



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

ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR INUNDACIÓN BAJO
CONDICIONES DE AMENAZAS INCIERTAS

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

PRESENTA:
EDGAR EDUARDO LÓPEZ LÓPEZ

TUTOR
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR INUNDACIÓN BAJO
CONDICIONES DE AMENAZAS INCIERTAS

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

PRESENTA:
EDGAR EDUARDO LÓPEZ LÓPEZ

TUTOR:
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

JURADO ASIGNADO:

<i>Cargo</i>	<i>Grado / Nombre</i>	<i>Entidad de adscripción</i>
Presidente:	Dr. Fuentes Mariles Oscar	Instituto de Ingeniería
Secretario:	Dr. Domínguez Mora Ramón	Instituto de Ingeniería
1 ^{er} Vocal:	Dr. Pedrozo Acuña Adrián	Instituto de Ingeniería
2 ^{do} Vocal:	Dr. Pozos Estrada Óscar	Instituto de Ingeniería
3 ^{er} Vocal:	Dr. Breña Naranjo José Agustín	Instituto de Ingeniería

La presente tesis fue desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

FIRMA

Índice

Resumen	1
Introducción.....	2
Capítulo 1, Antecedentes	4
1.1 <i>Riesgo por inundación.....</i>	<i>6</i>
1.2 <i>Evaluación de la vulnerabilidad.....</i>	<i>13</i>
1.3 <i>Caracterización de la incertidumbre.....</i>	<i>15</i>
Capítulo 2, Zona de estudio y eventos históricos	18
2.1 <i>Zona de estudio.....</i>	<i>19</i>
2.2 <i>Eventos históricos</i>	<i>24</i>
2.3 <i>Reflexión sobre la planeación urbana</i>	<i>28</i>
Capítulo 3, Modelización del evento hidrometeorológico extremo	30
3.1 <i>Estimación del ensamble para un evento de diseño.....</i>	<i>31</i>
3.1.1 <i>Modelo meteorológico</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Modelo hidrológico</i>	<i>33</i>
3.2 <i>Estimación de llanuras de inundación.....</i>	<i>36</i>
3.2.1 <i>Modelo hidrodinámico</i>	<i>36</i>
3.2.2 <i>Mapas de inundación</i>	<i>37</i>
Capítulo 4, Estimación de vulnerabilidad.....	44
4.1 <i>Infraestructura expuesta.....</i>	<i>47</i>
4.2 <i>Caracterización de niveles de vulnerabilidad.....</i>	<i>51</i>
Capítulo 5, Análisis y evaluación del daño	54
5.1 <i>Análisis de daño</i>	<i>56</i>
5.1.1 <i>Pérdida en menaje</i>	<i>59</i>
5.1.2 <i>Pérdida en sistemas estructurales</i>	<i>62</i>
5.2 <i>Evaluación de daño.....</i>	<i>65</i>
Capítulo 6, Conclusiones y comentarios	67
6.1 <i>Conclusiones.....</i>	<i>68</i>
6.2 <i>Futuras líneas de trabajo.....</i>	<i>69</i>
Bibliografía.....	70
Apéndice	80

Índice de tablas y figuras

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1 Clasificación de temas y grupos para las medidas ante inundaciones, según el Foresight future flooding report 2008.</i>	9
<i>Tabla 2.1 Definición de eventos hidrometeorológicos filtrados en la base de datos DesInventar</i> ...	25
<i>Tabla 2.2 Respuestas potenciales de gestión integral de inundaciones relacionadas a la planeación y gestión de uso de suelo en ingeniería de ríos (adaptada de von Lany y Palmer, 2007).</i>	29
<i>Tabla 2.3 Respuestas potenciales de gestión integral de inundaciones relacionadas a la planeación y gestión de uso de suelo en ingeniería de ríos (adaptada de Ashley y Saul, 2007).</i>	29
<i>Tabla 3.1 Clasificación de características fisiográficas representativas en la cuenca del río La Sabana de</i>	35
<i>Tabla 3.2 Gastos diarios simulados en los hidrogramas mínimo, medio y máximo en el río La Sabana</i>	37
<i>Tabla 3.3 Superficie inundable asociada al tránsito de los tres hidrogramas.</i>	41
<i>Tabla 3.4 Porcentajes característicos de tirantes inundables en las llanuras de inundación.</i>	42
<i>Tabla 4.1 Descripción de la estructura de datos vectoriales. Infraestructura y características del área de influencia expuesta</i>	48
<i>Tabla 4.2 Niveles de vulnerabilidad a nivel manzana en función de la llanura inundable.</i>	51
<i>Tabla 4.3 Distribución ponderada de niveles de vulnerabilidad a nivel manzana</i>	52
<i>Tabla 5.1 Estructura de la función de vulnerabilidad para menaje en vivienda Tipo V.</i>	60
<i>Tabla 5.2 Resumen del daño o pérdida económica en menaje tras la simulación de tres hidrogramas de caudal variado</i>	65
<i>Tabla 5.3 Resumen del daño o pérdida económica en sistema estructural tras la simulación de tres hidrogramas de caudal variado</i>	66

