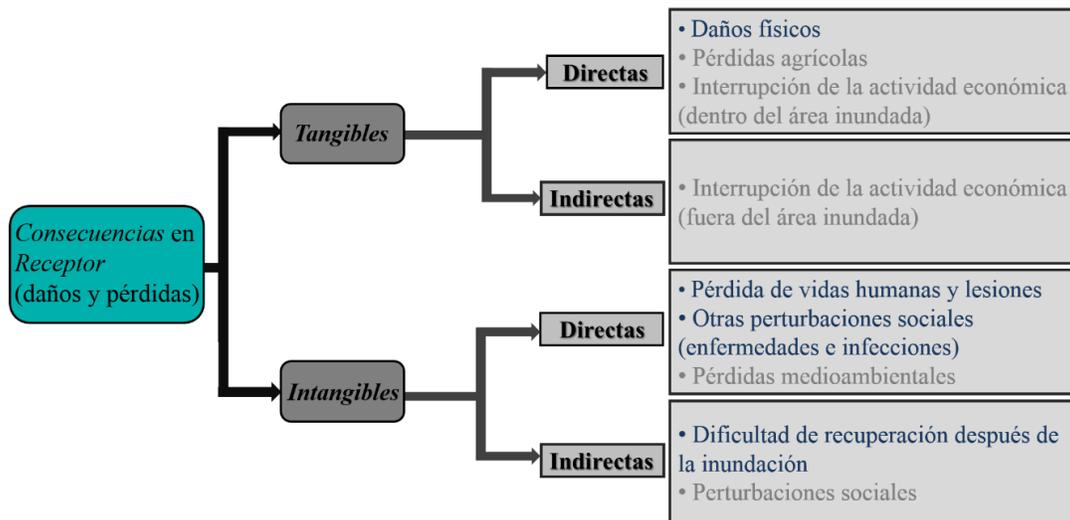
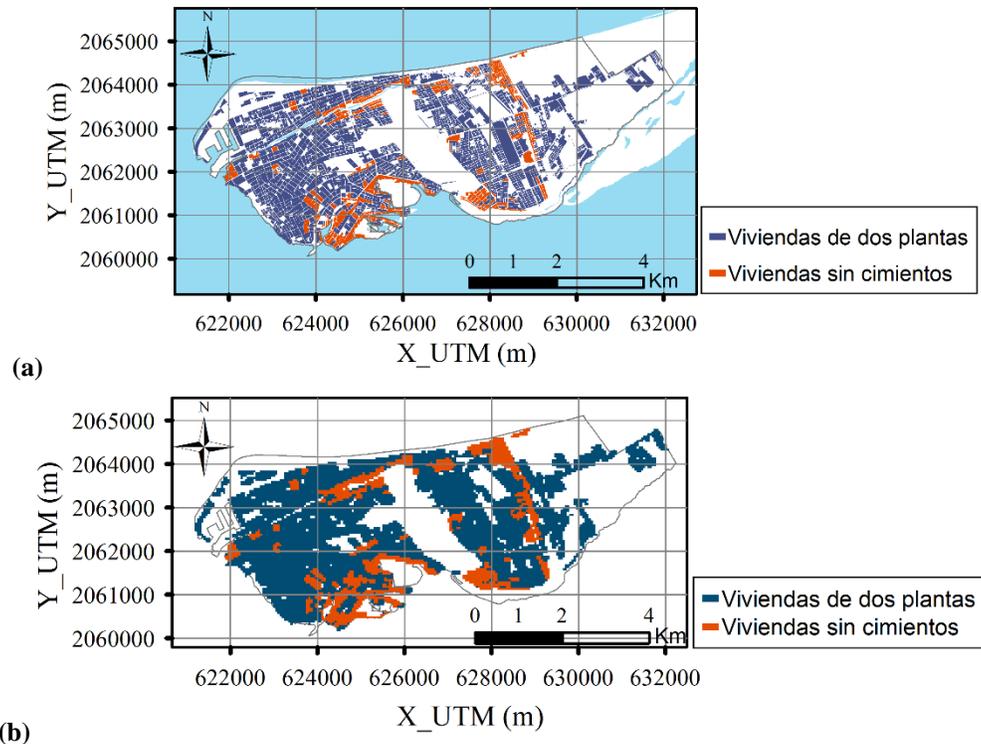


Figura 4.9. Categorías de daños/pérdidas analizadas en Ciudad del Carmen (en azul).

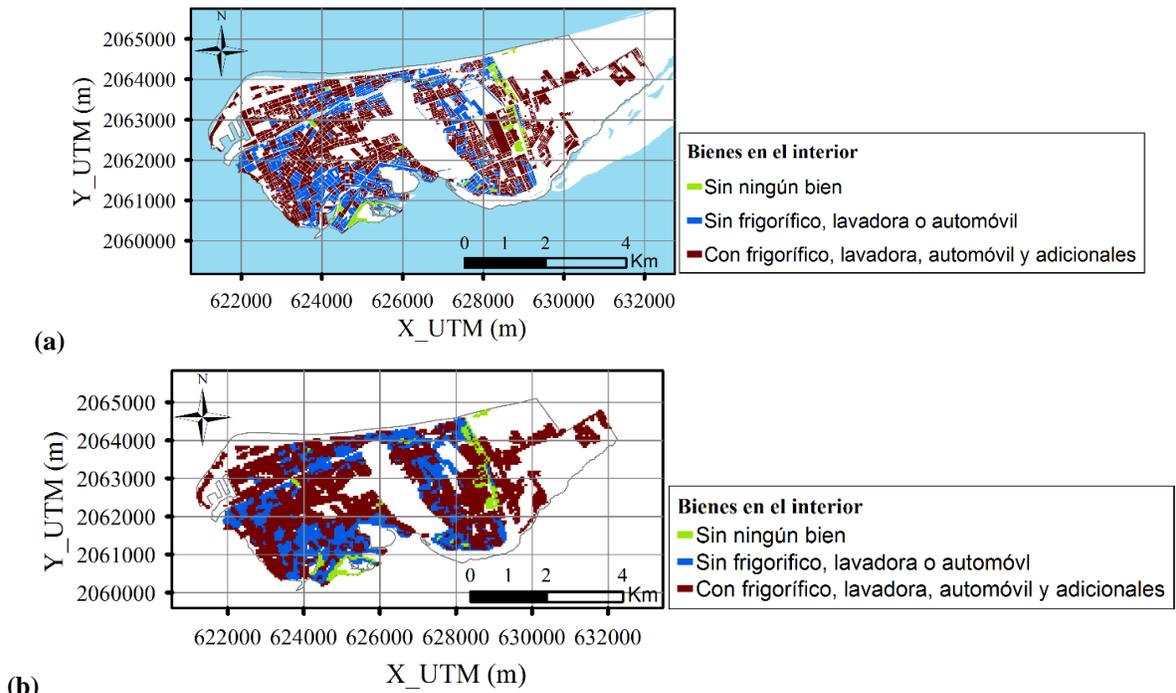
- Daños físicos (edificios y bienes)

La Fig. 4.10 muestra la distribución de los dos edificios-tipo definidos en Ciudad del Carmen, por manzanas (Fig. 4.10a) y en formato celda de 50 m (Fig. 4.10b).

Para la evaluación de los daños físicos sobre los bienes en el interior de las viviendas, la distribución de clases de pérdidas establecidas (Fig. 4.11a) son transferidas también a formato celda (Fig. 4.11b).



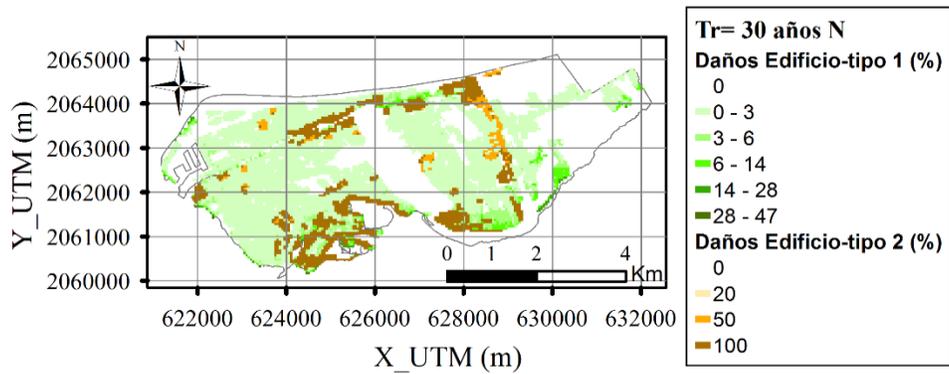
**Figura 4.10. Edificios-tipo definidos en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos en formato celda 50 m.**



**Figura 4.11. Clases de pérdidas económicas de acuerdo con la cantidad y naturaleza de los bienes en el interior de las viviendas: (a) datos por manzana; (b) datos en formato celda 50 m.**

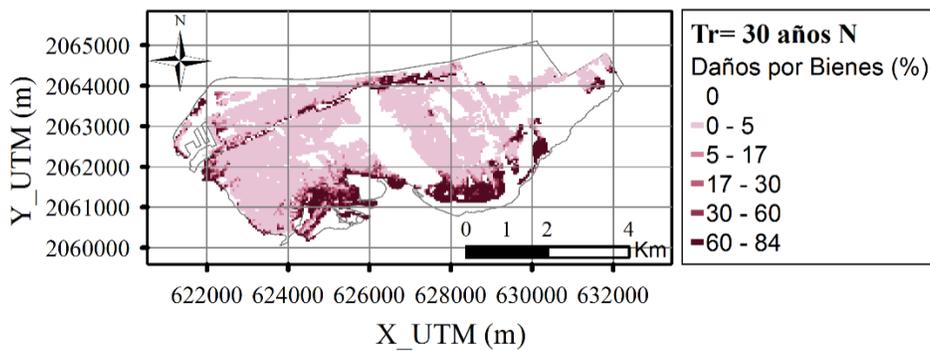
Mediante la aplicación de las curvas de daños definidas en el Capítulo 3 y la altura de inundación asociada a cada escenario de simulación se obtiene una estimación de la distribución de los daños físicos en Ciudad del Carmen por la ocurrencia de eventos con características similares a los analizados. En el Anexo VI se incluyen estos resultados, entre los que destacan varios eventos que producen daños únicamente en el extremo más occidental, junto a la Marina, como son nortes típicos o eventos de periodo de retorno de 5 años (en todas direcciones) y periodo de retorno de 10 años (en direcciones NE, NW y WNW); y otros fenómenos que ocasionan también daños en el extremo más oriental, como son los huracanes Janet, Roxanne, norte desfavorable 1 y eventos de periodos de retorno de 10 años en dirección Norte.

En las Fig. 4.12 a Fig. 4.17 se muestran los resultados correspondientes a los casos simulados que producen daños físicos en prácticamente toda la ciudad; éstos son los asociados a periodos de retorno de 30, 50 y 100 años, en dirección Norte.

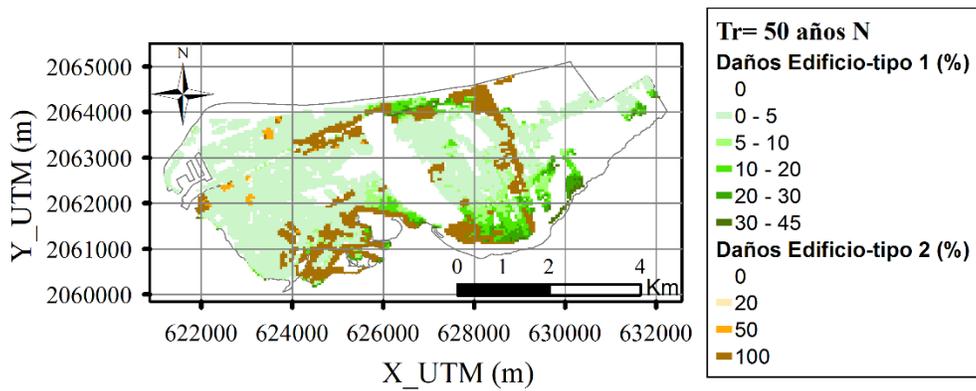


\*Nota: Edificio-tipo 1 (viviendas de dos plantas); Edificio-tipo 2 (viviendas sin cimientos).

**Figura 4.12. Daños físicos a edificios- Tr= 30 años N.**



**Figura 4.13. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas - Tr= 30 años N.**



**Figura 4.14. Daños físicos a edificios- Tr= 50 años N.**

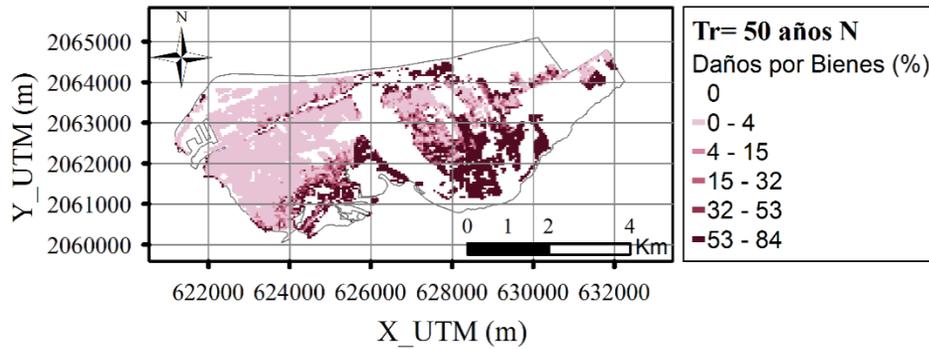


Figura 4.15. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas- Tr= 50 años N.

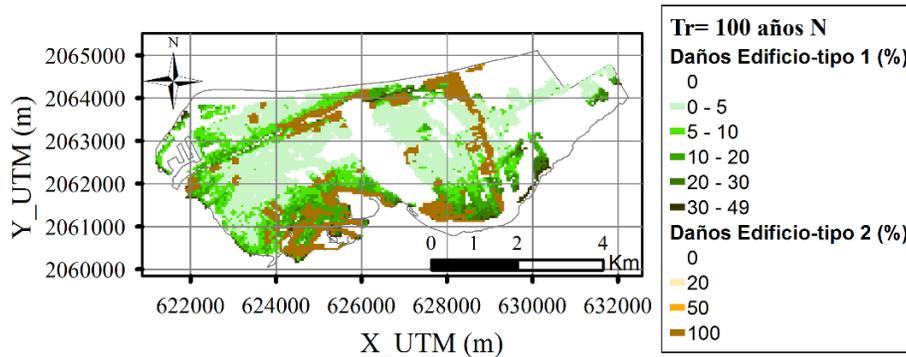


Figura 4.16. Daños físicos a edificios- Tr= 100 años N.

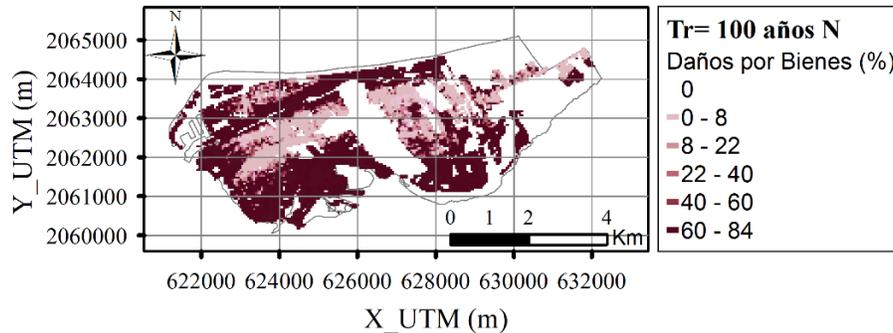


Figura 4.17. Daños físicos a bienes en el interior de las viviendas- Tr= 100 años N.

Se observa una mayor concentración de daños en la zona sur de Ciudad del Carmen, junto al arroyo La Caleta y en los alrededores de la Marina debido a una mayor altura de inundación y la presencia de edificios en condiciones precarias.

- Otras perturbaciones sociales (enfermedades e infecciones)

La Fig. 4.18 muestra el área de influencia considerada (en formato celda de 50 m), por las fuentes de contaminación representadas en la Fig. 4.19, en el análisis de posibles problemas de salud sobre los ocupantes de las viviendas en el área por contacto directo con agua de inundación contaminada.

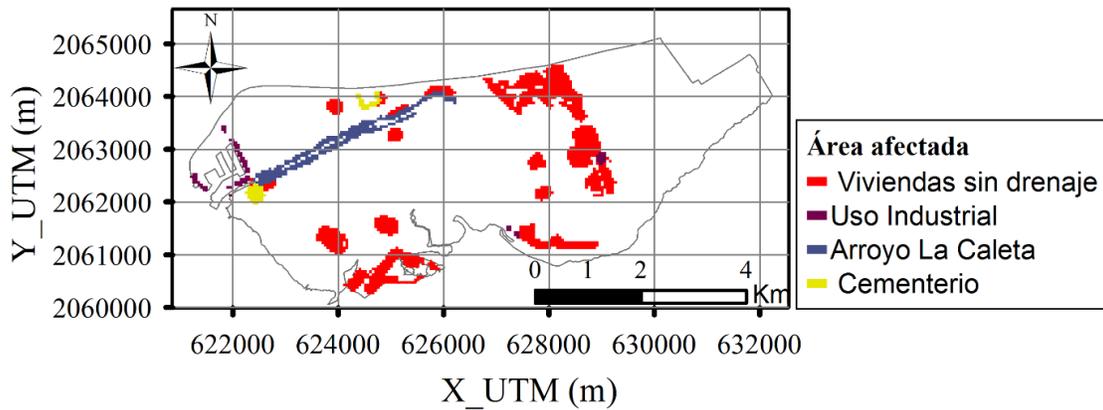


Figura 4.18. Área considerada en el análisis de posibles problemas de salud por contacto directo con agua contaminada de inundación (datos en formato celda 50 m).

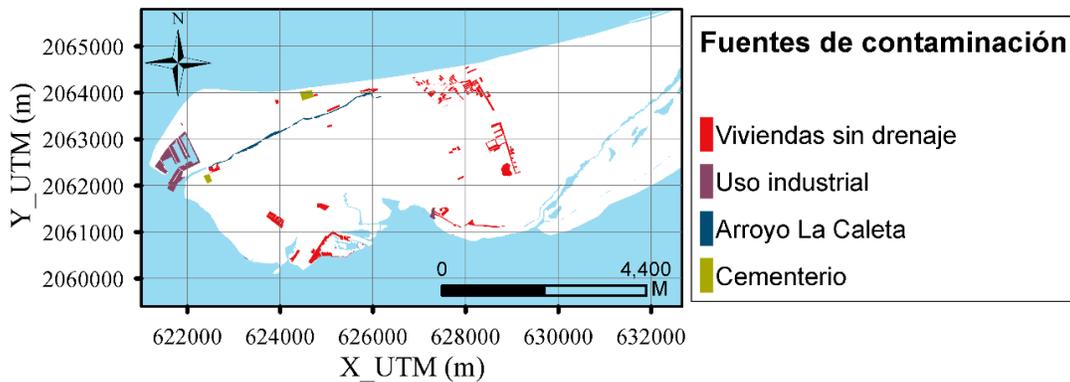


Figura 4.19. Fuentes de contaminación identificadas en Ciudad del Carmen.

Las Fig. 4.20 muestra la distribución de número de habitantes en cada vivienda, transferidos de datos por manzana a formato celda de 50 m. La población vulnerable considerada de acuerdo con los datos disponibles son los niños (Fig. 4.21), ancianos (Fig. 4.22) y discapacitados (Fig. 4.23).

