



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

CARACTERIZACIÓN DEL EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO EXTREMO
EN ACAPULCO, GUERRERO, EN SEPTIEMBRE DE 2013

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

PRESENTA:
MEJÍA ESTRADA PAMELA ISKRA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, D. F. JUNIO DE 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. González Villarreal Fernando J.

Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón

Vocal: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

1 er. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.

2 do. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

FIRMA

A Laura, Andrés y José Antonio

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme nuevamente el honor de aprender de los profesores más reconocidos en sus aulas. A cada uno de esos docentes por compartir su inmenso conocimiento con la mejor disposición.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por proveerme de las mejores herramientas y ser el impulso profesional para siempre ir por más.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña, por su asesoría, ejemplo y los constantes retos académicos que alientan la curiosidad y el ánimo de aprender.

A mis asesores, Dr. Fernando J. González Villarreal, por sus atinadas observaciones y recomendaciones, Dr. Óscar Pozos Estrada y Dr. Carlos A. Escalante Sandoval por facilitar enormemente la pronta conclusión de la tesis y muy especialmente al Dr. Ramón Domínguez Mora por procurar el aprendizaje sólido y por su constante interés en la realización de este trabajo.

A mi mamá, por ser ejemplo de que el apoyo se otorga, el respeto se gana, la confianza se cultiva y el amor sencillamente se da. A Andrés, por transmitirme la energía de alguien que ama lo que hace, y por enseñarme que cuando se quiere, se puede.

A José Antonio, por ser mi mejor amigo, el nombre de mi felicidad, la confianza para caminar, la paciencia para enmendar, la determinación para continuar, la energía para correr, la tranquilidad para disfrutar y la libertad de amar. Para describirte necesito las palabras más afectuosas y enérgicas de todos los idiomas.

A mi familia, por alentarme a lograr lo que me propongo. A Alex, Jorge, Lore y Alfonso por ser la risa diaria que me recuerda que las cosas sencillas son las que constituyen los grandes sentimientos.

A Mónica, por ser mi confidente, cómplice, maestra y hermana. A Óscar Licea, por cada risa y cada vivencia, por nunca rendirte.

A mis compañeros de estudio por sus atinados consejos, risas espontáneas, malentendidos resueltos y desveladas conjuntas.

A mis compañeros de cubículo (y a los que ya están cumpliendo sus metas en otra institución) por los momentos divertidos y por su paciencia al compartirme lo mucho que saben, especialmente a Miguel Laverde por ser ejemplo de determinación y por su simplicidad para reír. A Juan Orosco por su invaluable ayuda con el trabajo de cómputo.

A Jessica, por ayudarme a ver que los bloques para construir la felicidad siempre estuvieron a mi alcance.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado.

A la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y la Secretaría de Gobernación al IIUNAM bajo el proyecto *Sistema de Cuantificación de Pérdidas, Control de Recursos y Análisis de Riesgos para el FONDEN (2012)* por los datos del modelo digital de elevaciones de Acapulco.

Resumen

Las inundaciones son eventos que se presentan en países en desarrollo y desarrollados por igual, lo genera la necesidad de entender sus causas y establecer estrategias de gestión y políticas de acción para reducir el riesgo en una zona habitada, ya que si no se reduce su vulnerabilidad a los efectos de un evento extremo, persistirán condiciones desfavorables al desarrollo social.

El presente trabajo tiene como objetivo principal la reproducción numérica del evento hidrometeorológico extremo registrado entre el 14 y 18 de Septiembre de 2013, en la ciudad de Acapulco, Guerrero, ubicada en el litoral del Pacífico mexicano. Se trata de la presencia simultánea de Ingrid, huracán de categoría 1, y la tormenta tropical Manuel (que se convertiría en huracán categoría 1 días después de sus efectos en Acapulco) que produjeron lluvias de gran intensidad que provocaron el desbordamiento de dos ríos en la región y con ello pérdidas económicas y sociales que más de medio año después continúan siendo resarcidas. Para ello, se utilizó un marco de trabajo que involucra modelos numéricos en cascada para la reproducción meteorológica, hidrológica e hidrodinámica del evento utilizando datos espaciales de alta resolución.

El trabajo realizado pone de manifiesto que la reproducción numérica de un evento de inundación permite realizar un diagnóstico sobre las posibles causas que generaron este desastre, y representa el punto de partida para la implementación de medidas de mitigación del riesgo. Lo anterior se traduce en un plan integral de obras físicas y acciones institucionales que, aplicadas en conjunto, garanticen la seguridad de la población ante un evento de igual o mayor magnitud que el que provocó los daños en Acapulco. Dichas medidas integrales deben servir de ejemplo para la reestructuración de las políticas de desarrollo social y económico.

Abstract

Flooding are events than can occur in both developed and developing countries, thus highlighting the need of understanding its causes and establish management strategies and action policies in order to reduce the risk in an inhabited area. If the vulnerability associated to a flooding event is not diminished, adverse conditions for social development will persist.

The present work has as primary objective, the numerical modelling of the extreme hydrometeorological event occurred between September 14 and 18, 2013, in the city of Acapulco, Guerrero, situated in Mexico's Pacific coast. It is referred to the simultaneous presence of hurricane Ingrid (category 1) and tropical storm Manuel (which will later develop into hurricane category 1 after its impact in Acapulco); the event formerly described produced heavy rainfall which lead to the overflow of two rivers in the zone, and therefore economic and social losses that are currently in process of being covered. To do so, a cascade modelling approach comprised by meteorological, hydrological and hydrodynamic models is implemented.

The research done shows that numerical modelling enables the analysis regarding the possible causes that triggered this disaster, and represents the starting point for the implementation of risk reduction measures. The previous stated can be done through a holistic plan of physical works and institutional actions that, applied altogether, ensure the security of the population when it comes to a similar or greater event than the one that caused the damages in Acapulco. The aforementioned measures must provide an example for the reorganization of social and economic development policies.

Índice

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
CAPÍTULO 2 RIESGO POR INUNDACIONES	5
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE RIESGO	5
2.2 ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIONES	6
2.2.1 MODELO SOURCE-PATH-RECEPTOR-CONSEQUENCE	6
2.2.2 RIESGO POR INUNDACIONES EN MÉXICO	8
CAPÍTULO 3 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN CONTRA INUNDACIONES	10
3.1 MEDIDAS DE MITIGACIÓN	10
3.1.1 MEDIDAS ESTRUCTURALES	10
3.1.2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES	11
3.2 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	12
3.3 ENFOQUE MODERNO DE LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES	13
3.3.1 PLAN HÍDRICO INTEGRAL DE TABASCO	14
3.3.2 THE PITT REVIEW	15
3.3.3 ESTRATEGIA DEL GOBIERNO ESCOCÉS	17
3.4 APLICABILIDAD EN MÉXICO	18
3.4.1 NOTA SOBRE EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y USO DE SUELO	19
3.4.2 NOTA SOBRE CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS	19
CAPÍTULO 4 EVENTO EXTREMO EN ACAPULCO, 2013	21

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
4.1.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO	23
4.1.2 CLIMA	23
4.1.3 VEGETACIÓN Y USO DE SUELO	23
4.1.4 GEOLOGÍA	24
4.1.5 DESARROLLO URBANO HISTÓRICO	25
4.2 CRONOLOGÍA DEL EVENTO	28
4.2.2 NIVELES MEDIDOS	34
CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA	35
<hr/>	
MODELO METEOROLÓGICO	35
MODELO HIDROLÓGICO	36
MODELO HIDRODINÁMICO	39
ECUACIONES DE GOBIERNO	39
PROCESAMIENTO Y PUESTA A PUNTO DEL MODELO	41
CAPÍTULO 6 RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	58
<hr/>	
ZONA AFECTADA POR LA INUNDACIÓN	58
HIDROGRAMAS EN SECCIONES DE CONTROL	59
NIVELES MÁXIMOS	61
VALIDACIÓN DEL MODELO CON LOS PARÁMETROS POD Y FAR	62
MODELADO DE OBRAS ESTRUCTURALES DE MITIGACIÓN EN LA ZONA	65
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	73
<hr/>	
CONCLUSIONES DEL TRABAJO NUMÉRICO	74
LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS	73
<hr/>	

Índice de Figuras

Figura 2.1 a) Imagen satelital de las tormentas tropicales Ingrid y Manuel sobre México al 15 de septiembre de 2013 (NASA), b) inundación en Tixtla, Guerrero, c) y d) inundación en Chilpancingo, Guerrero	2
Figura 2.1 Curva de respuesta teórica al riesgo como función de la magnitud de la perturbación	5
Figura 2.2 Procedimiento esquemático para el análisis del riesgo	6
Figura 2.3 Marco de trabajo conceptual para el modelo	7
Figura 2.4. Esquemática del modelo Source-Path-Receptor-Consequence	7
Figura 3.1 Mapa con las obras de protección contra inundaciones en México al 2012	10
Figura 3.2 a) Canchas deportivas en el área inundable por el río Santa Catarina, N. L., b) Boulevard sobre el cauce del río Santiago, S. L. P. el cual se cierra durante una crecida	12
Figura 3.3 Etapas del manejo operacional del riesgo	14
Figura 3.4 Ejemplos de las medidas de resiliencia ante inundaciones en construcciones urbanas propuestas por el Reino Unido: a) construcción sobre-elevada, b) medidas de protección contra el agua, c) medidas de impedimento de paso del agua	17
Figura 4.1 Trayectoria del huracán “Alma” en el Golfo de México y la tormenta tropical no. 2 en el Océano Pacífico en 1958, determinada por la NOAA	21
Figura 4.2 Imágenes de afectaciones registradas durante este evento hidrometeorológico de Septiembre de 2013 a) fraccionamiento Las Gaviotas, b) Cruce del Viaducto Diamante con el río La Sabana, c) Aeropuerto Internacional “Juan N. Álvarez”, d) colapso de puente Lomas de Chapultepec	22
Figura 4.3 Ubicación de la zona de estudio	22
Figura 4.4 Regiones hidrológicas de los cuerpos de agua considerados para el estudio	23
Figura 4.5 Zonificación por uso de suelo y vegetación en el estado de Guerrero, México	24
Figura 4.6 Geología del área de estudio	24
Figura 4.7 a) Desarrollos urbanos y puntos de interés en a) la zona cerca al río La Sabana, b) la desembocadura de la Laguna de Tres Palos y río Papagayo	25
Figura 4.8 Extensión de las tres zonas de Acapulco: tradicional, dorado y diamante.	26
Figura 4.9 Evolución progresiva de la mancha urbana en las cercanías del río La Sabana, mancha urbana en a) 2002, b) 2006, c) 2009, d) 2013	27
Figura 4.10 Uso de suelo en la zona de a) Laguna Negra y desembocadura del río La Sabana, b) Aeropuerto Internacional de Acapulco y c) desembocadura de la Laguna de Tres Palos y del río Papagayo	28
Figura 4.11 a) Trayectoria de “Manuel” del 13 al 15 de septiembre a las 19:39 horas, y el entonces pronóstico de su trayectoria, b) trayectoria de “Manuel” durante el 15 y el 16 de septiembre	29
Figura 4.12 a) estaciones climatológicas operadas por CONAGUA y CFE para la construcción de b) hietograma de precipitación media para la cuenca del río La Sabana	30
Figura 4.13 Imagen infrarroja de RapidEye correspondiente al 18 de septiembre de 2013	30
Figura 4.14 Inundación del fraccionamiento Las Gaviotas a) Vista aérea, b) Vista hacia la desembocadura de la Laguna de Tres Palos, al fondo la zona hotelera	31
Figura 4.15 Inundación de a) estacionamiento del COSTCO y b) campo de golf	32

Figura 4.16 a) Flujo en la zona de comercios en Playa Revolcadero, b) Puente en Lomas de Chapultepec destruido, c) Puente Barra Vieja-Lomas de Chapultepec	32
Figura 4.17 a) Inundación del estacionamiento del Aeropuerto Internacional de Acapulco. En el extremo izquierdo de la foto se puede apreciar la torre de control, b) interior del edificio terminal inundado	33
Figura 4.18 Elevaciones en (msnm) de la inundación medidas en campo en a) zona del río La Sabana y Laguna Negra, b) desembocadura de la Laguna de Tres Palos y Río Papagayo	34
Figura 5.1 Metodología para la reproducción numérica del evento extremo en Acapulco, 2013	35
Figura 5.2 Dominios anidados del modelo WRF, la malla azul con resolución de 19 km y la malla negra con resolución de 4 km	36
Figura 5.3 a) Ubicación de tres de las estaciones junto con la curva masa medida de estaciones climáticas del 14 al 18 de septiembre de 2013 y calculada con el modelo WRF, b) Mapa de precipitación acumulada del 14 al 16 de septiembre con el modelo WRF	36
Figura 5.4 Hidrogramas calculados con el modelo hidrodinámico para a) el río La Sabana y b) el río Papagayo	38
Figura 5.5 Esquema del arreglo de una malla no estructurada basado en el método de celda centrada.	40
Figura 5.6 a) comparación de la resolución del modelo digital de elevaciones de los puntos LiDAR (5 m) con los de SRTM (90 m), b) Nube de puntos LiDAR cerca del cruce del Viaducto Diamante con el río La Sabana, c) batimetría de los cuerpos de agua en la zona de estudio	43
Figura 5.7 Malla de elementos finitos para la zona de estudio indicando condiciones de frontera, indicando el área máxima de elemento en [m ²] por polígono.	44
Figura 5.8 Condiciones iniciales de topografía y espejo de agua con la malla de elementos finitos de distinta resolución en a) Desembocadura del río La Sabana en la Laguna de Tres Palos, b) Aeropuerto y c) Desembocadura de la Laguna de Tres Palos al mar.	44
Figura 6.1 a) 15 de septiembre de 2013 00:00 horas, inundación del fraccionamiento Las Gaviotas, b) 15 de septiembre de 2013 05:00 horas inundación en las colonias Llano Largo y Coloso, c) 15 de septiembre de 2013 07:30 horas inundación en los campos de golf del hotel Princess Fairmont, d) 16 de septiembre de 2013 03:00 horas incremento en el nivel de la Laguna de Tres Palos, que provoca la inundación en el Aeropuerto Internacional	58
Figura 6.2 Comparación de la mancha de inundación de a) imagen satelital del 18 de septiembre de 2014, contra b) la calculada con el modelo.	59
Figura 6.3 a) Secciones transversales para el cálculo de hidrogramas: 1. Puente “El Marqués”, 2. puente “Marquesita”, 3. río La Sabana aguas arriba del cruce con el Viaducto Diamante, 4. salida de la Laguna de Tres Palos, b) Hidrogramas de salida en dichas secciones transversales indicando la ubicación temporal de los picos del hidrograma del río La Sabana	60
Figura 6.4 Ubicación de los puntos de comparación de mediciones de campo contra resultados del modelo.	61
Tabla 6.1, elevación de la superficie libre del agua y el error relativo entre medido y calculado.	61
Tabla 6.2 Tabla de contingencia para el desempeño del pronóstico de eventos	62
Figura 6.5 Modelo conceptual de la precisión de un pronóstico	62

Figura 6.6 Puntos de control para determinar los parámetros POD y FAR para el evento reproducido con el modelo hidrodinámico	63
Figura 6.7 a) comparación del parámetro POD para Acapulco y otros estudios, b) comparación del parámetro FAR para Acapulco y otros estudios.	64
Figura 6.8 Configuración propuesta de bordos perimetrales en la zona de estudio (líneas amarillas).	65
Figura 6.9 Comparación de la mancha de inundación máxima calculada a) para el evento y b) para la simulación con bordos.	66
Figura 6.10 Comparación de hidrogramas en las secciones de control definidas para el evento y para la simulación con bordos de protección.	67
Figura 6.11 Mancha de inundación calculada con el modelo hidrodinámico del 14 de septiembre a las 20:00 horas	67
Figura 6.12 a) bordo de protección con una vía en la corona, b) ciclopista entre el cuerpo de agua(a la derecha del camino) y una zona de amortiguamiento (a la izquierda del camino), c) zona de amortiguamiento entre el cuerpo de agua e infraestructura vial	68
Figura 6.1. Ciclo hipotético de Riesgo-Gasto ante inundaciones	75
Figura 6.2 Estrategia para la gestión del riesgo de inundación tomando como base el mejor conocimiento disponible	76

Índice de tablas

Tabla 2.1 Eventos de inundación importantes en años recientes en México	9
Tabla 3.1 Estado de las obras de protección contra inundaciones en cauces naturales México	11
Tabla 3.2 Acciones estructurales y no estructurales consideradas en el Plan Hídrico Integral de Tabasco	15
Tabla 3.3. Clasificación de temas y grupos para las medidas ante inundaciones	16
Tabla 3.4. Estrategia del gobierno escocés para la gestión del riesgo por inundación y las 3 P's de la ley de Inundaciones de la Unión Europea.	18
Tabla 6.1, elevación de la superficie libre del agua y el error relativo entre medido y calculado.	61
Tabla 6.2 Tabla de contingencia para el desempeño del pronóstico de eventos	62
Tabla 6.3 Tabla de contingencia para la simulación numérica del evento de Acapulco, 2013	64

Capítulo 1. Introducción

Las inundaciones son el fenómeno natural que genera el mayor número de pérdidas económicas a nivel mundial (**EM-DAT, 2011**). De acuerdo con el Centro de Investigación en Epidemiología de Desastres (CRED, por sus siglas en inglés), tan sólo en 2012 las inundaciones afectaron 178 millones de personas a nivel mundial, lo que lo cataloga como los eventos extremos de mayor impacto.

La correcta determinación del riesgo asociado a inundaciones es una de las prioridades para gran parte de la comunidad científica internacional (ej. (**DEFRA, 2005**) en el Reino Unido; (**IMEE, 2011**) en Estados Unidos), la cual ha centrado sus esfuerzos en la reducción de los daños derivados de una inundación (ej. (**Ashley, 2007; Dutta, 2003**). Eventos severos registrados en los ríos Rhin en Alemania (2006), Mississippi en Estados Unidos (2005), Danubio en Europa Central (2006), Valency y Jordan en Inglaterra (2004) y Usumacinta (2011) en México, son sólo algunos de los ejemplos sobresalientes asociados a un evento meteorológico extremo.

En septiembre de 2013, dos huracanes simultáneos incidieron en México: *Manuel* por el lado del Océano Pacífico e *Ingrid* en el Golfo de México (ver Figura 1.1a). Este fenómeno meteorológico produjo lluvias torrenciales sobre gran parte del país que derivaron en el desbordamiento de diversos ríos. Entre las ciudades afectadas se encuentran: Chilpancingo, Tixtla y Acapulco Diamante (Guerrero); Culiacán (Sinaloa); entre otras. Específicamente, en el Estado de Guerrero se registraron afectaciones en los sectores productivos (especialmente turismo) e infraestructura, así como gran cantidad de damnificados (ver Figura 1.1 b, c y d). En particular, se registraron afectaciones en la zona turística de Acapulco Diamante, donde un sinnúmero de turistas quedaron varados a consecuencia de los daños en carreteras y puentes de la región así como el Aeropuerto Internacional “Juan N. Álvarez” de la ciudad de Acapulco.

La intensa precipitación en la zona dejó cuantiosas pérdidas económicas. Es sabido que, bajo condiciones de un clima que está cambiando, los fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más intensos y frecuentes, por lo que sus consecuencias en la salud se agravarán a la par (**OMS, 2013**), por lo que es necesaria una revisión del evento que permita dejar lecciones aprendidas.

El presente trabajo de tesis comprende la aplicación de un marco de trabajo que permite la reproducción del evento de inundación en Acapulco Diamante con modelos numéricos respaldados por la comunidad científica. Lo anterior permitirá identificar las causas que lo produjeron y las acciones necesarias para mitigar las consecuencias de un evento similar en el futuro próximo. De esta manera se asegura la posibilidad de proveer a la sociedad con información importante sobre los sistemas que habitamos, reduciendo la falta de comunicación que actualmente existe entre la ingeniería y la sociedad.

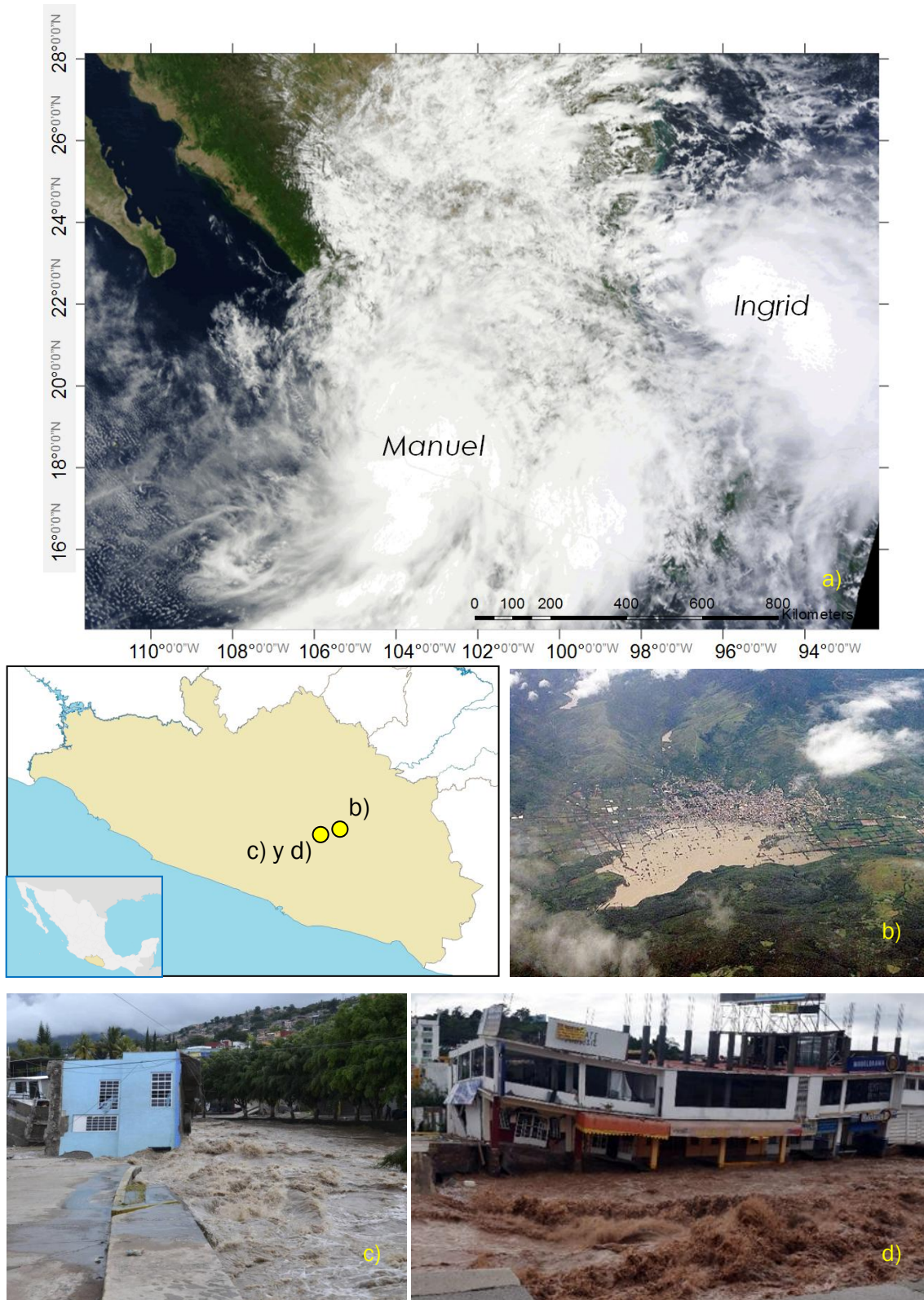


Figura 2.1 a) Imagen satelital de las tormentas tropicales Ingrid y Manuel sobre México al 15 de septiembre de 2013 (NASA), b) inundación en Tixtla, Guerrero, c) y d) inundación en Chilpancingo, Guerrero (Excélsior)

1.1 Objetivos

La presente investigación tiene como objetivo principal la reproducción numérica del evento hidrometeorológico extremo ocurrido en la costa de Acapulco, Guerrero, en el litoral del Pacífico Mexicano del 14 al 18 de septiembre de 2013. A partir de lo anterior se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Determinar el marco teórico de análisis del riesgo por inundaciones para determinar sus componentes y las etapas de su manejo para que dicho riesgo pueda ser disminuido.
- Establecer el marco de trabajo holístico a nivel mundial de gestión del riesgo de inundaciones para identificar el conjunto de acciones que puedan ser aplicadas de manera integral en un asentamiento urbano vulnerable a flujos de inundación.
- Utilizar un marco de trabajo robusto que permita la reproducción numérica de un evento de inundación, desde la nube que genera la precipitación hasta la delimitación del área afectada.
- Partir de los resultados de un modelo hidrodinámico para proponer una medida estructural y analizar el funcionamiento hidráulico de la zona con la implementación de dicha medida.

1.2 Estructura de la tesis

El presente trabajo está organizado en siete capítulos, como se muestra a continuación:

Capítulo 1. Introducción.

Provee un breve contexto sobre la problemática asociada a inundaciones a nivel mundial y presenta el evento meteorológico que derivó en las afectaciones en México.

Capítulo 2. Riesgo por inundaciones

Brinda la definición del riesgo en función de sus componentes, así como el marco teórico para su análisis aplicado a inundaciones, describiendo la condición de México con respecto a estos eventos.

Capítulo 3. Medidas de adaptación y mitigación contra inundaciones

Define el tipo de acciones que se pueden implementar para disminuir el riesgo que representa una inundación, así como la perspectiva actual de los planes de gestión del riesgo. Además, remarca la importancia de contar con planes de ordenamiento territorial y uso de suelo; así como la reproducción numérica de un evento para el mejor entendimiento de un evento meteorológico.

Capítulo 4. Descripción del evento.

Se describe el contexto climático y situación de la zona de estudio, así como una narrativa de la evolución meteorológica y local de la tormenta tropical que desencadenó la inundación en Acapulco.