Índice de figuras

<i>Figura I. 1 Visión geográfica de los desastres naturales del 2013 asociado a eventos;</i>	3
<i>Figura 1.1 Riesgo por inundación; interacción de amenaza y vulnerabilidad, Fuente: Merz y Thieken (2004)</i>	6
<i>Figura 1.2 Marco de trabajo conceptual para el modelo SPR.</i>	10
<i>Figura 2.1 Configuración espacial de la zona de estudio, el cauce río La Sabana y la subcuenca de aportación hacia la infraestructura expuesta</i>	20
<i>Figura 2.2 Principales afectaciones a la infraestructura producto del desbordamiento del río La Sabana tras la incidencia de los ciclones tropicales Ingrid y Manuel</i>	21
<i>Figura 2.3 Dinámica del desarrollo urbano en la planicie de inundación de la cuenca hidrográfica del río La Sabana (FUENTE: Google Earth. Imágenes; noviembre 2002 – enero 2015).</i>	23
<i>Figura 2.4 Registros históricos de gasto pico, m³/s, en la estación hidrométrica km 21+000.</i>	24
<i>Figura 2.5 Porcentaje total de eventos históricos registrados</i>	26

<i>Figura 2.6 Frecuencia de eventos de inundación en una ventana de 100 años (Fuente: PreventionWeb). Diseño del autor.</i>	27
<i>Figura 3.1 Resultados de 16 campos de precipitación acumulada, ciclones tropicales Ingrid y Manuel 2013.</i>	33
<i>Figura 3.2 Hidrograma de descarga; río La Sabana.</i>	35
<i>Figura 3.3 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma con menor condición de gasto</i>	38
<i>Figura 3.4 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma de condición de gasto promedio.</i>	39
<i>Figura 3.5 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma con mayor condición de gasto</i>	40
<i>Figura 3.6 Comparativa de la distribución espacial de las llanuras de inundación; a) tránsito del hidrograma mínimo, b) imagen infrarroja de satélite.</i>	43
<i>Figura 4.1 Distribución geográfica del desarrollo urbano en la zona de influencia (FUENTE: Google Earth. Imagen enero 2015)</i>	47
<i>Figura 4.2 Distribución geográfica de la infraestructura censada y expuesta (conjunto habitacional Joyas del Marqués II Llano Largo).</i>	48
<i>Figura 4.3 Tirantes medios inundables en las delimitaciones de manzanas, producto de las simulaciones de los hidrogramas; a) mínimo, b) medio, c) máximo</i>	50
<i>Figura 4.4 Niveles de vulnerabilidad en las delimitaciones de manzanas, producto de las simulaciones de los hidrogramas; a) mínimo, b) medio, c) máximo</i>	53
<i>Figura 5.1 Esquema de trabajo desarrollado en el análisis y evaluación de daño.</i>	57
<i>Figura 5.2 Infraestructura característica del tipo vivienda dentro las colonias Las Gaviotas y La Marquesa.</i>	58
<i>Figura 5.3 Menaje para la vivienda Tipo V (dos plantas) FUENTE: CENAPRED 2006.</i>	59
<i>Figura 5.4 Comparativa del porcentaje de pérdida en menaje bajo tres condiciones de caudal</i>	60
<i>Figura 5.5 Porcentaje de pérdida en menaje bajo condiciones de caudales; a) menor, b) promedio, c) mayor.</i>	61
<i>Figura 5.6 Función de vulnerabilidad para sistemas estructurales característicos de viviendas del conjunto habitacional.</i>	62
<i>Figura 5.7 Porcentaje de pérdida en sistemas estructurales bajo las condiciones de caudales; a) menor, b) promedio, c) mayor</i>	63
<i>Figura 5.8 Comparativa del porcentaje de pérdida en sistemas estructurales bajo tres condiciones de caudal</i>	64
<i>Figura A. 1 Distribución geográfica de características fisiográficas representativas en la cuenca del río La Sabana</i>	81

Estructura de la tesis

Capítulo 1

Con un enfoque de antecedentes, en el primer capítulo se refleja un panorama de los tópicos; riesgo por inundación, evaluación de vulnerabilidad y caracterización de incertidumbre. Enfoque que contribuye al entendimiento del peligro respondiendo al cuestionamiento del por qué y para qué de su consideración en esta tesis.