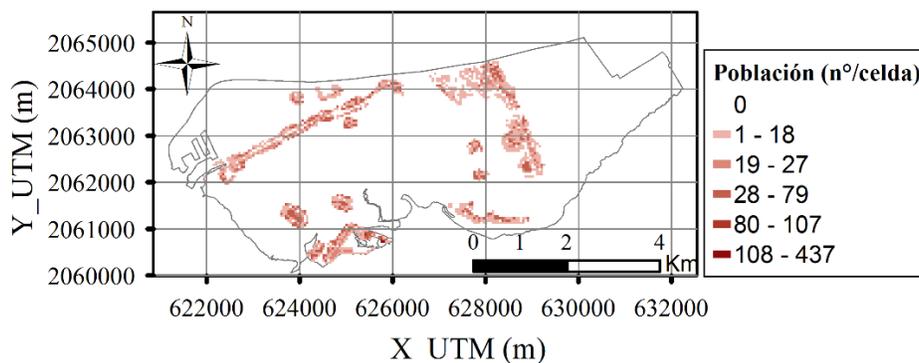


Figura 4.20. Número de residentes por celda de 50 m.

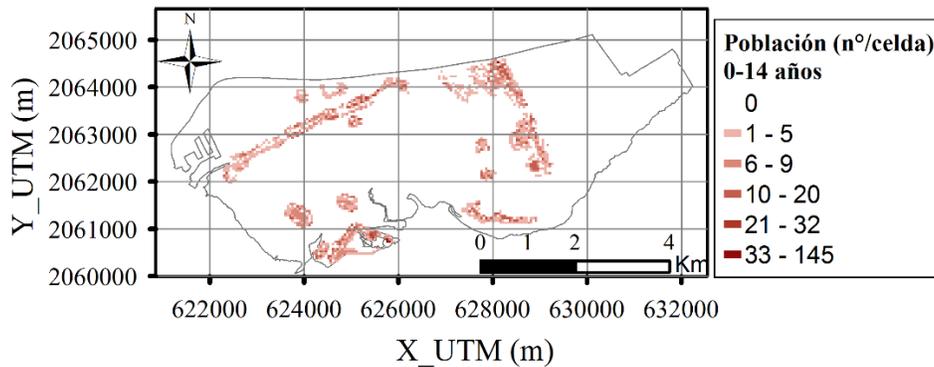


Figura 4.21. Número de niños por celda de 50 m.

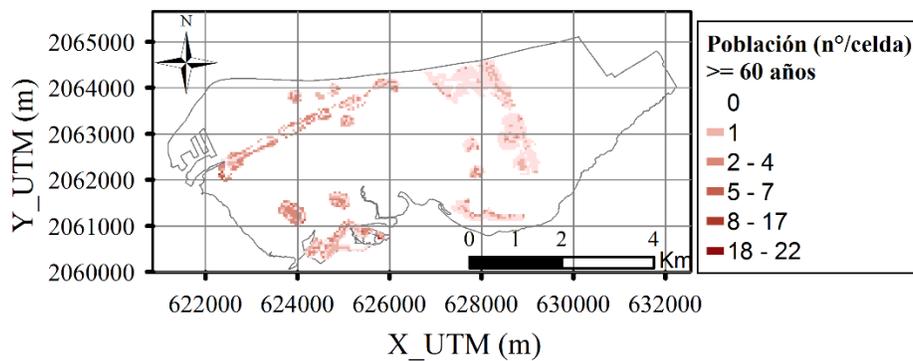


Figura 4.22. Número de ancianos por celda de 50 m.

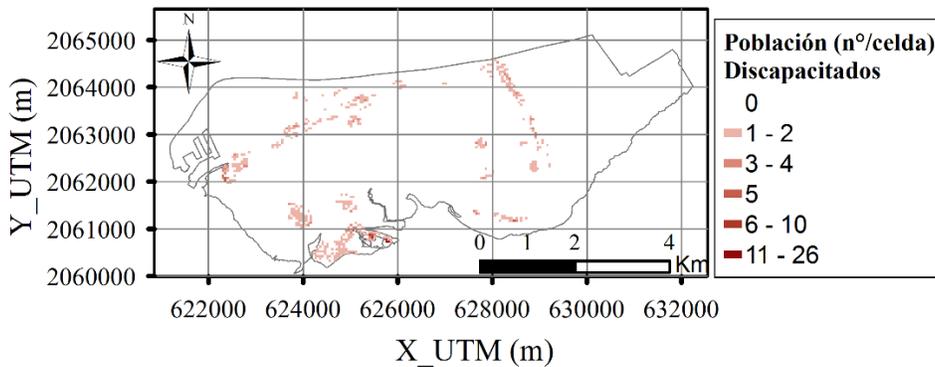
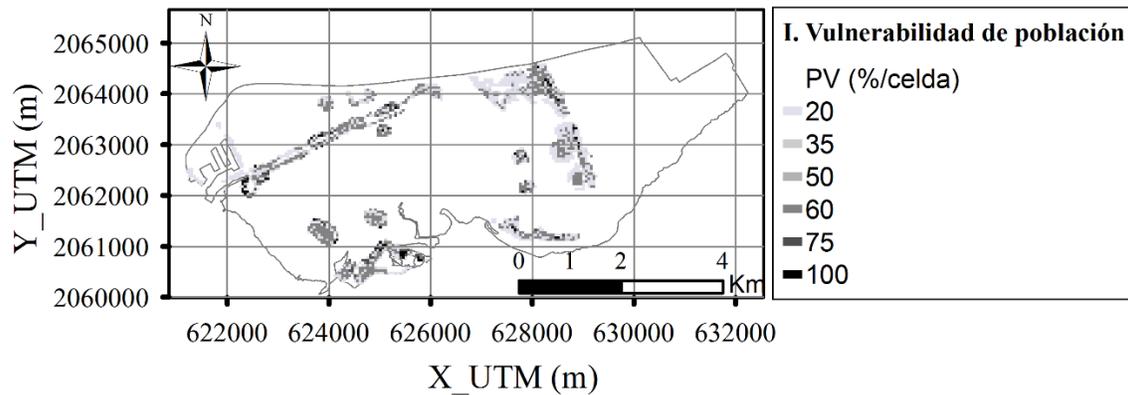


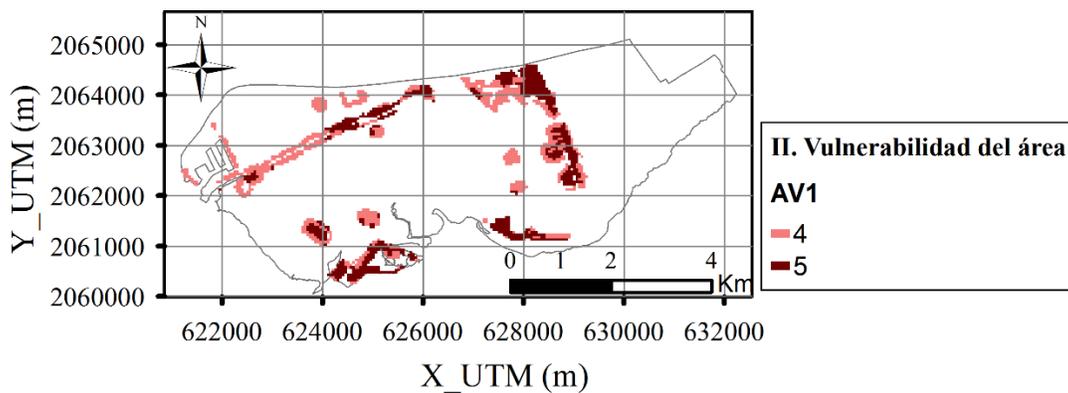
Figura 4.23. Número de discapacitados por celda de 50 m.

A partir de la distribución de la población vulnerable y el valor medio de cada una tomado como referencia, se obtiene el parámetro de vulnerabilidad de la población (PV), de acuerdo al modelo propuesto en el Capítulo 2 (Fig. 4.24).



**Figura 4.24. Parámetro de vulnerabilidad de la población.**

La vulnerabilidad del área se obtiene mediante la suma del factor adoptado por la naturaleza del área y la consideración de tres escenarios de acuerdo con la posibilidad de evacuación (dada por las medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación) (Fig. 4.25 a 4.27). Así AV1 hace referencia a la consideración de medidas de alerta efectivas y velocidad de alcance de la inundación baja (riesgo bajo); AV2, riesgo medio por medidas de alerta limitadas y velocidad de alcance de la inundación moderada; y AV3, riesgo alto por la inexistencia de medidas de alerta y alta velocidad de alcance de la inundación.



**Figura 4.25. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de alta posibilidad de evacuación.**

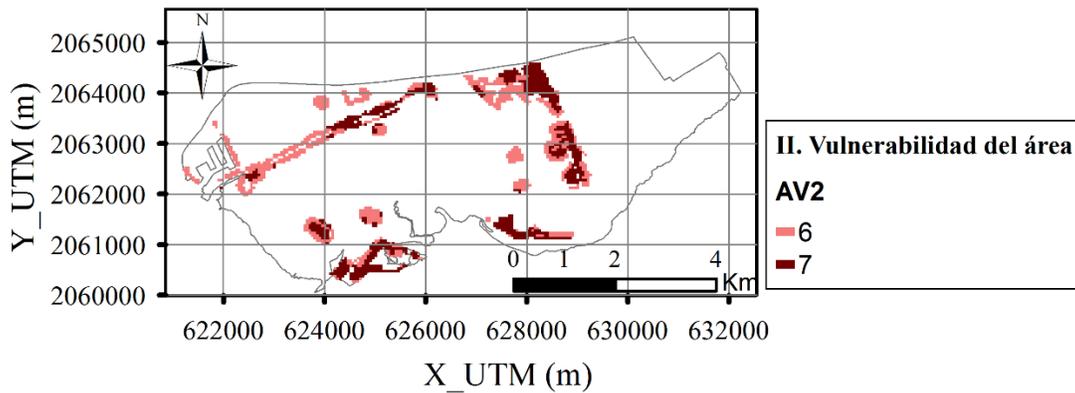


Figura 4.26. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de riesgo medio por posibilidad de evacuación.

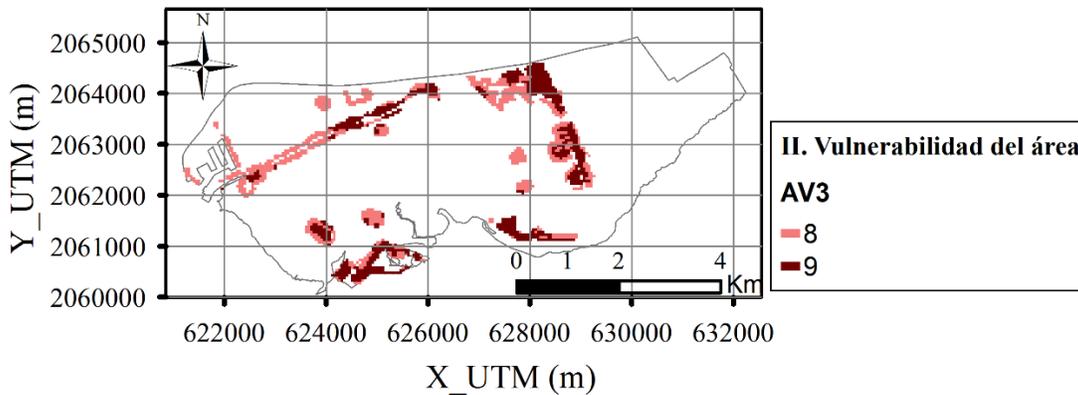


Figura 4.27. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de dificultad de evacuar el área.

Los resultados de la aplicación del modelo se incluyen en el Anexo VII, entre los que destaca la afectación de únicamente el cementerio como fuente de contaminación en varios escenarios (norte típico o huracanes Brenda, Dean e Isidore); de varias fuentes en otros como la presencia de viviendas sin drenaje o industrial (nortes desfavorables); la influencia de todas las fuentes de contaminación en algunos escenarios (periodos de retorno de 30 y 50 años); y el menor número de afectados en el evento de periodo de retorno de 100 años debido a la posibilidad de pérdida de vidas en este escenario (mayor altura de inundación).

La Fig. 4.28 muestra el número estimado de afectados para el periodo de retorno de 10 años, en dirección NW. En este caso el agua contaminada se debe a la carencia de drenaje en algunas viviendas, proximidad del cementerio y del arroyo La Caleta; y se observa un incremento en el número de afectados con la población vulnerable, residentes por vivienda y naturaleza del área desfavorable dada por la presencia de viviendas sin cimientos.

La Fig. 4.29 y Fig. 4.30 muestran los resultados correspondientes a los escenarios de periodos de retorno de 30 años (dirección N) y 50 años (dirección NW), respectivamente. Estos eventos producen la influencia de todas las fuentes de contaminación identificadas en el área. El mayor número de afectados en estos casos también vienen en gran parte

determinados por una mayor concentración de población vulnerable, número de habitantes por viviendas o la naturaleza del área.

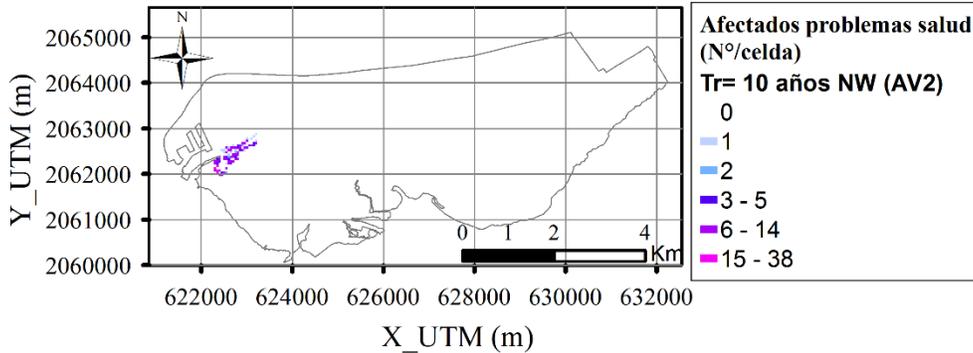


Figura 4.28. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 10 años NW.

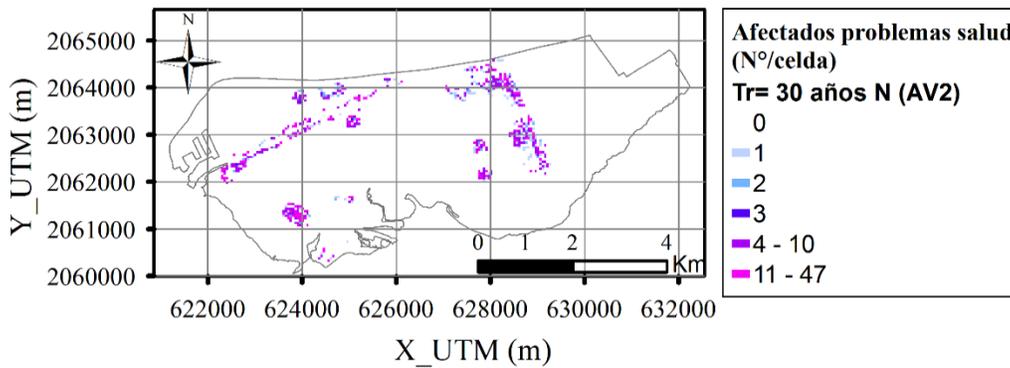


Figura 4.29. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 30 años N.

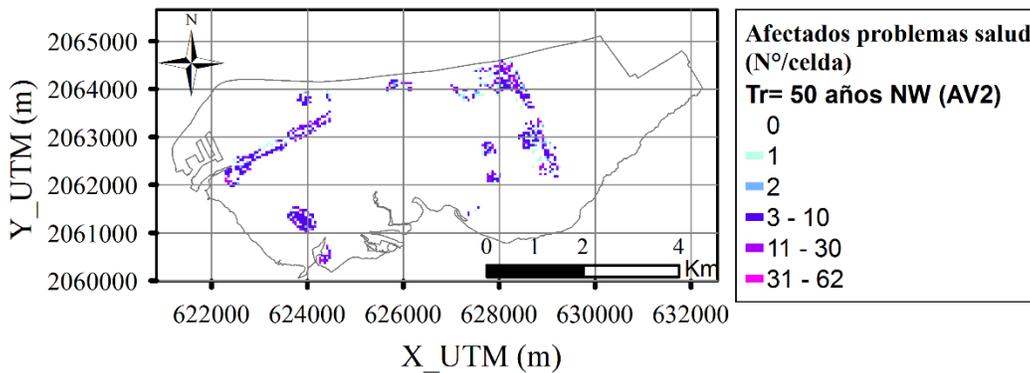
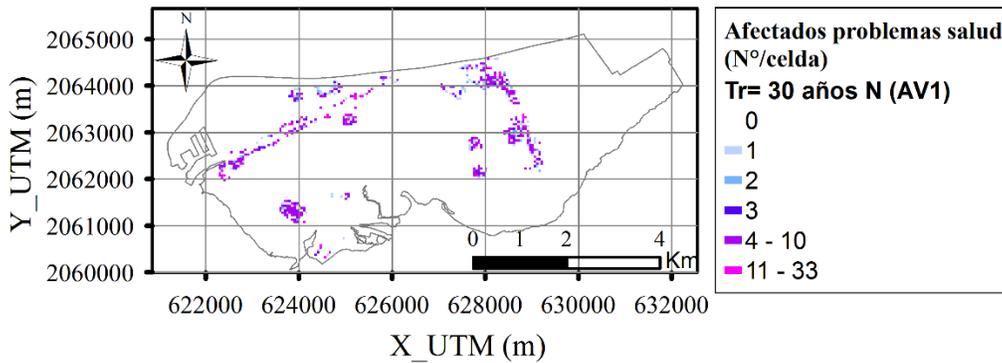
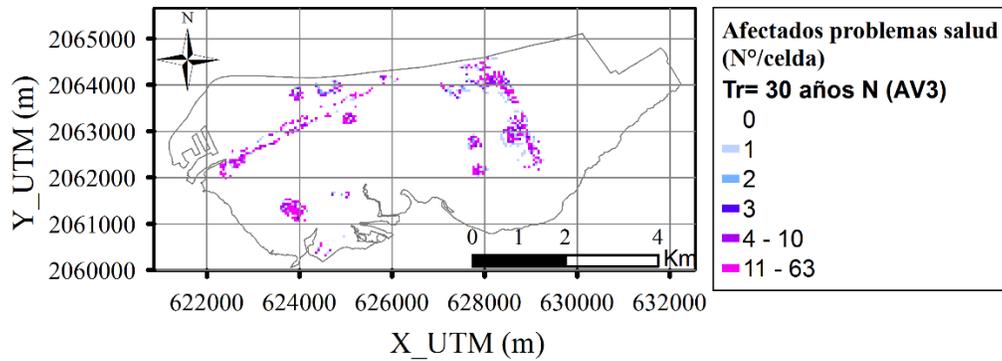


Figura 4.30. Número de afectados por problemas de salud- Tr= 50 años NW.

La Fig. 4.31 y Fig. 4.32 permiten observar la diferencia en el resultado dada por el modelo de acuerdo con la posibilidad o no de evacuar el área.