Capítulo 5. Metodología

Se establecen las etapas del marco de trabajo para la reproducción numérica del evento, describiendo los modelos utilizados y el pre-proceso de la información de campo para la puesta a

Capítulo 1. Introducción

punto del modelo hidrodinámico, cuyo resultado final es la evolución espacio-temporal de mancha de inundación.

Capítulo 6. Resultados y recomendaciones

Se muestran los resultados gráficos y numéricos del modelo numérico para el post-proceso de la información, incluyendo la evaluación de los resultados con metodología documentada. Se presentan también los resultados de una alternativa de solución sugerida, así como su posible configuración en el área de estudio.

Capítulo 7. Conclusiones.

Para finalizar, se presentan las ideas y resoluciones de la realización del presente trabajo al estudiar el marco teórico de manejo del riesgo por inundaciones y su aplicabilidad al caso Acapulco, así como las lecciones generales aprendidas de la inundación en dicha zona.

Capítulo 2 Riesgo por inundaciones

2.1 Conceptos básicos sobre riesgo

El riesgo es el producto de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno y las consecuencias que involucra. En este sentido, su definición involucra las características de un sistema y describe su potencial a ser dañado (Gouldby, 2005). Quizá la expresión que mejor define el riesgo está dada por la siguiente ecuación (Reeve, 2011):

$$R = f(P, V, E) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

- P Peligro, $0 \leq P \leq 1$, si $P = 1$ se tiene un certeza total de que el peligro se presentará
- V Vulnerabilidad, $0 \leq V \leq 1$, si $V = 1$ se tendría una pérdida total del bien en cuestión
- E Exposición, $0 \leq E \leq 1$, cuando $E = 1$ se tiene una máxima exposición al peligro.

El peligro es la amenaza que representa un evento natural. La vulnerabilidad es el grado de daño que puede ocurrir a infraestructura, bien material población o actividad humana ante un peligro. La exposición es qué tanto está sujeto lo anterior a la acción del peligro en función de su ubicación en tiempo y espacio.

Para reducir el riesgo ante un evento dado es necesario incidir sobre alguna de las tres variables, para lo cual se pueden implementar medidas estructurales o no estructurales, tal y como se presentarán en el capítulo 3 de este trabajo.

Para cada variable involucrada se puede construir una curva de respuesta (ver Figura 2.1), la cual depende de la magnitud de la perturbación y de las características del sistema; si no hay impactos sociales o económicos derivados de la inundación, la respuesta del sistema se considera como cero. Se espera que en algún punto, la respuesta (por ejemplo, el daño económico) alcance un máximo, porque las construcciones, infraestructura y plantaciones estén totalmente destruidas; sin embargo, puede cruzarse el umbral de recuperación antes de que la respuesta máxima del sistema se alcance (Mens, 2011).

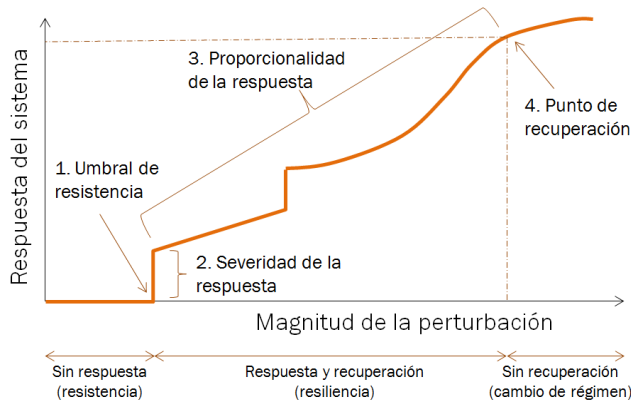


Figura 2.1 Curva de respuesta teórica al riesgo como función de la magnitud de la perturbación (Mens, 2011)

2.2 Análisis del riesgo por inundaciones

La metodología para determinar objetivamente el riesgo requiere el estudio de las propiedades y comportamiento de los elementos que lo componen para conocer su contribución en la construcción del mismo, así como la combinación de probabilidades y consecuencias de dichos componentes. De igual forma, la evaluación del riesgo tiene por objetivo el entendimiento e interpretación de percepciones del riesgo y tolerancias sociales del riesgo para comunicar decisiones y acciones en el proceso de manejo del riesgo por inundación (Gouldby, 2005).

El procedimiento de análisis del riesgo dentro de un marco de la gestión integral se describe en la Figura 2.2, en donde se muestran los principales pasos para el análisis del riesgo dentro del proceso de evaluación del riesgo.

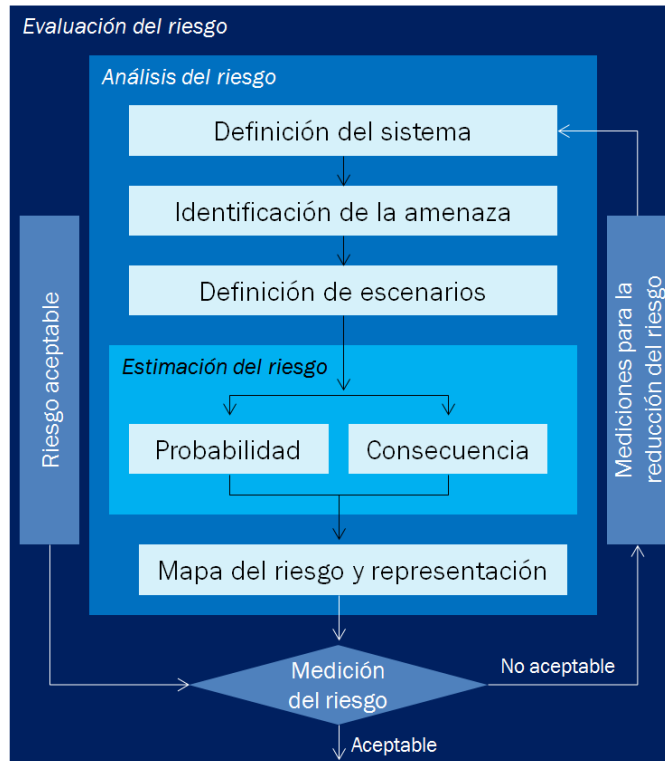


Figura 2.2 Procedimiento esquemático para el análisis del riesgo (Faber, 2006)

2.2.1 Modelo Source-Path-Receptor-Consequence

El marco de trabajo Fuente-Estado-Respuesta (Source-Path-Receptor, SPR) determina las causas del riesgo y sus efectos en un sistema dado, considerando dicho sistema como un ente de riesgo dinámico (ej. que cambia en el tiempo y espacio) y que se adapta a los cambios en los forzamientos que producen inundaciones. Este marco de trabajo permite distinguir las etapas de un fenómeno para analizar mejor el riesgo que representa; esta metodología ha sido aceptado desde el año 2000 (DETR, 2000).

El modelo SPR contempla tres componentes básicos para que un evento meteorológico sea motivo de riesgo: una *fuentes* o evento que inicie el peligro (por ejemplo, lluvias intensas, oleaje, río a punto de desbordar); un *receptor* de ese peligro (por ejemplo, propiedades en la llanura de

inundación); y un camino que comunique la fuente para llegar al receptor (por ejemplo, llanuras de inundación, o defensas que han fallado que permitan el flujo); la Figura 2.3 presenta de forma descriptiva los tres componentes del modelo SPR.

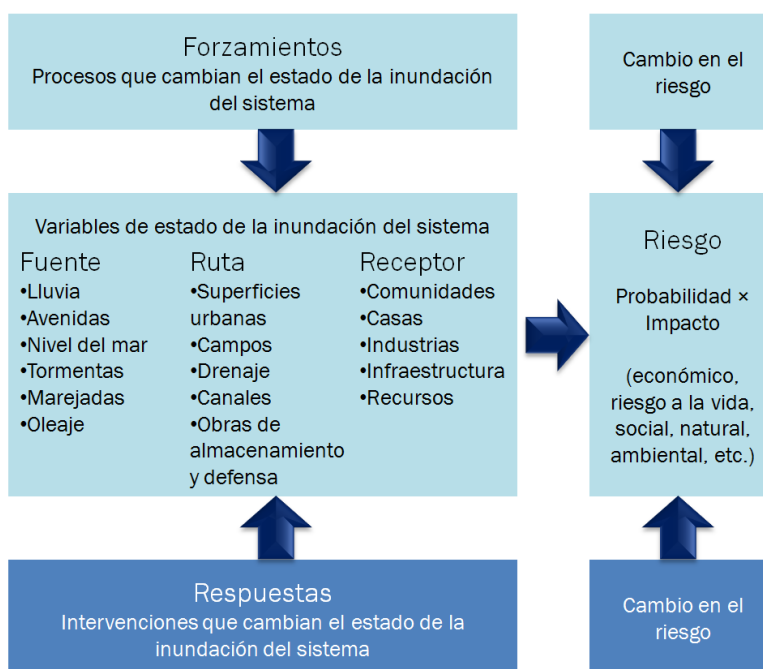


Figura 2.3 Marco de trabajo conceptual para el modelo Source-Path-Receptor (A. Pedrozo-Acuña & Breña-Naranjo, 2014a)

Para enriquecer el análisis, como cuarto componente se tienen las consecuencias, que representan el impacto que generó la fuente en el receptor, es decir, el resultado (daños o mejoras) económico social o ambiental que resulte de una inundación. Puede ser expresado cuantitativamente (por ejemplo, en valor monetario), por categoría (alto, medio, bajo). De esta forma, la fuente, el camino, el receptor y sus consecuencias forman el modelo Source-Path-Receptor-Consequence (SPRC), que ya considera todas las etapas en que existe alguno de los componentes del riesgo (ver Figura 2.4).

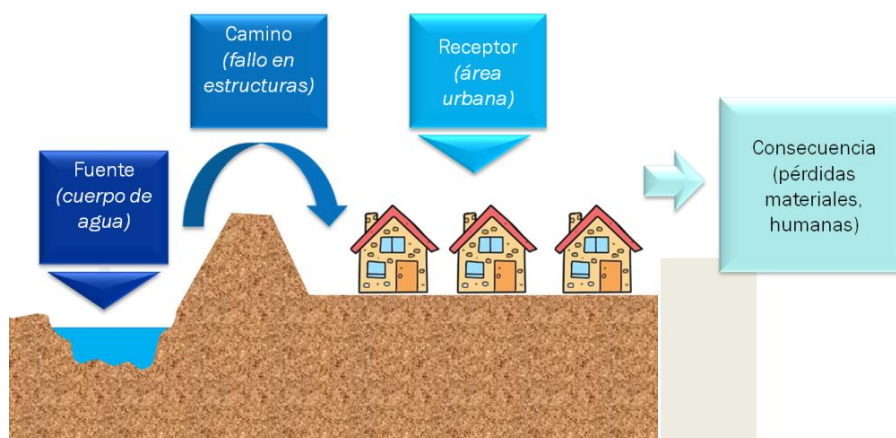


Figura 2.4. Esquemática del modelo Source-Path-Receptor-Consequence (DETR, 2000)

El hecho de identificar a una fuente de peligro implica que es posible que exista una consecuencia negativa, la cual depende de la exposición al peligro y las características del receptor. La vulnerabilidad del receptor puede ser disminuida al incrementar su resiliencia ante una inundación.

La severidad de una inundación es resultado de una combinación de factores; en general, las condiciones de humedad del suelo que definen la capacidad de infiltración y la duración e intensidad la precipitación determinan la magnitud del gasto pico de la avenida. La dificultad para estimar la ocurrencia de las inundaciones radica en que hay un número limitado de eventos en el pasado reciente y éstas son difíciles de predecir. Por lo tanto, hay una carencia de datos cuantitativos para la caracterización de eventos extremos, por lo que la calibración y validación de los modelos resulta complicada y está limitada. Adicionalmente, la variabilidad en las escalas espacio-temporales de los procesos hidrológicos, aunada a la falta de conocimiento de estos procesos complica su correcta caracterización y estudio (Beven, 2006).

2.2.2 Riesgo por inundaciones en México


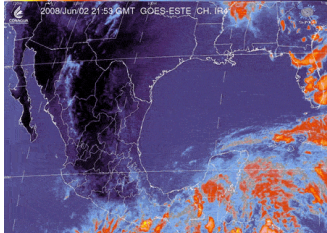
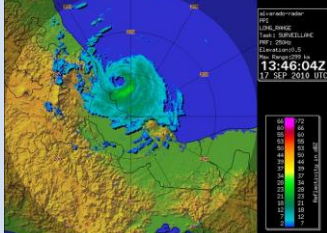
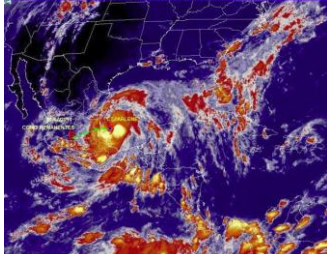


En México, las inundaciones son actualmente el peligro natural con el mayor costo asociado debido a la vulnerabilidad ante ciclones dada su ubicación geográfica: la mitad al sur del territorio nacional se encuentra en una zona de convergencia intertropical, donde el viento circula por convección y se tienen precipitaciones cerca de 200 días al año. En la costa del Océano Pacífico, la temporada de ciclones tropicales inicia el 15 de mayo y concluye el 30 de noviembre (Rosengaus-Moshinsky, 2002).

La ubicación y naturaleza geográfica de México favorece la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, como son los 25 huracanes que en promedio se producen de forma anual y que afectan las zonas costeras por ambos litorales. Asociados a estos fenómenos, se presentan lluvias torrenciales e intensas precipitaciones que pueden generar inundaciones fluviales y costeras, y deslaves de tierra.

Siendo México una nación de ingresos medios, el efecto de las catástrofes naturales afectan directamente el desarrollo, ya que el crecimiento de las infraestructuras y las actividades económicas va más rápido que la aprobación de las leyes y reglamentos que contribuirían a que ese crecimiento fuera ordenado (Ishizawa, 2013).

Algunos ejemplos de inundaciones con impactos económicos y sociales importantes en México, se encuentran los descritos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Eventos de inundación importantes en años recientes en México (FONDEN, 2014)

	Evento	Consecuencias
	<p>2007: El 24 de octubre el frente frío No. 4 provoca fuertes lluvias en Tabasco. Dos días después y hasta el 30 de octubre, el frente frío No. 5 se combina con la tormenta tropical “Noel”.</p>	<p>Lluvias intensas que provocaron el desbordamiento de los los ríos La Sierra, Carrizal, Chilapa y Grijalva en Tabasco, condición que se mantuvo hasta el 16 de noviembre y cuyos daños ascendieron a los 31 mil millones de pesos.</p>
	<p>2008: El 31 de mayo al mediodía se formó la tormenta tropical Arthur a partir de los remanentes de la depresión tropical “Alma” al norte de Belice. Arthur se desplazó hacia el Oeste y cruzó ese estado y Campeche.</p>	<p>Desbordamiento del río Hondo en Quintana Roo y daños por 140 millones de pesos.</p>
	<p>2010: El 17 de septiembre a las 12:00 horas, el huracán Karl categoría 3 tocó tierra en Playa Chachalacas, 15 km al norte de Veracruz.</p>	<p>Desbordamiento de 18 ríos y más de 1 millón de damnificados.</p>
	<p>2011: Del 28 de junio al 2 de julio la tormenta tropical <i>Arlene</i> afectó la costa del Golfo de México.</p>	<p>El río Pánuco presentó importantes crecidas, y se reportaron lluvias constantes que llegaron a los 348,8 mm de lluvia en Tamesí, Tamaulipas. Se aportaron más de mil millones de pesos del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) al estado de Veracruz.</p>
 	<p>2013: El 13 de septiembre se forman simultáneamente las tormentas tropicales <i>Ingrid</i> (Golfo de México) y <i>Manuel</i> (Océano Pacífico).</p>	<p>Daños en 18 estados, principalmente en Guerrero, Veracruz y Oaxaca. Pérdidas económicas en el sector turístico de Acapulco Diamante y Lomas de Chapultepec (Gro.) por el desbordamiento de los ríos La Sabana y Papagayo respectivamente. Inversión estimada de más de 37 mil millones de pesos por parte del FONDEN, Fondo Guerrero y sector privado a la recuperación de dicho estado.</p>

Capítulo 3 Medidas de adaptación y mitigación contra inundaciones

Las acciones específicas a tomar en cada etapa de la inundación dependen de la tecnología disponible, la disponibilidad de recursos financieros y la percepción de la urgencia de la necesidad de protección (que va relacionada con el sistema de valores de una sociedad). Dentro de estas acciones específicas se tienen las medidas de mitigación, que se clasifican en estructurales y no estructurales, y las medidas de adaptación.

3.1 Medidas de mitigación

En México, el “Manual para el control de inundaciones” establece una serie de medidas para disminuir el impacto de un evento de inundación en un área urbana (CONAGUA, 2011a)

3.1.1 Medidas Estructurales

En México predominan las obras estructurales para la mitigación del riesgo por inundaciones. Las obras más comunes son los bordos perimetrales y longitudinales, los encauzamientos del flujo del río, presas para el control de avenida, entre otros (como desvíos permanentes mediante cauces de alivio, rectificaciones del curso del río o presas de retención de azolves). México cuenta con un inventario Nacional de Obras de Protección contra Inundaciones en Cauces Naturales, el cual documenta más de 800 obras entre bordos, encauzamientos, presas y otros tipos de obras. La Figura 3.1 muestra una distribución espacial de estas estructuras al 2012.

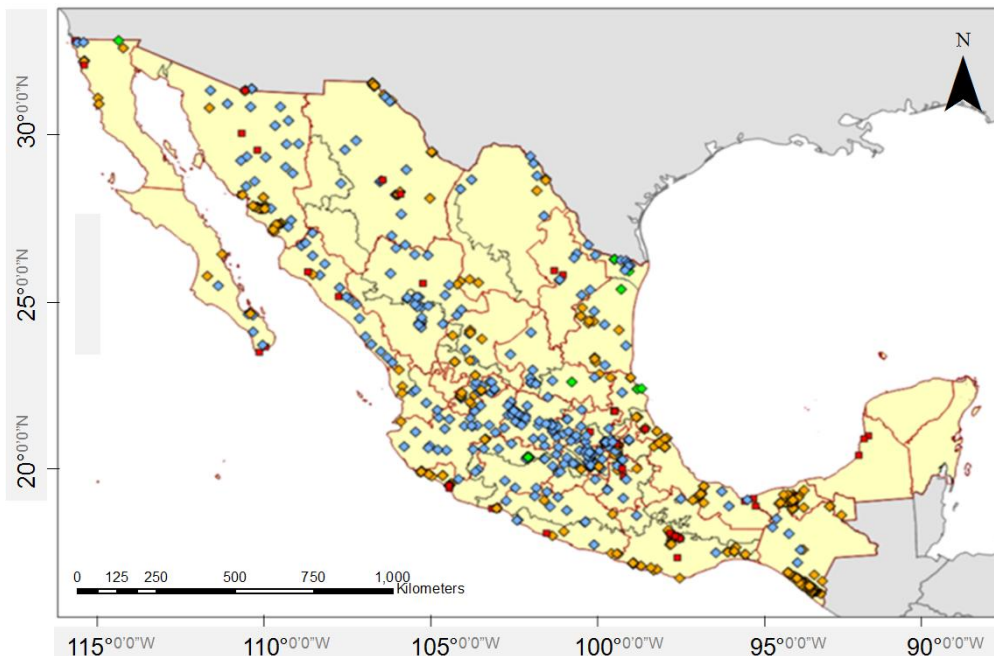


Figura 3.1 Mapa con las obras de protección contra inundaciones en México al 2012, ■ Bordos, ■ encauzamientos, ■ presas, ■ otras obras (SINA, 2003)

De acuerdo con esta información, cerca de dos terceras partes de las obras de protección contra inundaciones en México ubicadas en cauces, se encuentran en buen o regular estado, y la tercera parte restante requiere de trabajos de conservación y mantenimiento para recuperar o mejorar su capacidad de diseño para proteger adecuadamente contra inundaciones a poblaciones y áreas productivas (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Estado de las obras de protección contra inundaciones en cauces naturales México (CONAGUA, 2012)

	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	No especificado	Total
Presas	52	33	9	4	227	325
Bordos	113	137	39	20	76	385
Encauzamientos	43	32	1	1	13	90
Otras obras	6	4	1	0	11	22
Total	214	206	50	25	327	822

3.1.2 Medidas no Estructurales

- Reubicación de zonas habitadas. Esta medida reduce la exposición y la vulnerabilidad, y para que funcione deben tenerse bien definidas las zonas inundadas por el caudal de diseño, así como los motivos para su reubicación (por daños a bienes inmuebles, por posible aislamiento debido a la superficie de inundación, etc.). Es importante establecer mecanismos que impidan que el área desalojada sea habitada nuevamente.
- Planes de manejo de inundaciones. Su importancia radica en que se puede aplicar aún cuando ninguna medida estructural sea viable por las condiciones del sitio. Involucra mapas de inundación, facilidad de comunicación con las autoridades locales, rutas de evacuación y zonas hacia donde se concentrará la población, determinación de las instalaciones prioritarias a proteger (como escuelas y hospitales), cálculos necesarios para completar todas las etapas del plan. Requiere una actualización constante de acuerdo a los cambios en lo que se quiere proteger.
- Sistemas de alerta temprana. Es el conjunto de avisos que oportunamente anuncian a la población sobre las condiciones de predicciones de condiciones adversas. Su planeación y uso también permite la creación de pronósticos a corto plazo porque su operación se basa en mediciones en tiempo real, por ejemplo, precipitación en una cuenca o nivel de la superficie libre del agua de un río aguas arriba del sitio que se quiere proteger. Comúnmente, los resultados de los pronósticos no se presentan numéricamente, sino de forma cualitativa en escalas de peligro. Para su óptimo funcionamiento, se requiere que la población a la que sirven esté consciente de su utilidad y de su seriedad.
- Planes de desarrollo urbano. Se refiere a la normatividad que regule la ubicación de asentamientos humanos con respecto a, en este caso, zonas frecuentemente inundables para reducir la vulnerabilidad y la exposición. Es importante que, una vez establecido un plan de desarrollo, se haga cumplir para garantizar la seguridad de una población y sus servicios.

3.2 Medidas de adaptación

Estas medidas se implementan ante la realidad de que no es posible evitar las inundaciones, es decir, procuran la construcción de infraestructura resiliente y resistente ante el embate de estos fenómenos. Se utilizan por ejemplo, cuando no es posible reubicar una población que está frecuentemente expuesta a inundaciones, disminuyendo la vulnerabilidad sin llegar a anularla, para lo que se necesita la consciencia de una población del riesgo ante un evento.

En el caso de México, este tipo de obra se ha realizado en las construcciones tipo palafito, que a pesar de que tienen un costo inicial mayor al de una cimentación convencional, reducen las inversiones posteriores para recuperar lo que se pudo haber perdido en una inundación. Esta medida no sustituye a la evacuación dictada por un plan de manejo de inundaciones.

En México, algunos ejemplos de adaptación a las inundaciones se tienen en:

- Monterrey, Nuevo León. Se ha acondicionado al río Santa Catarina para que las tres cuartas partes de su cauce conduzcan el gasto en época de estiaje, y en la otra cuarta parte se ha acondicionado un espacio para eventos transitorios que no requieran construcciones permanentes (como circos, canchas deportivas, sitios de pruebas de manejo) y cuyas pérdidas o daños no representan un gasto importante, y además se puede recuperar (ver Figura 3.2a)
- San Luis Potosí, S. L. P. Cuando se presenta una avenida extraordinaria en el río Santiago, ciertas calles de la ciudad cercanas a dicho cuerpo de agua se cierran para permitir el flujo del agua, y son reabiertas en cuanto la avenida ha cruzado la localidad (ver Figura 3.2b)



Figura 3.2 a) Canchas deportivas en el área inundable por el río Santa Catarina, N. L., b) Boulevard sobre el cauce del río Santiago, S. L. P. el cual se cierra durante una crecida (CONAGUA, 2011a)

3.3 Enfoque moderno de la gestión del riesgo por inundaciones

La metodología abocada a evitar daños y pérdidas por la incidencia de inundaciones ha sufrido una evolución significativa. La estrategia más reciente para el manejo del riesgo generado por estos eventos extremos se enfoca no solamente en la construcción de obras de defensa (por ejemplo, bordos, compuertas de derivación y dragado de los ríos), sino también en la incorporación de otras medidas de mitigación, que permiten reducir la severidad de los daños asociados a estos fenómenos (por ejemplo, cambios en el uso de suelo por medio de un ordenamiento territorial).

Lo anterior significa una visión de manejo y mitigación de daños (**DEFRA, 2005**) que se apoya en las bases que dan pie al desarrollo sostenible, enfocándose tanto en la reducción de las consecuencias negativas de las inundaciones (p. ej. morbilidad de la población, las pérdidas económicas y ecológicas), como en el aprovechamiento de los beneficios sociales, económicos y ecológicos que éstas producen (ver UNESCO-IFI: International Flood Initiative –(**Di Baldassarre & Uhlenbrook, 2012**)).

Con respecto a lo anterior, (**Gouldby, 2005**) establece que la gestión sostenible del riesgo por inundación debe:

- Asegurar la calidad de vida al reducir los daños por inundación y al mismo tiempo estar preparados para más inundaciones
- Mitigar de los impactos de las medidas de manejo del riesgo en sistemas ecológicos en una gran variedad de escalas espaciales y temporales.
- Procurar el uso inteligente de recursos para proveer, mantener y operar infraestructura y medidas de manejo del riesgo.
- Mantener actividades económicas adecuadas (agricultura, industria, comercios, residenciales) en la llanura de inundación.

De acuerdo con lo presentado por (**Laverde-Barajas, 2013**), se concibe a la gestión del riesgo por inundación como un proceso de análisis social, continuo y holístico, que incluye su evaluación y mitigación (**Schanze, 2008**). La integralidad de este concepto incluye la seguridad, la equidad, la salud ambiental y la gobernabilidad como parte de un sistema integrado a favor de la sostenibilidad. Este proceso, debe ser un mecanismo dinámico que incluya la variación temporal y espacial de todos los componentes.