Capítulo 2

En el segundo capítulo, a través de una inspección de registros históricos producto de fenómenos hidrometeorológicos, se ilustra el comportamiento y distribución espacio-temporales de las inundaciones. Identificando así, la manera en la que se ha comprometido la sustentabilidad de la zona de estudio.

Capítulo 3

El capítulo tres documenta una metodología probabilista integradora de la caracterización de un evento hidrometeorológico extremo, haciendo posible, entre otros factores, la identificación espacial de posibles afectaciones producto de llanuras y tirantes inundables asociados a la incidencia del fenómeno hidrometeorológico.

Capítulo 4

A través del tránsito de tres hidrogramas, en el capítulo número cuatro, son definidos niveles de vulnerabilidad para la infraestructura tipo vivienda característica de un sector particular de la zona de estudio. Ilustrando de esta forma la influencia de la incertidumbre en la caracterización de una amenaza.

Capítulo 5

El quinto capítulo presenta un análisis y evaluación de daño en menaje y sistemas estructurales para viviendas clasificadas dentro de un nivel de vulnerabilidad Muy Alto. Donde, a través de un cierto límite de incertidumbre, el análisis contribuye como información crucial en el soporte de decisiones y políticas en el ámbito de la gestión de peligros naturales.

Capítulo 6

Producto del trabajo expuesto en la presente tesis, el último capítulo es destinado a las conclusiones particulares asociadas con los resultados de este trabajo. De igual forma, en este capítulo se exponen comentarios generales y líneas de trabajo futuro que pretenden contribuir con la gestión del fenómeno de inundación en zonas urbanas.

Resumen

El presente trabajo documenta un modelo desarrollado para la estimación de vulnerabilidad y daño producto de inundaciones asociadas al desbordamiento del río La Sabana tras la ocurrencia de los huracanes *Ingrid* y *Manuel* en el año 2013. La escala de la evaluación de los daños es caracterizada para un par de zonas urbanas propensas a inundaciones considerando para ello los efectos de la incertidumbre en la caracterización de un evento hidro-meteorológico extremo. La metodología considera el uso de valores diferentes en los parámetros que definen la relación lluvia-escorrentía de un modelo hidrológico. Este procedimiento, conocido como *GLUE* por sus siglas en inglés, permite cuantificar la incertidumbre epistémica en un modelo hidrológico, permitiendo así definir diversas posibilidades para el caudal extremo. Con lo que se definen diversos niveles de peligro para un mismo evento, los gastos son utilizados en un modelo hidrodinámico para estimar áreas y niveles de inundación, variables necesarias en la cuantificación de daños y la caracterización de la vulnerabilidad. El enfoque utilizado emplea información proveniente de modelos trabajando a diversas escalas espaciales y temporales, como son la meteorológica, hidrológica e hidrodinámica; y la combinación con estadísticos catastrales y censales así como funciones de fragilidad para determinar el daño por inundación, bajo condiciones de amenaza inciertas. La integración de los resultados, se realiza en un sistema de información geográfica, que nos permite localizar los impactos asociados a un evento extremo que dejó grandes daños en una zona urbana. Para ello se utiliza, a manera de reanálisis, el evento generado por el huracán Manuel en 2013, dentro de la zona baja de la cuenca del río La Sabana en el Estado de Guerrero, México.

La información proveniente de este tipo de metodologías se anticipa valiosa para compañías encargadas de asegurar los bienes expuestos a eventos climáticos extremos, así como a municipios encargados del desarrollo urbano.

Introducción

El desastre natural generado en el año 2013 dentro de la extensión territorial de la República Mexicana tras la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos dejó expuesta la capacidad destructiva que deriva este tipo de eventos y su interacción con el territorio nacional. En la escala mundial (ver Figura I. 1), de los 50 eventos con las mayores devastaciones por fenómenos naturales ocurridos en 2013, México ocupó el cuarto lugar con las mayores pérdidas económicas tras la ocurrencia de los huracanes *Ingrid* y *Manuel*, y las 157 pérdidas humanas asociadas a este par de fenómenos lo posicionaron en el treceavo lugar (Munich Re Group, 2014).