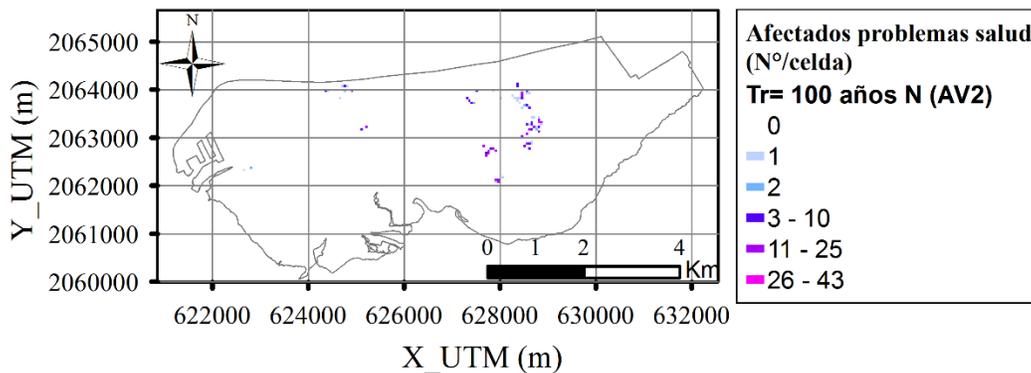


**Figura 4.31.** Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación-  
Tr= 30 años N (AV1 -riesgo bajo por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la  
inundación).



**Figura 4.32.** Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación-  
Tr= 30 años N (AV3 -riesgo alto por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la  
inundación).

La Fig. 4.33 muestra el número estimado de afectados en el escenario de periodo de retorno de 100 años.



**Figura 4.33.** Número de personas afectadas por contacto directo con agua contaminada de inundación-  
Tr= 100 años N.

- Pérdida de vidas humanas y lesiones

El modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones se aplica sobre todo el área de Ciudad del Carmen donde se distribuyen viviendas habitadas. Las Fig. 4.34 muestra esta superficie en formato celda.

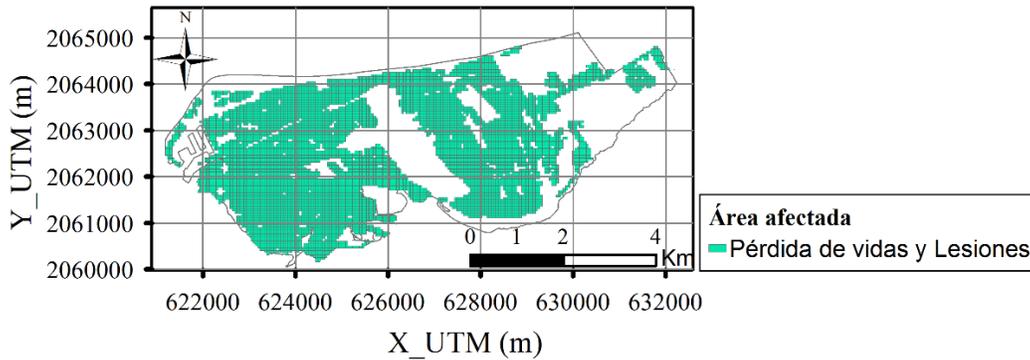


Figura 4.34. Área analizada por posible pérdida de vidas humanas y lesiones debido a un evento de inundación.

La Fig. 4.35 muestra la distribución de número de habitantes en cada vivienda, transferidos de datos por manzana (Fig. 4.35a) a formato celda de 50 m (Fig. 4.35b). La población vulnerable en este modelo son los niños (Fig. 4.36), ancianos (Fig. 4.37) y discapacitados (Fig. 4.38).

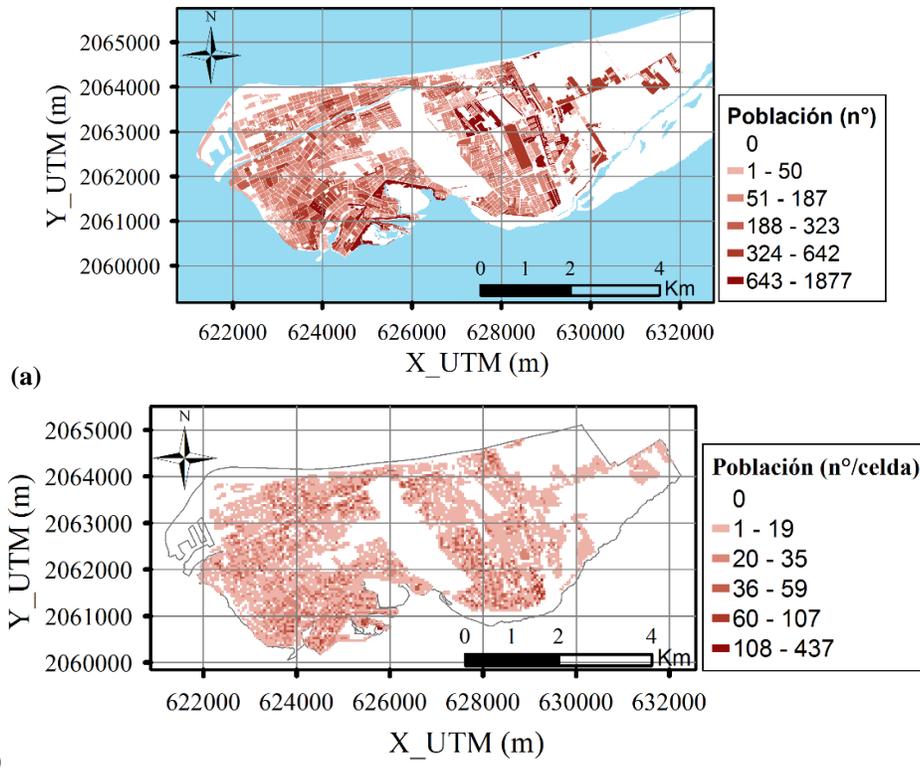


Figura 4.35. N° de personas en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

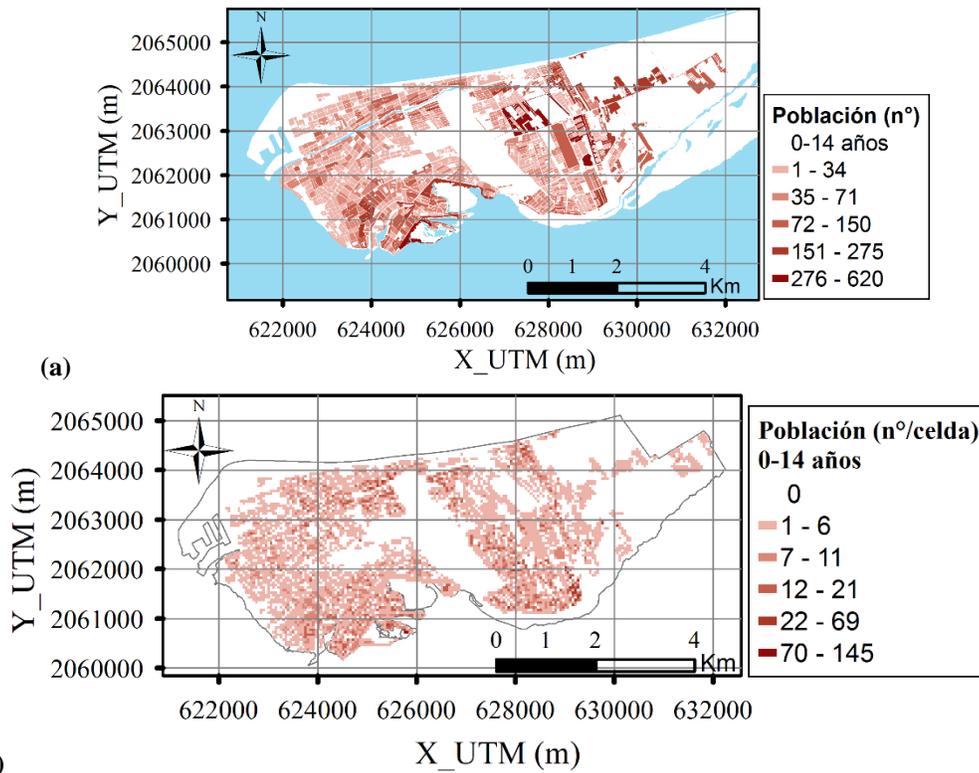


Figura 4.36. N° de niños en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

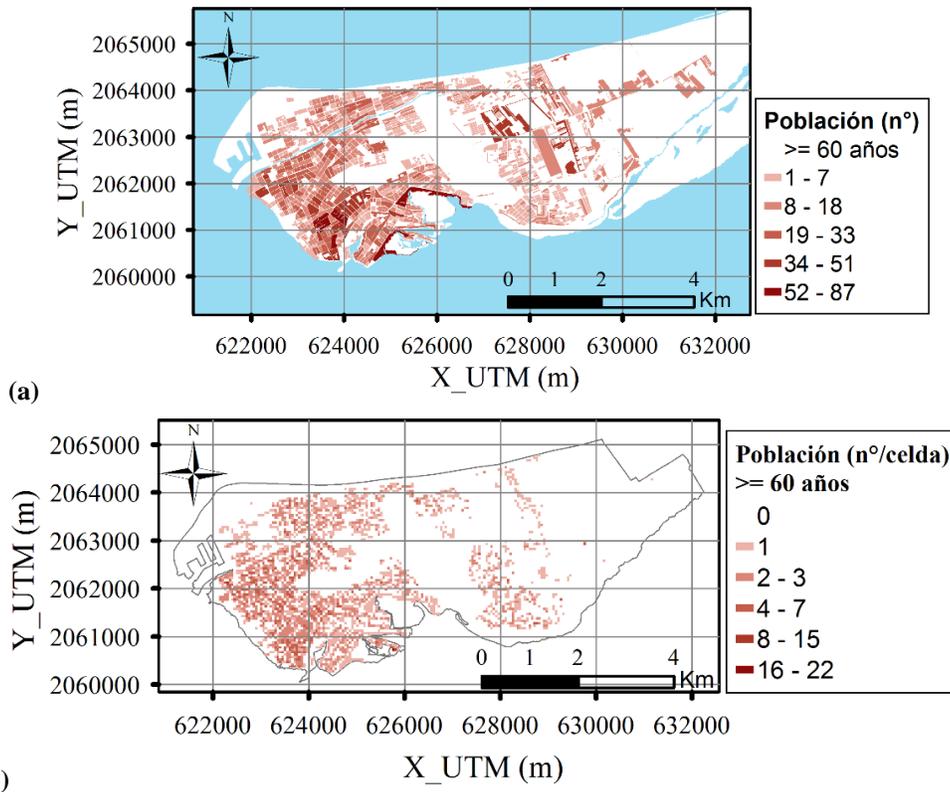


Figura 4.37. N° de ancianos en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

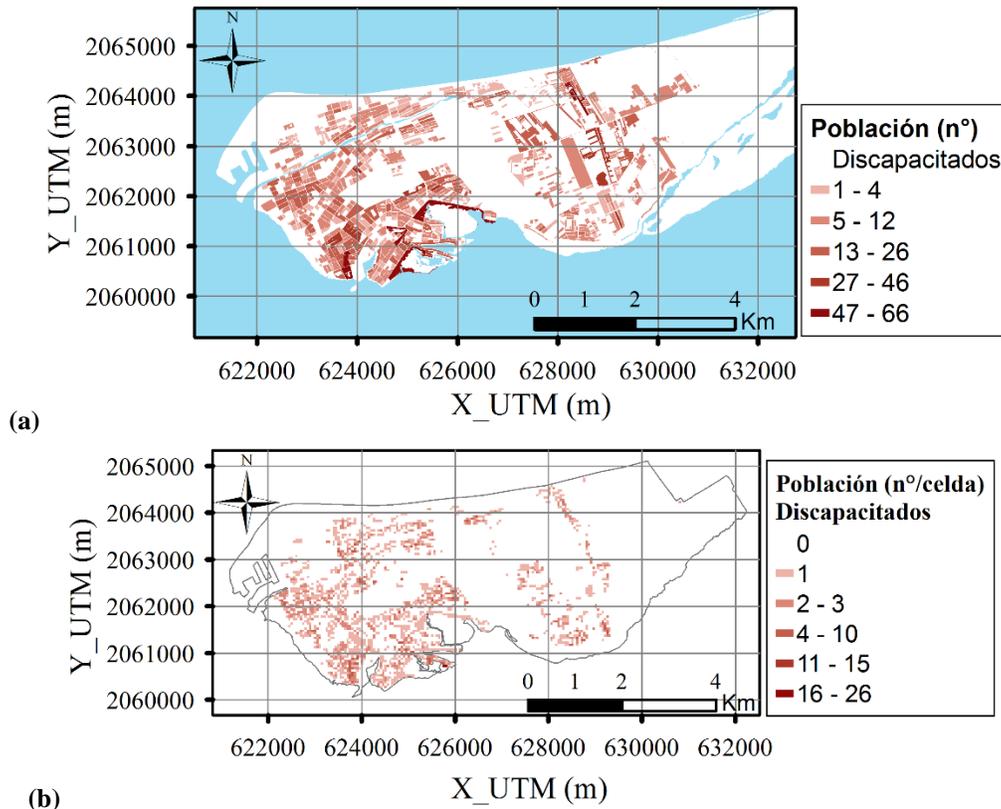


Figura 4.38. N° de discapacitados en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

En la Fig. 4.39 se muestra la distribución en Ciudad del Carmen del parámetro de vulnerabilidad de la población; y en las Fig. 4.40 a Fig. 4.42 el parámetro de vulnerabilidad del área de acuerdo al riesgo (bajo, medio o alto) definido por las medidas de alerta y la velocidad de alcance de la inundación.

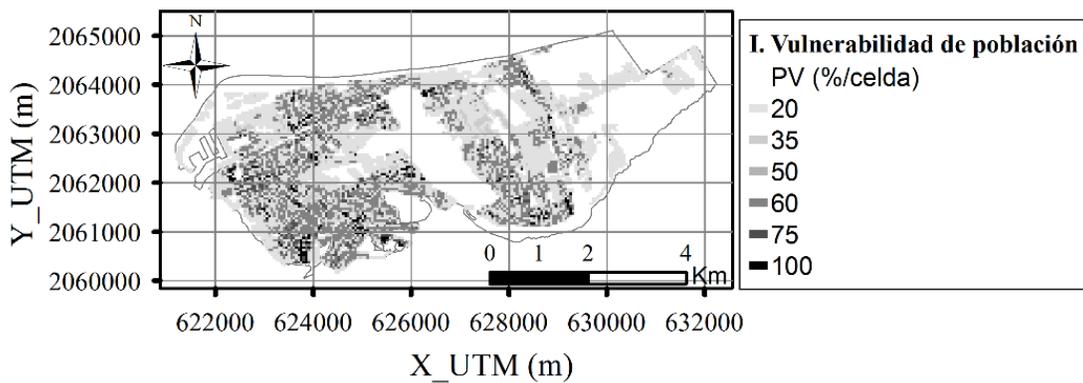


Figura 4.39. Parámetro de vulnerabilidad de la población.

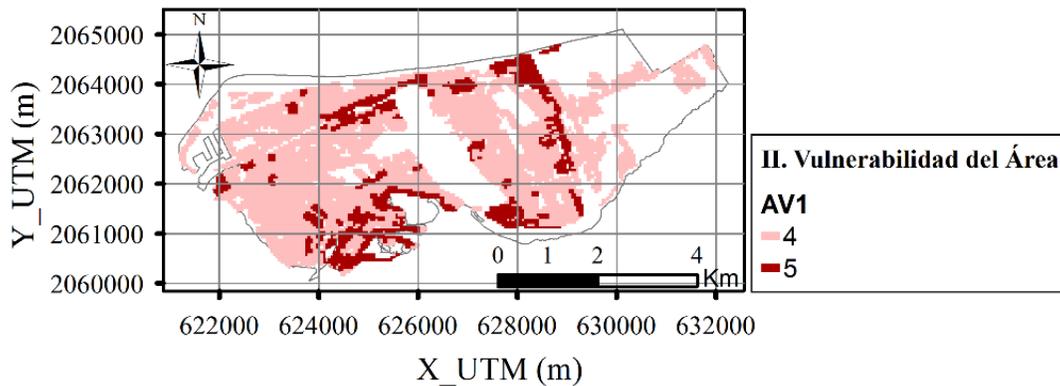


Figura 4.40. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de alta posibilidad de evacuación.

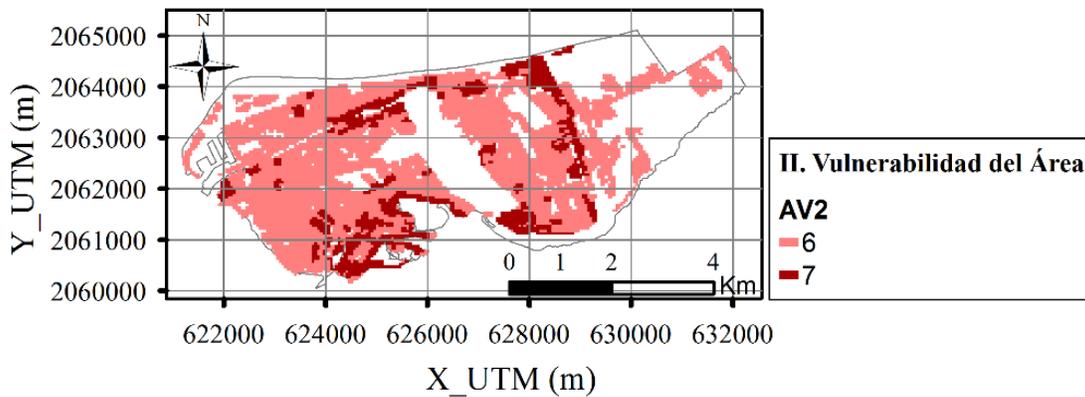


Figura 4.41. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de riesgo medio por posibilidad de evacuación.

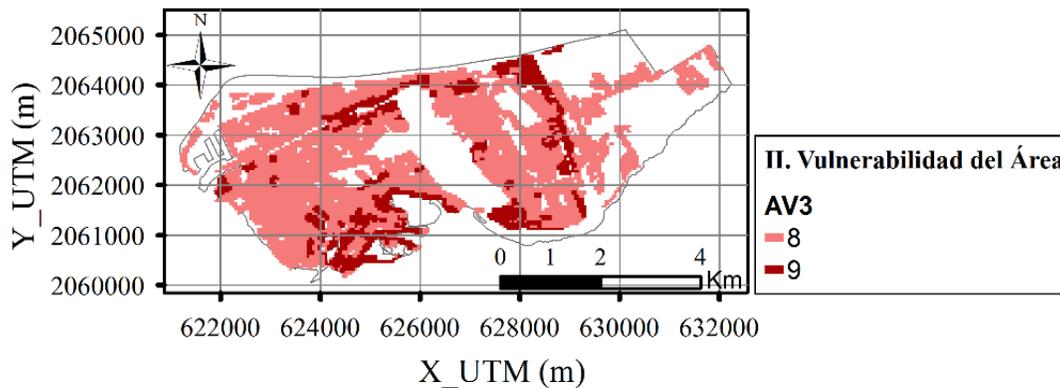


Figura 4.42. Parámetro vulnerabilidad del área, bajo la consideración de dificultad de evacuar el área.

Los resultados de la aplicación del modelo se incluyen en el Anexo VIII. Las Fig. 4.43, Fig. 4.44 y Fig. 4.45 muestran el número estimado de afectados debido a un evento de periodo de retorno de 30 años en dirección Norte, bajo la consideración de los diferentes escenarios por posibilidad de evacuación, refugio o rescate.