Para lograr lo anterior, (**Plate, 2002**) propone el proceso de gestión del riesgo por inundaciones se encuentra dividido en dos etapas, una etapa de planeación, en donde se evalúa el riesgo, y una etapa de operación, donde se realizan las acciones de atención y control de la inundación (ver Figura 3.3).

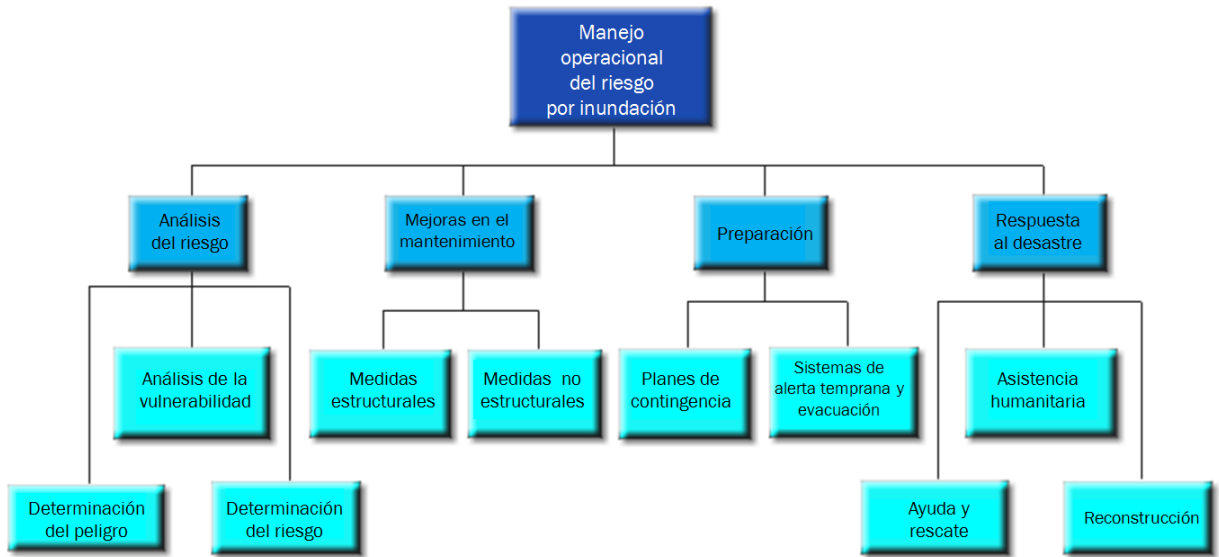


Figura 3.3 Etapas del manejo operacional del riesgo, adaptado de (Plate, 2002)

Algunos ejemplos de planes contra inundaciones que aplican el concepto holístico de manejo del riesgo son:

3.3.1 Plan Hídrico Integral de Tabasco

Como resultado de los impactos del desbordamiento de los ríos La Sierra, Carrizal, Chilapa y Grijalva en Tabasco en 2007, los cuales dejaron pérdidas económicas en los sectores productivo, social y de infraestructura de cerca de 31,8 millones de pesos, lo que representa el 29,31% del PIB estatal para ese año (CENAPRED, 2009), se creó el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), el cual es un conjunto de medidas estructurales y no estructurales para garantizar la seguridad de la población y la continuidad de las actividades económicas ante la incidencia de un evento de inundación. El objetivo general del Plan es la disminución de la vulnerabilidad de los ecosistemas y de la población y sus actividades económicas, procurando el desarrollo sustentable del estado (Carrillo-Sosa, 2009).

Dado que el estado de Tabasco tiene el mayor valor de precipitación en el país, y que la mayor parte de su territorio son llanuras, las inundaciones en la entidad son inevitables. Sin embargo, la implementación del PHIT representa una evolución en la gestión de inundaciones porque maneja la problemática con una visión holística que parte de las medidas tradicionales de control y defensa contra inundaciones, a un marco de trabajo para reducir el riesgo por desastres. Este documento representa la primera normatividad que regula el ordenamiento ecológico y territorial al prohibir asentamientos humanos en zonas propensas a inundación; además, cataloga la implementación de medidas estructurales y no estructurales a corto (Plan de Acciones Urgentes), mediano (Plan de Acciones Inmediatas) y largo plazo, como objetivos específicos del estudio (González-Villarreal, 2013).

En conjunto, las acciones propuestas en el PHIT son las mostradas en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Acciones estructurales y no estructurales consideradas en el Plan Hídrico Integral de Tabasco (Carrillo-Sosa, 2009)

	Descripción	Medida estructural	Medida no estructural
Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación geográfica • Eventos hidrometeorológicos extremos • Presencia de huracanes 	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentación • Sistema de monitoreo • Medición en tiempo real • Uso de radar • Reforestación 	<ul style="list-style-type: none"> • Pronóstico • Sistema de alerta • Políticas operativas en presas • Gestión de crecidas • Determinación de escalas críticas en cauces
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación de la hidrología debido a bordos y caminos que interrumpen el drenado natural de la cuenca • Infraestructura incompleta • Mantenimiento deficiente • Operación empírica • “Diseño emergente” 	<ul style="list-style-type: none"> • Readaptación del sistema de drenaje superficial • Rehabilitación de infraestructura • Construcción de protección a centros de población • Mantenimiento • Ingeniería básica 	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de supervisión y mantenimiento • Revisión de los criterios de diseño • Supervisión adecuada en la construcción • Manual operativo • Asignación clara de responsabilidades • Evaluación de la interacción infraestructura-medio ambiente
Ordenamiento territorial	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación de personas en las márgenes de los ríos • Construcción de viviendas en zonas de regulación • Regulación inadecuada 	<ul style="list-style-type: none"> • Reubicación • Delimitación de zonas federales • Delimitación de zonas protegidas • Delimitación de zonas de regulación y humedales 	<ul style="list-style-type: none"> • Reglamentos • Leyes • Supervisión • Programas de protección civil

3.3.2 The Pitt Review

En su reporte de 2004, la oficina de prospección del gobierno británico *UK Foresight* (Evans, 2004a, 2004b) definió un variado número de medidas divididas en temas y grupos, los cuales fueron actualizados en una revisión posterior conocida como the Pitt Review (Pitt, 2008). Esta clasificación se presenta en la Tabla 3.3, y la implementación de esas medidas se realiza en cada una de las etapas del modelo SPR (source-path-receptor, descrito en el capítulo 2) debido a la definición de sistema dinámico que maneja dicho modelo.

Tabla 3.3. Clasificación de temas y grupos para las medidas ante inundaciones (Pitt, 2008)

Tema	Número de medida	Grupo
Gestión del paisaje rural	1	Infiltración rural
	2	Almacenamiento a nivel de cuenca
	3	Flujo rural
Gestión del escurrimiento en ciudades	4	Almacenamiento urbano
	5	Infiltración urbana
	6	Flujo urbano
Gestión urbana	U1	Desarrollo constructivo
	U2	Desarrollo de áreas urbanas
	U3	Control urbano y rutas sobre tierra
	U4	Control de flujo urbano subterráneo
	U5	Almacenamiento urbano (subterráneo y superficial)
	U6	Red de drenaje principal (mantenimiento y operación)
Gestión de eventos de inundación	7	Medidas antes del evento
	8	Pronóstico y alerta
	9	Control de inundación
	10	Evadir daños colectivos
	11	Evitar daños individuales
Gestión de pérdidas por inundación	12	Manejo de uso del suelo
	13	Protección contra inundaciones
	14	Planeación del uso del suelo
	15	Reglamentos de construcción
	16	Aseguramiento, riesgo compartido y compensación.
	17	Medidas y políticas sociales y de salud
Ingeniería de ríos y mantenimiento	18	Flujo en ríos
	19	Almacenamiento ingenieril de avenidas
	20	Transferencia de avenidas
	21	Defensas ribereñas como bordos y espigones
Ingeniería costera y manejo	22	Defensas costeras
	23	Realineación de defensas
	24	Abandono de defensas
	25	Reducción de la energía costera
	26	Protección morfológica costera

La guía metodológica del Reino Unido, señala la importancia de la resiliencia ante inundaciones en los nuevos desarrollos urbanos. Propone los siguientes pasos:

- Para profundidades de inundación de menos de 300mm se deberá sobre-elevar la construcción (ver Figura 3.4a).
- Para profundidades de inundación entre 300mm y 600mm, sobre elevar la construcción y usar medidas de protección contra la entrada del agua (ver Figura 3.4b).
- Para profundidades mayores a 600mm usar medidas contra la entrada de agua (ver Figura 3.4c).



Figura 3.4 Ejemplos de las medidas de resiliencia ante inundaciones en construcciones urbanas propuestas por el Reino Unido: a) construcción sobre-elevada, b) medidas de protección contra el agua, c) medidas de impedimento de paso del agua

En el caso de pequeñas áreas urbanas, especialmente para la reparación de edificios existentes, el método que se recomienda como ideal es la sobre elevación de las construcciones con un umbral de inundación de hasta 900mm. De esta forma se previene la entrada a la casa de agua contaminada y se limita o elimina el daño al interior de la casa habitación.

3.3.3 Estrategia del Gobierno Escocés

El gobierno escocés propuso un marco de trabajo que provee la mayor resiliencia social y económica posible ante estos eventos por medio de la protección y el diseño de soluciones que funcionen en concordancia con los procesos del medio ambiente, y que sean accesibles en el presente y el futuro. Esta estrategia está diseñada bajo la directriz de la Comunidad Europea de las 3 P's: Preparación, Prevención y Protección en conjunto con la respuesta ante la emergencia y la recuperación planteadas en el Sistema de Información del Agua para Europa (Water Information System for Europe, WISE).

Otros ejemplos de planes integrales de gestión del riesgo por inundación son: “Room for the river” (Holanda) y “Making space for water” (Reino Unido). Estos planes agrupan las medidas en función de su tipo (estructural o no estructural; física, regulatoria o de comportamiento) o de su propósito (inundación costera o fluvial).

Tabla 3.4. Estrategia del gobierno escocés para la gestión del riesgo por inundación y las 3 P's de la ley de Inundaciones de la Unión Europea.

Los cuatro pasos clave	WISE
<p>Conciencia: Incrementar conciencia y compromiso en todos los aspectos del riesgo por inundación y los medios para su gestión; a un nivel político (tomadores de decisiones), entre profesionales (de las autoridades involucradas y otros) y al nivel del público en general (personas, compañías, desarrolladores, aseguradoras).</p>	<p>Preparación: Informar a la población sobre los riesgos por inundación y lo que tienen que hacer durante el evento.</p>
<p>Evasión: Limitar los daños por inundación y favorecer la recuperación por medio de la planeación y la adaptación de los edificios, infraestructura, superficies y actividades económicas e incrementar capacidades en los individuos e instituciones para ser más resilientes.</p>	<p>Prevención: Prevenir daños causados por las inundaciones por medio de la prohibición de construcción de hogares e industrias en zonas proclives a inundación. Por medio de la adaptación de futuros desarrollos al riesgo de inundación y por medio de la promoción de un ordenamiento territorial.</p>
<p>Alivio: Reducir el riesgo por inundación por medio de la implementación de medidas físicas, técnicas, no estructurales y procedimientos para la gestión de los sistemas hídricos.</p>	<p>Protección: Llevar a cabo medidas estructurales y no estructurales para reducir la probabilidad de inundación y su impacto en ubicaciones específicas.</p>
<p>Asistencia: Reducir el riesgo por inundación por medio de la implementación de medidas físicas, técnicas, no estructurales y procedimientos para la gestión de los sistemas hídricos.</p>	<p>Respuesta ante la Emergencia: Realizar medidas estructurales y no estructurales para reducir la probabilidad de inundación y su impacto en ubicaciones específicas.</p>
	<p>Recuperación y lecciones aprendidas: Regreso a las condiciones normales tan pronto como sea posible y mitigar ambos impactos, social y económico sobre la población.</p>

3.4 Aplicabilidad en México

Además de procurar medidas que sean económicamente eficientes y socialmente equitativas que consideren el ecosistema donde se encuentra y escenarios futuros, se recomienda maximizar los beneficios del manejo de inundaciones cuyos resultados deben ser la retroalimentación de los procesos (Kang, 2013).

En este sentido, investigaciones futuras deberán enfocar sus esfuerzos hacia el mejoramiento de la estimación y la predicción del riesgo de inundación a través de la reducción de la incertidumbre (Bao, 2011; Demeritt et al., 2007). Un ejemplo de lo anterior, está dado por (A. Pedrozo-Acuña, Rodríguez-Rincón, Arganis-Juárez, Domínguez-Mora, & González-Villareal, 2013), quienes a través de un análisis de sensibilidad del modelo hidrológico determinaron un conjunto de posibles respuestas de la cuenca del río Pánuco en México.

Los planes integrales descritos anteriormente son un ejemplo a seguir en México, dada su condición de exposición a huracanes. Particularmente, en el caso de Acapulco, se requiere

establecer un conjunto de acciones que mitiguen los impactos de un fenómeno meteorológico como el de 2013, donde se establezcan:

1. El conjunto de obras físicas que protejan los asentamientos urbanos del desbordamiento de los cuerpos de agua cercanos a estos.
2. El conjunto de obras físicas de encauzamiento de ríos hacia un cuerpo de amortiguamiento o que pueda conducir el escurrimiento derivado de un evento de precipitación.
3. El conjunto de planes de acción que reduzcan la vulnerabilidad de la población.

3.4.1 Nota sobre el ordenamiento territorial y uso de suelo

El punto de partida para un programa de gestión del riesgo por inundación en cualquier país es la manera en la que se planifica el uso del suelo. Los puntos clave de los programas anteriores en diversas partes del mundo indican lo siguiente:

- Las defensas de protección en ríos y costas tienen el mayor potencial para la reducción del riesgo por inundación.
- Un adecuado ordenamiento territorial y la protección de las casas habitación ante la entrada de agua, representan los reductores de riesgo por inundación más importantes.
- La planeación del paisaje urbano, de tal suerte que se generen áreas de almacenamiento para ubicar el exceso de agua es una de las medidas más importantes.

Por lo tanto, el uso del suelo y el ordenamiento territorial junto con la planeación del paisaje urbano, conforman las medidas más importantes para la gestión del riesgo por inundación.

El predominio de directrices económicas en el desarrollo urbano, ha generado un legado de exposición y vulnerabilidad ante el riesgo por inundación en diversos sitios (similar al caso Acapulco). Estas lecciones indican la necesidad de manejar las inundaciones de una forma más armónica con los procesos naturales de las llanuras de inundación.

A pesar de ello se percibe un conflicto entre las necesidades del campo, especialmente las agrícolas y las de las zonas urbanas aguas abajo, sobre todo en las regiones en las que la tierra rural se usa para reducir el riesgo por inundación aguas abajo. Este conflicto entre el campo y la adaptación de las prácticas agrícolas para el beneficio de ciudades aguas abajo, tiene una larga historia y se intensifica o disminuye en función de la percepción de la sociedad hacia la necesidad de comida producida de forma local.

3.4.2 Nota sobre caracterización de eventos

Una parte importante dentro de la gestión del riesgo de inundaciones, es la generación de lecciones aprendidas ante la incidencia de un evento extremo en una región dada. Esta acción comienza por el conocimiento y documentación de eventos extremos pasados que permita mejorar las políticas de mitigación del riesgo por inundación en la zona. Esto permite incluir información de inundaciones pasadas a un marco de trabajo probabilístico (Cœur & Lang, 2008).

Existen dos acciones concretas en términos de promover el uso de información histórica para el manejo del riesgo por inundación:

- 1) El desarrollo de una base de datos, tanto para información histórica como para la actual. Su actualización con nuevos eventos de inundación pueden ayudar a la sociedad a tener una retroalimentación en eventos recientes, con un mejor entendimiento de las diferentes inversiones relacionadas al riesgo por inundación. Dicha herramienta puede ser usada por usuarios específicos: ingenieros civiles que diseñen la evaluación del riesgo, manejadores del riesgo que establezcan la relación entre manejo de tierras y eventos extremos, y el público en general, que debe estar informado y consciente sobre el riesgo por inundación.
- 2) Una red de series de información climatológica extensas, con el compromiso de mantenerlas actualizadas. Dicha red, que debe seguir criterios específicos de rango de datos, calidad de datos y una adecuada distribución espacial, proveerá futuras referencias para estudios sobre el cambio climático, tanto para calcular la variabilidad climática pasada como para calibración y validación de modelos de circulación global.

En el caso del evento climático extremo estudiado en este trabajo de investigación, la caracterización presentada por (A. Pedrozo-Acuña et al., 2014c) representa un buen ejemplo del tipo de información que es necesario recabar al paso de estos fenómenos.

Capítulo 4 Evento extremo en Acapulco, 2013

Como ya se ha descrito, el evento extremo que será descrito en el presente trabajo fue resultado de la presencia simultánea de las tormentas tropicales, *Manuel* en el Pacífico Mexicano e *Ingrid* en el Golfo de México, que produjeron lluvias torrenciales que derivaron en situaciones de emergencia para la población. De acuerdo con información de la Organización Meteorológica Mundial, el único antecedente de la presencia de dos ciclones tropicales incidiendo sobre ambas costas del país fue en el año de 1958, cuando el huracán Alma, por el Golfo de México, y la Tormenta Tropical Número 2 en el Pacífico se conjuntaron a mediados de junio (OMM, 2014) (Ver Figura 4.1).



Figura 4.1 Trayectoria del huracán “Alma” en el Golfo de México y la tormenta tropical no. 2 en el Océano Pacífico en 1958, determinada por la NOAA (CSC, 2014)

En el 2013, la zona costera del estado registró una inundación considerable en diversos desarrollos urbanos y hoteles localizados en la zona turística Acapulco-Diamante, Guerrero. Se presentaron daños en la infraestructura carretera que comunica dicha zona con el resto del estado y en el Aeropuerto Internacional “Juan N. Álvarez”, por lo que un gran número de turistas permanecieron varados en la zona hotelera.

La Figura 4.2 presenta un resumen fotográfico de algunas de las afectaciones registradas durante este evento hidrometeorológico.



Figura 4.2 Imágenes de afectaciones registradas durante este evento hidrometeorológico de Septiembre de 2013 a) fraccionamiento Las Gaviotas, b) Cruce del Viaducto Diamante con el río La Sabana, c) Aeropuerto Internacional “Juan N. Álvarez”, d) colapso de puente Lomas de Chapultepec (Internet)

4.1 Descripción del área de estudio

En la Figura 4.3, se aprecia la complejidad hidrológica del sistema, limitado al Oeste y Este por los ríos La Sabana, que desemboca en la laguna de Tres Palos y Papagayo, que desemboca directamente a Océano Pacífico.

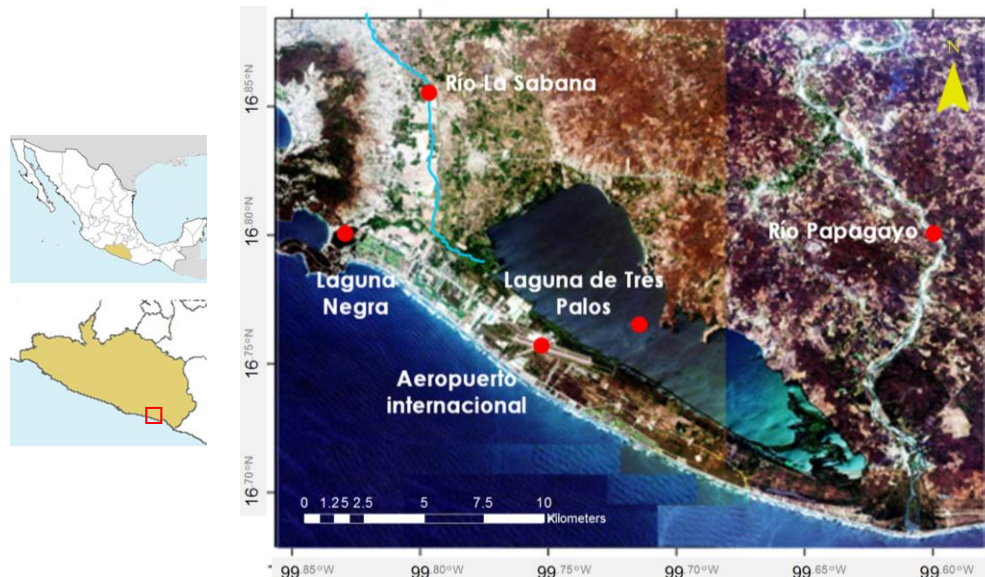


Figura 4.3 Ubicación de la zona de estudio

Antes de presentar la cronología del evento sobre el territorio del estado de Guerrero, se presenta una breve descripción del área de estudio, dada por la zona de Acapulco-Diamante, en donde se resumen las características físicas del sistema, a saber: su régimen hidrológico, clima, vegetación y uso de suelo, geología y desarrollo urbano histórico.

4.1.1 Régimen hidrológico

El río La Sabana se ubica en la región hidrológica “Costa Grande de Guerrero” y le corresponde la clave RH19Ab. Su cuenca tiene un área de 762 km² y de los 2 250 msnm que tiene de altura máxima, en el área de estudio la elevación mayor del cauce es de 10,46 msnm. Por su parte, el río Papagayo tiene un escurrimiento natural medio superficial anual de 4 237 millones de m³ y ocupa la quinta posición de entre los 50 ríos del país por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial. Se encuentra en la región hidrológica “Costa Chica de Guerrero” con clave RH19Ea. La cuenca abarca 7 410 km² y su altura máxima es de 3 330 msnm. Dado que el área de estudio termina 22,17 km al norte de la desembocadura, la elevación mayor de dicho río para el cálculo es de 20,55 msnm (ver Figura 4.4) (SINA, 2003).

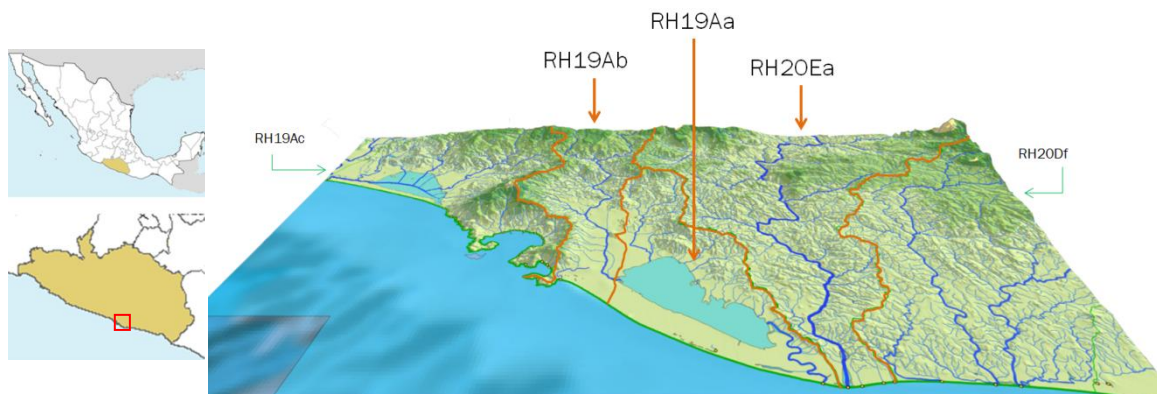


Figura 4.4 Regiones hidrológicas de los cuerpos de agua considerados para el estudio (INEGI, 2014)

4.1.2 Clima

El clima en la zona de estudio es predominantemente cálido subhúmedo con temperatura media anual de 22 °C y la del mes más frío es de 18 °C; tiene un índice de Lang (precipitación total anual entre temperatura media anual) de 43,2 (CONABIO, 2010), es decir, tiene una precipitación anual de 950,4 mm. Por otro lado, es importante mencionar que la costa del Pacífico mexicano registró una mayor cantidad de huracanes que la vertiente del Atlántico de 1970 a 2011 (SINA, 2003).

4.1.3 Vegetación y uso de suelo

La zona de estudio se ubica en una zona catalogada como formación de manglar (CONABIO, 2010), sin embargo, el uso de suelo que prevalece en toda la región del río La Sabana y Barra Vieja, es el de asentamiento urbano. Esto ha permitido la proliferación de desarrollos urbanos en esta zona que resultaron gravemente afectados durante las inundaciones del año pasado (ver Figura 4.5).

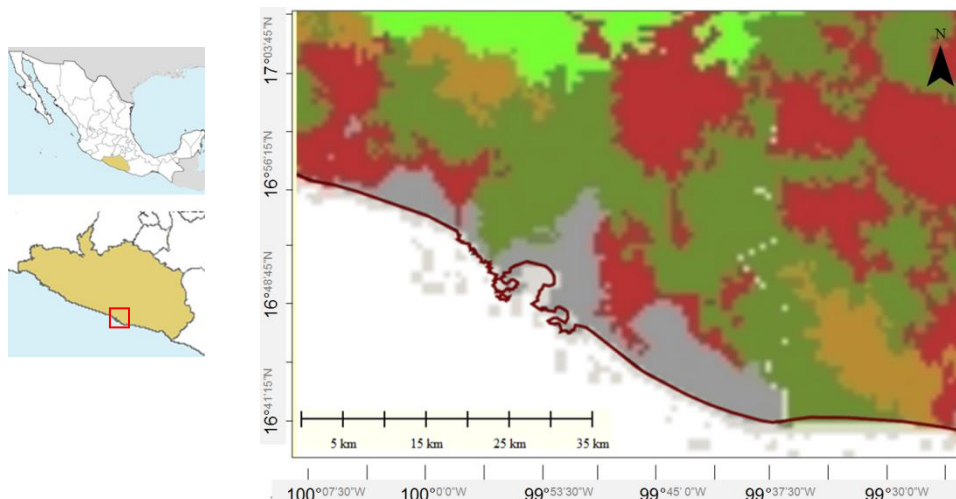


Figura 4.5 Zonificación por uso de suelo y vegetación en el estado de Guerrero, México: ■ agrícola, ■ bosque, ■ matorral, ■ selva, ■ zona urbana y asentamiento humano (CONABIO, 2010)

4.1.4 Geología

Por su parte, la geología del área de estudio comprende en su mayor parte, aluvión cuaternario de arenas y arcillas así como depósitos arenosos litorales del cuaternario. El primer conjunto se ubica en la cuenca del río La Sabana, en el canal de salida de la Laguna de Tres Palos y a ambos lados del cauce del río Papagayo y en su desembocadura. Los depósitos arenosos se ubican en toda la barra costera de la Zona Diamante. Adicionalmente, al norte de la Laguna de Tres Palos hay rocas metamórficas y en la zona montañosa, rocas graníticas mesozoicas (Hernández-Santana, 2005).