Particularmente el conjunto de daños expuestos tanto en el ámbito social como económico presentados en el Estado de Guerrero tras el paso de *Ingrid* y *Manuel* fueron de magnitud significativa, acentuando considerablemente los efectos negativos sobre las condiciones de vida en la población y su significativo impacto económico.

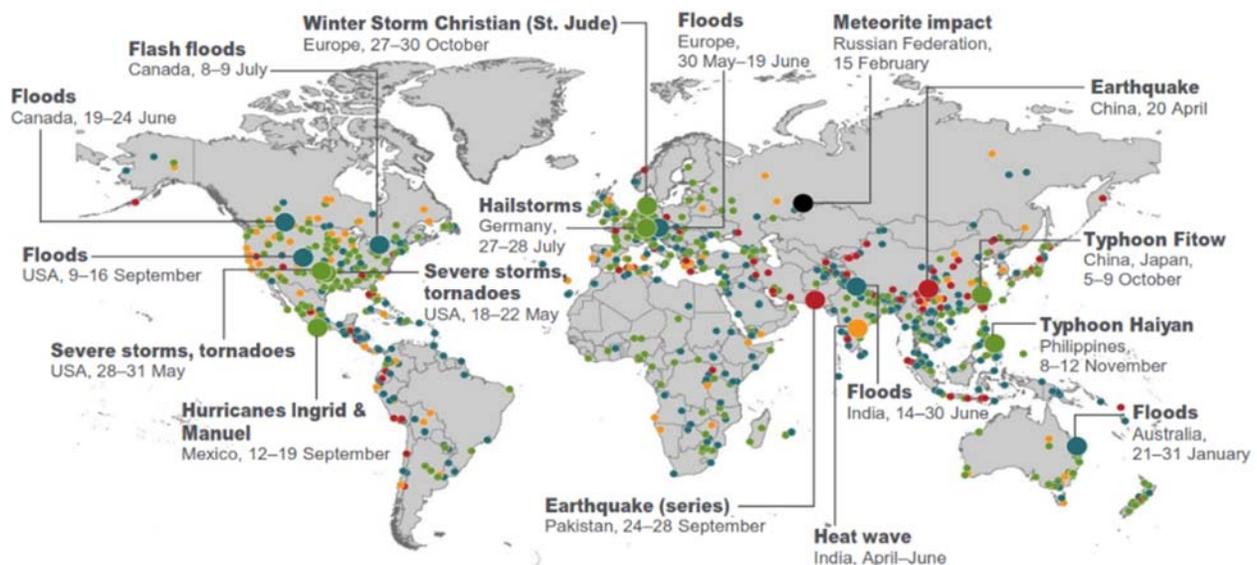


Figura I. 1 Visión geográfica de los desastres naturales del 2013 asociado a eventos; ● geofísicos, ● meteorológicos, ● hidrológicos, ● climatológicos, ● extraterrestres
(Fuente: Munich Re, NatCatSERVICE, 2014)

A nivel nacional la proyección estimada, en cuanto a daños y pérdidas asociados por la ocurrencia de este par de fenómenos ascendió, en números cerrados, a 4.2 billones de dólares afectando a una población de 900,000 habitantes (CENAPRED, 2014, Aon Benfield, 2104, Guha-Sapir, 2014). En el Estado de Guerrero, específicamente el municipio y ciudad capital de Acapulco de Juárez presentó graves afectaciones producto de inundaciones asociadas a la interacción de este par de fenómenos. Cifras estimadas de los daños asociados a dichos eventos fueron publicadas en el informe; *Impacto Socioeconómico de los desastres en México durante 2013*, informe emitido por la Secretaría de Gobernación (CENAPRED, 2014). En dicho informe fueron documentados y publicados los daños y afectaciones asociados a la inundación donde una cifra escasamente inferior a 23,000 millones de pesos fue el resultado de las inundaciones extremas presentadas dentro de la extensión territorial del estado de Guerrero.

En la actualidad, las inundaciones extremas son muy difíciles de predecir dado que los modelos existentes no siempre reproducen de manera adecuada estos fenómenos. Sin embargo, es posible mejorar los resultados de pronóstico de estos modelos, a través de su uso combinado con información obtenida por medio de herramientas de percepción remota, esta información tiene una creciente disponibilidad de datos espaciales que son accesibles a nivel mundial y de descarga libre (Di Baldassarre y Uhlenbrook, 2012).