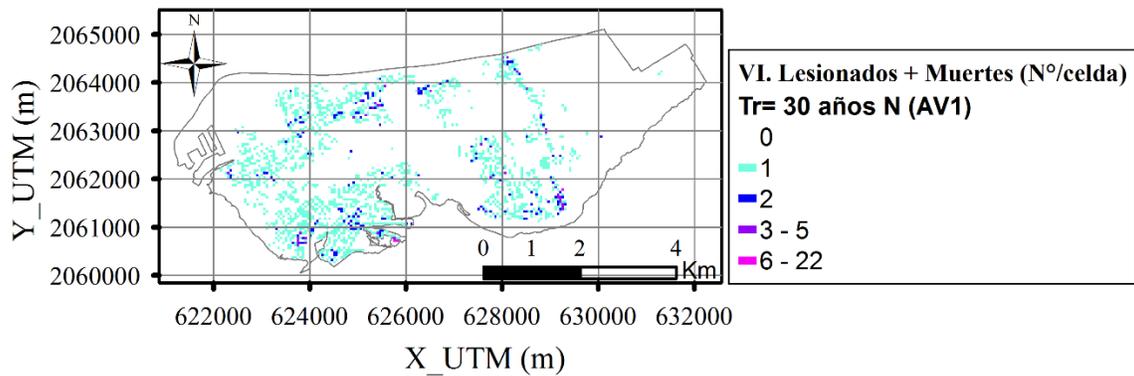


Figura 4.43. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N (AV1 -riesgo bajo por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación).

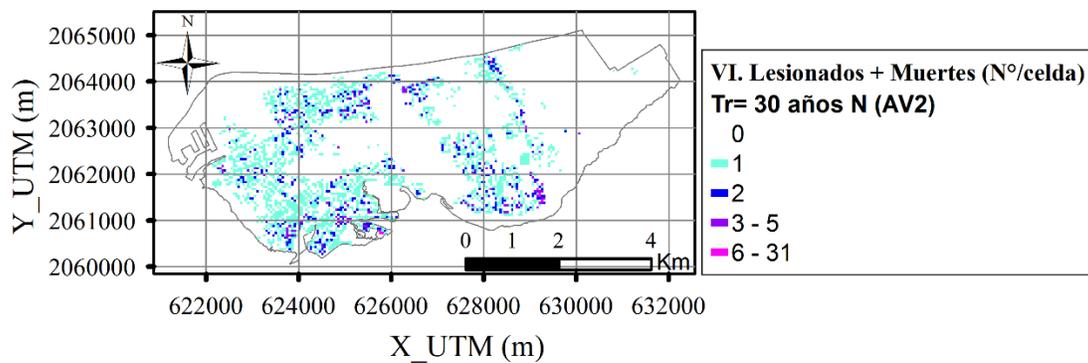


Figura 4.44. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N (AV2 -riesgo medio por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación).

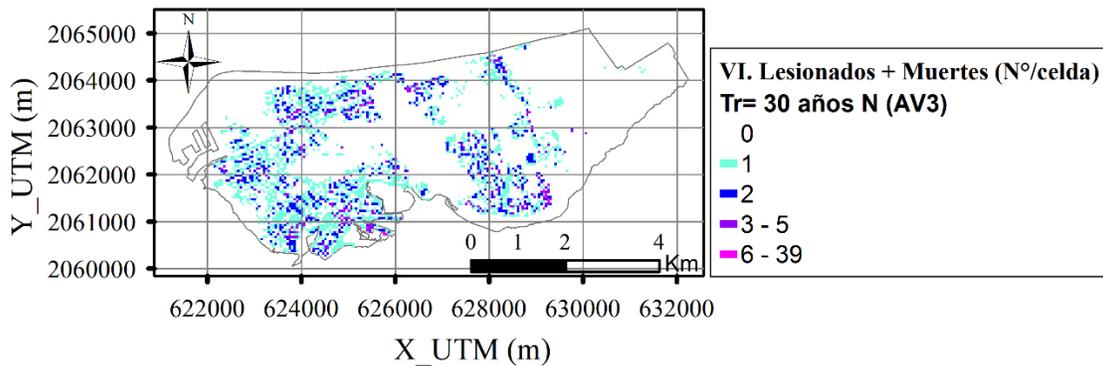


Figura 4.45. N° (lesionados + muertes) debido a inundación – Tr= 30 años N (AV3 -riesgo alto por la existencia de medidas de alerta y velocidad de alcance de la inundación).

La concentración del mayor número de afectados se localiza en la zona sur y oeste de Ciudad del Carmen principalmente debido al mayor número de residentes, densidad de población vulnerable y viviendas en condiciones precarias. El mayor número de afectados junto a la Marina se debe a un mayor número de residentes y población vulnerable.

- Dificultad de recuperación después de la inundación

### Población

La Fig. 4.46 muestra la distribución de la población económicamente activa y la Fig. 4.47 las distintas clases sociales definidas en Ciudad del Carmen, por manzanas y su conversión a formato celda.

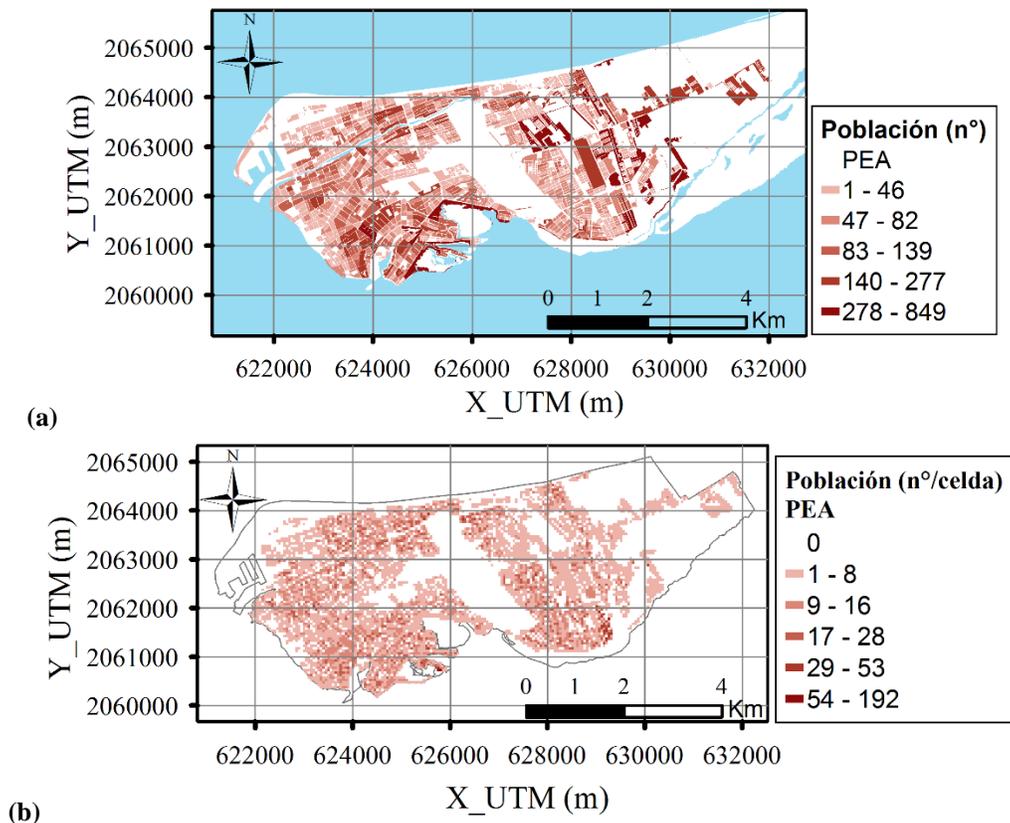


Figura 4.46. N° de personas definidas población económicamente activa (PEA) en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

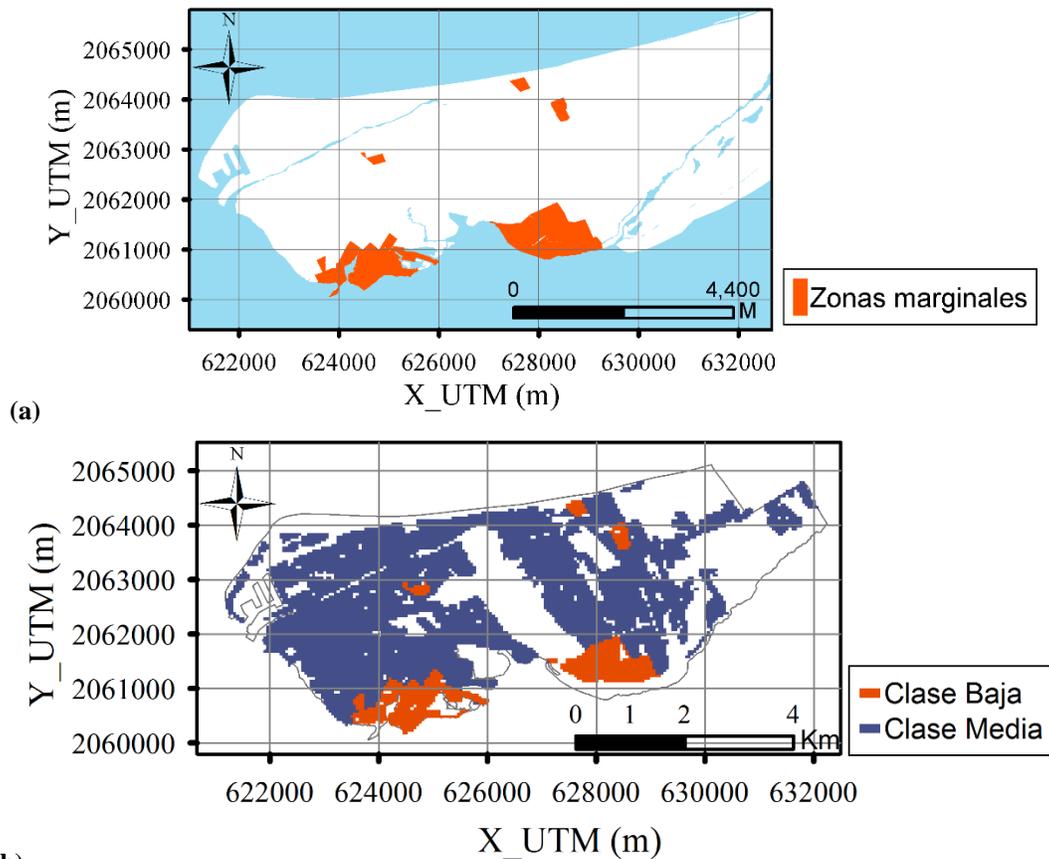


Figura 4.47. Clases sociales definidas en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

Del análisis de estos dos parámetros en las zonas más afectadas para cada escenario de inundación se obtiene que gran parte de los daños o pérdidas por inundación se produce en zonas donde habita población de clase social baja, lo cual puede dificultar su recuperación ante la presencia de estos eventos. Además, en las tres zonas marginales situadas más cercanas a la playa la PEA es mínima, lo cual disminuye todavía más la capacidad de recuperación de las familias.

#### Infraestructura

En cuanto a la posibilidad de funcionamiento habitual de la infraestructura después de una inundación, la Fig. 4.48 muestra las condiciones de drenaje de las vialidades, por manzanas y su conversión a formato celda.

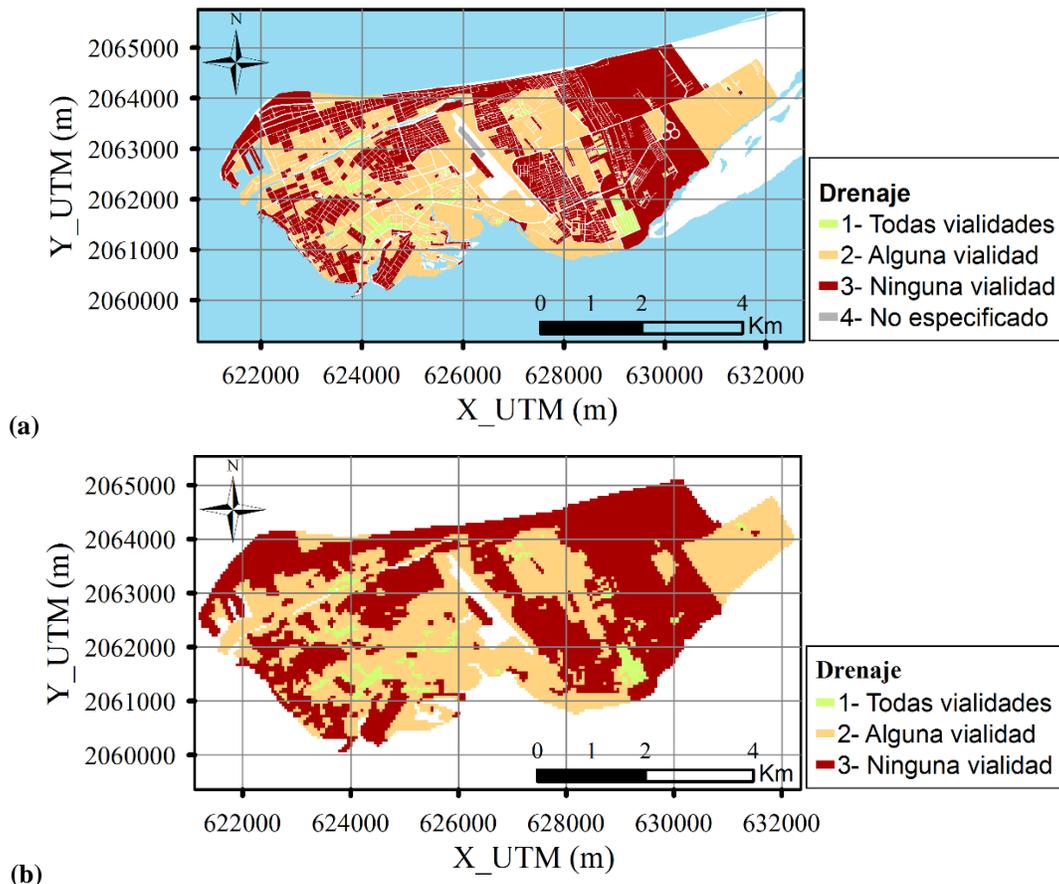


Figura 4.48. Drenaje pluvial en Ciudad del Carmen: (a) datos por manzana; (b) datos por celda 50 m.

Una fracción de las vialidades que carecen de drenaje se encuentran en zonas afectadas con mayor frecuencia por problemas de inundación, como son la zona junto al arroyo La Caleta, área próxima a la Marina o algunas colonias situadas en la parte sur de Ciudad del Carmen. Las Fig. 4.49 y 4.50 muestran la altura de inundación en los eventos de Norte desfavorable 1 y periodo de retorno 30 años (dirección N), donde se observa la carencia de este servicio de drenaje en áreas con mayores profundidades de inundación.

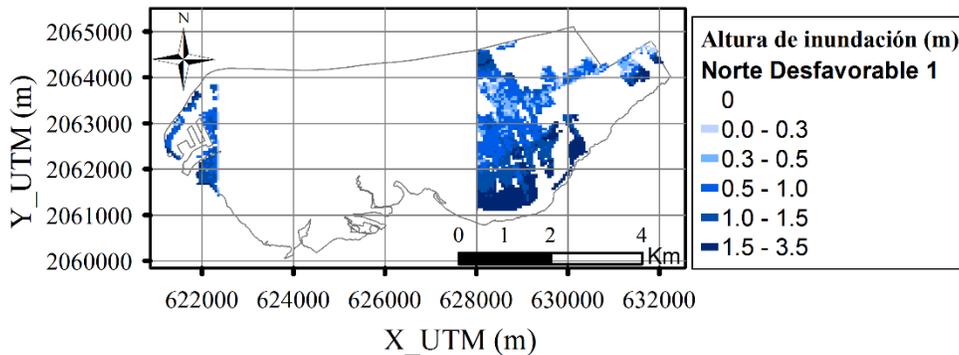


Figura 4.49. Altura de inundación asociada en Ciudad del Carmen- Norte Desfavorable 1.

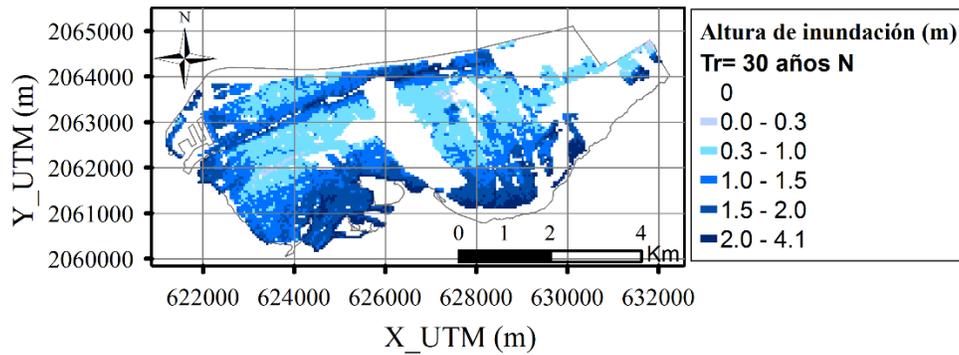


Figura 4.50. Altura de inundación asociada en Ciudad del Carmen- Tr= 30 años N.

### Ecosistema de manglar de Isla del Carmen

Siguiendo la metodología propuesta en el Capítulo 2 y la definición de parámetros adoptada en el Capítulo 3, se obtiene la estimación del grado de daño por cada evento de inundación sobre el ecosistema de manglar localizado en Isla del Carmen. Las distintas tipologías de manglar identificadas en Isla del Carmen también son convertidas a formato celda para la aplicación del modelo (Fig. 4.51).

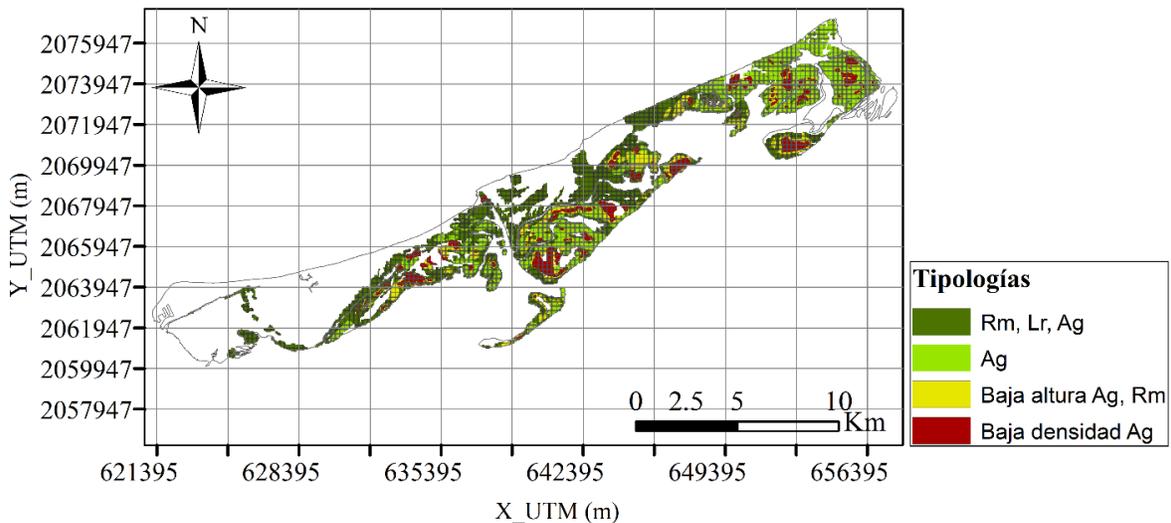


Figura 4.51. Distribución de tipologías de manglar en Isla del Carmen, por celdas de 50 m.

En el Anexo IX se incluyen los resultados de la aplicación del modelo de evaluación de las pérdidas medioambientales sobre el ecosistema de manglar. Se observan varias áreas afectadas para diferentes condiciones de simulación, como las presentadas en los escenarios de Norte Desfavorable 1 (Fig. 4.52), Huracán Janet (Fig. 4.53) y Huracán Roxanne (Fig. 4.54). En estas áreas se encuentra manglar en regular y mala condición ecológica (en amarillo y rojo en Fig. 4.51), lo que puede deberse a su mayor afectación por la ocurrencia de eventos extremos.