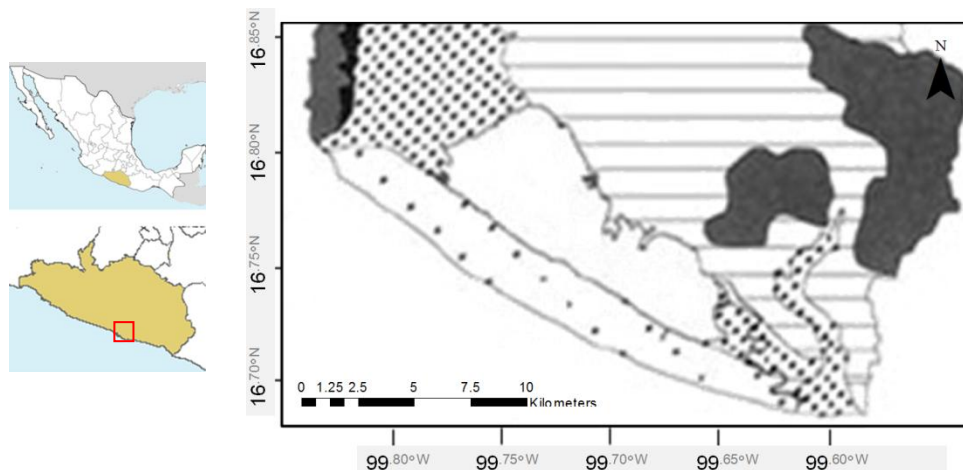


Figura 4.6 Geología del área de estudio, ■ Aluvión cuaternario de arenas y arcillas, ■ depósitos arenosos litorales del Cuaternario, ■ Depósitos detríticos, coluvio-proluviales del Cuaternario, ■ Granitos, granodioritas, tonalitas y cuarzo-monzonitas del Cretácico, ■ Gneises, cuarzo feldespático, esquistos de biotita, ■ Laguna de Tres Palos, adaptado de (Hernández-Santana, 2005)

4.1.5 Desarrollo urbano histórico

La planicie de inundación del río La Sabana ha sido cubierta casi por completo por asentamientos urbanos de nivel socio-económico medio-bajo en las regiones más al norte, mientras que la plusvalía de las propiedades aumenta conforme su ubicación es más cercana a la playa; en el primer caso, se tiene la colonia El Coloso y la colonia Llano Largo, en el segundo se encuentran los fraccionamientos residenciales La Marquesa y Las Gaviotas. Finalmente que están separados por un canal pluvial denominado “Canal GEO” que desemboca en el manglar de Laguna Negra. Al sur del manglar se encuentra la colonia Ciudad Luis Donald Colosio, la cual está compuesta de varios fraccionamientos como Villas Paraíso, Princess del Marqués, Granjas del Marqués y la Unidad Habitacional Colosio, así como el centro comercial Multiplaza Las Palmas y el almacén comercial COSTCO. Junto a la playa se encuentran los campos de golf de los hoteles Princess Fairmont y Pierre Marqués.

Con respecto a la zona este del área de estudio, se encuentra el pueblo de Lomas de Chapultepec a poco más de 3 km de la desembocadura del río Papagayo, en su margen derecha; y el puente del mismo nombre que sirve de paso a la Carretera Federal 200 Acapulco-Pinotepa. También se encuentra el pueblo de Barra Vieja, al oeste de la desembocadura de la Laguna de Tres Palos al mar, y un puente que comunica dicho poblado con Lomas de Chapultepec.

La Figura 4.7a muestra la ubicación de los desarrollos urbanos y puntos de referencia en las inmediaciones del río La Sabana y el manglar de Laguna Negra; la Figura 4.7b contiene la localización de los asentamientos de interés, así como la indicación de puentes vehiculares que resultaron dañados durante el evento.

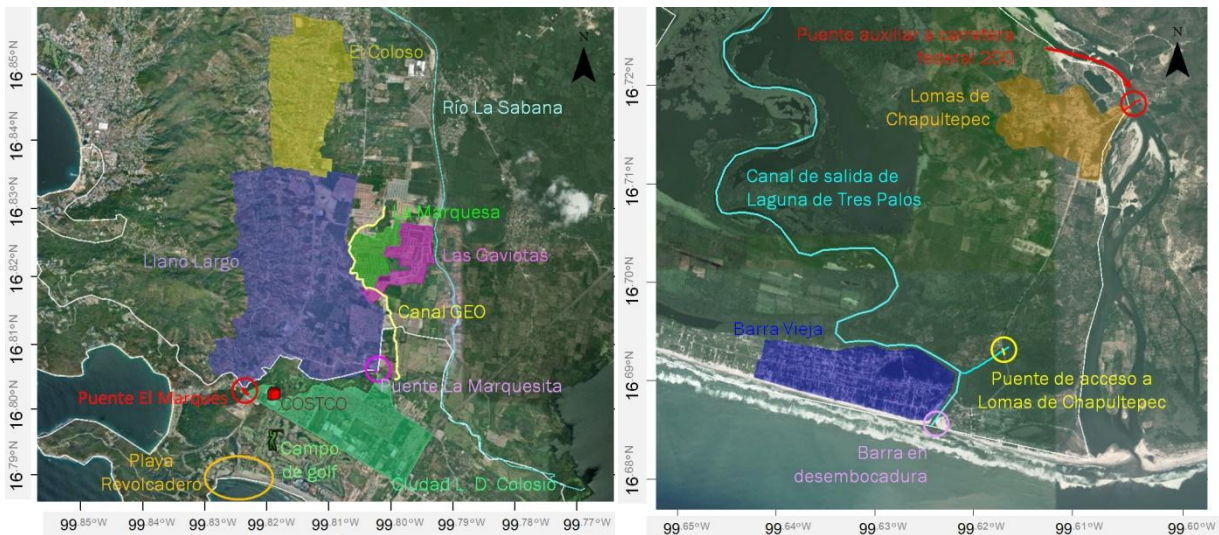


Figura 4.7 a) Desarrollos urbanos y puntos de interés en a) la zona cerca al río La Sabana, b) la desembocadura de la Laguna de Tres Palos y río Papagayo

Dentro de la región, las primeras edificaciones constituyeron la zona denominada “Acapulco tradicional”, que abarca desde Las Playas hasta el Parque Papagayo. El crecimiento urbano continuó, y entre 1970 y 1980 tuvo su auge la zona conocida como “Acapulco Dorado”. Finalmente, la mancha urbana se extendió desde la Base Naval de Icacos y hasta el río Papagayo,

comprendiendo las playas de Puerto Marqués, Revolcadero y Barra Vieja, así como el Aeropuerto Internacional “Juan N. Álvarez”, en la zona conocida como Acapulco-Diamante (Ramírez-Bravo, 2009) (ver Figura 4.8).

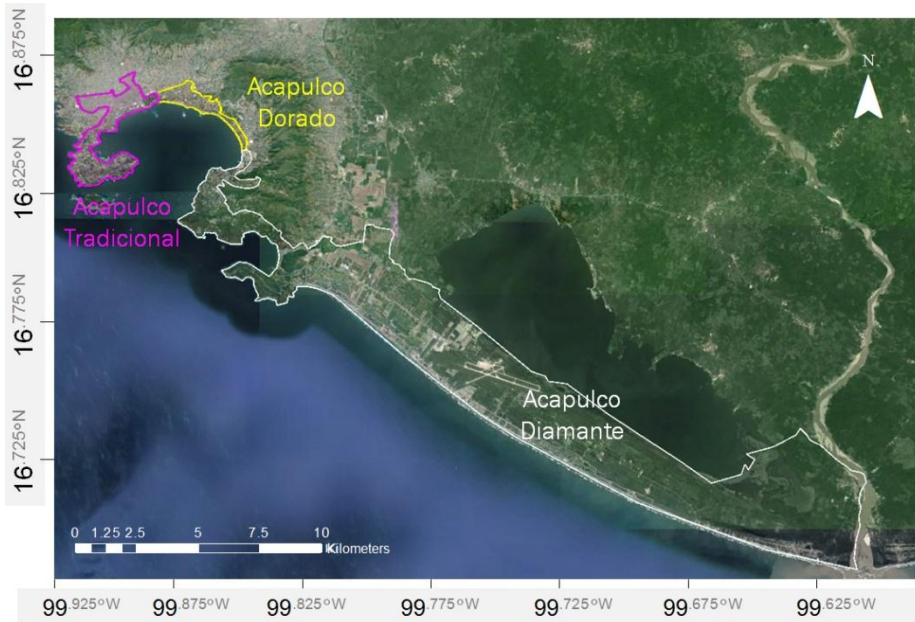


Figura 4.8 Extensión de las tres zonas de Acapulco: tradicional, dorado y diamante.

En esta región comenzó en el año 1977, la construcción de la Unidad Habitacional “El Coloso” por parte de INFONAVIT, y actualmente consta de 92 etapas donde habitan cerca de 50 mil personas (Azaola-Garrido, 2002).

El 15 de agosto de 1987 se promulga la Ley de Fomento al Turismo, y doce días después la zona de Punta Diamante es declarada apta para infraestructura turística o similar (Gobierno-del-estado-de-Guerrero, 2004). Su pronto desarrollo era clave para aumentar el valor económico de la zona, y el financiamiento fue aportado por Promotora Turística de Guerrero (PROTUR), un organismo público descentralizado del gobierno del estado, y Grupo Mexicano de Desarrollo, el cual en 1991 destinó 60 hectáreas a la construcción del Viaducto Diamante. La infraestructura propició el crecimiento incontrolado y falta de planeación en las zonas de Llano Largo, Puerto Marqués, y Playa Alfredo V. Bonfil (al sur del Aeropuerto Internacional de Acapulco).

Finalmente, la constructora GEO estuvo a cargo de la construcción de los fraccionamientos “Las Gaviotas” y “La Marquesa” en 2005 y 2008, respectivamente. Entre la edificación de estas unidades, se construyó el Canal GEO, terminado en 2007, el cual es un canal pluvial que descarga en Laguna Negra. Fotografías históricas de satélite permiten identificar la construcción progresiva de viviendas descrita anteriormente, como se informa en la Figura 4.9.



Figura 4.9 Evolución progresiva de la mancha urbana en las cercanías del río La Sabana, mancha urbana en a) 2002, b) 2006, c) 2009, d) 2013 (Google Earth)

En la actualidad, el plan que rige los desarrollos urbanos en Acapulco es el Plan Director Urbano de la Zona Metropolitana de Acapulco (PDUZMA) 2001 (CEURA, 2001). En él se establece que Laguna Negra es zona de Protección y Conservación de Áreas Naturales, y el tramo desde la desembocadura del Canal GEO y hasta Puente El Marqués está declarado como Área Verde y Espacio Abierto; lo mismo ocurre con una franja de 100 m en la margen derecha del río La Sabana. Sin embargo, justo terminando esta franja, comienzan zonas habitacionales (de máximo dos niveles con 40% de ocupación del terreno por predio) cuya cercanía a las márgenes del río implica que no se están considerando las posibles crecientes del río.

Por otro lado, la margen izquierda del río está determinada como de aprovechamiento agrícola, sin embargo, cerca de la desembocadura del río en la Laguna de Tres Palos ya se ubica un desarrollo habitacional denominado “Campestre de la Laguna”. Es importante resaltar que el río La Sabana está trazado como un cauce de ancho constante. Entre Laguna negra y el Aeropuerto internacional, las áreas están destinadas en su mayoría a usos turísticos, hoteleros y residenciales con 60 cuartos por hectárea y un 80% de área libre, lo cual es congruente con la colonia Ciudad Luis Donaldo Colosio, construida en 1995 (Figura 4.10a).

En los alrededores del aeropuerto, el suelo está destinado a áreas turísticas pero que deben protegerse debido a las características de su entorno ambiental (“turístico con norma ecológica”); este uso de suelo permite construir hasta 40 cuartos hoteleros por hectárea (Figura 4.10b)

Finalmente, al igual que parte de Laguna Negra, el canal de salida de Laguna de Tres Palos está catalogado como de “protección y conservación de áreas naturales”. Entre el canal de salida y el río Papagayo se tiene una zona de “conservación de flora y fauna”; pero se puede apreciar el contraste del área habitacional de Lomas de Chapultepec. Una observación importante es que en la margen derecha de la desembocadura del río Papagayo se tienen contemplados desarrollos turísticos parecidos a los de la Ciudad Luis Donaldo Colosio (Figura 4.10c)



Figura 4.10 Uso de suelo en la zona de a) Laguna Negra y desembocadura del río La Sabana, b) Aeropuerto Internacional de Acapulco y c) desembocadura de la Laguna de Tres Palos y del río Papagayo (CEURA, 2001)

4.2 Cronología del evento

En México existe una herramienta de alerta ante una amenaza ciclónica, denominada Sistema de Alerta Temprana por Ciclón Tropical (SIAT-CT) cuya función es alertar a la población en tiempo y forma acerca de un agente meteorológico que represente una amenaza mediante boletines

emitidos periódicamente por el Sistema Nacional de Protección Civil (SNPC), los cuales proveen información actual y pronóstico de la trayectoria de un ciclón tropical y la física del fenómeno, así como grados de alerta para las zonas de posible afectación (SNPC, 2003).

Es así que el 13 de septiembre de 2013 a las 11:30 horas, el SNPC emitió un boletín de alertamiento por ciclón tropical debida a la depresión tropical 13-E en el Océano Pacífico, localizado a 225 km al sur de Zihuatanejo, Guerrero, con vientos sostenidos y rachas de 55 km/h y 75 km/h (SNPC, 2013a). A las 16:30 horas de ese mismo día, la depresión tropical se intensificó a tormenta tropical y se le nombra “Manuel”, ubicándose al sur-suroeste de Zihuatanejo, Guerrero, México y con una trayectoria estimada al oeste-noroeste (SNPC, 2013b). Para el 14 de septiembre a las 04:30 horas, el boletín de alertamiento del SNPC ubicaba a la tormenta tropical estacionaria a 300 km al sur de Lázaro Cárdenas, Michoacán, pronosticando lluvias muy fuertes a torrenciales en Guerrero, Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit (SNPC, 2013c). A las 22:30 horas, “Manuel” ya estaba a 90 km de Lázaro Cárdenas, Michoacán (SNPC, 2013d). Para las 07:30 horas del 15 de septiembre, la tormenta tropical ya estaba a 10 km al sur del municipio de Aquila, Michoacán. Se alertaba a la población de Guerrero, Michoacán y Colima sobre “la posibilidad de encharcamientos y/o inundaciones pluviales y fluviales a causa de la acumulación y la continuidad de las lluvias” (SNPC, 2013e). La trayectoria descrita anteriormente se puede apreciar en la Figura 4.11.



Figura 4.11 a) Trayectoria de “Manuel” del 13 al 15 de septiembre a las 19:39 horas, y el entonces pronóstico de su trayectoria, b) trayectoria de “Manuel” durante el 15 y el 16 de septiembre (CONAGUA)

Por su parte, las estaciones climatológicas y Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mostradas en la Figura 4.12a permitieron construir el hietograma a cada seis horas en cuenca del río La Sabana (ver Figura 4.12b).

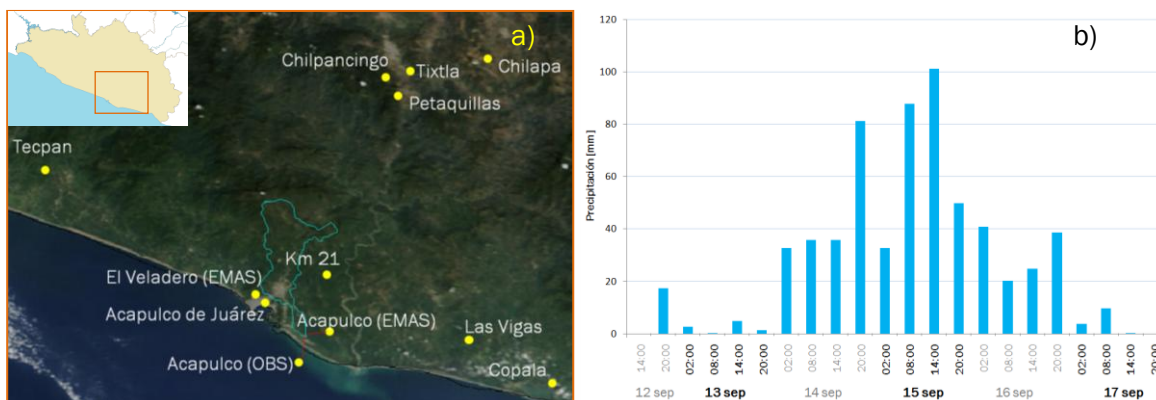


Figura 4.12 a) estaciones climatológicas operadas por CONAGUA y CFE para la construcción de b) hietograma de precipitación media para la cuenca del río La Sabana

La lámina de lluvia acumulada del 12 de septiembre a las 14:00 horas al 17 de septiembre a las 20:00 horas fue de 619,33 mm. Como se muestra en el hietograma de la Figura 4.12b, las lluvias intensas comenzaron en la madrugada del sábado 14 de septiembre con un máximo en la mañana del 15 de septiembre; este forzamiento dio como resultado el desbordamiento de los ríos Papagayo y La Sabana, registrándose el mayor número de daños en la zona del río la Sabana, tal y como se reporta en la imagen infrarroja correspondiente al 18 de Septiembre de 2013 (ver Figura 4.13), en donde se puede apreciar la extensión de la mancha de inundación y el arrastre de sedimentos hacia la desembocadura.

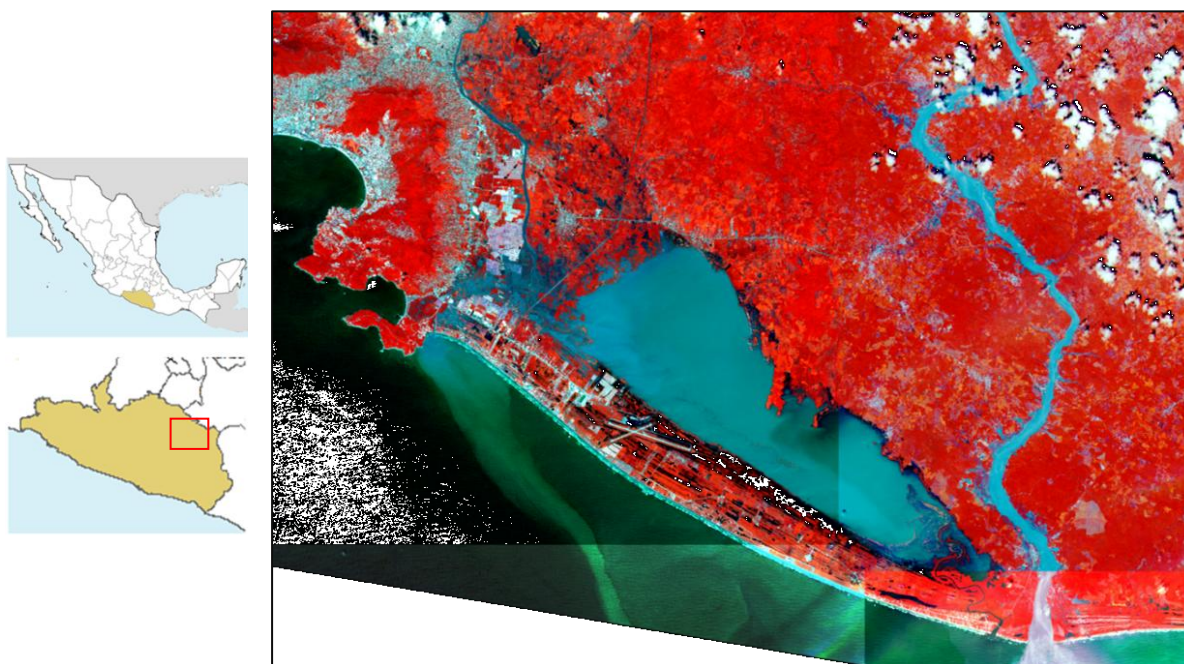


Figura 4.13 Imagen infrarroja de RapidEye correspondiente al 18 de septiembre de 2013 (adquirida por el IUNAM)

Como resultado de este evento, personal académico del Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó una visita de campo a la zona de estudio durante noviembre de 2013. Durante la cual se contó con el apoyo de personal de la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la CONAGUA, así como de la Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de

Guerrero (CAPASEG), para recabar información sobre el desarrollo del evento mediante narrativa de los habitantes de la zona, así como de los niveles máximos de agua en puntos de control determinados por personal del IIUNAM. Lo anterior permitió reconstruir cronológicamente la evolución del evento, la cual se narra a continuación:

15 de septiembre

00:00 horas. El río La Sabana se desborda hacia el fraccionamiento Las Gaviotas (ver Figuras 4.14a y 4.14b), que se encuentra en la margen derecha, cerca de 6 km aguas arriba de su desembocadura en la Laguna de Tres Palos. El desbordamiento en dicho río ocurrió después de que se presentaran las primeras lluvias intensas en la zona, lo que sugiere que el cauce no tiene capacidad hidráulica suficiente para conducir un volumen como el que se presentó el 14 de septiembre.



Figura 4.14 Inundación del fraccionamiento Las Gaviotas a) Vista aérea, b) Vista hacia la desembocadura de la Laguna de Tres Palos, al fondo la zona hotelera (Internet)

01:00 horas. El río Papagayo se desborda hacia su margen derecha sobre la zona de Lomas de Chapultepec, ubicada a aproximadamente 4 km de la desembocadura al mar.

05:00 horas. La inundación en el río La Sabana avanza hacia el sur en dirección a la costa, cubriendo parte de la colonia Llano Largo y la colonia Luis Donaldo Colosio. El impedimento del flujo de salida de la Laguna Negra hacia el mar (debido a la presencia de vegetación y estrechamientos en su curso por la construcción de puentes como La Marquesita y El Marqués) provocó la acumulación de agua en la zona norte del COSTCO y la colonia Ciudad Luis Donaldo Colosio. Dicho volumen en exceso además inundó el campo de golf y fluyó desde el COSTCO hasta la zona de comercios de Playa Revolcadero por las calles, que eran las vías que mejor conducían el caudal, más que Laguna Negra

07:30 horas. El COSTCO y su estacionamiento están anegados (ver Figura 4.15a). El volumen contenido logra romper la barda perimetral que delimita el campo de golf, por lo que éste también se inunda (ver Figura 4.15b).



Figura 4.15 Inundación de a) estacionamiento del COSTCO y b) campo de golf (Internet)

08:00 horas. El escurrimiento del campo de golf llega a la desembocadura de Laguna Negra, fluyendo por la zona de comercios de Playa Revolcadero hasta el mar (ver Figura 4.16a). Adicionalmente, el incremento del nivel del agua en el propio manglar de Laguna Negra desborda hacia Puerto Marqués, inundando también este lugar.

Por otro lado, la corriente del río Papagayo derrumba el puente auxiliar Barra Vieja-Lomas de Chapultepec, el cual era la vía de acceso a la carretera federal 200 Acapulco-Pinotepa (ver Figura 4.16b). Más hacia la costa, el escurrimiento es tal que destruye otro puente de menores proporciones que sirve de acceso de Barra Vieja a Lomas de Chapultepec y que cruza el meandro de salida de la Laguna de Tres Palos (ver Figura 4.16c).



Figura 4.16 a) Flujo en la zona de comercios en Playa Revolcadero, b) Puente en Lomas de Chapultepec destruido, c) Puente Barra Vieja-Lomas de Chapultepec (Internet)

Por otro lado, el arrastre playero habitual había formado una barra que bloqueaba la desembocadura de la laguna de Tres Palos, ubicada en el área conocida como Barra Vieja. Dicha condición propició que parte del caudal del río Papagayo fluyera hacia la Laguna de Tres Palos a través del canal de salida de ésta, y no hacia el mar, de las 07:00 a las 11:00 horas del domingo 15 de septiembre.

Cabe mencionar que el canal de salida de la Laguna de Tres Palos estaba cerrado por una barra arenosa, por lo que dicha laguna se comporta como un cuerpo de almacenamiento y su nivel aumenta durante el 15 de septiembre. El estacionamiento y el edificio terminal del Aeropuerto Internacional de Acapulco se encuentran a una cota más baja que la del agua en la laguna, por lo que dichas áreas se inundan.

Una vez abierta la barra, a las 11:00 horas, tanto la Laguna de Tres Palos como parte del volumen que llevaba río Papagayo, descargaron hacia el mar; sin embargo, estimaciones iniciales determinan que la desembocadura mencionada tiene una baja eficiencia hidráulica, pudiendo conducir aproximadamente 20 millones de metros cúbicos.

16 de septiembre

03:00 horas. El Aeropuerto Internacional de Acapulco cesa sus actividades por amanecer inundado el estacionamiento (Figura 4.17a) y el interior del edificio terminal (Figura 4.17b). Se registraron niveles en la laguna de 3 msnm, lo que afectó al estacionamiento y edificio terminal que se encuentran a 2,5 msnm. La mayor parte de las pistas resultaron intactas, ya que se encuentran a una altitud de 5,0 msnm.



Figura 4.17 a) Inundación del estacionamiento del Aeropuerto Internacional de Acapulco. En el extremo izquierdo de la foto se puede apreciar la torre de control, b) interior del edificio terminal inundado (NOTIMEX, 2013)

17:00 horas. Se declara oficialmente cerrado el Aeropuerto Internacional.