A pesar de estos avances, cada etapa del proceso de modelado de eventos de inundación induce errores, por ejemplo, fallas en las observaciones y en la habilidad de los modelos para representar la realidad (Pappenberger *et al.*, 2005). Es por ello, que estudios recientes han comenzado a explorar la implementación de metodologías probabilistas que consideran a la incertidumbre en la estimación tanto de avenidas extraordinarias (Shrestha y Solomatine 2008), como en el cálculo de superficies de afectación por inundaciones (Rodríguez-Rincón *et al.*, 2012; Pedrozo-Acuña *et al.*, 2013; Pedrozo-Acuña *et al.*, 2014; Rodríguez-Rincón *et al.*, 2015).

Dentro de este contexto, es importante revisar el impacto de utilizar información que no siempre es confiable para la toma de decisiones. De esta manera, el trabajo de investigación propuesto tiene como objetivo principal ilustrar la influencia de esta incertidumbre en la determinación de niveles de vulnerabilidad ante un evento de inundación extrema. Para ello, se utiliza una metodología probabilista que permite la caracterización de la amenaza a través de n eventos; los resultados identificarán los diferentes niveles de vulnerabilidad que se podrían esperar para un evento de diseño dado. Para ello, se utilizarán los datos de un evento de inundación reciente que corresponde al desbordamiento del río La Sabana, como resultado de la incidencia de la tormenta tropical Manuel en septiembre de 2013 (Mejía Estrada, 2014). Este tipo de metodologías coadyuvan a la estimación del riesgo por inundación en zonas urbanas, tomando en cuenta por un lado la ocurrencia de eventos extremos, históricos y posibles, así como las características de cierta infraestructura expuesta.

En este sentido, el marco de trabajo empleado en la presente investigación tiene su base en el trabajo presentado por Rodríguez-Rincón *et al.* (2012) y Rodríguez-Rincón *et al.* (2015), quienes proponen un enfoque de modelación escalonado, que está compuesto por tres diferentes niveles: uno atmosférico por medio de la utilización de un modelo numérico de predicción meteorológica (*Numerical Weather Analysis and Prediction*¹); uno de cuenca, a través del uso de un modelo de precipitación-escorrentía y uno de planicie por medio de la puesta a punto de un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando para ello información topográfica proveniente de una nube de puntos LiDAR de alta resolución (INEGI, 2008).

¹ La predicción meteorológica numérica (NWAP, por sus siglas en inglés) hace referencia a los sistemas que usan datos meteorológicos actuales para alimentar complejos modelos físico-matemáticos de la atmósfera para predecir la evolución meteorológica. El ensamble de varios modelos numéricos permite definir con mayor precisión la incertidumbre de la predicción y extender la predicción hacia un futuro más lejano (7 a 12 días).

La incertidumbre es considerada en el modelo *WRF* (*Weather Research and Forecasting Model*²) utilizando una técnica de conjunto multi-física de dieciséis diferentes esquemas de parametrización, este tipo de metodología se basa en los sistemas de predicción por ensambles (*Ensemble Prediction System*³) ampliamente utilizados en los pronósticos meteorológicos.

Así el propósito de este trabajo de tesis consiste en ilustrar la influencia de la incertidumbre **epistémica** en la caracterización adecuada de los niveles de vulnerabilidad y daño asociados a un evento extremo. Utilizando para ello, una metodología probabilista que reproduce al evento hidrometeorológico en diferentes niveles del sistema terrestre. Así mismo, se anticipa que esta metodología permitirá exponer, por medio de un análisis cuantitativo, los posibles niveles de daño que se tuvieron en menaje y sistemas estructurales para un tipo de vivienda característico, ante la ocurrencia de este evento hidrometeorológico extremo.

Se anticipa que los resultados provenientes de este tipo de estrategias de modelación serán de gran valor para en el futuro, establecer condiciones más seguras a la población. Constituyéndose en una herramienta que permite estimar y evaluar vulnerabilidad y daño por eventos hidrometeorológicos extremos.

² El modelo de Investigación y Pronóstico Meteorológico (*WRF*, por sus siglas en inglés) es un sistema numérico, a mesoescala de próxima generación, de predicción meteorológica diseñado para necesidades operativas de investigación y pronóstico atmosférico. El *WRF* cuenta con dos núcleos dinámicos; un sistema de asimilación de datos, y de arquitectura en el software tal que facilita el cómputo en paralelo y la extensibilidad del sistema. El modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas o resoluciones de decenas de metros y hasta miles de kilómetros.

³ Los sistemas de predicción por ensambles o conjuntos (*EPS*, por sus siglas en inglés) emplean una técnica que permite integrar la información basada en múltiples realizaciones de un modelo de pronóstico. En otras palabras, una predicción por conjuntos es simplemente una colección de dos o más pronósticos verificando al mismo tiempo, lo que contribuye a producir pronósticos meteorológicos más confiables.