Por otro lado, la Fig. 4.55 permite observar la distribución del grado de daño producido por un evento que afecta a casi toda la extensión de superficie de manglar de Isla del Carmen.

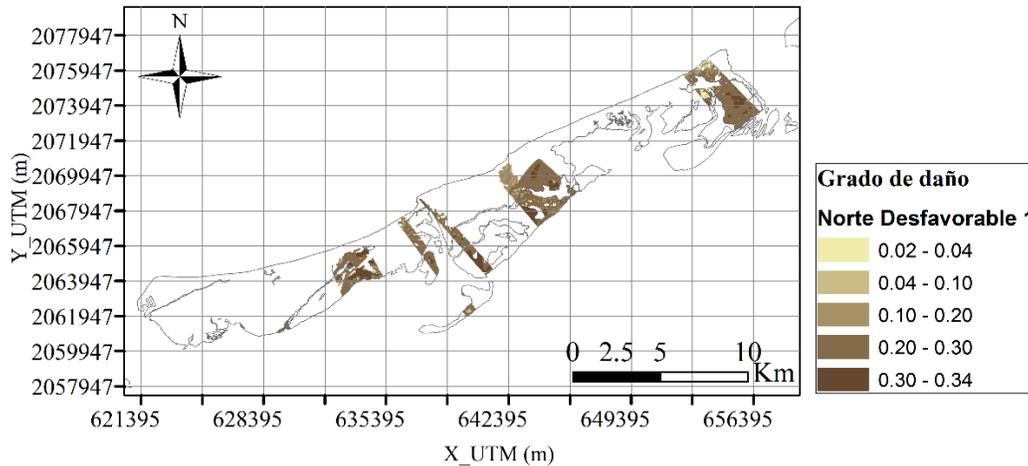


Figura 4.52. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Norte Desfavorable 1.

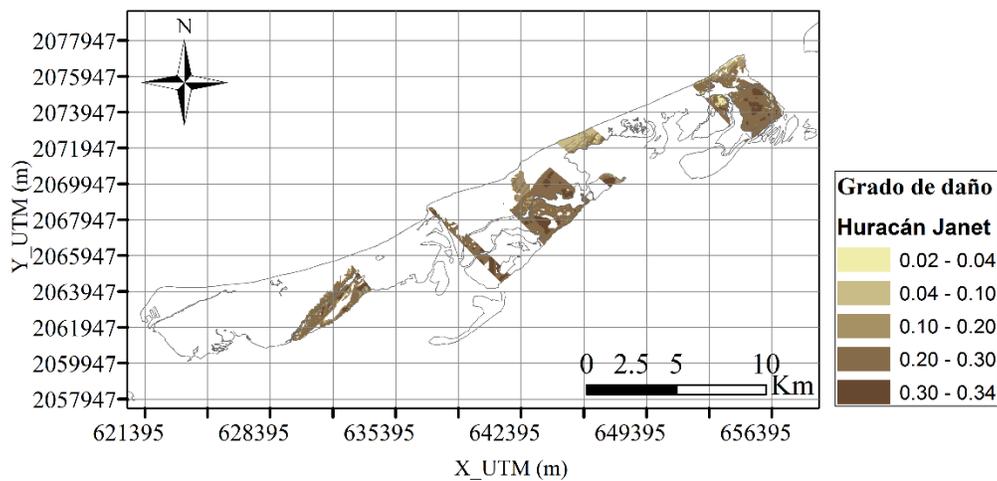


Figura 4.53. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Huracán Janet.

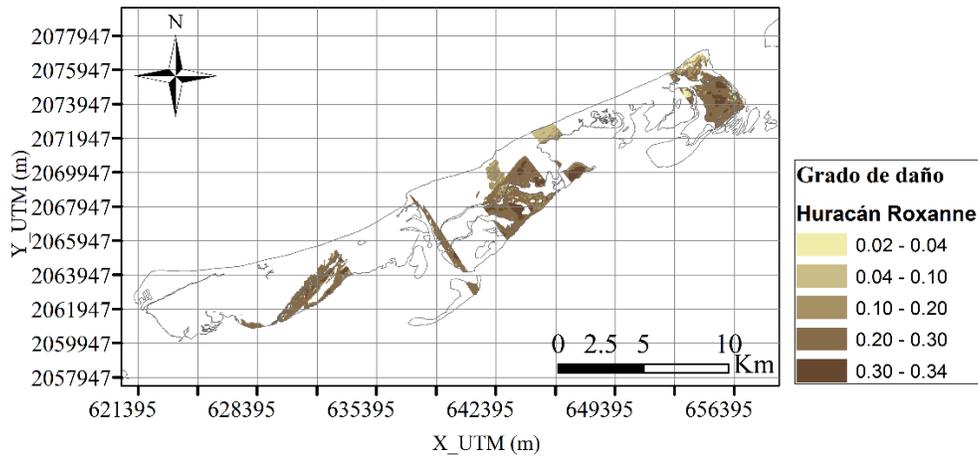


Figura 4.54. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Huracán Roxanne.

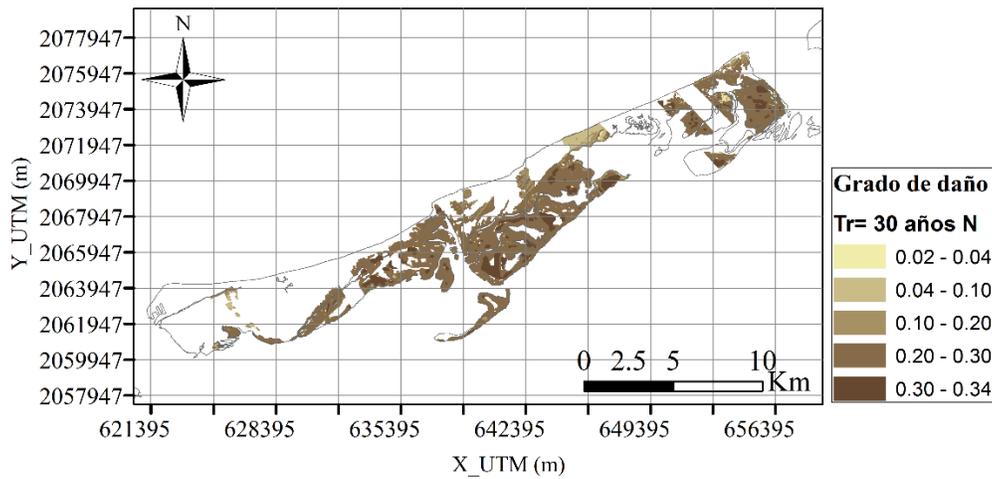


Figura 4.55. Grado de daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación – Tr= 30 años N.

## 4.2. Evaluación de riesgos en Cancún

### 4.2.1. Análisis de peligros

La Fig. 4.56 muestra los resultados de propagación de la altura de ola significativa en Cancún.

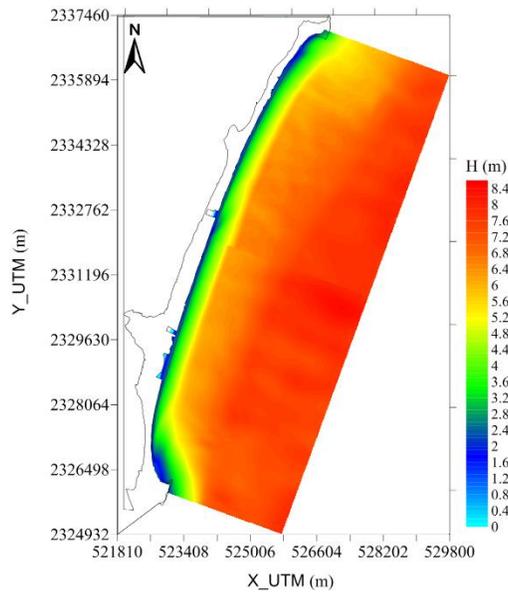


Figura 4.56. Altura de ola significativa correspondiente al escenario simulado en Cancún.

La altura de inundación se muestra en la Fig. 4.57 en formato de datos ASCII (Fig. 4.57a) y una vez convertido a formato celda de 50 m (Fig. 4.57b).

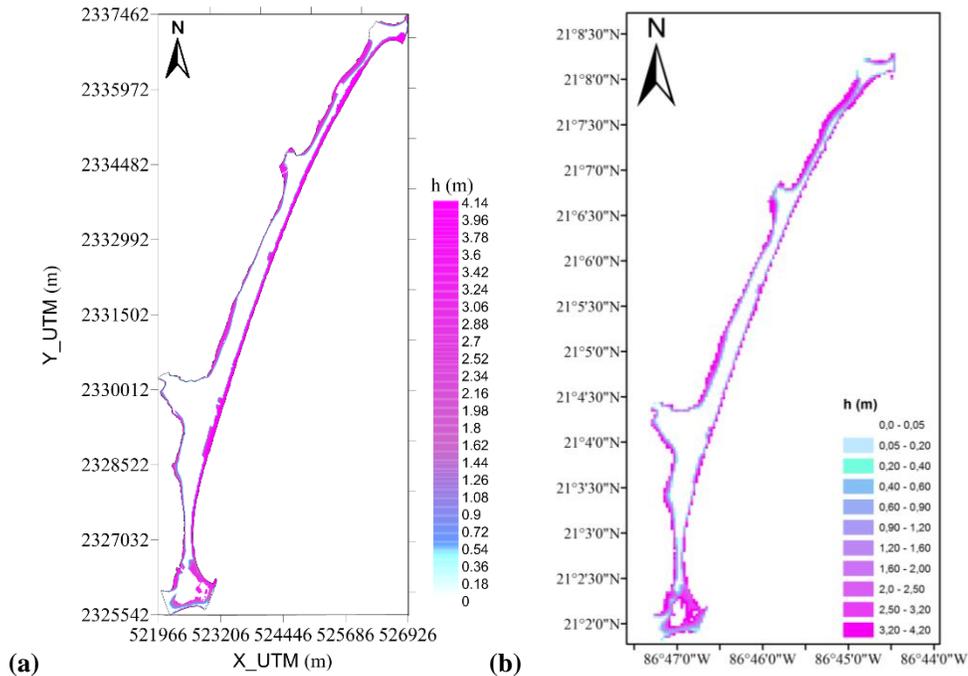
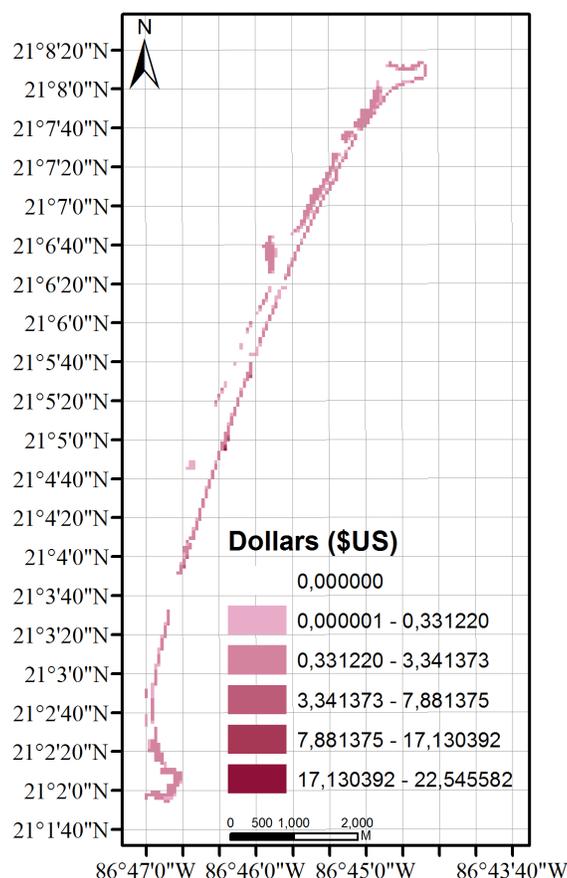


Figura 4.57. Altura de inundación en Cancún: (a) datos ASCII; (b) datos convertidos a formato celda 50 m.

#### 4.2.2. Análisis de consecuencias

- Daños físicos (infraestructura social y bienes de la zona hotelera)

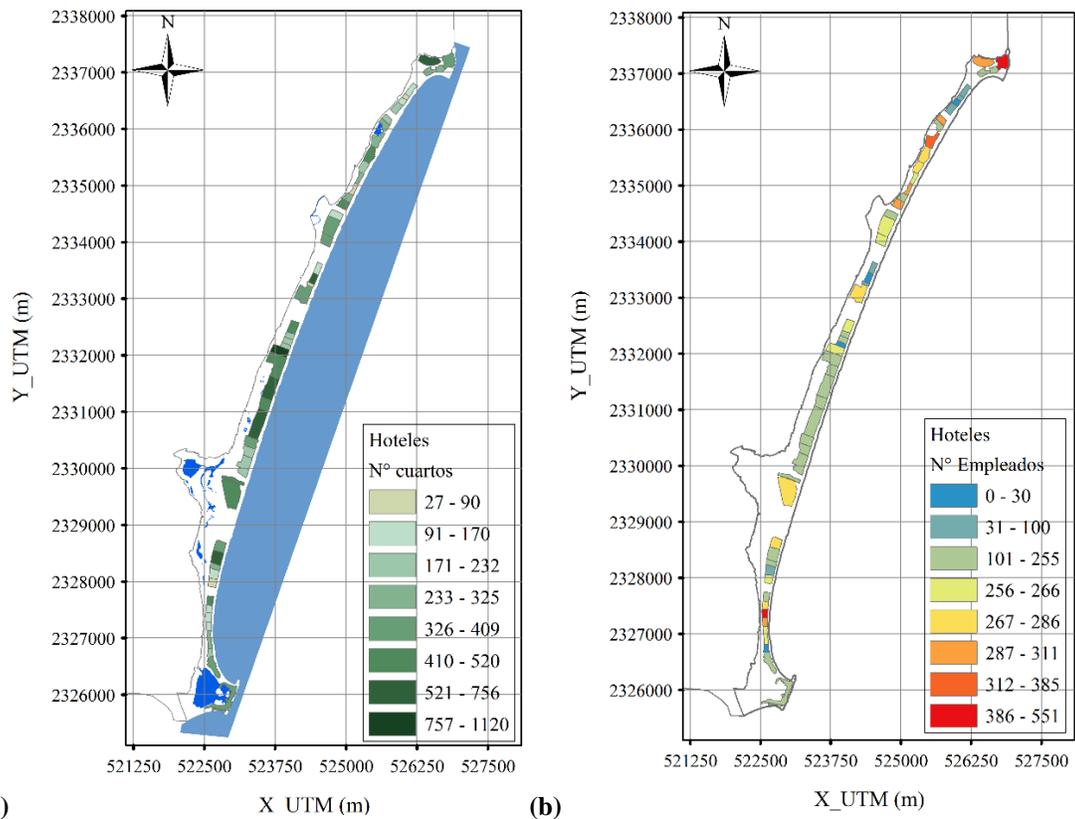
El resultado de la combinación de las curvas de daños definidas en el Capítulo 3 y las alturas de inundación, en cada celda de 50 m, permite estimar la distribución espacial de los daños físicos en el área (Fig. 4.58).



**Figura 4.58. Distribución de los daños físicos (por celda cuadrada de 50 m) en la zona hotelera de Cancún.**

- Dificultad de recuperación después de la inundación

Se observa una mayor concentración de daños en la zona norte y mitad de la isla (Fig. 4.58), la cual se encuentra ocupada por hoteles de varias categorías con diferente número de empleados y oferta de cuartos disponibles (Fig. 4.59). La ocurrencia de inundaciones de características similares puede ocasionar mayores dificultades para los hoteles de menor tamaño para recuperar su actividad económica normal.



**Figura 4.59. Distribución de parámetros de resiliencia del sector turístico de Cancún: (a) N° cuartos en los hoteles; (b) N° empleados de los hoteles.**



## **Capítulo 5**

### **TRATAMIENTO DEL RIESGO EN ISLA DEL CARMEN**

---



## **Capítulo 5**

### **TRATAMIENTO DEL RIESGO**

#### **EN ISLA DEL CARMEN**

##### **5.1. Playa de Isla del Carmen**

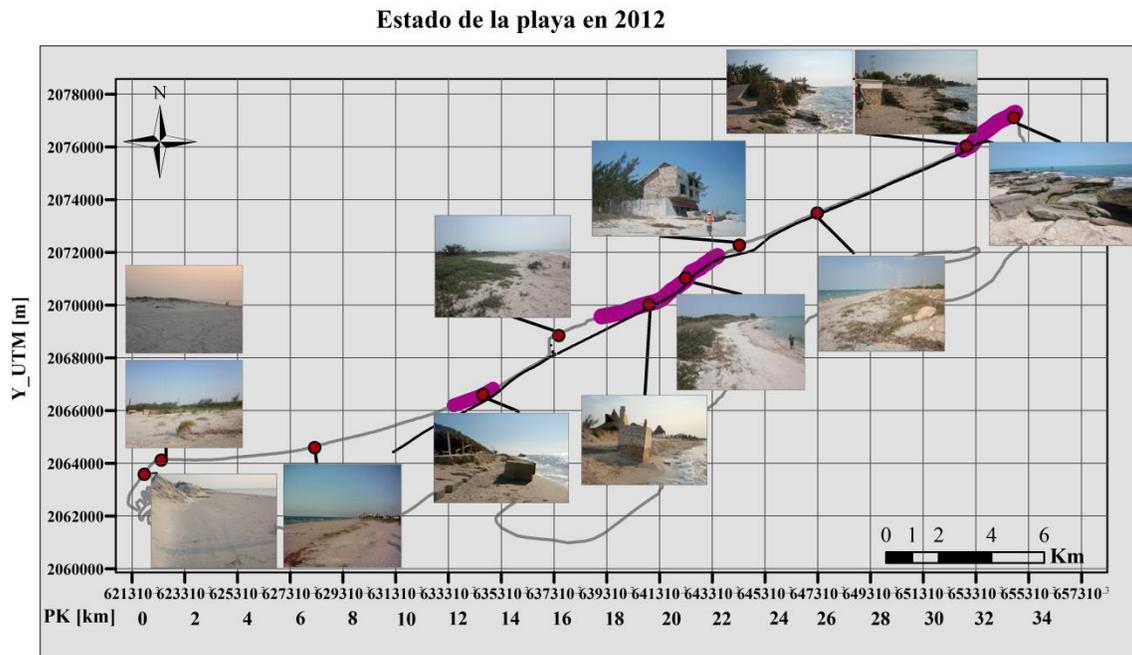
###### **5.1.1. Diagnóstico del estado**

Como se analiza en el Anexo X, los problemas de erosión en la zona costera de Isla del Carmen son resultado de la interrupción o bloqueo del transporte natural de sedimentos. La construcción en los años 40's de la carretera que cruza a lo largo la Isla, con el consiguiente mantenimiento, extensiones y subidas de nivel, crearon una barrera que impide el flujo libre original de agua de los humedales adyacentes y el arrastre de sedimentos que cada año permitían el balance natural de la dinámica costera en el área. Además, la expansión de Ciudad del Carmen y la construcción de edificios sobre la playa, la construcción de estructuras de defensa rígidas e inapropiadas, el cierre de bocas en las áreas adyacentes, y la construcción de presas y cambios hidrológicos en el continente han dificultado la llegada de sedimentos a la playa. Las construcciones relacionadas con el puerto de Ciudad del Carmen también han dificultado el movimiento original del flujo y sedimentos de la laguna hacia el Golfo. Las medidas de emergencia adoptadas, además de no resolver los problemas de erosión, han contaminado el sustrato arenoso con rocas y otros materiales inadecuados aumentando las corrientes y la concentración de energía del oleaje en algunas áreas. Otro inconveniente del bloqueo del flujo de sedimentos de la laguna hacia el mar es la sedimentación y acidificación del sistema fluvio-lagunar de Laguna de Términos.