4.2.2 Niveles medidos

Una vez determinados los puntos de control, es decir, aquellos lugares donde se midieron las marcas de agua de la inundación, las empresas de topografía Consultoría Integral en Ingeniería, S. A. de C. V. (CONIISA) y Consorcio IUYET S. A. de C. V. se encargaron de obtener las elevaciones en (msnm) de estos puntos. En total, se recabaron 14 mediciones en la zona cercana al río La Sabana, 3 en la zona del aeropuerto y 8 en la zona del río Papagayo. Los resultados se pueden apreciar en las Figuras 4.18 a y b.

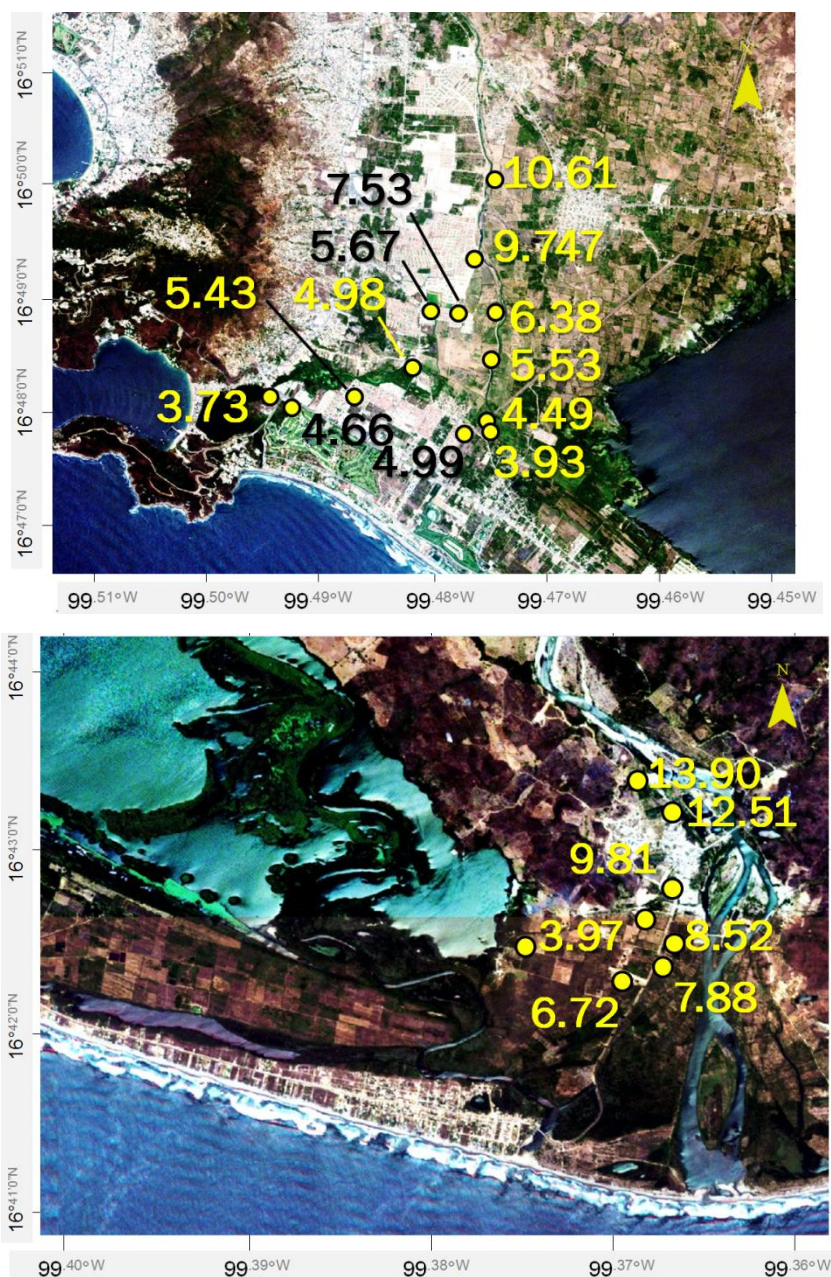


Figura 4.18 Elevaciones en (msnm) de la inundación medidas en campo en a) zona del río La Sabana y Laguna Negra, b) desembocadura de la Laguna de Tres Palos y Río Papagayo

Capítulo 5 Metodología

El marco de trabajo utilizado en el presente estudio ha sido desarrollado en los últimos años al interior de la Coordinación de Hidráulica del IIUNAM, y ha sido probado con éxito en otros casos de estudio como son el río Tonalá (A. Pedrozo-Acuña, Ruiz de Alegria-Arzaburu, Mariño-Tapia, Enriquez, & González Villareal, 2012a) y el río Pánuco (A. Pedrozo-Acuña et al., 2013). Este marco comprende el encadenamiento de modelos numéricos que están abocados a la representación completa de un evento extremo, desde su generación en la nube hasta la zona inundada.

Tal y como se señala en la Figura 5.1, la metodología contiene tres etapas de modelación a saber: modelo atmosférico, modelo hidrológico y modelo hidrodinámico. En esta cadena de modelos los resultados del modelo meteorológico, campos de precipitación, sirven como datos de entrada al modelo hidrológico a fin de determinar los caudales en ambos ríos del sistema. Posteriormente, los caudales sirven como condiciones de forzamiento para el modelo hidrodinámico bidimensional a través del cual es posible determinar las zonas afectadas por el evento hidrometeorológico.

Para la puesta a punto de todas las herramientas numéricas se utilizó información de precisión y última generación, como son la nube de puntos obtenidos con tecnología LiDAR y resolución de 7 m y un ráster de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución a cada 90 m. Adicionalmente, se emplearon datos de las estaciones climatológicas operadas por CONAGUA y por CFE e imágenes de satélite de las zonas afectadas.

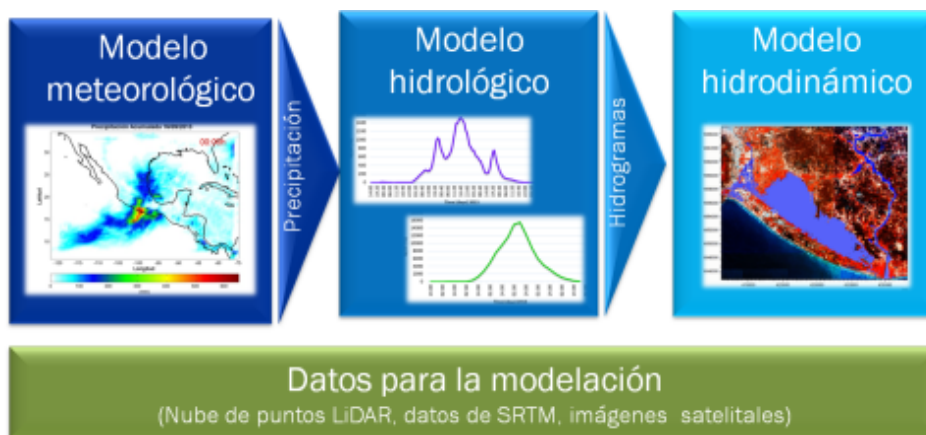


Figura 5.1 Metodología para la reproducción numérica del evento extremo en Acapulco, 2013 (IIUNAM)

Modelo meteorológico

Para la primera etapa del sistema escalonado se utilizó el modelo Weather Research & Forecasting (WRF) para representar la microfísica de la nube que produce la precipitación en la zona de estudio. El WRF es un sistema de modelación numérica del clima a meso-escala que implementa el solucionador dinámico Advanced Research WRF (ARW) descrito en (Skamarock, 2008) en mallas de alta resolución.

De acuerdo con lo que se presenta en (A. Pedrozo-Acuña, Mejía-Estrada, Rodríguez-Rincón, Domínguez-Mora, & González-Villarreal, 2014b), la presencia simultánea de las dos tormentas tropicales en el país, obligó a utilizar dos dominios numéricos anidados, el dominio 1 con resolución de 19 km y el dominio 2 con resolución de 4 km, con puntos asociados a las estaciones para cada dominio. El área de estudio para el modelo WRF es la delimitada por el dominio 1 (ver Figura 5.2).

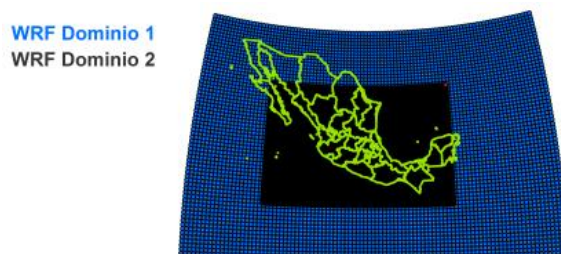


Figura 5.2 Dominios anidados del modelo WRF, la malla azul con resolución de 19 km y la malla negra con resolución de 4 km

Para validar los resultados del modelo meteorológico, se compararon los datos calculados con los de estaciones climáticas en el sureste del Pacífico mexicano, donde la precipitación fue más intensa. A manera de resumen de resultados, en la Figura 5.3 se presentan los hietogramas y curvas masa calculadas para las estaciones de Copala, Tierra Colorada y Acapulco, así como un mapa de la lluvia acumulada del 14 al 16 de septiembre de 2013.

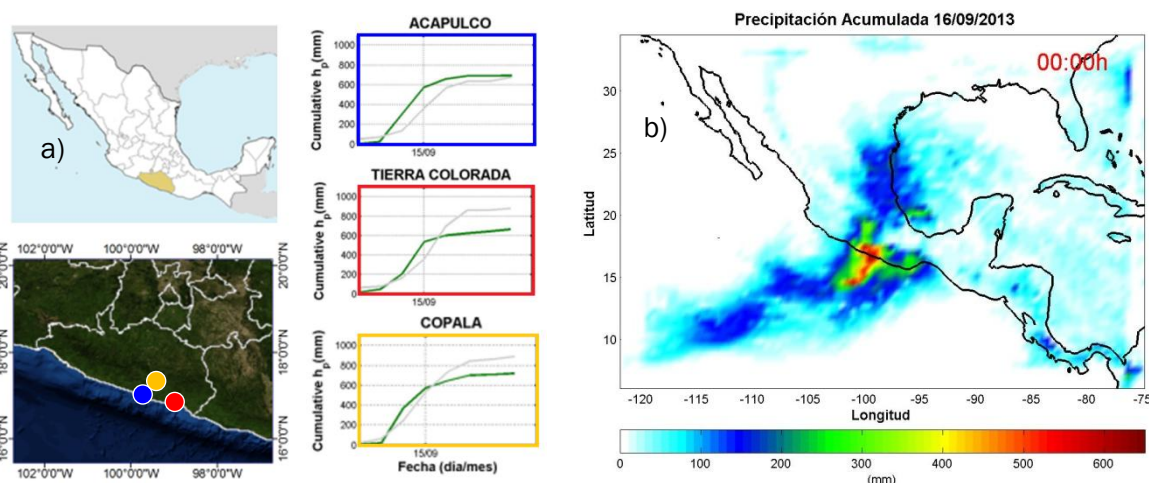


Figura 5.3 a) Ubicación de tres de las estaciones junto con la curva masa medida de estaciones climáticas del 14 al 18 de septiembre de 2013 y calculada con el modelo WRF, b) Mapa de precipitación acumulada del 14 al 16 de septiembre con el modelo WRF.

La precipitación acumulada derivada del modelo WRF es consistente con la observada en las estaciones. Esta comparación sugiere que el modelo meteorológico reproduce exitosamente el fenómeno de lluvia durante el periodo de estudio.

Modelo hidrológico

Para la estimación de los hidrogramas en las cuencas de los ríos La Sabana y Papagayo se utilizó el Modelo para Pronóstico de Esguerrimiento que pronostica los esguerrimientos mediante

parámetros distribuidos (Domínguez-Mora, 2008), lo cual significa que la cuenca es dividida en celdas o pixeles, cada uno con sus propias características. El MPE está basado en el método del Soil Conservation Service (SCS) (USDA-SCS, 1985) y modificado para considerar el proceso de secado del suelo después de un evento de precipitación (evapotranspiración).

Los datos de entrada del MPE comprenden información de estaciones pluviográficas en la cuenca, así como parámetros hidrológicos obtenidos con ayuda de un sistema de información geográfica (SIG). El modelo estima la escorrentía para cada una de las celdas del dominio, así como la precipitación media en la cuenca y su hietograma. Para ello se sirve, en primer lugar, del Método Shepard para determinar la distribución de la lluvia en la cuenca al obtener un promedio pesado de la lluvia registrada en las N estaciones pluviográficas cercanas al punto de interpolación, como se muestra a continuación:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=0}^N w_i(x, y) hp_i \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$\phi(x, y)$	Punto por interpolar
$w_i(x, y)$	Factor de peso en la estación i en una región arbitraria del plano x, y
hp_i	Lluvia en la estación i

Después se apoya en el Método del Número de Curva para obtener la escorrentía basándose en la ecuación del balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales (ver conjunto de ecuaciones 3):

- Para un evento de precipitación único y al iniciar el escurrimiento en la cuenca, la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima.
- La infiltración inicial se supone como el 20% del potencial de retención para efectos prácticos.

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S}$$

$$I_a = 0,2S$$

Donde

P	Precipitación total (cm)
P_e	Precipitación efectiva (cm)
I_a	Infiltración efectiva (cm)
F_a	Infiltración acumulada (cm)
S	Infiltración potencial máxima, en función del número de curva CN , determinado a partir del uso y tipo de suelo (cm)

Posteriormente, utiliza un Factor de Olvido que gradualmente reduce el contenido de agua en el suelo para simular las pérdidas por evapotranspiración y que determina una precipitación acumulada neta

Ec. 4

$$P_{a_n} = \sum_i^n P_j f x^{n-i}$$

Donde

- P_{a_n} Precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n (cm)
- $P_{j=n}$ Precipitación en el intervalo de tiempo n (cm)
- $f x$ Factor de olvido $0 \leq f x \leq 1$

A partir del conjunto de ecuaciones (3) y dado que $S = f(CN)$, se tiene que

$$P_e = \frac{\left(P_{a_n} - \frac{508}{CN} + 5,08\right)}{P_{a_n} + \frac{2032}{CN} - 20,32} \tag{Ec. 5}$$

Finalmente, se sirve del Método Clark modificado para estimar los escurrimientos a la salida de la cuenca a partir del área y tiempo asociado a isócronas (zonas de igual tiempo de viaje en que se divide la cuenca).

Para el río La Sabana se consideró una longitud del cauce de 72,72 km con una pendiente media del 2,1%; un tiempo de concentración de 5 horas y $\Delta T = 10$ minutos. Para la validación de los datos se utilizó información de estaciones climáticas. Para el río Papagayo, se consideró un tiempo de concentración de 18 horas y $\Delta T = 6$ horas. En este caso, no hubo información de campo con la cual comparar el hidrograma estimado, por lo que éste tiene asociada cierta incertidumbre. La Figura 5.4 muestra los hidrogramas de diseño para ambos ríos, donde se puede apreciar la diferencia en magnitud de los picos de ambos hidrogramas.; el río La Sabana alcanzó su pico el 15 de septiembre a las 05:00 horas. Sin embargo, a pesar de ser el del río La Sabana diez veces menor al del río Papagayo, fue el primero el que causó mayores daños.

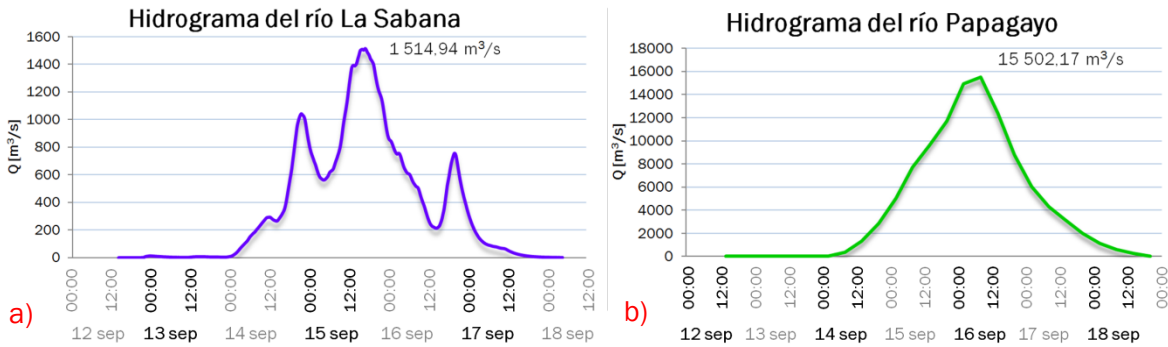


Figura 5.4 Hidrogramas calculados con el modelo hidrodinámico para a) el río La Sabana y b) el río Papagayo

Modelo hidrodinámico

La herramienta numérica para determinar las áreas afectadas es un modelo de aguas someras en dos dimensiones, que resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds (Reynolds-averaged Navier-Stokes), las cuales están sujetas a hipótesis de incompresibilidad, presión hidrostática, consideran la aproximación de Boussinesq y se sirven de la solución de Riemann para manejar cualquier discontinuidad en la solución (DHI, 2011), y permite la construcción de una malla de elementos finitos estable y flexible (A. Pedrozo-Acuña et al., 2014c). El modelo hidrodinámico se denomina MIKE 21 Flow Model FM (desarrollado por el Danish Hydraulic Institute) y su utilización se debe a la exitosa aplicación que ha tenido durante los estudios de la Segunda, Tercera y Cuarta Etapas del Plan Hídrico Integral de Tabasco (A. Pedrozo-Acuña, et al., 2009, 2010), así como en el modelado de la inundación por el desbordamiento del río Pánuco en los estados de Veracruz y Tamaulipas (A. Pedrozo-Acuña et al., 2013).

Ecuaciones de gobierno

El sistema de ecuaciones en dos dimensiones de aguas someras consiste en tres ecuaciones: una ecuación de continuidad y dos ecuaciones de conservación de momentum en dos direcciones ortogonales (Mignot, Paquier, & Haider, 2006).

La ecuación de continuidad local es

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad \text{Ec. 6}$$

Mientras que las ecuaciones de momentum para las componentes x y y son (DHI, 2011):

Ec. 7

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} \\ & = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \\ & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} \\ & = f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hu_s S \end{aligned}$$

Donde

h Profundidad total del agua (m)

$$h = \eta(x, y, t) + d(x, y)$$

$\eta(x, y, t)$ Variación de la superficie libre del agua (m)

$d(x, y)$ Profundidad del fluido en reposo (m)

\bar{u}, \bar{v} Componentes de la velocidad en la dirección x y y promediadas en la vertical (m/s)

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad , \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{Ec. 8}$$

S Magnitud de la descarga en los puntos fuente (m³/s)

f Parámetro de Coriolis (1/s)

g Gravedad (m/s²)

ρ_0 Densidad del agua (kg/m³)

p_a Presión atmosférica (Pa)

τ_{si}, τ_{fi} Esfuerzos en la superficie y el fondo

s_{ij} Componentes del tensor de esfuerzos de radiación

T_{ij} Esfuerzos laterales que incluyen fricción viscosa y turbulenta, y advección diferencial

u_s Velocidad de la descarga hacia el cuerpo de agua

El esquema numérico adopta un enfoque de volumen finito para resolver las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, integradas en la vertical y para un flujo incompresible, y, en su caso, ecuaciones de segundo orden para resolver la advección y dispersión de la salinidad y temperatura.

La discretización espacial, es decir, la conversión de un espacio continuo a uno discreto, se realiza utilizando el método de volumen finito centrado en la celda (ver Figura 5.5), es cual es estable para regímenes sub y supercríticos, por lo que es el método más aplicado para flujos tierra adentro (Beffa, 2008).

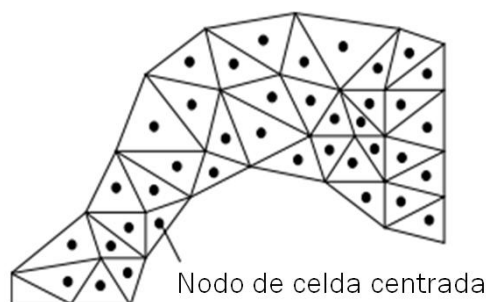


Figura 5.5 Esquema del arreglo de una malla no estructurada basado en el método de celda centrada.

En una malla triangular no estructurada, el número de grados de libertad del problema es el producto del número total de nodos y el número de variables del problema (Sánchez-Vázquez, 2004).

La profundidad del agua en cada celda es monitoreada para clasificar a los elementos como secos, parcialmente secos o mojados. De igual forma, se revisan las caras de los elementos para identificar fronteras inundadas.

Los tres parámetros para determinar la condición de las celdas son la profundidad de secado (h_{dry}), la profundidad de inundación (h_{flood}) y la profundidad de mojado (h_{wet}). En general

$$h_{dry} < h_{flood} < h_{wet} \quad \text{Ec. 9}$$

- La cara del elemento se considera inundada si 1) la profundidad del agua de un lado de la cara es menor a h_{dry} y del otro lado de la cara es mayor a h_{flood} , y 2) la suma la profundidad del lado en que es menor a h_{dry} y la elevación de la superficie del lado en que es mayor a h_{flood} , es mayor a cero.
- Un elemento se considera seco si la profundidad del agua es menor a h_{dry} , y ninguna de sus caras está considerada como inundada, Un elemento se considera parcialmente seco. El elemento es entonces despreciado del cálculo.
- Un elemento se considera parcialmente seco si la profundidad del agua es mayor a h_{dry} y menor a h_{wet} , o cuando es menor a h_{dry} y una de sus caras está considerada como inundada.
- Un elemento se considera mojado si la profundidad del agua es mayor a h_{wet} . En este caso se realiza el cálculo del flujo de masa y del flujo del momentum.

Procesamiento y puesta a punto del modelo

En todas las aplicaciones prácticas de modelos numéricos, la actividad clave no es el cómputo de los datos, sino el análisis precedente, la selección del modelo y el procesamiento de datos, así como el posterior análisis, presentación e interpretación de resultados. El procedimiento descrito está dividido en tres componentes principales: pre-proceso, proceso y post-proceso (**Musall, 2011**).

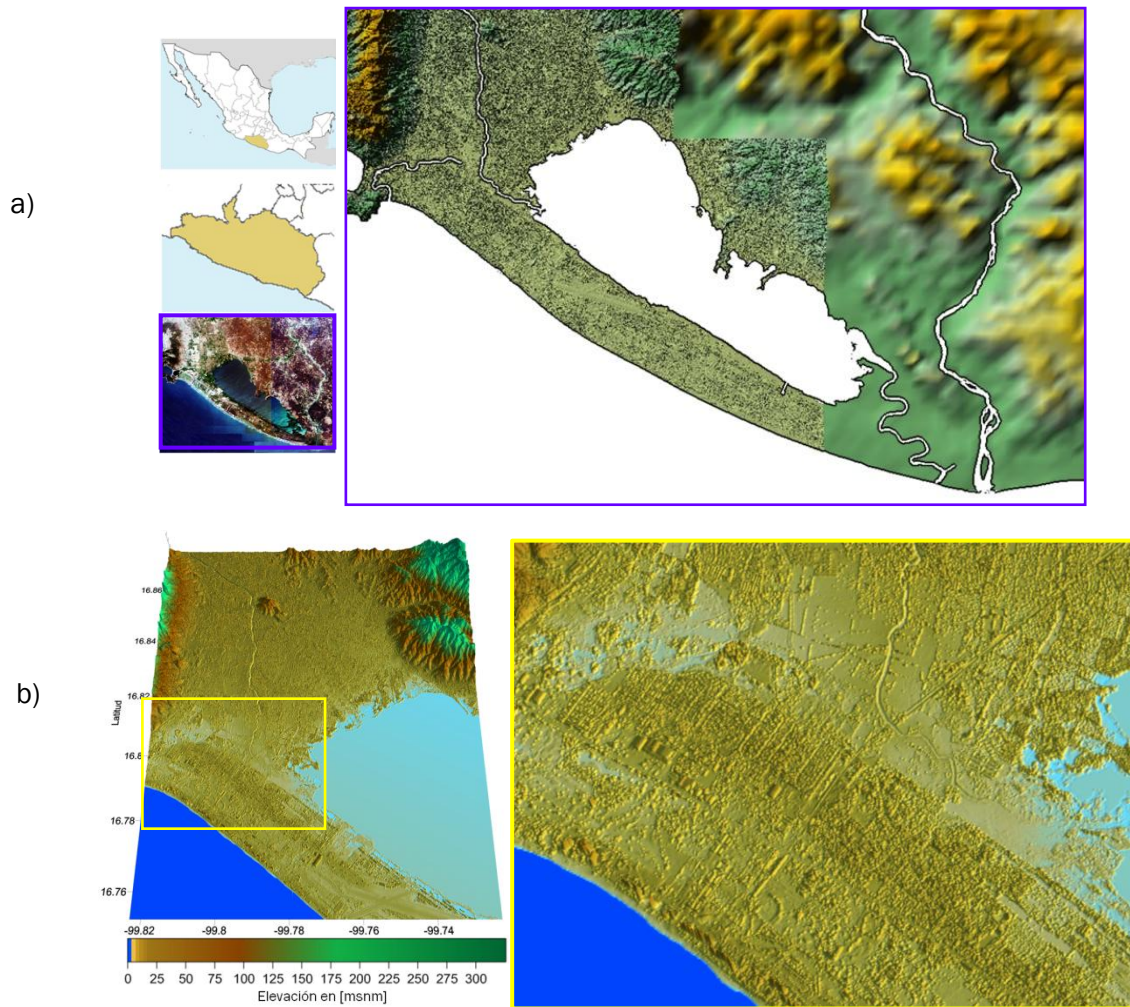
El pre-proceso considera la definición del problema, su análisis y plausibilidad de la información disponible y las características del flujo en estudio, es decir, especificación del área de modelado, preparación de la topografía, construcción de la malla de elementos finitos, así como las condiciones iniciales y de frontera, descargas y niveles de agua al inicio de la simulación. El proceso es el cómputo de la información donde se resuelven las ecuaciones de gobierno del flujo. El post-proceso involucra la visualización, análisis y revisión de los resultados del cómputo.