Capítulo 1, Antecedentes

A nivel mundial, las inundaciones son probablemente la causa número uno de las pérdidas económicas tras la ocurrencia de fenómenos naturales, además de ser consideradas como el peligro natural más común del mundo (Wang *et al.*, 2011). Al menos no existe registro de una región poblada del mundo que se encuentre exenta de ser inundada. Durante las últimas décadas, muchas llanuras naturalmente inundables se han visto modificadas al alterar su uso de suelo convirtiéndolas en zonas residenciales o de parques industriales (Kron, 2005).

Por otro lado, el cambio climático y las modificaciones en el tamaño y distribución espacial de la población en llanuras de inundación, son factores que hacen que el riesgo por inundación sea dinámico y varíe de un evento a otro. Así, es vital la regulación de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo de inundación. La delimitación de áreas inundables debe hacerse basada en la mejor información disponible y siempre antes de un desastre, considerando, entre otros aspectos, la topografía, tipo de suelo y su condición de saturación y vegetación. Una vez establecidas las zonas vulnerables ante el desbordamiento de un río, es fundamental restringir futuros asentamientos mediante la implementación de normatividad firme de uso de suelo, y la supervisión de su cumplimiento (Pedrozo-Acuña, 2012; Pedrozo-Acuña y Breña-Naranjo, 2015).

La estimación de la magnitud de los daños ocasionados tanto a la población como a infraestructura causados por inundaciones de tipo fluvial ha sido un tema de considerable trascendencia económica y social. El Estado de Guerrero, por su ubicación geográfica y condiciones climáticas es vulnerable a los efectos de fenómenos hidrometeorológicos generados tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico. En el año 2013, de los treinta y dos ciclones tropicales generados en el Pacífico y Atlántico, diecisiete se registraron en la vertiente pacífica. Notablemente, durante esta temporada ciclónica se presentó la rara incidencia simultánea de las tormentas tropicales Ingrid y Manuel, que durante algunas horas tuvieron categoría de huracán. Este evento, analizado desde el punto de vista hidrometeorológico por Pedrozo-Acuña *et al.* (2014), produjo daños significativos a desarrollos urbanos ubicados en la llanura de inundación del río La Sabana, en una zona de alto valor económico conocida como Acapulco–Diamante, lo que a su vez ocasionó que decenas de miles de personas quedaran incomunicadas durante varios días (Munich Re Group, 2014).

En la ventana de tiempo comprendida por los años 1970 – 2013, la ciudad de Acapulco y su zona conurbada ha presentado en conjunto 60 eventos asociados a inundaciones, prácticamente 1.4 inundaciones al año (DesInventar, 2015). Los tipos de desastres naturales que han dejado expuesta la susceptibilidad dentro de la zona conurbada de Acapulco son lluvias, avenidas torrenciales, tempestades y ciclones tropicales. De acuerdo con la estadística que integra la base de datos, el 23.9% de las víctimas mortales de los desastres naturales mencionados, está asociado a eventos de inundación.

Si bien las herramientas y fuentes públicas traducidas en base de datos como las publicadas por DesInventar y Munich Re (por mencionar algunas) dan la pauta de un riesgo existente, la tarea importante o el objetivo primordial de este tipo de trabajo es coadyuvar con esfuerzos que disminuyan o mitiguen el riesgo en zonas naturalmente inundables. Puntualmente se identifican zonas de riesgo en las cuales existe la probabilidad de presentarse niveles de daño y de vulnerabilidad física y social originados por fenómenos perturbadores.

Con base en lo anterior, en las páginas que integran este capítulo se presenta la revisión bibliográfica de tres temas fundamentales, que contribuyen al entendimiento del peligro asociado a las inundaciones en zonas urbanas. Dichos tópicos pretenden dar la respuesta a la importancia de continuar con la evaluación y caracterización de zonas propensas a la amenaza de inundación. Así, el marco teórico que integra el contenido del presente capítulo tiene como objetivo presentar el estado del arte en temas asociados al riesgo por inundación, la evaluación de la vulnerabilidad, y la caracterización de la incertidumbre. De esta manera, se anticipa su utilidad para mostrar la importancia de la valoración de la incertidumbre en estudios abocados a la cuantificación del riesgo inducido por eventos climáticos extremos.

1.1 Riesgo por inundación

A nivel mundial el término riesgo, e inclusive a escalas interdisciplinarias, posee diversidad en su significado. De ahí que al hablar de este tópico, una acción obligada sea definir y caracterizar los parámetros, variables e indicadores que permitan describir tanto cualitativamente como cuantitativamente los fenómenos físicos intrínsecos del riesgo (Merz *et al.*, 2007).