El conocimiento de la tendencia erosiva de la playa y el ancho de playa seca actual en cada región permitieron identificar las áreas críticas donde actuar. Éstas son las secciones de playa comprendidas entre X\_UTM (15N) de 633510 a 634910 (playa Club de Playa); X\_UTM (15N) de 639110 a 644310 (playa C.A.S.E.S); X\_UTM (15N) de 652810 a 654810 (playa Punta Real). En estas áreas, se produce concentración de energía del oleaje durante el paso de tormentas extremas (Capítulo 4).

Aunque el tramo de litoral comprendido entre playa Bahamitas y playa Tortugueros también se identificó en el Capítulo 4 por su destacada altura de erosión ante la ocurrencia de algunas tormentas, el análisis de evolución de línea de costa (Anexo X) muestra una tendencia cíclica del movimiento de la línea de costa en esta región (en el periodo de 1985 a 2012) por lo que no será considerado por necesidad inmediata de actuación. Otras áreas que presentaron erosión y que no se han seleccionado como críticas son las localizadas en las secciones X\_UTM (15N) de 645510 a 652010 (junto a la carretera), por la posibilidad de que recuperen su equilibrio una vez estabilizadas la regiones X\_UTM (15N) de 639110 a 644310 (playa C.A.S.E.S) y X\_UTM (15N) de 652810 a 654810 (playa Punta Real).

La Fig. 5.1 muestra la ubicación de los tramos propuestos para la realización de las actuaciones (en lila), y el aspecto de algunos de éstos en Abril de 2012.



**Figura 5.1. Estado de la playa en 2012, y localización de las secciones de playa a estabilizar.**

### **5.1.2. Tratamiento del riesgo de erosión en la playa de Isla del Carmen**

La mejor alternativa para proteger la playa podría ser la retirada de instalaciones donde fuera posible, lo que ayudaría a estabilizar el sistema playa-duna y eliminar el efecto reflejante de las estructuras. Sin embargo, esta opción podría ocasionar consecuencias económicas y sociales negativas.

Otras posibles alternativas son: el adecuado diseño de rompeolas para estabilizar los tramos de playa definidos como críticos, sin interrumpir el transporte litoral de sedimentos. Esta medida debería de estar seguida de una alimentación de playa para obtener el ancho de playa seca deseado, y la realización periódica de regeneraciones de playa para mantenerlo. La arena para el relleno de la playa podría ser parcialmente obtenida de la laguna mediante un procedimiento de trasvase o “bypass”. Esta operación permitiría mejorar la calidad del agua de la laguna, al mismo tiempo que reduciría los costes para cubrir el volumen de arena necesario para mantener la playa. En el curso de la estabilización de la playa, sería recomendable retirar las rocas y restos de estructuras de defensa existentes actualmente en la playa. Además, la restauración, reconstrucción o construcción de una nueva duna (complementada con las regulaciones de acuerdo al uso de dunas para asegurar su conservación) proporcionaría una reserva de arena en la playa después de las tormentas.

La adopción de estas alternativas ayudaría a estabilizar la playa, facilitar el balance de sedimentos en el sistema, y garantizar la vida a largo plazo de la playa.

## **5.2. Ciudad del Carmen**

### **5.2.1. Diagnóstico por daños físicos (edificios y bienes)**

Del análisis de los resultados de daños físicos evaluados para cada escenario de simulación (Anexo VI) se han identificado aquellas áreas que son propensas a sufrir mayores pérdidas debido a las condiciones precarias de sus viviendas (viviendas sin cimientos) y su baja cota topográfica (altura de inundación mayor).

La Fig. 5.2 muestra las regiones correspondientes a los eventos de nortes más desfavorables (Norte desfavorable 1), donde la distribución de daños se produce de forma similar a la eventos como el huracán Roxanne y Janet y el escenario de periodo de retorno de 10 años en dirección Norte.

Por otro lado, en la Fig. 5.3 se resaltan las áreas críticas de los eventos simulados que producen la inundación de prácticamente toda la ciudad, como son el asociado a periodo de retorno de 30 años (dirección Norte), periodo de retorno de 50 años (dirección Norte) y periodo de retorno de 100 años. Se observa que prácticamente todas las viviendas sin cimientos son afectadas por mayores profundidades de inundación debido a su baja cota topográfica (Fig. 5.4).

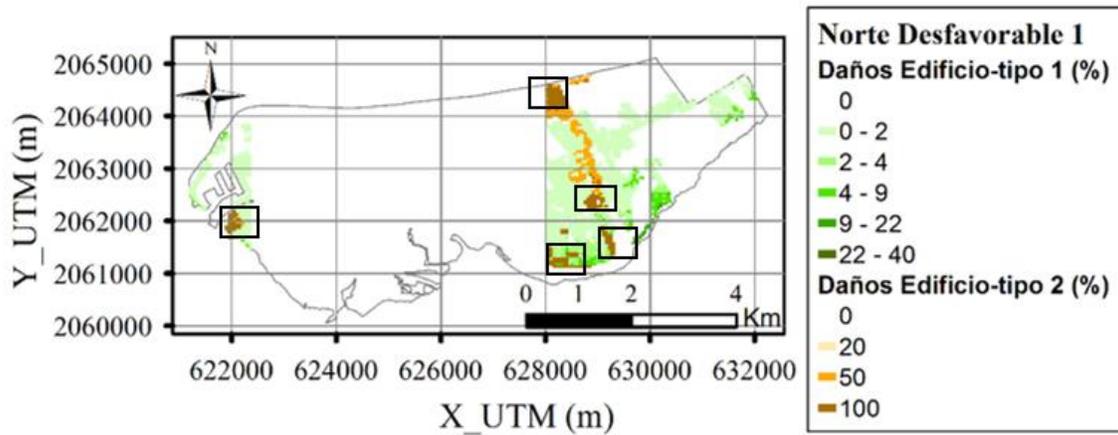


Figura 5.2. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y las condiciones precarias de las viviendas (sin cimientos) (en negro).

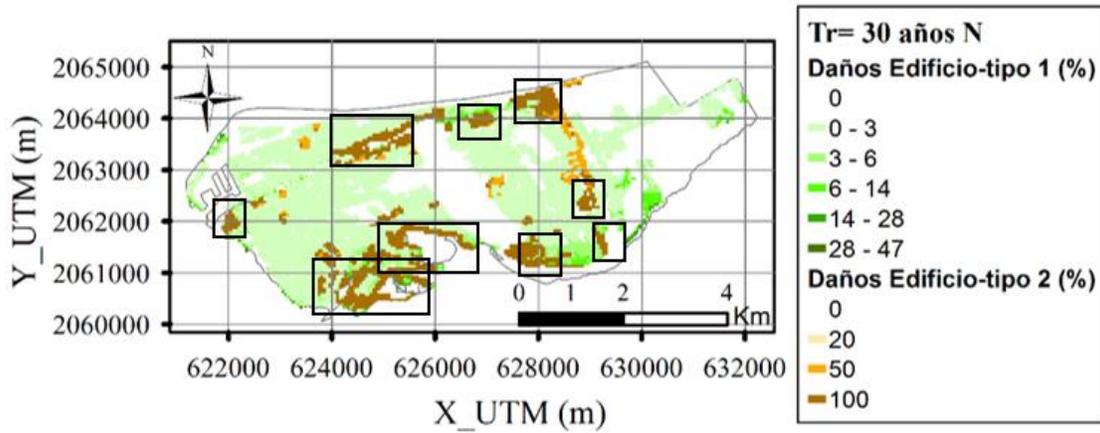


Figura 5.3. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y las condiciones precarias de las viviendas (sin cimientos) (en negro)- en los escenarios más desfavorables donde prácticamente toda la ciudad es inundada.

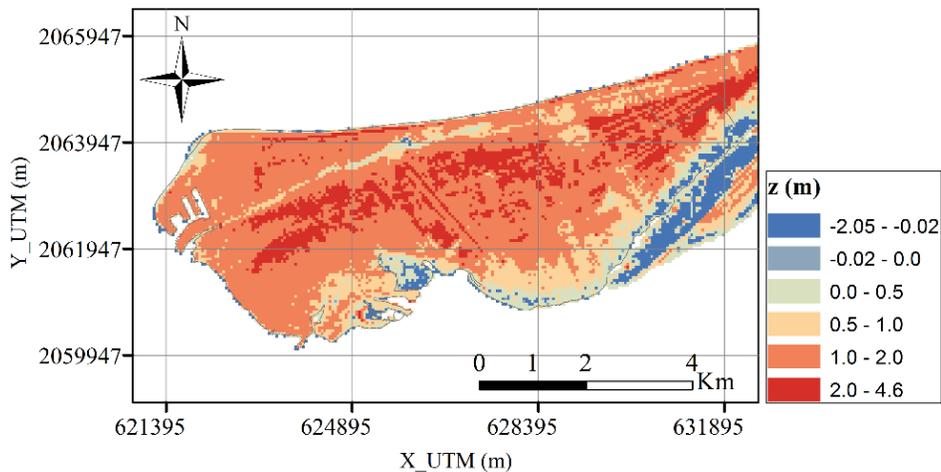


Figura 5.4. Topografía en Ciudad del Carmen.

Este análisis también se realiza para detectar las áreas donde se pueden producir mayores pérdidas por la afectación de los bienes en el interior de las viviendas. Así, en la Fig. 5.5 se incluyen regiones correspondientes a los eventos de nortes más desfavorables, huracanes Roxanne y Janet y el escenario de periodo de retorno de 10 años (en dirección Norte); y en la Fig. 5.6 las áreas críticas asociadas a los eventos analizados de periodo de retorno de 30 años (dirección Norte), periodo de retorno de 50 años (dirección Norte) y periodo de retorno de 100 años. Estas áreas se encuentran afectadas por una mayor profundidad de inundación (debido a su baja cota topográfica) y ocupadas por viviendas con mayor cantidad y calidad de bienes en su interior.

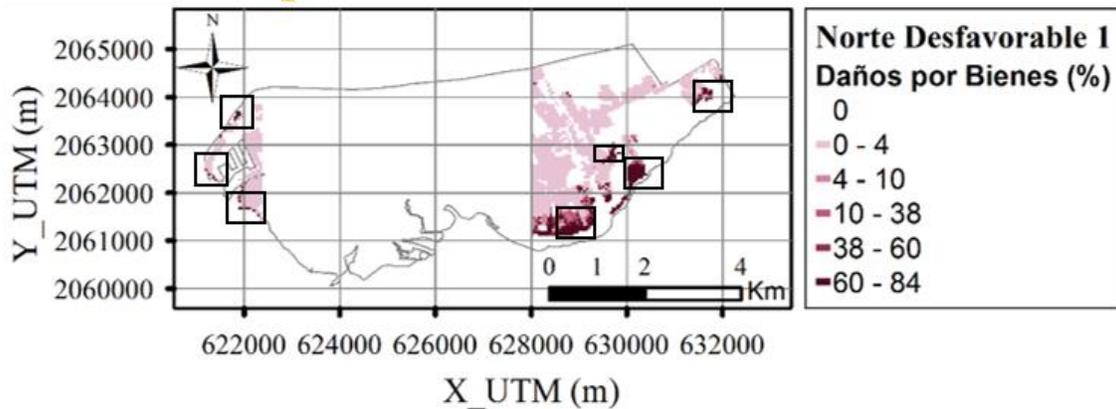


Figura 5.5. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y mayor disponibilidad de bienes en el interior de las viviendas (en negro).

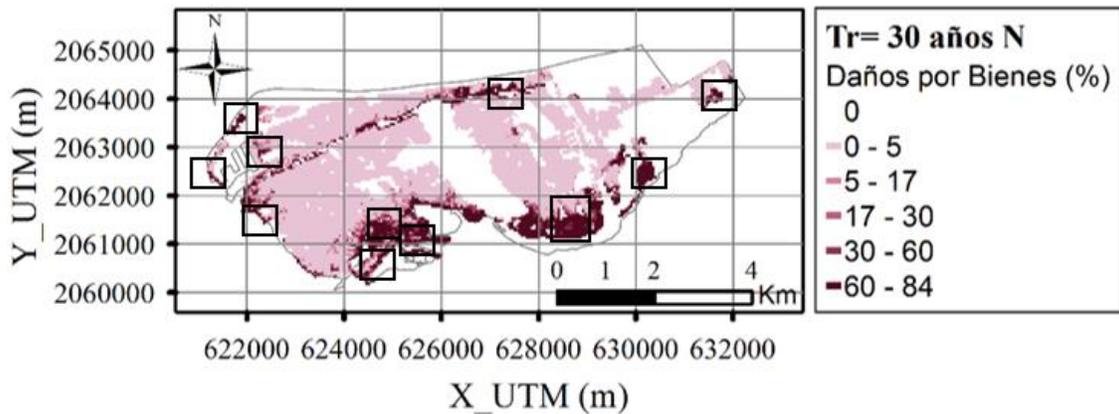
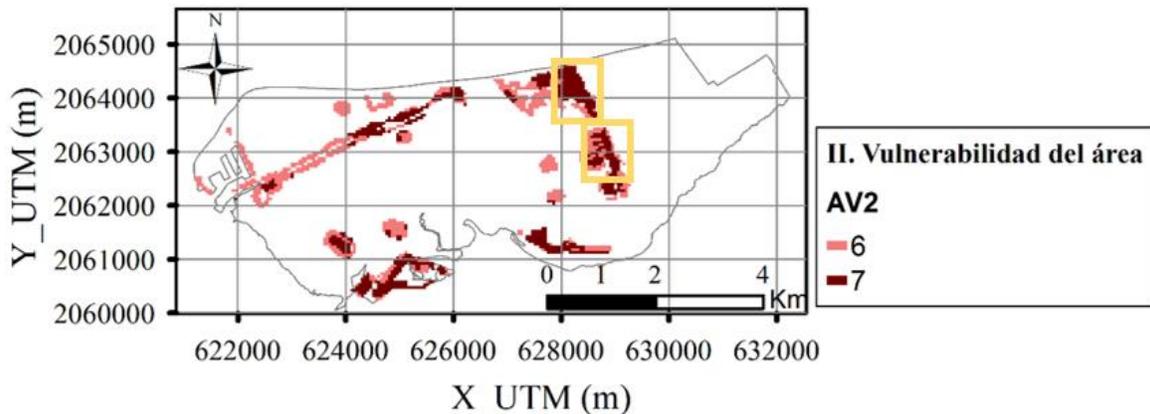


Figura 5.6. Áreas identificadas por mayores daños físicos debido a la mayor altura de inundación y mayor disponibilidad de bienes en el interior de las viviendas (en negro)- en los escenarios donde prácticamente toda la ciudad es afectada.

### 5.2.2. Diagnóstico por posibles problemas de salud por contaminación

Las áreas resaltadas en amarillo en la Fig. 5.7 son las zonas críticas identificadas en los escenarios de simulación con marea de tormenta máxima de 0.8 m (norte desfavorable 1, huracanes Janet y Roxanne) por el mayor número de afectados con problemas de salud debido a la vulnerabilidad de las viviendas (sin cimientos) y la concentración de una mayor densidad de población vulnerable. Las fuentes de contaminación consisten en la carencia de servicio de drenaje en las viviendas principalmente y, en menor medida, a la presencia de uso industrial junto al residencial.



**Figura 5.7. Áreas identificadas por mayores problemas de salud debido a la naturaleza del área y la concentración de mayor densidad de población vulnerable (en amarillo)- escenarios norte desfavorable 1, huracán Janet y huracán Roxanne.**

En los escenarios simulados con marea de tormenta superior, de 1 a 1.3 m (periodo de retorno de 30 años en dirección norte y periodo de retorno de 50 años en direcciones norte y noreste) las áreas críticas se extienden en parte del arroyo La Caleta y zona suroeste de la ciudad. Junto al arroyo La Caleta éstas vienen dadas por la tipología de viviendas junto a una mayor densidad de población vulnerable; mientras que en la zona sur únicamente a la tipología de edificio de vivienda vulnerable. Las fuentes de contaminación son debido a la carencia de drenaje en las viviendas y la proximidad del arroyo.

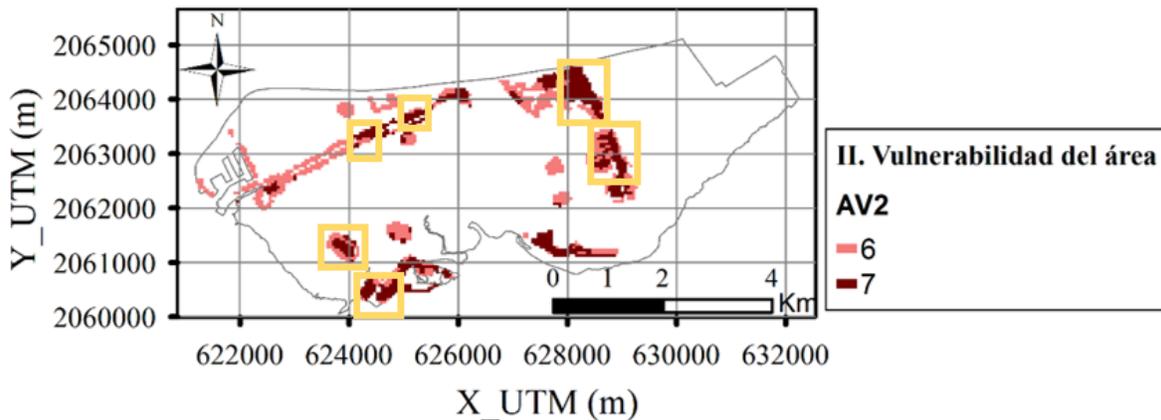


Figura 5.8. Áreas identificadas por mayores problemas de salud debido a la naturaleza del área (en la zona inferior), y por naturaleza del área y una mayor población vulnerable en el resto (junto al arroyo La Caleta y zona oriental) (en amarillo)- escenarios con marea de tormenta de 1 a 1.3 m.

### 5.2.3. Diagnóstico por pérdida de vidas humanas y lesiones

En cuanto a la pérdida de vidas humanas y lesiones, la Fig. 5.9 muestra las regiones críticas por influencia principal de la naturaleza del área (en amarillo) y de forma conjunta por ésta y la baja cota topográfica de las resaltadas en negro. Algunas de estas regiones han resultado más afectadas en escenarios como norte desfavorable 1, huracanes Janet y Roxanne y los eventos asociados al periodo de retorno de 10 años (en dirección norte y noroeste).