▪ PRE-PROCESO

La información de topografía la conforman por un lado, datos provenientes de una nube de puntos LiDAR con resolución de 7 m que cubren la zona de Laguna Negra, el río La Sabana el aeropuerto internacional de Acapulco y parte de la Laguna de Tres Palos. Lo anterior se complementó con un ráster de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de la NASA con resolución de 90 m, y cubre la salida de dicha laguna al mar y los alrededores del río Papagayo (ver Figuras 5.6a y 5.6b)

Capítulo 5. Metodología

Los datos de batimetría del río La Sabana y la zona de manglar de Laguna Negra fueron proporcionados por la empresa Consultoría Integral en Ingeniería, S. A. de C. V. (CONIISA), la cual entregó un esquema de planta, perfil longitudinal y 106 secciones transversales del río La Sabana a lo largo de 21,55 km del cauce. Asimismo, entregó 50 secciones transversales del manglar de Laguna Negra, desde la desembocadura del canal GEO hasta Playa Revolcadero. Por otro lado, la empresa Consorcio IUYET S. A. de C. V. proporcionó curvas batimétricas de la Laguna de Tres Palos y un perfil longitudinal de la descarga de dicha laguna al mar. Por su parte, la Comisión Federal de Electricidad facilitó 66 secciones transversales del río Papagayo a lo largo de 36,90 km, concluyendo 650 m antes de la desembocadura de dicho río al mar. La Figura 5.6c muestra las batimetrías de los cuerpos de agua antes mencionados con su respectiva escala de colores.



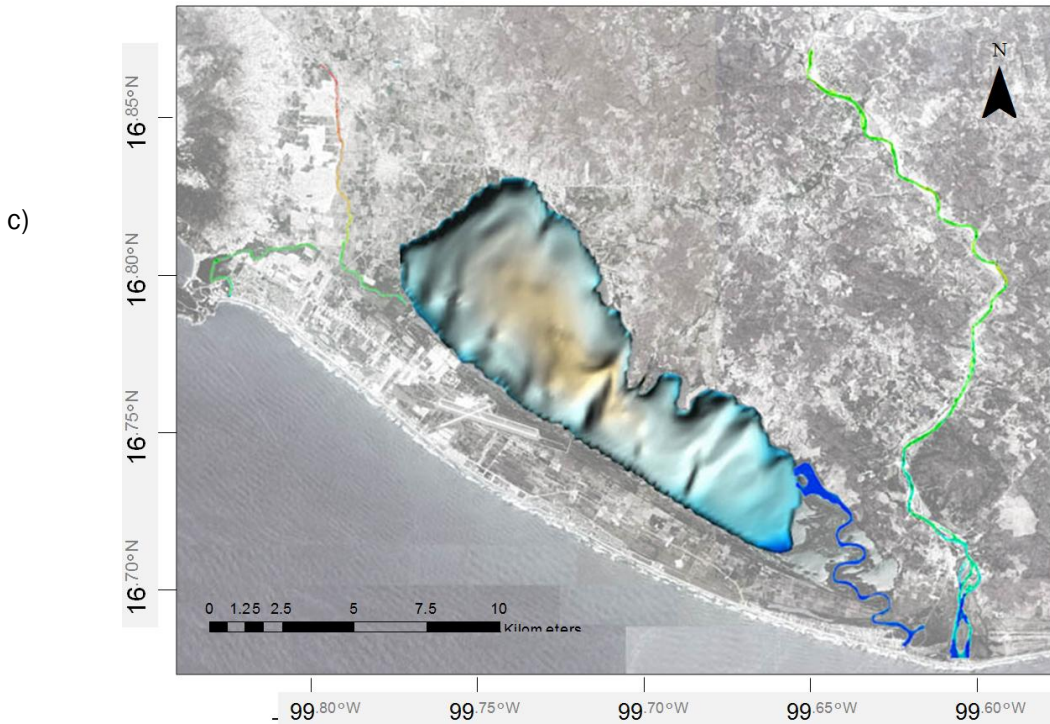


Figura 5.6 a) comparación de la resolución del modelo digital de elevaciones de los puntos LiDAR (5 m) con los de SRTM (90 m), b) Nube de puntos LiDAR cerca del cruce del Viaducto Diamante con el río La Sabana, c) batimetría de los cuerpos de agua en la zona de estudio

La extensión de la malla flexible de elementos finitos se delimitó a partir de la discretización numérica de la información de topografía y batimetría (A. Pedrozo-Acuña et al., 2014c). El dominio seleccionado comprende ambos ríos (La Sabana y Papagayo), la Laguna de Tres Palos y Laguna Negra junto con su correspondiente llanura de inundación. Se establecieron polígonos con diferentes áreas máximas de elemento tomando en cuenta la importancia del detalle en los resultados: la malla con mayor resolución se encuentra en los cauces de ambos ríos (300 m²), mientras que en la llanura se construyeron subdominios con área máxima de elemento desde 625 m² hasta 8000 m². La jerarquización mencionada permitió mostrar el área inundable de manera pormenorizada ahorrando tiempo de simulación, garantizando la representación apropiada de las elevaciones con el MDE utilizado (A. Pedrozo-Acuña et al., 2013). La malla generada se presenta en la Figura 5.7, la cual considera seis condiciones de frontera:

- 1) Hidrograma de entrada del río La Sabana (punto verde).
- 2) Hidrograma de entrada del río Papagayo (punto cian).
- 3) Desembocadura de la Laguna de Tres Palos al mar (punto azul).
- 4) Desembocadura del río Papagayo al mar (punto naranja).
- 5) Conexión de Laguna negra con el Océano Pacífico (punto rojo).
- 6) Frontera cerrada (línea magenta).

El modelo bidimensional de aguas someras permite hacer la interpolación de los datos de topografía y batimetría, conjuntándolo con la malla de elementos finitos y el espejo de agua inicial (ver Figura 5.8).

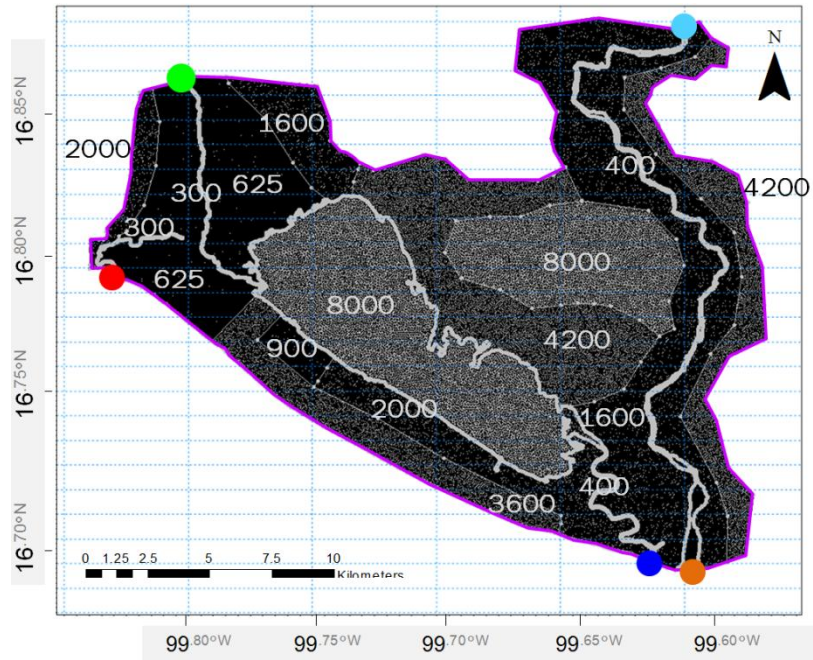


Figura 5.7 Malla de elementos finitos para la zona de estudio indicando condiciones de frontera, indicando el área máxima de elemento en $[m^2]$ por polígono.

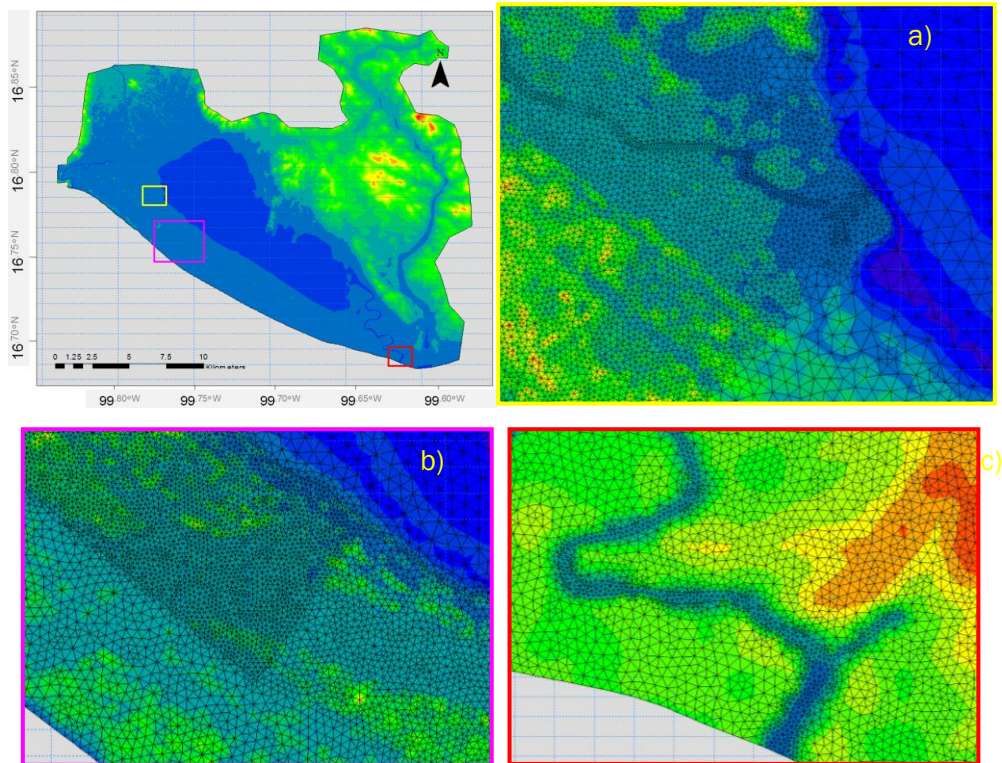


Figura 5.8 Condiciones iniciales de topografía y espejo de agua con la malla de elementos finitos de distinta resolución en a) Desembocadura del río La Sabana en la Laguna de Tres Palos, b) Aeropuerto y c) Desembocadura de la Laguna de Tres Palos al mar.

Es importante mencionar que el manejo de datos topobatimétricos y de rugosidad superficial para la simulación de la llanura de inundación tiene asociada una incertidumbre. En este estudio se considera la incertidumbre del modelo hidrológico, y la representación numérica de los datos de topografía y de fricción está tratada con un enfoque determinista como lo documenta (**A. Pedrozo-Acuña et al., 2013**). Bajo este enfoque, la incertidumbre es disminuida mediante la combinación de datos topográficos de alta resolución obtenidos mediante percepción remota junto con datos de campo recientes; además, de acuerdo a (**A. Pedrozo-Acuña et al., 2012a**), la extensión de la inundación no cambia significativamente si se utiliza un coeficiente de rugosidad uniforme en comparación con un mapa de distribución espacial de rugosidades.

El modelo hidrodinámico establece el esfuerzo cortante en el fondo en función de un coeficiente de arrastre que depende de la relación entre el inverso del número de Manning y la rugosidad de Nikuradse para superficies con tamaño de grano $D_{50} = 0,1$ para cuando no se tienen datos exactos de campo (**DHI, 2011**), lo que implica que $1/n = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Además, de acuerdo con el estudio del USGS sobre la rugosidad en canales naturales (**Barnes Jr, 1849**), dicha distribución en cura granulométrica corresponde a $1/n = 31,25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, por lo que la rugosidad constante para el área de estudio es de $n = 0,03125 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$.

Capítulo 6 Resultados y recomendaciones

Este capítulo resume los resultados de la simulación hidrodinámica del evento, con la reproducción de las zonas afectadas. El periodo de simulación abarca del 14 de septiembre de 2013 a las 14:00 horas al 18 de septiembre a las 05:00 horas, con un total de 12 120 pasos de tiempo a cada 30 minutos.

Zona afectada por la inundación

La Figura 6.1 presenta cuatro momentos clave del evento que coinciden con la narrativa presentada en el capítulo 4 del presente trabajo junto con el instante del hidrograma del río La Saban (RLS) y del río Papagayo (RP) en que ocurren. La imagen infrarroja de fondo corresponde a un instante en que las condiciones del río eran normales, correspondiente al 5 de mayo de 2013, adquirida por la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

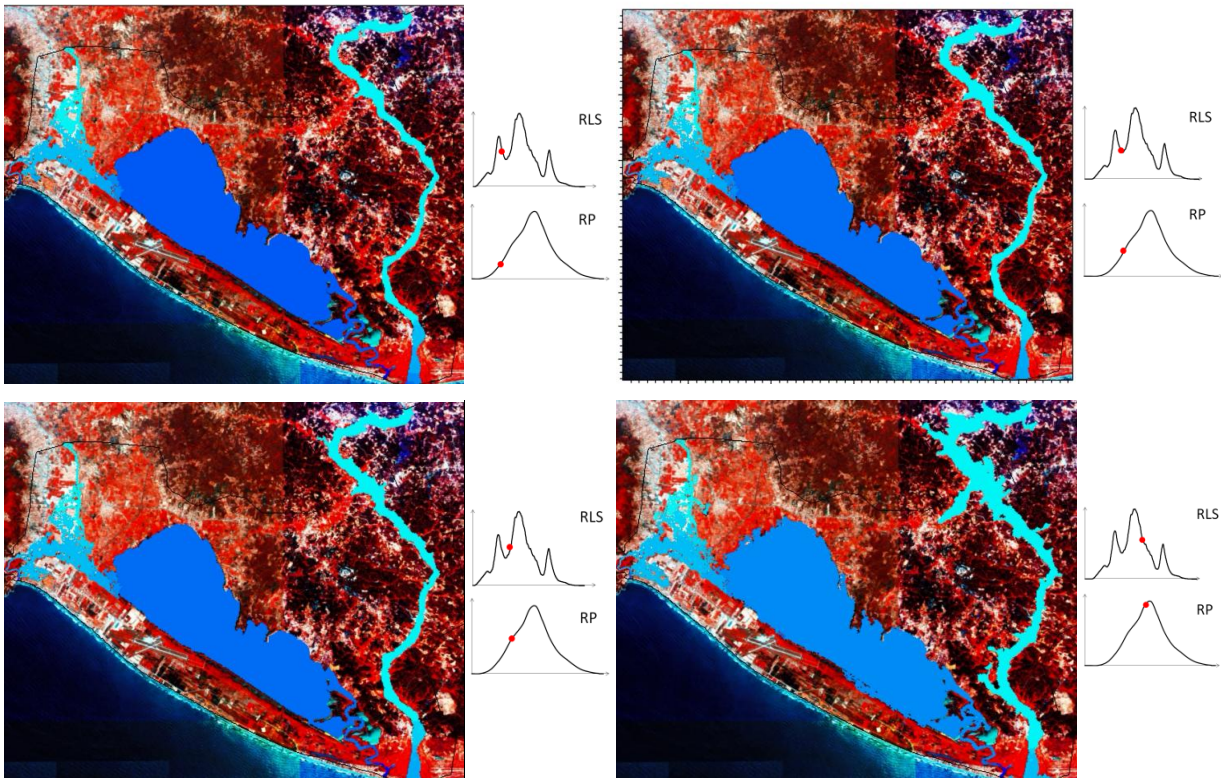


Figura 6.1 a) 15 de septiembre de 2013 00:00 horas, inundación del fraccionamiento Las Gaviotas, b) 15 de septiembre de 2013 05:00 horas inundación en las colonias Llano Largo y Coloso, c) 15 de septiembre de 2013 07:30 horas inundación en los campos de golf del hotel Princess Fairmont, d) 16 de septiembre de 2013 03:00 horas incremento en el nivel de la Laguna de Tres Palos, que provoca la inundación en el Aeropuerto Internacional.

La Figura 6.2a muestra la comparación de la zona afectada calculada con el modelo con respecto a aquella identificada por medio de la imagen de satélite del 18 de septiembre (Figura 6.2b). Es

importante enfatizar en la similitud de las áreas urbanas afectadas a pesar de los procesos de flujo no lineales que ocurren en el desbordamiento de un río al comparar la evolución de la mancha calculada con la imagen satelital, narrativa, topografía e información de campo (A. Pedrozo-Acuña et al., 2014b). Por un lado, se reproduce de manera satisfactoria el proceso de inundación en los campos de golf, el estacionamiento del COSTCO y en la salida de la Laguna Negra (punto 1). Por otro lado, la inundación en las cercanías de la desembocadura de la laguna de Tres Palos al mar y en el río Papagayo, identificados por los puntos (2) y (3), respectivamente, es correctamente reproducida por el modelo.

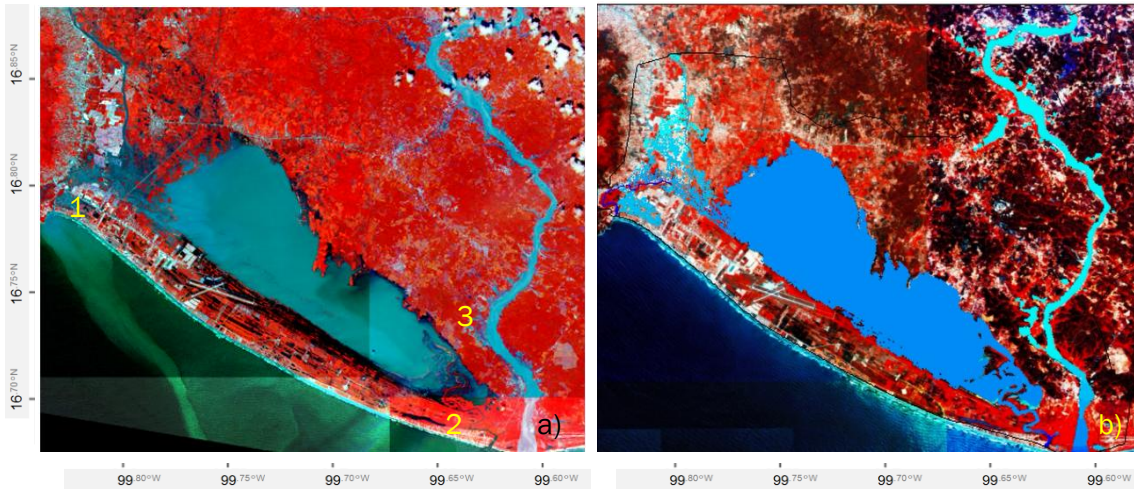


Figura 6.2 Comparación de la mancha de inundación de a) imagen satelital del 18 de septiembre de 2014, contra b) la calculada con el modelo.

Hidrogramas en secciones de control

Por otro lado, el modelo hidrodinámico también permite la obtención de hidrogramas en secciones de control, al interior del dominio numérico. Para este caso, se definieron cuatro puntos que permitirán determinar el drenaje del volumen en exceso durante la incidencia del evento extremo así como la eficiencia de estructuras de mitigación contra inundaciones.

El panel derecho de la Figura 6.3 muestra la ubicación de dichas secciones. El gráfico comparativo mostrado en el panel izquierdo de la misma Figura, presenta los hidrogramas obtenidos para estos puntos, en conjunto con los picos del hidrograma del río La Sabana (mostrado en la Figura 5.5a).

Estos resultados indican que los picos de los hidrogramas en las secciones de control para el Viaducto Diamante aguas arriba del cruce con el río La Sabana, y los puentes “Marqués” y “Marquesita” se presentan horas después de los picos del hidrograma del río La Sabana, lo que señala un comportamiento correspondiente a la descarga de dicho río. En el caso de la salida de la Laguna de Tres Palos, la magnitud del gasto que pasa hasta antes de la apertura de la barra en Barra Vieja (15 de septiembre de 2013 11:00 horas) es de menos de 35 m³/s, lo que corrobora el comportamiento de la laguna como un cuerpo de almacenamiento, debido a que la barra formada por el arrastre playero impedía la descarga de la laguna al mar.

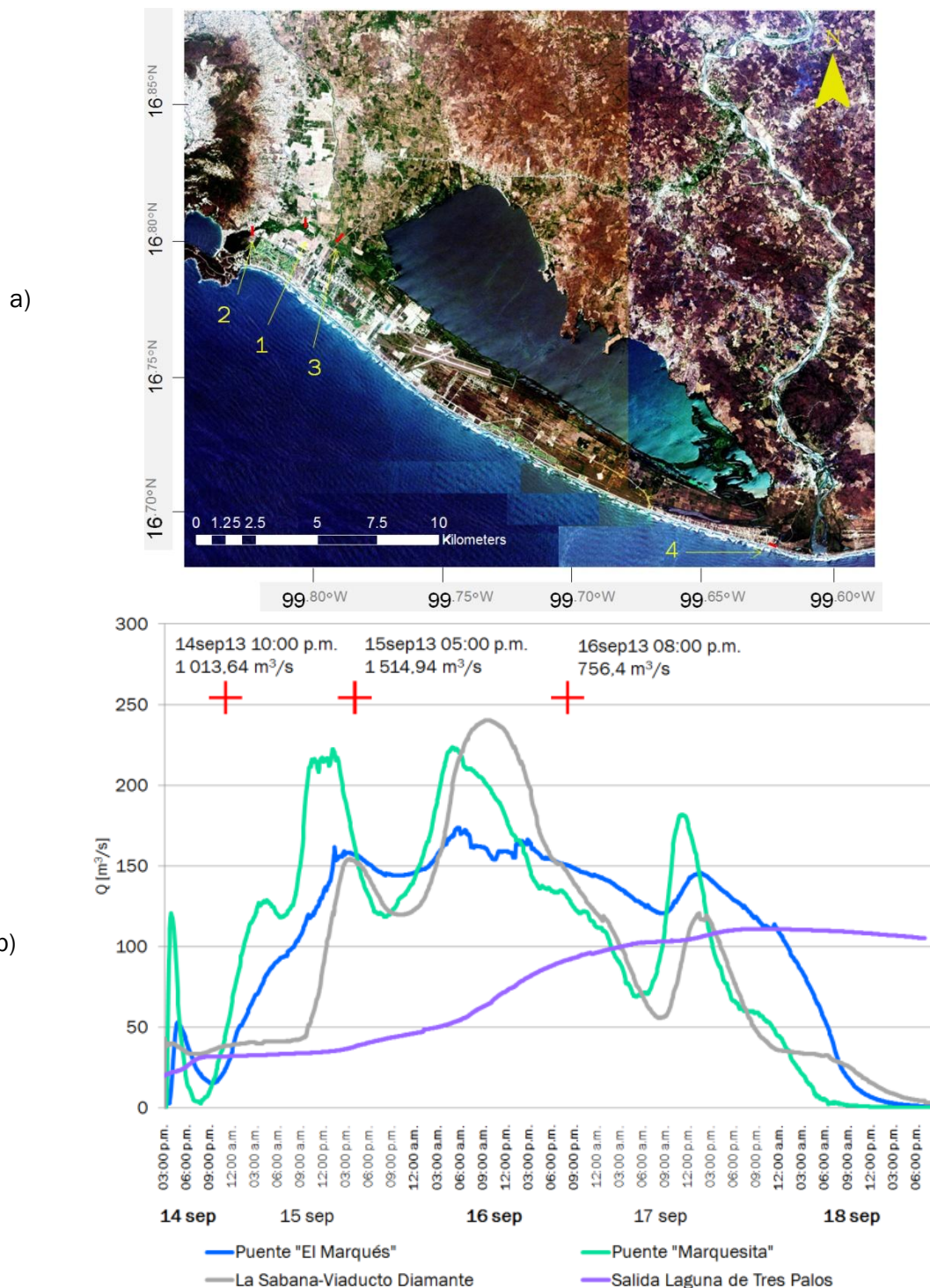


Figura 6.3 a) Secciones transversales para el cálculo de hidrogramas: 1. Puente “El Marqués”, 2. puente “Marquesita”, 3. río La Sabana aguas arriba del cruce con el Viaducto Diamante, 4. salida de la Laguna de Tres Palos, b) Hidrogramas de salida en dichas secciones transversales indicando la ubicación temporal de los picos del hidrograma del río La Sabana

Niveles máximos

Tal como se indicó en el capítulo 4 del presente trabajo, se recabó información sobre los niveles máximos de la mancha de inundación en la zona. Lo anterior fue proporcionado por las empresas Consultoría Integral en Ingeniería, S. A. de C. V. (CONIISA) y Consorcio IUYET S. A. de C. V. En la Tabla adyacente a la Figura se presenta la comparación de diez niveles medidos y calculados.

A pesar de las incertidumbres en cada modelo, y la propagación de la incertidumbre del modelo meteorológico al hidrológico y, a su vez, al hidrodinámico, los resultados del marco de trabajo en cascada coinciden con los observados de imagen satelital y mediciones de campo. En cualquier modelo, la calidad de los datos es una de las principales fuentes de incertidumbre; en el caso del modelo hidrodinámico, se trata de una simulación determinista donde la incertidumbre es minimizada con la alta resolución de los datos de topografía.

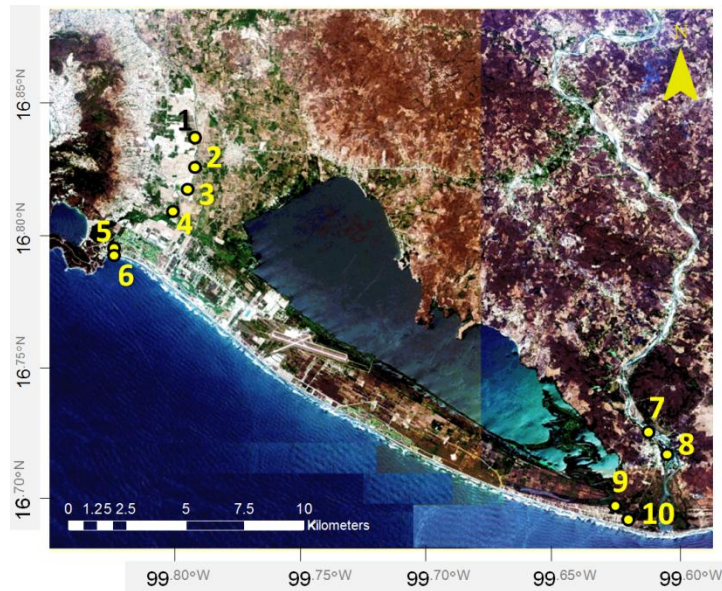


Figura 6.4 Ubicación de los puntos de comparación de mediciones de campo contra resultados del modelo.