Con respecto a los desastres naturales, el riesgo se describe como la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta magnitud en un periodo de tiempo con pérdidas esperadas (Kaplan y Garrick, 1981, Fournier d'Albe, 1985, Milutinoviç y Petrovsky, 1985, Mileti, 1999). En su forma estricta y común, para estar en términos de evaluar y estimar el riesgo, éste deberá integrarse por dos aspectos: la amenaza y la vulnerabilidad (Kaplan y Garrick, 1981, Mileti, 1999, Apel *et al.*, 2008).

De acuerdo con el riesgo por inundación, éste es descrito por el o los escenarios de inundación asociados con cierto periodo de retorno, ver Figura 1.1. Dicho esquema engloba los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados a un evento con periodo de retorno de 50 años, donde a través de una curva de excedencia se determina una posible zona inundable en alguna región hipotética.

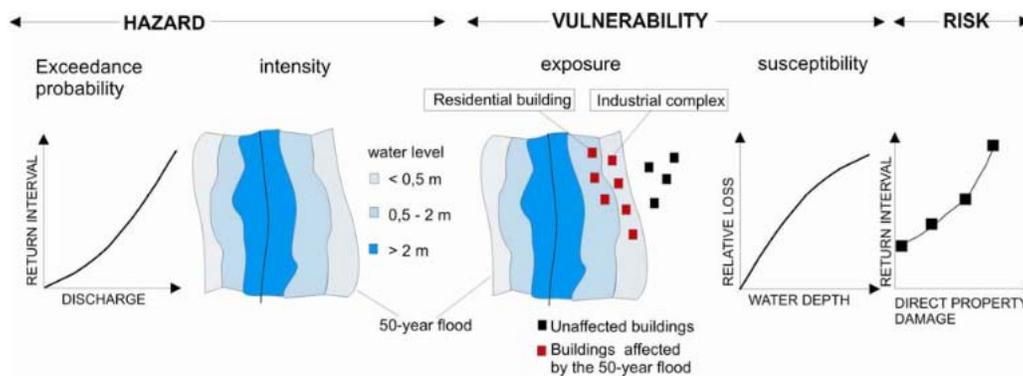


Figura 1.1 Riesgo por inundación; interacción de amenaza y vulnerabilidad, Fuente: Merz y Thielen (2004)

En otras palabras, la Figura 1.1 ejemplifica la existencia e interacción de una amenaza y vulnerabilidad generadoras de riesgo, éste definido como la probabilidad de ocurrir cierto daño dentro un periodo de tiempo dado. Merz *et al.* (2011), determina que la vulnerabilidad es restringida en el sentido de su definición, partiendo de la consideración de que la vulnerabilidad se compone de la interacción entre exposición y susceptibilidad. Si se define al término exposición como aquello o aquellos elementos que serán afectados, la susceptibilidad define la manera en cómo serán dañados o afectados estos elementos expuestos. Este último término; susceptibilidad, usualmente es descrito a través de funciones de daño que determinan el nivel o grado de daño monetario que es estimado al

relacionar un tirante de inundación con el uso y tipo estructural de un elemento expuesto (Wind *et al.*, 1999, NRC 2000).

Por otro lado y en un estricto sentido, el nivel de impacto ocasionado por el fenómeno de las inundaciones a los elementos en riesgo; entendiendo como elementos a la población, infraestructura, sistemas y medio ambiente, dependerá de su vulnerabilidad (Merz y Thieken, 2004).

Por otro lado, diversos autores señalan la necesidad de comenzar a trabajar dentro de un enfoque integral para caracterizar el riesgo por inundación. Este nuevo enfoque considera la generación del riesgo como resultado de la interacción de una amenaza natural y la vulnerabilidad de la infraestructura (Apel *et al.*, 2008, Merz *et al.*, 2010). Dado el alto nivel de daño, registrado en todo el mundo durante las últimas décadas, la evaluación y gestión del riesgo por inundación conforma una base muy importante para una adecuada toma de decisiones. Esta noción ha sido ampliamente aceptada y puesta en práctica al considerar el uso de modelos que integran la caracterización de amenaza y vulnerabilidad, ya que proporciona una comprensión de la naturaleza y de las características del riesgo por inundación para una población ubicada en una zona de riesgo (Wang *et al.*, 2011).