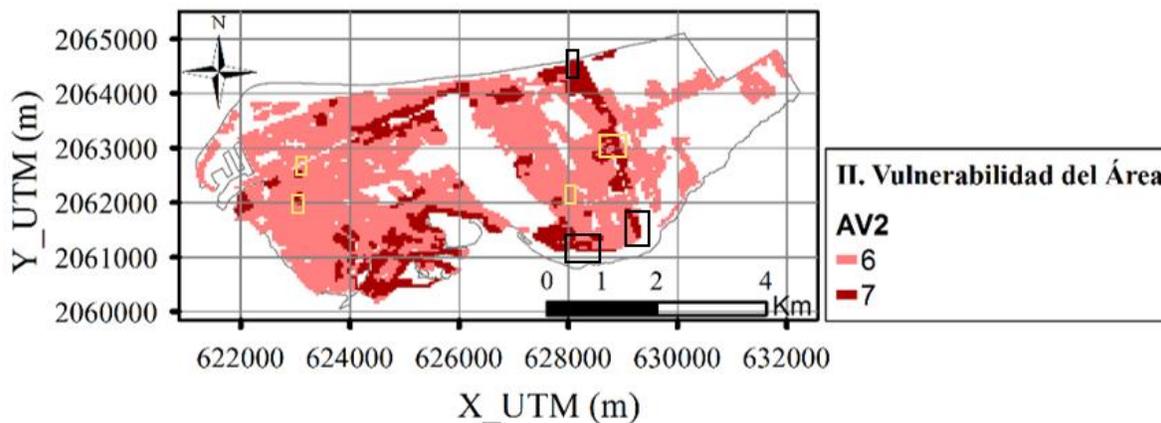


Figura 5.9. Áreas identificadas por mayor posibilidad de pérdida de vidas y lesiones debido a la naturaleza del área (en amarillo) y la combinación de ésta con una mayor altura de inundación (en negro).

En los eventos más extremos analizados, asociados a los periodos de retorno de 30, 50 y 100 años, además de las regiones identificadas previamente se observan otras a tener en cuenta junto a la playa Norte, en las proximidades del arroyo La Caleta y región suroeste de Ciudad del Carmen. En la Fig. 5.10 se resaltan en amarillo las críticas por su condición de vulnerabilidad del área (tipología de vivienda) y en negro las también afectadas por la cota topográfica.

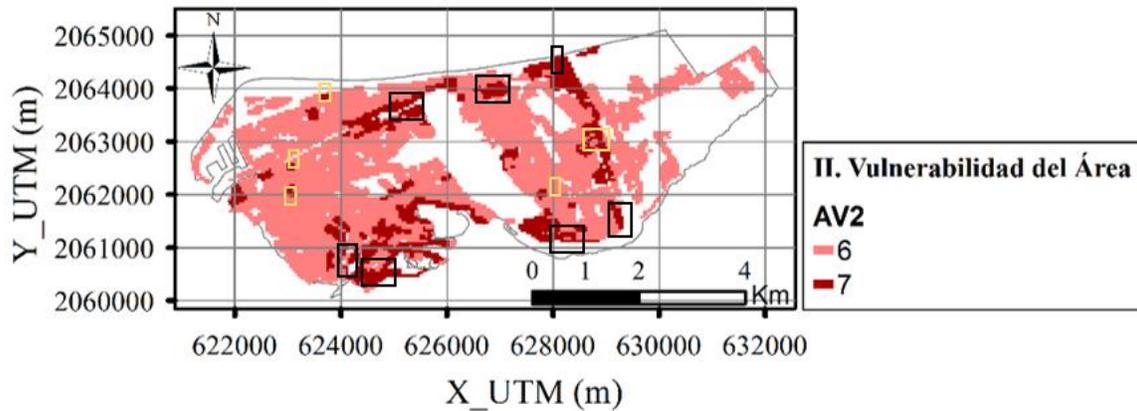


Figura 5.10. Áreas identificadas por mayor posibilidad de pérdida de vidas y lesiones debido a la naturaleza del área (en amarillo) y la combinación de ésta con una mayor altura de inundación (en negro)- en los casos más donde prácticamente toda la ciudad es afectada.

#### 5.2.4. Tratamiento del riesgo de inundación en Ciudad del Carmen

Del análisis realizado en los apartados anteriores se deduce la necesidad inmediata de actuar en las zonas identificadas con viviendas en condiciones precarias en cuanto a disponibilidad de drenaje sanitario, suelo de tierra y baja cota topográfica mejorando estas condiciones. Estas zonas se encuentran ubicadas principalmente en la región oriental y sur de la ciudad. Además sería recomendable proteger los bienes de las viviendas que ocupan las áreas más bajas y así evitar las grandes pérdidas que podrían producirse.

La reubicación de las viviendas situadas junto al arroyo La Caleta permitiría la reducción de los posibles daños por problemas de salud, lesiones o pérdida de vidas frente a un evento de inundación.

### 5.3. Ecosistema de manglar de Isla del Carmen

#### 5.3.1. Diagnóstico del estado

##### *Zonificación por tramos más afectados por el peligro de inundación*

Para el análisis de los tramos de Isla del Carmen que resultan inundados en cada escenario de simulación, se han extraído aquéllos que lo hacen con mayor frecuencia. Estas regiones se resaltan en la Fig. 5.11 en color azul; y se observa que algunos de éstos engloban superficie de manglar en regular o mala condición biológica (en color amarillo y rojo, respectivamente), lo que podría empeorar todavía más su estado si no se adoptan medidas.

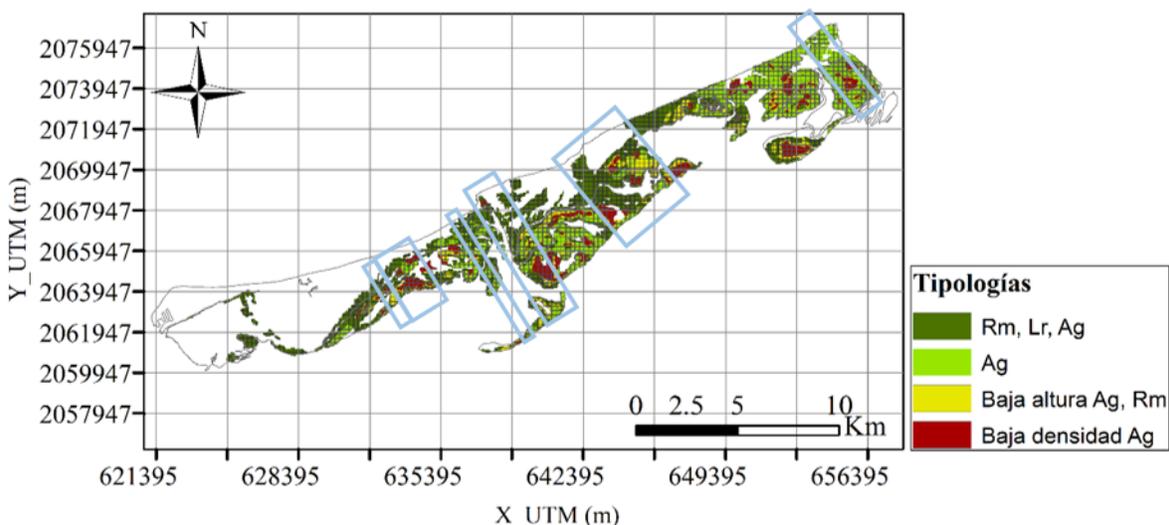
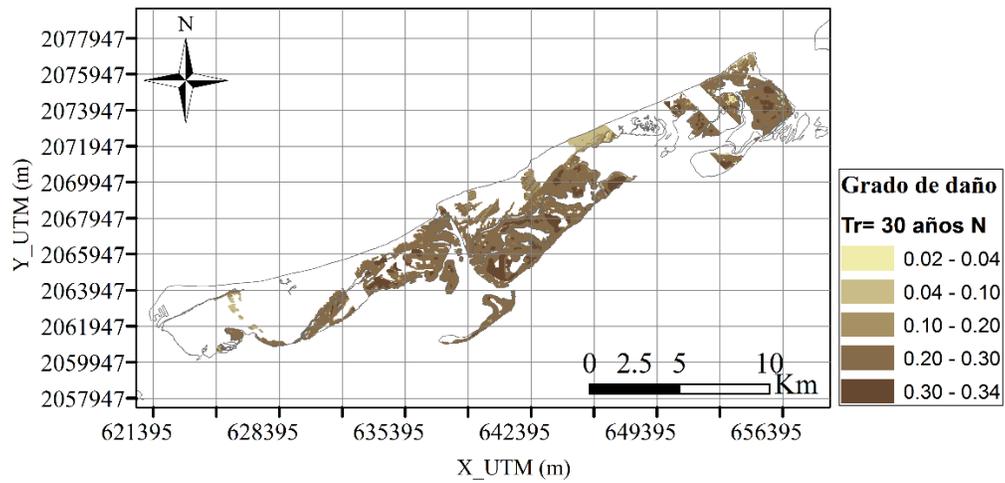


Figura 5.11. Áreas identificadas por presentar inundación en la mayoría de los escenarios de simulación analizados (en azul).

#### 5.3.2. Tratamiento del riesgo de inundación en el ecosistema de manglar

En general, las regiones definidas en la Fig. 5.11 se encuentran en el trasdós de las secciones de playa identificadas por su condición crítica debido a problemas de erosión. Por tanto, la estabilización de la playa mediante la adopción de las medidas descritas anteriormente favorecería la supervivencia del ecosistema de manglar.

Una medida que se podría adoptar es restaurar la superficie de manglar en mayor grado de degradación. Esto mejoraría la resiliencia del ecosistema ante la ocurrencia de los evento más extremos analizados, como el asociado a periodo de retorno de 30 años en dirección norte (Fig. 5.12) donde prácticamente toda la superficie de manglar se prevé que sea afectada y, en mayor grado, en las que disponen de peor condición ecológica.



**Figura 5.12.** Grado de daño estimado sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación - Tr= 30 años N.

## **Capítulo 6**

### **CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**



## **Capítulo 6**

### **CONCLUSIONES Y**

### **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **6.1. Conclusiones**

Las principales conclusiones que se deducen del estudio son:

1. La revisión de literatura mostró la importancia de desarrollar herramientas y modelos que permitan integrar las diversas categorías de daños en cada sitio en cuestión; incluidas las pérdidas intangibles, menos atendidas por las metodologías actuales por su mayor dificultad de evaluación.
2. Con base en los fundamentos de las metodologías de evaluación de riesgo más recientes desarrolladas, se propuso una metodología que incorpora nuevos aspectos relacionados con la resiliencia de los receptores ante el peligro de erosión y/o inundación en zonas costeras, y el análisis de daños en la salud por contacto directo con agua contaminada de inundación o posibles pérdidas medioambientales debido a un evento de inundación.
3. Los modelos de evaluación de pérdidas de vidas humanas-lesiones y perturbaciones sociales propuestos mostraron la importancia de las medidas preventivas/planes de adaptación y las características del área afectada en la reducción de los posibles daños. Así, en países de bajos recursos mediante la promoción del crecimiento económico equitativo y sostenible para fomentar la capacidad adaptativa de la población; en países de recursos altos, mediante la eficacia de las medidas de prevención como sistemas de alerta temprana y difusión en áreas más lejanas.

4. El modelo de evaluación de pérdidas medioambientales debido a un evento de inundación propuesto permitió estimar el grado de daño del ecosistema en cuestión, y la consecuente afección sobre los servicios ambientales, en función de su respuesta a las distintas amenazas; determinada por la tipología-características estructurales y condición biológica del ecosistema.
5. El análisis en Ciudad del Carmen mostró la presencia de áreas propensas a sufrir mayores daños sociales por la ubicación de viviendas en zonas de baja cota topográfica, con condiciones precarias en cuanto a disponibilidad de drenaje sanitario y sin cimentación; principalmente en las regiones oriental, sur de la ciudad, y junto al arroyo La Caleta. Algunas de estas áreas también fueron identificadas por su mayor afectación por daños físicos, junto a otras localizadas en playa Norte y junto a la Marina de Ciudad del Carmen.
6. Los resultados del análisis de peligro de erosión en la playa a lo largo de todo el litoral de Isla del Carmen permitió identificar las secciones de playa con necesidad de actuar para mejorar su estado y minimizar futuros daños.
7. Los resultados de modelación numérica fueron coherentes con las conclusiones del análisis de fotografía aérea, imágenes satelitales o de vídeo, en cuanto a la identificación de las secciones de playa con mayor erosión por la ocurrencia de tormentas.
8. La evaluación de daños sobre el ecosistema de manglar de Isla del Carmen permitió detectar regiones inundadas con mayor frecuencia en el trasdós de las secciones de playa identificadas por su condición crítica debido a problemas de erosión; por lo que la actuación sobre éstas podría proteger considerable superficie de manglar.
9. El análisis de daños en Cancún permitió analizar la validez de la metodología de evaluación propuesta en dos áreas con características socioeconómicas muy diferentes; además de evaluar la distribución espacial de daños físicos sobre la infraestructura y bienes de la zona hotelera por la ocurrencia de un fenómeno de características similares a la del huracán Wilma.

## **6.2. Futuras líneas de investigación**

Como futuras líneas de investigación se plantea:

1. Construcción de funciones de transferencia para estimar el cambio de cada uno de los servicios ambientales de los ecosistemas a partir del grado de daño.

2. Analizar con mayor precisión la definición del parámetro factor de escombros, introducido en el modelo de pérdida de vidas humanas y lesiones.
3. Analizar el radio de influencia a considerar para cada fuente de contaminación en la evaluación de problemas de salud por inundación.
4. Definición más precisa del parámetro “índice de calidad del ecosistema”, el cual incorpora la influencia del estado de un determinado ecosistema en su mayor o menor resiliencia a sufrir daños.
5. Establecer la relación entre los distintos indicadores seleccionados para evaluar la dificultad de recuperación después de un evento de inundación (en los sectores residencial, turístico, industrial, comercial e infraestructura); así como los propuestos para evaluar pérdidas intangibles indirectas sobre la sociedad (p.e. enfermedades transmitidas por vectores).
6. Analizar los escenarios de riesgo mediante la aplicación de las medidas de tratamiento anteriormente definidas.
7. Integrar la evolución temporal del riesgo mediante la incorporación de cambios de los elementos “trayectoria” o del “receptor”, como la batimetría o usos del suelo.
8. Calibración de los modelos propuestos mediante datos reales de inundación.
9. Definición más precisa de las funciones de valores que integran diferentes categorías de daños en una única estimación.



**ANEXOS**

---



## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo I. Tipología de especies de manglar

Anexo II. Fuentes de peligro en Isla del Carmen

Anexo III. Altura de erosión e inundación en la playa de Isla del Carmen

Anexo IV. Altura de inundación. Ciudad del Carmen

Anexo V. Altura de inundación. Isla del Carmen

Anexo VI. Daños Físicos. Ciudad del Carmen

Anexo VII. Problemas de salud por agua contaminada de inundación. Ciudad del Carmen

Anexo VIII. Pérdida de vidas humanas y lesiones. Ciudad del Carmen

Anexo IX. Daño sobre el manglar de Isla del Carmen debido a flujo de inundación

Anexo X. Caracterización del medio en Isla del Carmen

Los anexos vienen adjuntados en formato digital junto al documento.



## **BIBLIOGRAFÍA**

---



## Bibliografía

Abt, S.R., Wittier, R.J., Taylor, A. & Love, D.J., 1989. Human stability in a high flood hazard zone1, 881-890.

Adams, J., 1995, in *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.

ADAPT, Towards an Integrated Decision Tool for Adaptation Measures- Case Study: Floods, *Final Report (Phase I)*, Belgian Science Policy, ADAPT, Brussels Belgium 2008.

AHC, 2008. Boletín Turístico de Cancún, Cancún, Quintana Roo, Mexico, Vol. 1 (3).

Alderman, K., Turner, L.R. & Tong, S., 2012. Floods and human health: a systematic review, *Environment international*, 47, 37-47.

Apel, H., Thielen, A.H., Merz, B., Blöschl, G., 2006. A probabilistic modelling system for assessing flood risks, *Natural hazards*, 38(1-2), 79-100.

Association of State Flood Plain Managers, Use of *Benefit/Cost Analysis for FEMA Programs*, Association of State Flood Plain Managers, Madison, WI 2007.

Balica, S.F., Popescu, I., Beevers, L. & Wright, N.G., 2013. Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: a comparison, *Environmental Modelling & Software*, 41, 84-92.

Ballinger, R.C., Smith, H.D., Warren, L.M., 1994. The Management of the Coastal Zone of Europe, *Ocean Coastal Manage*, 22, 45-85.

Bana, C.A., P.A. Da Silva, Correia, F.N., 2004. Multicriteria evaluation of flood control measures: The case of Ribeira do Livramento, *Water Resources Management*, 18(3), 263-283.

Baquerizo, A., Losada, M.A., 2008. Human Interaction with Large Scale Coastal Morphological Evolution. An Assessment of the Uncertainty, *Coastal Eng.*, 55, 569-580.

Batica, J. & Gourbesville, P., 2011. Collaborative Research on Flood Resilience in Urban Areas: The CORFU Project, In *Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd*

*Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering* (p. 3914), Engineers Australia.

Belger, G., Haase, M. & Lippert, K., 2008. Odyssey to Kalypso—Experiences with setting up an Open Source Platform for Environmental Modeling.

Bellomo D., 2008. Flood Map Modernization and FEMA Levee Policy, FEMA – U.S. *Department of Homeland Security*, Hyattsville.

Brooks, N., 2003, *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, 38, 1-16.

Brouwer, R. & Van Ek, R., 2004, Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands, *Ecological economics*, 50(1), 1-21.

Bunt, J.S., 1996. Mangrove zonation: an examination of data from seventeen riverine estuaries in tropical Australia, *Annals of Botany*, 78(3), 333-341.

Burzel, A., Dassanayake, D., Naulin, M., Kortenhaus, A., Oumerachi, H., Wahl, T., et al. 2010. Integrated flood risk analysis for extreme storm surges (XTREMRISK), *Proceedings of 32th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, Shanghai, China.

Burzel, A., Dassanayake, D.R. & Oumeraci, H., 2015. Spatial modeling of tangible and intangible losses in integrated coastal flood risk analysis. *Coastal Engineering Journal*, 57(01), 1540008.

Burzel, A., Dassanayake, D.R., Oumeraci, H., 2012. Spatial modelling of tangible and intangible losses in an integrated risk analysis, *Proceedings of 34th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, Santander, España.

Chanson, H., Brown, R. & McIntosh, D., 2014. Human body stability in floodwaters: the 2011 flood in Brisbane CBD, In *Proceedings of the 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Engineering Challenges and Extremes*, The University of Queensland.

Crichton, D., 2001. The Implications of Climate Change for the Insurance Industry, *Building Research Establishment*, Watford, England.

Crichton, D., 2008. Urban Flood Risk Management- A Tool for Integrated Flood Management, (WMO/GWP Associated Programme on Flood Management), Flood Management Tools Series, *World Meteorological Organisation*, Geneva 2008.

Dal-Cin, R. & Simeoni, U., 1994. A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy), *J. Coastal Res.*, 10, 18-29.

Dassanayake, D.R., Burzel, A. & Oumeraci, H., 2015. Methods for the evaluation of intangible flood losses and their integration in flood risk analysis, *Coastal Engineering Journal*, 57(01), 1540007.

Dassanayake, D.R., Burzel, A., Kortenhaus, A., Oumeraci, H., 2010. Framework and Methods for the Evaluation of Intangible Losses and their Integration in Coastal Flood Risk Analysis, *XtremRisK Progress Report*, *Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources*, Technische Universität Braunschweig, 84 p.

Davidson, R.A., & Lambert, K.B., 2001. Comparing the hurricane disaster risk of US coastal counties, *Natural Hazards Review*, 2(3), 132-142.

Davis, S.A., & Skaggs, L.L., 1992. *Catalog of residential depth-damage functions used by the army corps of engineers in flood damage estimation* (No. IWR-92-R-3), ARMY ENGINEER INST FOR WATER RESOURCES ALEXANDRIA VA.

Dawson, R.J., Dickson, M.E., Nicholls, R.J., Hall, J.W., Walkden, M.J., Stansby, P.K., ... & Jordan, A., 2009. Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change, *Climatic Change*, 95(1-2), 249-288.

De La Cruz-Reyna, S., 1996, in *Defining Risk* (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6-8.