Tabla 6.1, elevación de la superficie libre del agua y el error relativo entre medido y calculado.

Punto	Medido (msnm)	Calculado (msnm)	Error relativo (%)
1	10,61	12,05	13,62
2	9,75	8,97	-7,93
3	7,53	7,36	-2,19
4	4,98	7,46	49,81
5	3,30	2,42	-26,61
6	2,85	2,11	-26,08
7	13,90	16,63	19,66
8	11,63	11,44	-1,66
9	2,32	2,21	-4,76
10	2,32	2,05	-11,61

Validación del modelo con los parámetros POD y FAR

Para determinar de una manera cuantitativa la bondad del modelo numérico para detectar zonas afectadas, se empleó una tabla de contingencia dicótoma que relaciona la ocurrencia o ausencia de un fenómeno observado con la existencia o no de un pronóstico (ver Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Tabla de contingencia para el desempeño del pronóstico de eventos (Doswell, 1990)

		Observado		TOTAL
		Sí	No	
Pronóstico	Sí	x	z	$x + z$
	No	y	w	$y + w$
TOTAL		$x + y$	$z + w$	N

Donde

- x Pronóstico positivo de un evento que sí ocurrió
- y Pronóstico negativo de un evento que sí ocurrió
- z Pronóstico positivo de un evento que no ocurrió
- w Pronóstico negativo de un evento que no ocurrió
- N Número total de eventos

Al relacionar las variables de la Tabla 6.2, se obtienen parámetros como la Probabilidad de Detección (Probability of Detection, POD) e Índice de Falsa Alarma (False Alarm Ratio, FAR), los cuales determinan qué tan bien se hace un pronóstico a través de la herramienta numérica. El POD contabiliza los eventos que ocurren y son detectados por el modelo, el FAR indica eventos que no ocurrieron pero que fueron simulados por el modelo. En caso de que se presente afectación y el modelo no lo detecte, se utiliza el parámetro Frecuencia de Errores (Frequency of Misses, FOM) (ver Figura 6.5). Este modelo desprecia las alarmas no emitidas para eventos no ocurridos, ya que es poco probable que eso afecte la percepción pública de la eficiencia del sistema de alerta (Barnes, 2007).

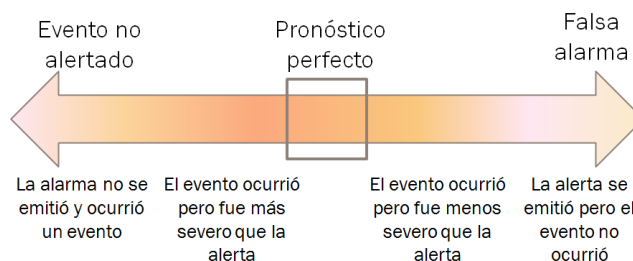


Figura 6.5 Modelo conceptual de la precisión de un pronóstico (Barnes, 2007)

Al relacionar los elementos de la Tabla 6.2 con sus sumas marginales, se obtienen los tres parámetros descritos anteriormente, definidos por las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$POD = \frac{x}{x + y} \quad \text{Ec. 10}$$

$$FAR = \frac{z}{x + z} \quad \text{Ec. 11}$$

$$FOM = \frac{y}{x + y} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

POD Probabilidad de detección (Probability of Detection), $0 \leq POD \leq 1$

FAR Índice de falsa alarma (False Alarm Ratio), $0 \leq FAR \leq 1$

FOM Frecuencia de errores (Frequency of Misses), $0 \leq FOM \leq 1$

El caso perfecto, en el que todos los pronósticos son acertados tanto para eventos que ocurrieron como para los que no, los parámetros tomarían los valores $POD = 1$, $FAR = 0$, $FOM = 0$.

Este tipo de parámetros y la Tabla de contingencia son herramientas que han sido ampliamente utilizados en la verificación de pronósticos de fenómenos meteorológicos como huracanes y granizo (Keene, 2007; Thede, 1998, 1999). Su uso previene la exageración o atenuación de la percepción cualitativa de la calidad del pronóstico al hacer una verificación numérica de su desempeño (Doswell, 1990), por lo que es una de las medidas clave para verificar la precisión de las alertas emitidas por el Servicio Climatológico Nacional (National Weather Service) de Estados Unidos (Barnes, 2007).

Para validar la precisión del modelo hidrodinámico se partió de una imagen satelital del 18 de septiembre de 2013 que mostraba claramente las zonas inundadas. Se situaron 534 puntos en las inmediaciones de los cuerpos de agua del área de estudio, 398 de los cuales se ubicaban en áreas inundadas y 136 en zonas no afectadas. La ubicación de los puntos se muestra en la Figura 6.6.

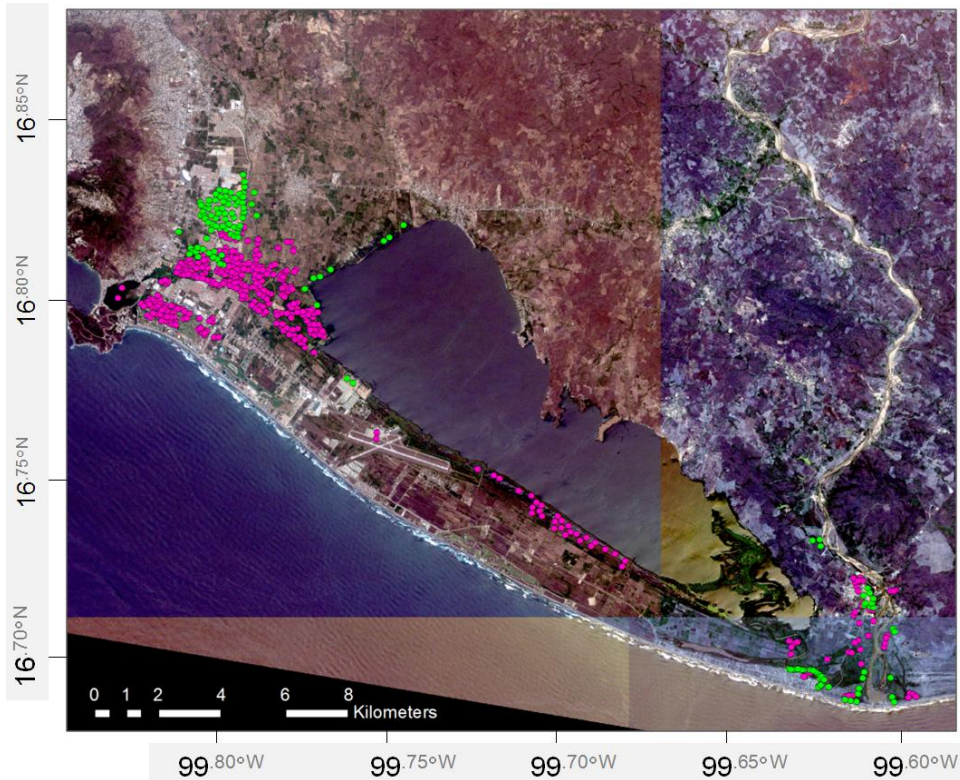


Figura 6.6 Puntos de control para determinar los parámetros *POD* y *FAR* para el evento reproducido con el modelo hidrodinámico donde ● son los puntos inundados y ● son los puntos sin inundación.

Al comparar los puntos en la mancha de inundación de satélite con el valor de los tirantes calculados por el modelo hidrodinámico para la misma fecha, se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Tabla de contingencia para la simulación numérica del evento de Acapulco, 2013

		Observado		TOTAL
		Sí	No	
Pronóstico	Sí	313	42	355
	No	85	94	179
TOTAL		398	136	534

De donde

$$POD = 0,79; FAR = 0,12; FOM = 0,21.$$

Los resultados encontrados por estos índices permiten concluir que la simulación escalonada, realizada en este trabajo de investigación es adecuada pues se tiene un índice de detección del 79%. Esta información es importante para tomadores de decisiones y organismos de Protección civil encargados de las labores de emergencia y rescate.

Para otorgar un contexto comparativo a los números obtenidos con otros casos presentados en la literatura, la Figura 6.7 presenta la comparación de los valores de POD para el presente estudio (**Acapulco**) y para otros cuatro:

- 1) Desempeño del Algoritmo de Detección de Tornados 10.0 en situaciones de granizo con y sin huracanes (**Thede, 1998**) (**TDA**)
- 2) Desempeño y Optimización del Algoritmo de Detección de Tornados 10.0 para el radar Kansas WSR-88D (**Thede, 1999**) (**Kansas**)
- 3) Desempeño de la Alerta emitida por el Servicio Meteorológico Nacional asociado con observaciones de huracanes de 1997 a 2007 en Estados Unidos (**Keene, 2007**) (**NWS**)
- 4) Pronóstico del Ejército de Estados Unidos sobre la ocurrencia de huracanes al este de las Montañas Rocosas (**Frei, 2008**) (**RockyM**)

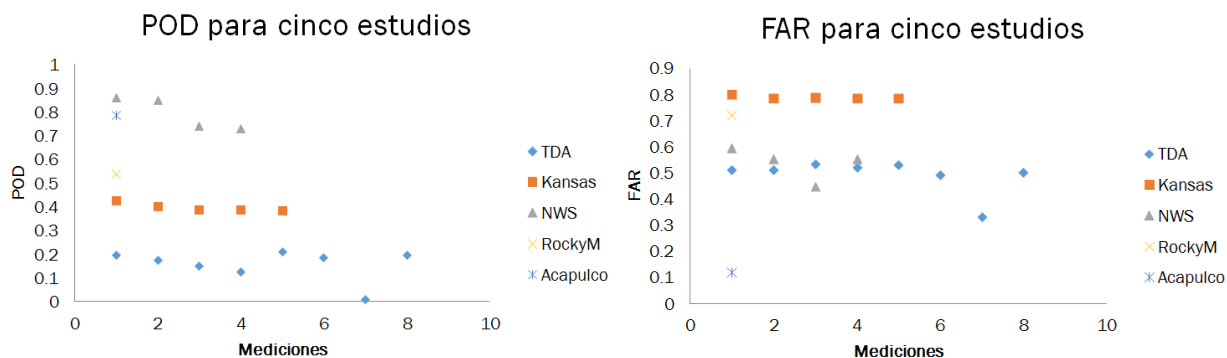


Figura 6.7 a) comparación del parámetro POD para Acapulco y otros estudios, b) comparación del parámetro FAR para Acapulco y otros estudios.

Tal y como se aprecia en la Figura 6.8, en casi todos los casos el presente estudio supera los valores obtenidos por el resto de estudios internacionales.

Modelado de obras estructurales de mitigación en la zona

De acuerdo con los resultados obtenidos en la reproducción del evento, es posible utilizar el modelo numérico para evaluar la posible estrategia de mitigación de daños por el desbordamiento del río La Sabana.

De las medidas de mitigación que se presentaron en el capítulo 3 de esta tesis, se eligió la implementación de bordos perimetrales a las zonas urbanas como una medida estructural de protección. El trazo de estas estructuras se propuso considerando la mancha de inundación calculada y la ubicación de los asentamientos urbanos, tal y como se presenta en la Figura 6.8 por medio de líneas amarillas.

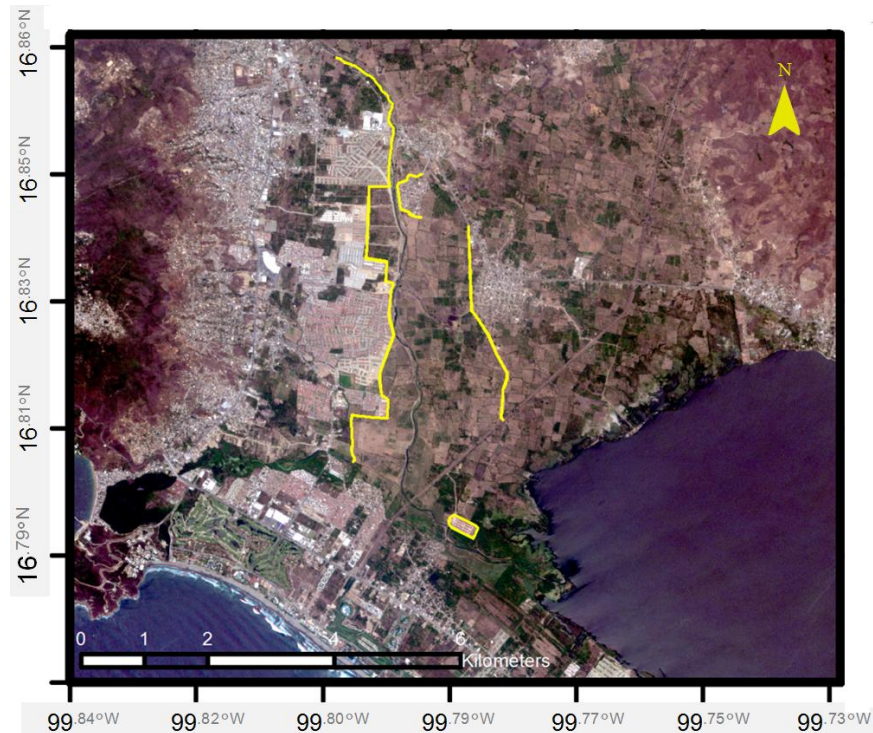


Figura 6.8 Configuración propuesta de bordos perimetrales en la zona de estudio (líneas amarillas).

En este trazo, además de la ubicación de las áreas pobladas, se consideró la topografía del lugar, permitiendo y propiciando que el caudal del río La Sabana descargara hacia la Laguna de Tres Palos, ya que el manglar de Laguna Negra no tiene capacidad de conducción suficiente para ser una vía de descarga del río al mar.

En la margen derecha del río, las áreas protegidas con los bordos implementados son: colonia Llano Largo (su parte sur), fraccionamiento La Marquesa y fraccionamiento Las Gaviotas, además de otros asentamientos al norte de éstos. En la margen izquierda se protegió el poblado de Tres Palos y un fraccionamiento privado al norte. En el fraccionamiento Campestre de la Laguna se implementó un bordo en todo su perímetro dada la ubicación desfavorable aguas abajo del cruce del río La Sabana con el Viaducto Diamante, es decir, en la zona deltaica donde el río desemboca en la laguna. Además, en ambos lados del cauce se procuró una llanura de inundación con la mayor extensión posible, considerando que la mayor parte de ella estaría en la margen izquierda.

Capítulo 6. Resultados y recomendaciones

La simulación numérica, se realizó con los forzamientos asociados al evento extremo, considerando los mismos parámetros hidráulicos y condiciones de frontera. La Figura 6.10 presenta una comparación en la zona de la mancha de inundación del evento, con respecto a la simulación que considera la implementación de bordos.

Tal y como se registra en la Figura 6.10, el bordo en la margen derecha protege efectivamente la zona habitacional que resultó afectada durante el evento (1). Además, los bordos implementados en los poblados de la margen izquierda también protegen los asentamientos urbanos, encauzando el flujo hacia la laguna (2). Un resultado sobresaliente de este ejercicio, es que a partir de la nueva configuración de bordos, también se evita la inundación del COSTCO y los campos de golf, por lo que también se protegió Playa Revolcadero y todos los comercios establecidos en esa zona (3). Por otro lado, al encauzar la mayor parte del flujo del río La Sabana hacia la Laguna de Tres Palos, se registran mayores elevaciones de la superficie libre, lo que causa desbordamiento de la laguna en esta zona (4).

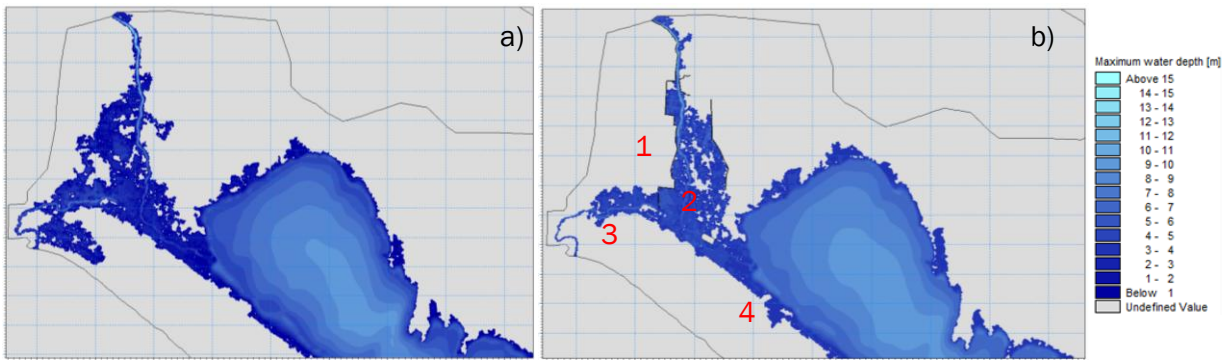
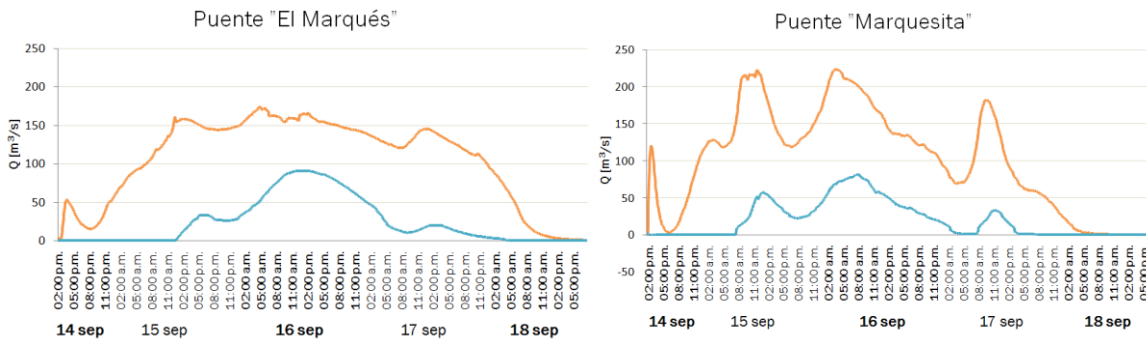


Figura 6.9 Comparación de la mancha de inundación máxima calculada a) para el evento y b) para la simulación con bordos.

A fin de completar la comparación del funcionamiento hidráulico en ambos escenarios, se comparan los hidrogramas de control en las cuatro secciones transversales definidas en la Figura 6.3a. La Figura 6.10 presenta los resultados entre condiciones normales en el evento y con el esquema de protección propuesto.



Capítulo 6. Resultados y recomendaciones

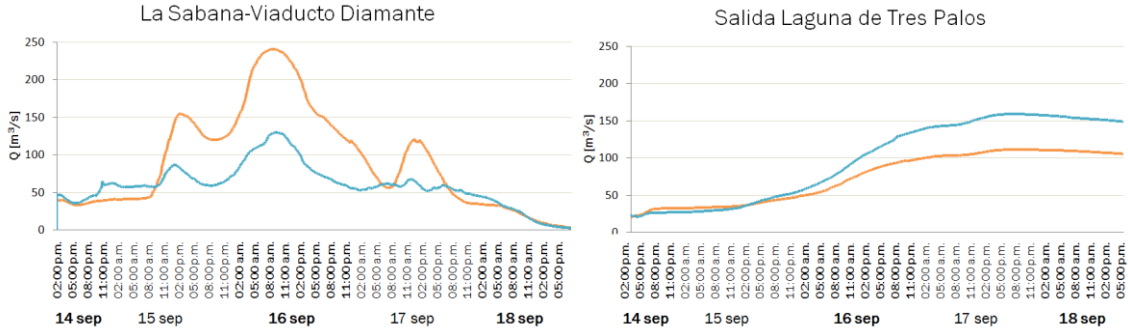


Figura 6.10 Comparación de hidrogramas en las secciones de control definidas para el evento — y para la simulación con bordos de protección —

Destaca la reducción en la magnitud del gasto que pasa por los puentes “Marqués” y “Marquesita”, ya que todo el flujo está siendo desviado hacia la Laguna de Tres palos y se está evitando que el manglar de Laguna Negra lleve un caudal adicional al entregado por el canal pluvial GEO, debido a su deficiente capacidad de conducción. Por otro lado, el caudal en la sección de control ubicado en el cruce del Viaducto Diamante con el río La Sabana se reduce porque a pesar de que ahora el flujo está siendo desviado sobre esta vialidad, la mayor parte del caudal pasa por otra sección de la carretera más al norte que dicha sección de control. Evidentemente, el gasto a la salida de la Laguna de Tres Palos aumenta por todo el flujo desviado hacia este cuerpo de agua por los bordos.

Un análisis más detallado de la evolución temporal de la inundación en el esquema de protección, indica que la margen derecha (donde está la mayor parte de las zonas habitadas) es la primera en recibir el volumen de desbordamiento del río (ver Figura 6.11), lo que implica la necesaria robustez de los bordos en ese lado del cauce.

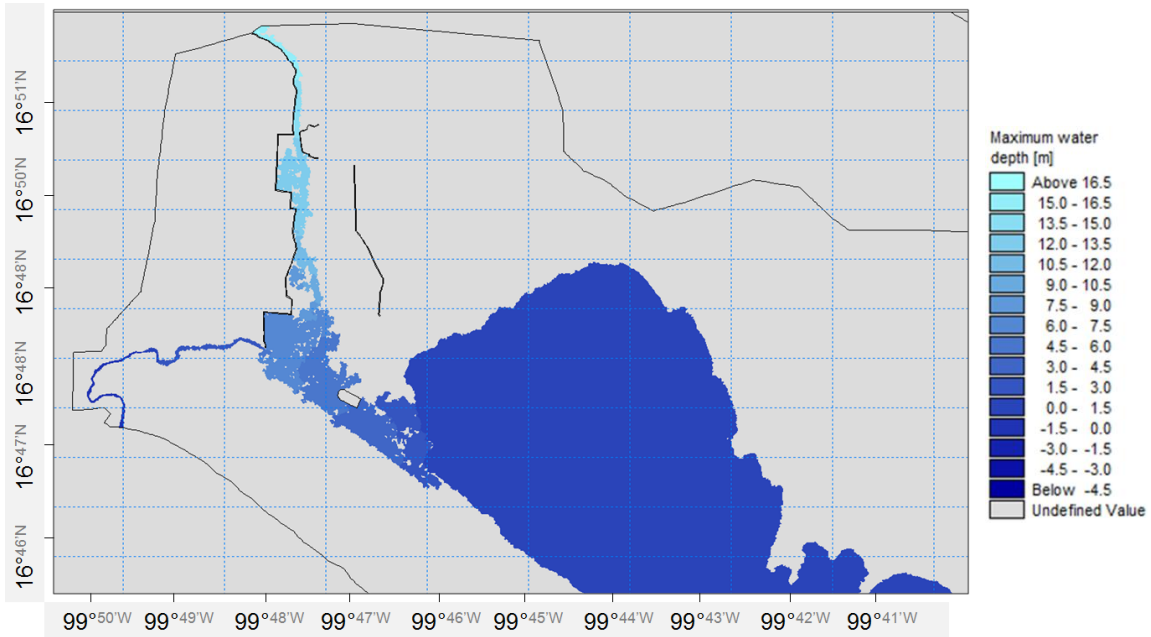


Figura 6.11 Mancha de inundación calculada con el modelo hidrodinámico del 14 de septiembre a las 20:00 horas

Particular atención deberá ser puesta en el campo de velocidades que se genere con la construcción de las estructuras, ya que es posible que se incremente la velocidad del cauce poniendo en peligro la estabilidad de las obras de protección.

Para evitar velocidades grandes al pie de los bordos de protección, se propone que el esquema sea construido similar a las estructuras que se registran en el río Meuse en Holanda, donde la estructura de protección se integra al paisaje y tiene un uso recreativo, por ejemplo con una ciclopista en la corona (ver Figura 6.12a y 6.12b). Este tipo de estructuras se diseñan dejando un espacio de amortiguamiento (lo más alejado del cauce principal), de tal suerte que las velocidades al pie de la estructura sean pequeñas, evitando la socavación. Es posible entonces proponer este tipo de esquema para el río La Sabana.

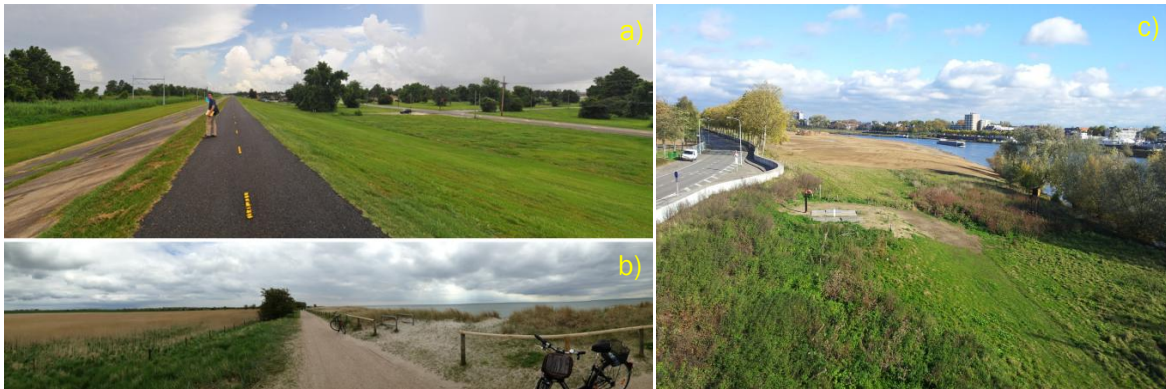


Figura 6.12 a) bordo de protección con una vía en la corona, b) ciclopista entre el cuerpo de agua (a la derecha del camino) y una zona de amortiguamiento (a la izquierda del camino), c) zona de amortiguamiento entre el cuerpo de agua e infraestructura vial

Adicionalmente, y de forma notable, futuros cambios en el trazo de los bordos y la posible consideración de otras obras estructurales de adaptación y mitigación contra inundaciones no deben perder de vista la interacción del río La Sabana con el Viaducto Diamante. Esto se debe a que durante el evento esta vía de comunicación sirvió como represa al volumen en exceso que se presentaba en el cauce.

Por último, es necesario considerar las afectaciones o adecuaciones que será necesario implementar al Aeropuerto Internacional de Acapulco, que está ubicado en las inmediaciones de la Laguna de Tres Palos.

Capítulo 7 Conclusiones

Los eventos hidrometeorológicos extremos, son generadores de cuantiosas pérdidas económicas, especialmente en zonas densamente pobladas donde se concentra gran cantidad de infraestructura. Los impactos producidos por la inundación que afectó la zona turística de Acapulco-Diamante, produjeron cuantiosas pérdidas y tensión social en la región. El análisis de fenómenos meteorológicos extremos es fundamental para determinar cuantitativamente qué tanto están cambiando las condiciones climáticas en el mundo para establecer políticas de acción y vincular estos fenómenos con problemas de salud pública, por lo que se requiere mejorar la comunicación del riesgo y reconocer qué lugares son los vulnerables a fenómenos extremos (Nullis, 2014).

Tal y como lo señala (A. Pedrozo-Acuña, et al., 2012b), resulta evidente que en situaciones de esta naturaleza, las autoridades estatales y federales (p. ej. CONAGUA, Protección Civil, SEDENA, SEGOB) necesitan tomar decisiones en relación con el manejo del desastre y las estrategias que se utilizarán para la evacuación de la población. Sin embargo, con el propósito de evaluar el daño potencial y planificar una eficiente asignación de recursos para activar las acciones de emergencia y rescate, se necesita información sobre los patrones de inundación, incluyendo elevaciones del agua, velocidades de flujo y el desarrollo temporal de la inundación. La investigación realizada en el presente trabajo representa una sólida herramienta para la toma de decisiones en relación a la gestión local del riesgo por inundación, ya que brinda información detallada del desarrollo del evento que permite distinguir zonas vulnerables y zonas de posible amortiguamiento, proponer estructuras de mitigación o adaptación a los flujos naturales de inundación que reduzcan las pérdidas sociales y económicas ante un evento de igual o mayor magnitud que el ocurrido en septiembre de 2013.

El riesgo por inundación tiene una estrecha relación con el resultado de la interacción del ciclo hidrológico con el desarrollo urbano. Para establecer un plan de acción que considere la interacción de centros urbanos con cuerpos de agua, se deben considerar las opciones disponibles para el manejo de una inundación y a la percepción del riesgo y actitudes que se toman respecto a este (Plate, 2002). Con lo anterior en mente, un plan de desarrollo urbano y uso de suelo para la zona de Acapulco Diamante debe considerar que la extensión de ríos, lagunas y manglar de la depende de procesos dinámicos que varían a lo largo del año (como el régimen de lluvias que se intensifica durante la temporada de huracanes). Además, se debe crear normatividad para regular el uso de suelo e impedir futuros asentamientos en zonas identificadas como llanuras de inundación o cerca de cuerpos de regulación, así como determinar las viviendas que pueden ser reubicadas, y en caso de ser inamovibles, establecer estrategias que mitiguen su vulnerabilidad ante un flujo de inundación incluso mayor que el sucedido en septiembre de 2013.

Los cambios en sistemas naturales y socioeconómicos debido a factores tanto naturales como antropogénicos han aumentado el potencial para inundaciones más severas a nivel mundial. Es por ello que en muchos países los sistemas actuales de manejo de inundaciones se espera que cambien de sistemas tradicionales basados únicamente en el diseño hidrológico a sistemas más proactivos (pensar y actuar antes de un evento de inundación), holísticos y sustentables. La comunicación efectiva de un manejo sustentable de las inundaciones a nivel nacional requiere

reconocimiento del contexto del manejo de inundaciones, cooperación y compartir la información sobre inundaciones, junto con aprendizaje social y cambio climático, todo lo cual puede ser alcanzado con la participación activa de inversionistas (**Kang et al., 2013**).

Se debe estar consciente de que el riesgo por inundación es dinámico y depende de las modificaciones de origen antropogénico al ambiente, del cambio en el tamaño y distribución espacial de la población, así como de la percepción social del riesgo y potencialmente en función de los cambios en el clima.

Como lo señala (**A. Pedrozo-Acuña, et al., 2012b**), la seguridad ante fenómenos naturales es una necesidad básica para garantizar el desarrollo social y económico de una nación. Una infraestructura mal diseñada que no la garantice, está destinada a ser objeto de importantes y repetidas inversiones para resarcir los daños que debió haber evitado, como lo ocurrido con la infraestructura portuaria en el puerto de Cozumel, Quintana Roo, por el paso del huracán Wilma en 2007 (**González-Vázquez, 2008**).

Por otra parte, es necesario reconocer que la prevención absoluta de las inundaciones no es posible, pero la mitigación de sus efectos sobre las actividades humanas, sí. El reto en la prevención de inundaciones consiste entonces en proveer un grado aceptable de protección a través de la combinación de infraestructura física con medidas de reducción del riesgo no estructurales, como los planes integrales presentados en el capítulo 3. La prevención debe tomar un rol decisivo durante ambos la evaluación y el manejo del riesgo de inundaciones.

Mejores métodos de cálculo requieren una nueva evaluación del potencial de inundación porque los datos hidrológicos de entrada han cambiado (**Plate, 2002**). El resultado del entendimiento del fenómeno deben ser simulaciones numéricas adecuadas y predicciones acertadas de su comportamiento (**Martínez-López, 2014**).

Conclusiones del trabajo numérico

Los tres modelos utilizados en la metodología en cascada permitieron la representación y reconstrucción del evento desde un enfoque nube-lluvia-inundación que permitió la evaluación de la interacción de los flujos naturales con las áreas urbanas y la infraestructura existente. El alcance del marco de trabajo puede incluir otras áreas y puede ser implementado para considerar también los efectos del cambio climático. Se utilizaron de manera satisfactoria programas y metodologías asociadas a la gestión del riesgo para la reproducción del evento.

Es importante conocer la sensibilidad del modelo a utilizar, para determinar la importancia de los parámetros de entrada. Un modelo numérico puede requerir muchas condiciones iniciales, pero basta con discernir las necesarias en el estudio para realizar una modelación adecuada. No se debe olvidar que mayor número de datos de entrada no necesariamente reduce la incertidumbre en los cálculos.

La validación de datos de los modelos numéricos con información de campo es vital para determinar la utilidad y confiabilidad de los resultados; además, una visita de campo permite el reconocimiento espacial de la zona que se está analizando, estableciendo criterios de selección de información útil.

La determinación de los cuerpos de agua que se considerarán para el estudio es crucial para evaluar su impacto en la zona de estudio. Su comportamiento numérico determina la calidad de la simulación al establecer las áreas inundables, así como las zonas protegidas (por topografía o por infraestructura) que se deberán mantener en el caso de implementar medidas que modifiquen el comportamiento hidráulico de la zona.

La incertidumbre en una modelación en cascada puede disminuirse con la calidad de datos de campo. Una nube de puntos LiDAR a cada 5 metros permite la reproducción fiel del espacio que se está analizando, sin necesidad de hacer un estudio más detallado (por ejemplo, incluyendo un mapa de rugosidad), disminuyendo el tiempo de pre-proceso y de la simulación numérica en general.

La propuesta de alternativas de solución debe comenzar con la identificación del problema, un estudio de las condiciones del sitio, la propuesta de alternativas en conjunto y culmina con la evaluación de éstas. Una primera aproximación a las medidas estructurales de mitigación determina qué tan adecuada es dicha medida, y permite la discusión sobre cambios en la estructura propuesta, tomar la decisión de no implementarla (si fuera el caso), así como establecer qué otras medidas disminuirían la vulnerabilidad de un área poblada.

Por otro lado, es importante tener acceso a información adecuada de la zona de estudio de manera pronta y sencilla para ejecutar el pre-proceso de cualquiera de los tres modelos del marco de trabajo en cascada presentados en el capítulo 5, y que la información de entrada permita disminuir la incertidumbre asociada a la reproducción numérica de un evento.

La comunicación entre los participantes del proyecto de modelado es fundamental para agilizar cualquier proceso o cambio en las decisiones y actividades involucradas en la reproducción numérica de un evento. Las decisiones deben tomarse después de un proceso de diálogo donde se expongan las ideas surgidas en cualquier etapa del proyecto.

Lecciones aprendidas y recomendaciones

Las modificaciones a los ecosistemas (deforestación, tala inmoderada, etc), el cambio climático y la complejidad del incremento poblacional constituyen factores cuya interacción no lineal tiene un impacto directo sobre la vulnerabilidad ante un evento de inundación. Lo anterior requiere integrar acciones del gobierno con la disposición de la sociedad civil para evitar la inversión no planificada e improductiva (ver Figura 6.1)



Figura 6.1. Ciclo hipotético de Riesgo-Gasto ante inundaciones (adaptada de Samuels, 2000)

Una vía natural para este propósito es a través de la incorporación de los resultados de investigaciones académicas a la práctica de la ingeniería y las políticas públicas

En general, se recomienda lo siguiente:

1. Incorporar el comportamiento hidrológico a la planeación urbana y de infraestructura, procurando que los cambios de origen antropológico permitan el funcionamiento global de la cuenca (dirección del flujo, ocupación de llanuras inundables, desembocaduras sin obstáculos, etc.).
2. Establecer alternativas de solución a los efectos de las inundaciones apoyadas en el mejor conocimiento disponible, es decir, procurando la calidad de datos para reducir la incertidumbre asociada a fenómenos meteorológicos para determinar los efectos que estos eventos producen sobre los sistemas naturales y productivos, incluyendo la propuesta de medidas de resiliencia, vulnerabilidad, robustez y sostenibilidad.
3. Realizar la estadística de ocurrencia y magnitud de eventos extremos pasados desde la hidrología hasta las afectaciones, así como estudios de la probabilidad de eventos futuros para adaptar las políticas a un clima cambiante (González-Villarreal, 2011).
4. Mejorar la comunicación del riesgo a la sociedad mediante sistemas efectivos de alerta temprana y la coordinación de los actores políticos y sociales involucrados en las acciones antes (prevención), durante (control del riesgo) y después (reacción ante el desastre) de la ocurrencia de un fenómeno meteorológico, permitiendo un manejo integral del riesgo por inundaciones, como se muestra en la Figura 6.2
5. Restringir y regular los asentamientos humanos en zonas de alto riesgo de inundación mediante la implementación de políticas firmes de uso de suelo, así como la supervisión del cumplimiento de las mismas.

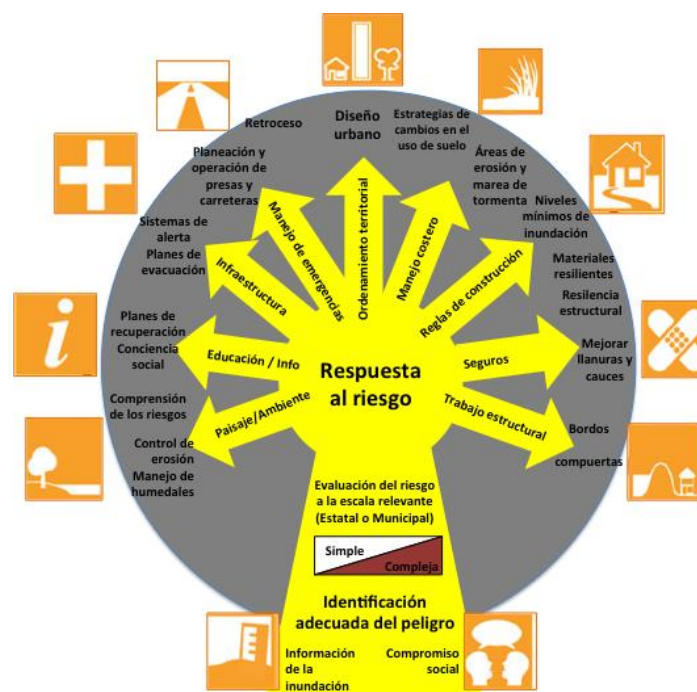


Figura 6.2 Estrategia para la gestión del riesgo de inundación tomando como base el mejor conocimiento disponible (A. Pedrozo-Acuña & Breña-Naranjo, 2014a)

Referencias

- Ashley, R. M., Saul, A. J. (2007). "Chapter 19: Responses to Future intra-urban Flood Risks, Future Flooding and Coastal Erosion Risks. Thomas Telford" (pp. 320-339).
- Azaola-Garrido, E. (2002). "Acapulco" *Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM*. México.
- Bao, H.-J., Zhao, L.-N., He, Y., Li, Z.-J., Wetterhall, F., Cloke, H. L., Pappenberger, F., and Manful, D. (2011). "Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast". *Advances in Geosciences*, 15(29), 61-67. doi: 10.5194/adgeo-29-61-2011
- Barnes Jr, H. H. (1849). "Roughness Characteristics of Natural Channels". Estados Unidos.
- Barnes, L. R., E.C. Grunfest, M. Hayden, D.M. Schultz, and C. Benight. (2007). "False alarms and close calls: A conceptual model of warning accuracy". *Weather and Forecasting*, 22, 1140-1147. doi: 10.1175/WAF1031.1
- Beffa, C. (2008). "2D-Shallow Water Equations. Basics - Solutions - Applications": Fluvial.ch Project.
- Beven, K. (2006). "A manifesto for the equifinality thesis". *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 18-36. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>
- Carrillo-Sosa, J. J. (2009). "Plan Hídrico Integral de Tabasco". Paper presented at the Segundo Seminario de Potamología "José Antonio Maza Álvarez", Villahermosa, Tabasco, México. <https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/docs/evento/JuanJavierCarrilloSosa.pdf>
- CENAPRED. (2009). "Características e Impacto Socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2007". México: Retrieved from http://www.proteccioncivil.gob.mx/EA07BB69-7ABF-470F-9438-D38EFF6C65CF/FinalDownload/DownloadId-AA051FC28EA7983FF1A7AD1BB01C6D2A/EA07BB69-7ABF-470F-9438-D38EFF6C65CF/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/no_9.pdf.
- CEURA. (2001). "Plan Director Urbano de la Zona Metropolitana de Acapulco de Juárez, Guerrero" Centro de Estudios de Urbanismo y Arquitectura S. A. de C. V., H. Ayuntamiento de Acapulco de Juárez 1999-2002, Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas y Ecología. México.
- Cœur, D., & Lang, M. (2008). "Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning". *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9-10), 644-650. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2008.03.001>
- CONABIO. (2010). "Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad" *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Portal de Geoinformación*. México.
- CONAGUA. (2011a). *Manual para el control de Inundaciones*. México: Felipe I. Arreguín Cortés, Michel Rosengaus Moshinsky, Antonio Acosta Godínez, Rubén Chávez Guillen, Mario López Pérez, Ulrich Hungsberg Engelmann, Antonio Dávila Capiterucho, Enrique Mejía Maravilla, Horacio Rubio Gutiérrez. Retrieved from <http://www.freshwateraction.net/sites/freshwateraction.net/files/SGT-1-11Manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>.
- CONAGUA. (2012). "Inventario Nacional de Obras de Protección contra Inundaciones en Cauces Naturales. Capítulo 5: Perspectivas" *Comisión Nacional del Agua*. México.
- CSC. (2014). "Historical Hurricane Track. Storm name/year: 1958" *Coastal Services Center, National Oceanic and Atmospheric Administration*. Estados Unidos.
- DEFRA. (2005). "Making space for water: Taking forward a new Government strategy for flood and coastal erosion risk management in England" *Department for Environment, Food and Rural Affairs*. Inglaterra.
- Demeritt, D., Cloke, H., Pappenberger, F., Thielen, J., Bartholmes, J., & Ramos, M.-H. (2007). "Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting".

- Environmental Hazards*, 7(2), 115-127. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.05.001>
- DETR. (2000). "Guidelines for Environmental risk assessment and management", 2a Edición *Department of the Environment Transport and the Regions, The Stationary Office, Institute of Environmental Health*. Inglaterra.
- DHI. (2011). "MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module" *MIKE by DHI User Guide*.
- Di Baldassarre, G., & Uhlenbrook, S. (2012). "Is the current flood of data enough? A treatise on research needs for the improvement of flood modelling". *Hydrological Processes*, 26(1), 153-158. doi: 10.1002/hyp.8226
- Domínguez-Mora, R., Esquivel G. G., Méndez A. B., Mendoza R. A., Arganis J. M. L., Carrizosa E. E. (2008). "Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento" *Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Doswell, C., Davies-Jones, Robert, Keller, David. (1990). "On Summary Measures of Skill in Rare Event Forecasting Based on Contingency Tables". *Weather and Forecasting*, 5(4), 576-585. doi: citeulike-article-id:8768462
- doi: 10.1175/1520-0434(1990)005%253C0576:OSMOSI%253E2.0.CO;2
- Dutta, D., Herath, Srikantha, Musiaka, Katumi. (2003). "A mathematical model for flood loss estimation". *Journal of Hydrology*, 277(1-2), 24-49. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00084-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00084-2)
- EM-DAT. (2011). "OFDA/CRED International Disaster Database" *Universite Catholique de Louvain, Bruselas*: <http://www.cred.be/emdat>.
- Evans, E. P., Ashley, R., Hall, J., Penning-Roswell, W., Sayers, P., Thorne, C., Watkinson, A. (2004a). "Future Flooding Scientific Summary: Volume I, Future Risks and their drivers" *Office of Science and Technology*. Inglaterra.
- Evans, E. P., Ashley, R., Hall, J., Penning-Roswell, W., Sayers, P., Thorne, C., Watkinson, A. (2004b). "Future Flooding Scientific Summary: Volume II, Managing Future Risks" *Office of Science and Technology*. Inglaterra.
- Faber, R. (2006). "Flood risk analysis: Residual risks and uncertainties in an Austrian context" *Dissertation, Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering, University of Natural Resources an Applied Life Sciences*. Viena.
- FONDEN. (2014). "Recursos autorizados por declaratoria de desastre". México: Retrieved from <http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Insumos autorizados por declaratoria de emergencia>.
- Frei, C. (2008). "Analysis of Climate and Weather Data. Section 5: Forecast Evaluation and Skill Scores" *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos*. Suiza.
- Gobierno-del-estado-de-Guerrero. (2004). "Ley de Fomento al Turismo". México.
- González-Vázquez, J. A. (2008). "Análisis de los efectos ocasionados por el huracán Wilma sobre la infraestructura portuaria de Cozumel y propuesta de parámetros de diseño para muelles en la zona". Ingeniería Civil (Tesis de Licenciatura), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- González-Villarreal, F. J. (2013). "El Plan Hídrico Integral de Tabasco". Paper presented at the Encuentro Internacional de Manejo del Riesgo por Inundación, IIUNAM, México.
- Gouldby, B., Sammuels, P., et al. (2005). "Language of Risk - Project Definitions" *Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies*. FLOODsite Research Project.
- Hernández-Santana, J. R., Ortiz-Pérez, M. A. (2005). "Morphostructural analysis of the hydrographic basins of Sabana and Papagayo rivers (middle-lower third), Guerrero State, Mexico" *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- IMEE. (2011). "Infrastructure Management and Extreme Events Project". Estados Unidos.
- INEGI. (2014). "SIATL: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas". México.

- Ishizawa, O. (2013). "Manejar el riesgo de desastres debe ser parte integral de la estrategia de desarrollo en México" *Banco Mundial*. 30 de septiembre de 2013.
- Kang, M. G. J., H. S.; Lee, J. H.; Kang, B. S. (2013). "Assessing national flood management using a sustainable flood management framework". *Water Policy*, 15(3), 418.
- Keene, K., Schlatter, P., Hales, J., Brooks, H. (2007). "Evaluation of NWS Watch and Warning Performance Related to Tornadoic Events" *National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration*. Estados Unidos.
- Laverde-Barajas, M. A. (2013). "Análisis Integral del Riesgo por Inundación en la cuenca baja del río Tonalá". Ingeniería Civil (Tesis de Maestría), Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mens, M. J. P., Klijn, Frans, de Bruijn, Karin M., van Beek, Eelco. (2011). "The meaning of system robustness for flood risk management". *Environmental Science & Policy*, 14(8), 1121-1131. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2011.08.003>
- Mignot, E., Paquier, A., & Haider, S. (2006). "Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations". *Journal of Hydrology*, 327(1-2), 186-199. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.026>
- Musall, M., Oberle, P., Nestmann, F. (2011). "Hydraulic Modelling". In Springer (Ed.), "Flood Risk Assessment and Management" (pp. 290).
- NOTIMEX. (2013). "Cerrado Aeropuerto de Acapulco". *Grupo Fórmula*. Retrieved from <http://www.radioformula.com.mx/notas.asp?ldn=354993>,
- OMM. (2014). "Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2013". Suiza.
- OMS. (2013). "Cambio Climático y Salud" *Nota descriptiva No. 266* (Octubre de 2013 ed.): Organización Mundial de la Salud.
- Pedrozo-Acuña, A., & Breña-Naranjo, J. A. (2014a). "Respuestas ante el incremento del riesgo por inundación en México". *Revista H2O*.
- Pedrozo-Acuña, A., Capella-Vizcaíno, A., González-Villarreal, F. J., Domínguez-Mora, R., Ramos-Hernández-J., Esquivel-Garduño, G., . . . Rodríguez-Rincón, J. P. (2014c). "Caracterización y lecciones aprendidas del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco, Guerrero (2013)". México.
- Pedrozo-Acuña, A., et al. (2009). "Procesos Costeros y Sistemas Lagunares del Plan Hídrico Integral de Tabasco – Fase 2, Junio 2009 – Marzo 2010". México.
- Pedrozo-Acuña, A., et al. (2010). "Modelación de procesos costeros en la descarga del río Tonalá al Golfo de México, Capítulo 9. Informe Final del Plan Hídrico Integral de Tabasco – Fase 3, Mayo 2010 – Diciembre 2010". México.
- Pedrozo-Acuña, A., et al. (2012b). "Inundaciones: Evaluación y manejo del riesgo". *AGUA en Quintana Roo*, (2). Retrieved from
- Pedrozo-Acuña, A., Mejía-Estrada, P. I., Rodríguez-Rincón, J. P., Domínguez-Mora, R., & González-Villarreal, F. J. (2014b). "Flood risk from extreme events in Mexico". Paper presented at the 11th International Conference on Hydroinformatics 2014, Nueva York, Estados Unidos.
- Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón, J. P., Arganis-Juárez, M., Domínguez-Mora, R., & González-Villarreal, F. J. (2013). "Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México". *Journal of Flood Risk Management*, n/a-n/a. doi: 10.1111/jfr3.12067
- Pedrozo-Acuña, A., Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., & González Villarreal, F. J. (2012a). "Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico)". *Journal of Flood Risk Management*, 5(3), 226-244. doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01142.x
- Pitt, M. (2008). "Learning Lessons from the 2007 Floods: An Independent Review by Sir Michael Pitt". Inglaterra.
- Plate, E. J. (2002). "Flood risk and flood management". *Journal of Hydrology*, 267(1-2), 2-11. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00135-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00135-X)

- Ramírez-Bravo, M. (2009).** "El desarrollo urbano en Acapulco. La normatividad para su ordenamiento y sus efectos en la Zona Diamante". Ciencias y Planificación (Tesis de Maestría), Instituto Politécnico Nacional, México.
- Reeve, D. E. (2011).** "Risk and Reliability: Coastal and Hydraulic Engineering": CRC Press.
- Rosengaus-Moshinsky, M. J. E., Martín; Vázquez Conde, María Teresa. (2002).** "Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México". México: Retrieved from <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc16060/doc16060.htm>.
- Sánchez-Vázquez, J. (2004).** "Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Capítulo 3: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)" *Escuela Técnica superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.* España.
- Schanze, J., Hutter, G., Penning-Rowsell, E., Nachtnebel, H. P., Meyer, V., Koniger, P., Neuhold, C., Harris, T., Kuhlicke, C., and Ölfert, A. (2008).** "Evaluation of Effectiveness and Efficiency of nonstructural measures in Flood Risk Management". Paper presented at the Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defence, Toronto, Canadá.
- SINA. (2003).** "Atlas digital del agua México 2012".
- Skamarock, W. C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008).** "A description of the Advanced Research WRF version 3" *NCAR Technical Note NCAR/TN475+STR.* Estados Unidos.
- SNPC. (2003).** "Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales". México.
- SNPC. (2013a).** "Histórico de Alertamientos por Ciclón Tropical, Boletín No. E 'Depresión Tropical 13'" *Sistema Nacional de Protección Civil.* México.
- SNPC. (2013b).** "Histórico de Alertamientos por Ciclón Tropical, Boletín No. 02 'Tormenta Tropical Manuel'" *Sistema Nacional de Protección Civil.* México.
- SNPC. (2013c).** "Histórico de Alertamientos por Ciclón Tropical, Boletín No. 04 'Tormenta Tropical Manuel'" *Sistema Nacional de Protección Civil.* México.
- SNPC. (2013d).** "Histórico de Alertamientos por Ciclón Tropical, Boletín No. 07 'Tormenta Tropical Manuel'" *Sistema Nacional de Protección Civil.* México.
- SNPC. (2013e).** "Histórico de Alertamientos por Ciclón Tropical, Boletín No. 10 'Tormenta Tropical Manuel'" *Sistema Nacional de Protección Civil.* México.
- Thede, D. D. (1998).** "Performance of the Build 10.0 Tornado Detection Algorithm (TDA) during Tornadic and non-tornadic (large hail) situations" *National Weather Service Regional Office, National Oceanic and Atmospheric Administration.* Estados Unidos.
- Thede, D. D. (1999).** "Performance and Optimization of the Dodge City, Kansas WSR-88D Build 10.0 Tornado Detection Algorithm" *National Weather Service Regional Office, National Oceanic and Atmospheric Administration.* Estados Unidos.
- USDA-SCS. (1985).** "National Engineering Handbook, Section 4 – Hydrology". Estados Unidos.