Defra/Environment Agency, Best Practice in Coastal Flood Forecasting, R&D Technical Report FD2206/TR1; HR Wallingford Report TR 132, DEFRA, London, UK 2004.

DHA, U., 1992. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management, *UN DHA (United Nations Department of Humanitarian Affairs)*, Geneva.

Dhondia, J.F., & Stelling, G.S., 2004. SOBEK one dimensional–two dimensional integrated hydraulic model for flood simulation–its capabilities and features explained, *In Proceedings of the 6th International Conference*, 21, 24p.

Du, W., FitzGerald, G.J., Clark, M. & Hou, X.Y., 2010. Health impacts of floods, *Prehospital and disaster medicine*, 25(03), 265-272.

Duke, N., Ball, M. & Ellison, J., 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves, *Global Ecology & Biogeography Letters*, 7(1), 27-47.

Duxbury, J. & Dickinson, S., 2007. Principles for Sustainable Governance of the Coastal Zone: In the Context of Coastal Disasters, *Ecological Economics*, 63, 319-330.

Ellison, J.C., 1999. Impacts of sediment burial on mangroves, *Marine Pollution Bulletin*, 37(8), 420-426.

Escudero, M., Silva, R. & Mendoza, E., 2014. Beach Erosion Driven by Natural and Human Activity at Isla del Carmen Barrier Island, Mexico, *Journal of Coastal Research*, 71(sp1), 62-74.

Evans, E., Ashley, R., Hall, J., Penning-Rowsell, E., Saul, A., Sayers, P., ... & Watkinson, A., 2004. Foresight. Future flooding, *Scientific summary*, 1.

Faber, M.H. & Stewart, M.G., 2003. Risk Assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion, *Reliability engineering & system safety*, 80(2), 173-184.

Fekete, A., 2009. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany, *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 393-403.

Feller, I.C., & Sitnik, M., 1996. Mangrove ecology: a manual for a field course, *Smithsonian Institution*, Washington, DC.

FEMA, 1997. Multi-hazard identification and risk assessment, *Federal Emergency Management Agency*.

Flanagan, B.E., Gregory, E.W., Hallisey, E.J., Heitgerd, J.L. & Lewis, B., 2011. A social vulnerability index for disaster management, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 8(1).

FLOODsite, Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies, *FLOODsite EU Integrated Project, Sixth Framework Programme, European Community*, Brussels 2004-2009.

Förster, S., Kuhlmann, B., Lindenschmidt, K.E. & Bronstert, A., 2008. Assessing flood risk for a rural detention area, *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2), 311-322.

Gattenlöhner, U., Lampert, S. & Wunderlich, K., 2007. Mangrove Rehabilitation Guidebook Published in the framework of the EU-ASIA PRO ECO II B Post Tsunami Project in Sri Lanka (Global Nature Fund).

Gilman, E., Ellison, J.C., Jungblut, V., Van Lavieren, H., Wilson, L., Areki, F., ... & Kilman, M., 2006. Adapting to Pacific Island mangrove responses to sea level rise and climate change, *Climate Research*, 32(3), 161-176.

Gilman, E.L., Ellison, J., Duke, N.C. & Field, C., 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review, *Aquatic botany*, 89(2), 237-250.

González, D.M., 2010. Valoración y Gestión del Riesgo por Inundaciones en Municipios Costeros (Una aproximación con Base en Indicadores), en Cambio Climático en México: Un Enfoque Costero y Marino (Eds.: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L.

Alpuche Gual, G.J. Villalobos-Zapata), Universidad Autónoma de Campeche, CETYS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche, pp. 591-606.

Gornitz, V. & Kanciruk, P., 1989. Assessment of global coastal hazards from sea-level rise (No. CONF-8907104-1). Oak Ridge National Lab., TN (USA).

Gornitz, V.N., Daniels, R.C., White, T.W., Birdwell, K.R., 1997. Multi Hazard-Identification and Risk Assessment, The Cornerstone of the National Mitigation Strategy, *Federal Emergency Management Agency*, New York.

Granger, K., 2003. Quantifying Storm Tide Risk in Cairns, *Nat. Hazards*, 30(2), 165-185.

Green, C.H. & Penning-Rowsell, E.C., 1989. Flooding and the quantification of ‘intangibles’, *Water and Environment Journal*, 3(1), 27-30.

Hall, J.W., Evans, E.P., Penning-Rowsell, E.C., Sayers, P.B., Thorne, C.R., Saul, A.J., 2003. Quantified scenarios analysis of drivers and impacts of changing flood risk in England and Wales: 2030-2100, Global Environmental Change Part B, *Environ. Hazards*, 5(3), 51-65.

Hallegatte, S., 2008. An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina, *Risk analysis*, 28(3), 779-799.

Hammond, M., Chen, A., Djordjevic, S., 2014. Flood Damage Model Case Study Results. CORFU Report, University of Exeter, 117 p.

Helm, I., 1996, in *Defining Risk* (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6-8.

Hydraulics, D., 1999. User Manual Delft3D-FLOW, WLjDelft Hydraulics, The Netherlands.

INEGI, 2003. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, *Edición 2002*, No. 61.

IPCC, 2003, in *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich.

IPET (Interagency Performance Evaluation Task Force)., 2007. Performance evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana hurricane protection system-volume VII: the consequences, Final report 26 March 2007.

ISO/EC, 1999, in *Language of Risk- Project Definitions*, HR Wallingford 2009.

Järvelä, J., 2004. Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation, *International Journal of River Basin Management*, 2(1), 61-70.

Jha, A., Lamond, J., Bloch, R., Bhattacharya, N., López, A., Papachristodoulou, N., Bird, A. et al., 2011. Five Feet High and Rising: Cities and Flooding in the 21st Century, *World Bank Policy Research Working Paper Series*, 5648, The World Bank Group, Washington, DC.

Jonkman, S.N. & Vrijling, J.K., 2008. Loss of life due to floods, *Journal of Flood Risk Management*, 1(1), 43-56.

Jonkman, S.N., & Penning-Rowsell, E., 2008. Human Instability in Flood Flows1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1208-1218.

Jonkman, S.N., Bočkarjova, M., Kok, M. & Bernardini, P., 2008. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands, *Ecological economics*, 66(1), 77-90.

Joshi, H. & Ghose, M., 2003. Forest structure and species distribution along soil salinity and pH gradient in mangrove swamps of the Sundarbans, *Tropical Ecology*, 44(2), 195-204.

Kang, J.L., Su, M.D. & Chang, L.F., 2005. Loss functions and framework for regional flood damage estimation in residential area, *Journal of Marine Science and Technology*, 13(3), 193-199.

Kaplan, M., Renaud, F.G. & Lüchters, G., 2009. Vulnerability assessment and protective effects of coastal vegetation during the 2004 Tsunami in Sri Lanka, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1479-1494.

Kelman I., 2003, in *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.

King, D., 2001. Uses and limitations of socioeconomic indicators of community vulnerability to natural hazards: data and disaster in Northern Australia, *Nat. Hazards*, 24(2), 147-156.

Kirby J.T. & Dalrymple, R.A., 1994. Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.5: Documentation and User's Manual, *Center for Applied Coastal Research*, Department of Civil Engineering, University of Delaware.

Koshimura, S., Katada, T., Mofjeld, H.O. & Kawata, Y., 2006. A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow, *Natural Hazards*, 39(2), 265-274.

Kowalewski, J., & Ujeyl, G., 2012. Estimating direct and indirect damages from storm surges: The case of Wilhelmsburg, Hamburg, *Comprehensive Flood Risk Management*.

Krauss, K.W., McKee, K.L., Lovelock, C.E., Cahoon, D.R., Saintilan, N., Reef, R. & Chen, L., 2014. How mangrove forests adjust to rising sea level, *New Phytologist*, 202(1), 19-34.

Lee, S.Y., Primavera, J.H., Dahdouh-Guebas, F., McKee, K., Bosire, J.O., Cannicci, S., ... & Mendelssohn, I., 2014. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment, *Global Ecology and Biogeography*, 23(7), 726-743.

Lekuthai, A. & Vongvisessomjai, S., 2001. Intangible flood damage quantification, *Water Resources Management*, 15(5), 343-362.

Lu, W., Chen, L., Wang, W., Tam, N.F.Y. & Lin, G., 2013. Effects of sea level rise on mangrove *Avicennia* population growth, colonization and establishment: evidence from a field survey and greenhouse manipulation experiment, *Acta oecologica*, 49, 83-91.

Manojlovic, N. & Pasche, E., 2007. FloReTo–Web Based Advisory Tool for Flood Mitigation Strategies for Existing Buildings, *Advances in Urban Flood Management*, 359.

Marín A. & Martín D., 2015. Proyectos y estudios de impacto ambiental, Noveno informe mensual de supervisión ambiental y seguimiento a la remediación-rehabilitación, Cd del Carmen, Campeche.

McKee, K.L., 1996. Growth and physiological responses of neotropical mangrove seedlings to root zone hypoxia, *Tree physiology*, 16(11-12), 883-889.

McLeod, E. & Salm, R.V., 2006. *Managing mangroves for resilience to climate change*. Gland, Switzerland: World Conservation Union (IUCN).

Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A. & Schmidtke, R., 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings, *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 153-163.

Meyer, V., Haase, D. & Scheuer, S., 2007. GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management, *FLOODsite Project Report*, Contract No: GOCE-CT-2004-505420.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. *Ecosystems and human well-being. A framework for assessment*, Millenium Ecosystem Assessment Series, Vol. 5, Washington D.C., Island Press.

Moreno-Casasola, P. & Infante, D.M., 2009. Manglares y selvas inundables, Instituto de Ecología, A.C. CONAFOR Y OIMT, Xalapa, Ver. México, 150 pp.

Moreno-Casasola, P. & Peresbarbosa, E., 2006. Manejo integral de la zona costera. Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal, *Instituto de Ecología AC y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT-Gobierno del Estado de Veracruz*, Xalapa, Ver., México. I, 21-54.

Morgan, M.G., Henrion, M., 1990, in *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.

Nadal, N.C., Zapata, R.E., Pagan, I., López, R. & Agudelo, J., 2009. Building damage due to riverine and coastal floods, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(3), 327-336.

Narayan, S., Hanson, S., Nicholls, R., Clarke, D., 2011. Use of the source-pathway-receptor-consequence model in coastal flood risk assessment, in *European Geosciences Union General Assembly*, Copernicus Publisher, Vienna.

Naulin, M., Kortenhuis, A. & Oumeraci, H., 2011. Failure probability of flood defence structures/systems in risk analysis for extreme storm surges, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 13.

Oumeraci, H., Kortenhuis, A., Burzel, A., Naulin, M., Dassanayake, D. R., Jensen, J., ... & Fröhle, P., 2015. XtremRisk—Integrated flood risk analysis for extreme storm surges at open coasts and in estuaries: Methodology, key results and lessons learned, *Coastal Engineering Journal*, 57(01), 1540001.

PDU, 2009. Actualización Programa Director Urbano del centro de población Ciudad del Carmen. Campeche: Por una Ciudad bella, competitiva, sustentable e incluyente, tomo I. Antecedentes y diagnóstico, 158p.

Pendleton, E.A., Barras, J.A., Williams, S.J., Twichell, D.C., 2010. Coastal vulnerability assessment of the Northern Gulf of Mexico to sea-level rise and coastal change, *US Geological Survey*.

Penning-Rowsell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D. & Surendran, S., 2005. Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework, *Natural Hazards*, 36(1-2), 43-64.

Pérez-Ceballos, R., Zaldívar-Jiménez, A., Ladrón de Guevara, P., Amador del Angel, L., Endañú-Huerta, E., Guevara-Carrió, E., Herrera-Silveira., 2013. Los manglares de la región Atasta-Sabancuy, Campeche, México, *Informe final. Programa piloto de conservación y restauración de manglares dentro del Proyecto Integral para el Gran Ecosistema Marino del Golfo de México*, SEMARNAT, UNIDO, GEF, Ciudad del Carmen, Campeche, México. p21.

PMOET, 2009. Programa Municipal de Ordenamiento Ecológico y Territorial de Carmen; Campeche, Gobierno de Campeche, 266p.

Ramsbottom, D., 2003. *Flood risks to people: Phase 1*, London: DEFRA.

Ramsbottom, D., Wade, S., Bain, V., Hassan, M., Penning-Rowsell, E., Wilson, T., ... & Floyd, P., 2004. R&D outputs: flood risks to people. Phase 2, FD2321/IR2, Department for the Environment, *Food and Rural Affairs/Environment Agency*.

Ricketts P., 1986, National policy and management responses to the hazard of coastal erosion in Britain and the United States, *Appl. Geogr.*, 6(3), 197-221.

Rodríguez-Zúñiga, M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule, A.D., Márquez-Mendoza, J. D., Vázquez- Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Velázquez-Salazar, S., Cruz-López, M. I., Ressler, R., Uribe-Martínez, A., Cerdeira-Estrada, S., AcostaVelázquez, J., Díaz-Gallegos, J., Jiménez-Rosenberg, R., FueyoMac Donald, L. y Galindo-Leal, C., 2013. Manglares de México/ Extensión, distribución y monitoreo, *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, México D.F., 128 pp.

Roelvink, D., Reniers, A.J.H.M., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R., 2010. XBeach model description and manual, *Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology*.

Roode, N., 2008. Coastal flood risk and trends for the future in the North Sea region, *Rijkswaterstaat, RIKZ*.

RPA- Risk and Policy Analysts Ltd., *Evaluating a Multi-criteria Analysis (MCA) Methodology for Application to Flood Management and Coastal Defense Appraisals*, R&D Technical Report, DEFRA, London 2004.

Saenger, P., 2002. *Mangrove ecology, silviculture and conservation*, Springer Science & Business Media.

Samuels P., 2009, *Language of Risk- Project Definitions*, HR Wallingford.

Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., ... & Lawrence, M., 2006. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment, *Natural Hazards Review*, 7(2), 72-81.

Schanze, J., Zeman, E. & Marsalek, J. (Eds.), 2007. *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, Vol. 67, Springer Science & Business Media.

Schrage, N., Antanaskovic, D., Jung, T. & Pasche, E., 2009. KALYPSO-An Open Source Software Tool for Flood Studies in Rivers, In *Proceedings of the 8th International Conference on Hydroinformatics*, Concepción, Chile.

SCINCE, 2010. Sistema para la Consulta de Información Censal, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Selvam, V. & Karunagaran, V.M., 2004. Coastal Wetlands: Mangrove Conservation and Management. *Orientation Guide 1*, Ecology and Biology of Mangroves.

Silva, R., Borthwick, A.G. & Taylor, R.E., 2005. Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation, *Coastal Engineering*, 52(5), 391-407.

Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Espinal, J., Mendoza, E., 2007. *Atlas de clima marítimo de la vertiente Pacífica Mexicana*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz, M., Mendoza, E., Delgadillo, M., Escudero, M., Félix, A., y Cid, A., 2014. *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*, UNAM/SEMARNAT.

Smith, K. & Ward, R., 1998. *Floods: physical processes and human impacts*, John Wiley and Sons Ltd.

Smith, K., 1996, in *Defining Risk* (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6-8.

Smith, K., 2013. *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*, Routledge.

Spalding, M., Kainuma, M., Collins, L., 2010a. *World Atlas of Mangroves*, A collaborative project of ITTO, ISME, FAO, UNEP-WCMC, UNESCO-MAB, UNU-INWEH and TNC, London (UK): Earthscan, London, 319 pp.

Stenchion, P., 1997, in *Defining Risk* (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6-8.

Stolper, D., List, J.H. & Thieler, E.R., 2005. Simulating the evolution of coastal morphology and stratigraphy with a new morphological-behaviour model (GEOMBEST), *Marine Geology*, 218(1), 17-36.

Sugimoto, T., Murakami, H., Yozuki, K., Nishikawa, K., Shimada, T., 2003. A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities, *Nat Hazards*, 29(3), 585-600.

Thorne, C.R., Evans, E P. & Penning-Rowsell, E.C., 2007. *Future flooding and coastal erosion risks*, Thomas Telford.

Thywissen, K., 2006. *Components of risk: a comparative glossary*, UNU-EHS, Bonn, Germany.

Tkach, R.J. & Simonovic, S.P., 1997. A new approach to multi-criteria decision making in water resources, *J. Geogr. Inf. Decis. Anal.*, 1(1), 25-43.

TNO- Built Environment and Geoscience, The Netherlands, [www.tno.nl](http://www.tno.nl)

Tolman, H.L., 2014. The WAVEWATCH III® Development Group, *User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 4.18.Tech*, Note 316, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Tsakiris, G., Nalbantis, I. & Pistrika, A., 2009. Critical technical issues on the EU flood directive, *Eur Water*, 25(26), 39-51.

Turner, I.M., Gong, W.K., Ong, J.E., Bujang, J.S., Kohyama, T., 1995. The architecture and allometry of mangrove saplings, *Functional Ecology*, 9, 205-212.

Ujeyl, G. & Rose, J., 2015. Estimating Direct and Indirect Damages from Storm Surges: The Case of Hamburg–Wilhelmsburg, *Coastal Engineering Journal*, 57(01), 1540006.

Ukpong, I.E., 1991. The performance and distribution of species along soil salinity gradients of mangrove swamps in southeastern Nigeria, *Vegetatio*, 95(1), 63-70.

Vellinga, P., Klein R.J.T., 1993. Climate Change. Sea Level Rise and Integrated Coastal Zone Management: An IPCC Approach, *Ocean Coastal Manage*, 21, 245-268.

Villalobos-Zapata, G.J., Yáñez-Arancibia, A., Day J. W., Lara Domínguez, A.L., 1999. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México, p. 263-274. In: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara Domínguez (eds.). *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*, Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. 380 p.

Vittal Hedge, A. & Radhakrishnan Reju, V., 2007. Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India, *Journal of Coastal Research*, 1106-1111.

Walker, G.P., Burningham, K., Fielding, J., Smith, G., Thrush, D., Fay, H., 2006. Addressing environmental inequalities: Flood risk. Bristol: Environment Agency.

Wallingford, HR., 2002, in *Language of Risk- Project Definitions*, HR Wallingford 2009.

Waarts, P.H., 1992. Method for determining loss of life caused by inundation, *TNO-report Delft*, The Netherlands (in Dutch).

Yanagisawa, H., Koshimura, S., Goto, K., Miyagi, T., Imamura, F., Ruangrassamee, A. & Tanavud, C., 2009. The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(1), 27-37.

Ye, Y., Tam, N.F., Wong, Y.S. & Lu, C.Y., 2003. Growth and physiological responses of two mangrove species (*Bruguiera gymnorrhiza* and *Kandelia candel*) to waterlogging, *Environmental and Experimental Botany*, 49(3), 209-221.

Zahran, S., Brody, S.D., Peacock, W.G., Vedlitz, A. & Grover, H., 2008. Social vulnerability and the natural and built environment: a model of flood casualties in Texas, *Disasters*, 32(4), 537-560.

Zanuttigh, B., Simcic, D., Bagli, S., Bozzeda, F., Pietrantoni, L., Zagonari, F., ... & Nicholls, R.J., 2014. THESEUS decision support system for coastal risk management, *Coastal Engineering*, 87, 218-239.

Zerger, A., Smith, D.I., Hunter, G.J., Jones, S.D., 2002. Riding the Storm: A Comparison of Uncertainty Modelling Techniques for Storm Surge Risk Management, *Appl, Geogr.*, 22, 307-330.

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

[http://www.lavozdegalicia.es/internacional/2005/10/22/0003\\_4184607.htm](http://www.lavozdegalicia.es/internacional/2005/10/22/0003_4184607.htm)

<http://www.inecc.gob.mx/>