Por ejemplo, autores como Apel *et al.* (2004), hacen énfasis en la estrategia de mitigación de desastre de inundación que tiene su base en una evaluación integral del riesgo de inundación, combinada con una investigación exhaustiva de la incertidumbre asociada con los procesos intrínsecos de la evaluación del riesgo. Aunado a ello, revisiones como la llevada a cabo por Merz *et al.* (2010), destacan que la acción de evaluar los daños de los peligros naturales proporcionan información crucial para el soporte de decisiones y desarrollo de políticas en el ámbito de la gestión de peligros naturales y la planificación de la adaptación ante un clima que está cambiando. Particularmente, en Europa las acciones encaminadas al mejoramiento de las metodologías empleadas para la estimación de daños por inundación están ganando terreno, pues se reconoce la relevancia de las estrategias no estructurales (de planificación), son tan importantes como la construcción de bordos e infraestructura para un adecuado manejo de estos eventos.

Dentro del mismo enfoque, Thieken *et al.* (2005), consideran que una mejor comprensión de las causas que originan los daños por inundación y la manera en la que se estiman pérdidas, coadyuvan a mejorar la toma de decisiones, tanto en la prevención de desastres como en acciones abocadas a mitigar o reducir el riesgo. En este sentido, datos de pérdidas de alta calidad son el insumo más importante.

En países como Alemania, la gestión del riesgo por inundación ha demostrado ser una actividad que requiere de una adecuada estimación de eventos que superen la capacidad de diseño de la infraestructura, así como la consideración de todos aquellos eventos proclives a generar daños. Así se produce una interacción compleja entre los eventos extremos y la infraestructura disponible en el área de estudio (Büchle *et al.*, 2006).

Tal y como lo mencionan Pedrozo-Acuña y Breña Naranjo (2015), las medidas que se pueden implementar ante el riesgo por inundación, constituyen acciones que se introducen como parte del proceso de adaptación del sistema. Desde luego, es posible no hacer nada y aceptar el riesgo, pero inclusive bajo esta perspectiva, si una inundación ocurre será necesario lidiar con sus impactos de alguna manera.

Ante las nuevas condiciones, impuestas por el cambio climático, las posibles respuestas ante inundaciones son la mitigación, esto es la reducción de las causas u orígenes del fenómeno (punto clave para los tomadores de decisiones); o la adaptación que representa el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos o sus efectos, las cuales disminuyen el daño o explotan las oportunidades de beneficio.

En general, la forma de enfrentar esos fenómenos y sus efectos consiste en un portafolio de medidas abocadas a la reducción del riesgo (ej. Plan Hídrico Integral de Tabasco, México, *Room for the river*, Holanda, *Making space for water*, Reino Unido). Éstas se pueden agrupar en función de su propósito (inundación costera o fluvial) o en relación tipo de medida, como estructural o no estructural, física, regulatoria o de comportamiento.

En su reporte de 2004, la oficina de prospección del gobierno británico *UK Foresight* (Evans *et al.*, 2004a y 2004b) definió un variado número de medidas divididas en temas y grupos, los cuales fueron actualizados en una revisión posterior conocida como Pitt Review (2008). Esta clasificación se presenta en la Tabla 1.1.

La implementación de estas medidas tiene su base en el marco de trabajo conocido como Fuente-Estado-Respuesta (SPR por sus siglas en inglés), en el que éstas se implementan en cada una de estas tres etapas dentro del modelo, el cual define al 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. La Figura 1.2 presenta la división de las variables que representan el estado del sistema, en forzamientos y respuestas de acuerdo a este modelo.

Tabla 1.1 Clasificación de temas y grupos para las medidas ante inundaciones, según el Foresight future flooding report 2008.

Tema	Número de medida	Grupo
Gestión del paisaje natural.	1	Infiltración rural.
	2	Almacenamiento a nivel 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.
Ingeniería de ríos y mantenimiento.	17	Medidas y políticas sociales y de salud.
	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.

Otra consideración importante dentro de la mitigación de inundaciones es que el marco de medidas seleccionado tiene que ser económicamente viable (Apel *et al.*, 2006). Es decir, que el beneficio de la construcción de la infraestructura y la adaptación de los planes de

desarrollo urbano reduzcan los efectos negativos de las inundaciones, como son daños a infraestructura, a contenidos y a la población.

Conceptualizando que el riesgo es definido como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. O bien en un contexto técnico, el riesgo con frecuencia hace más énfasis en las consecuencias, en términos de pérdidas probables relativas a cierta causa, lugar y momento en particular. Sin embargo en distintos ámbitos no necesariamente se comparte la misma percepción sobre el significado y las causas subyacentes de los diferentes riesgos (UN/ISDR 2009).

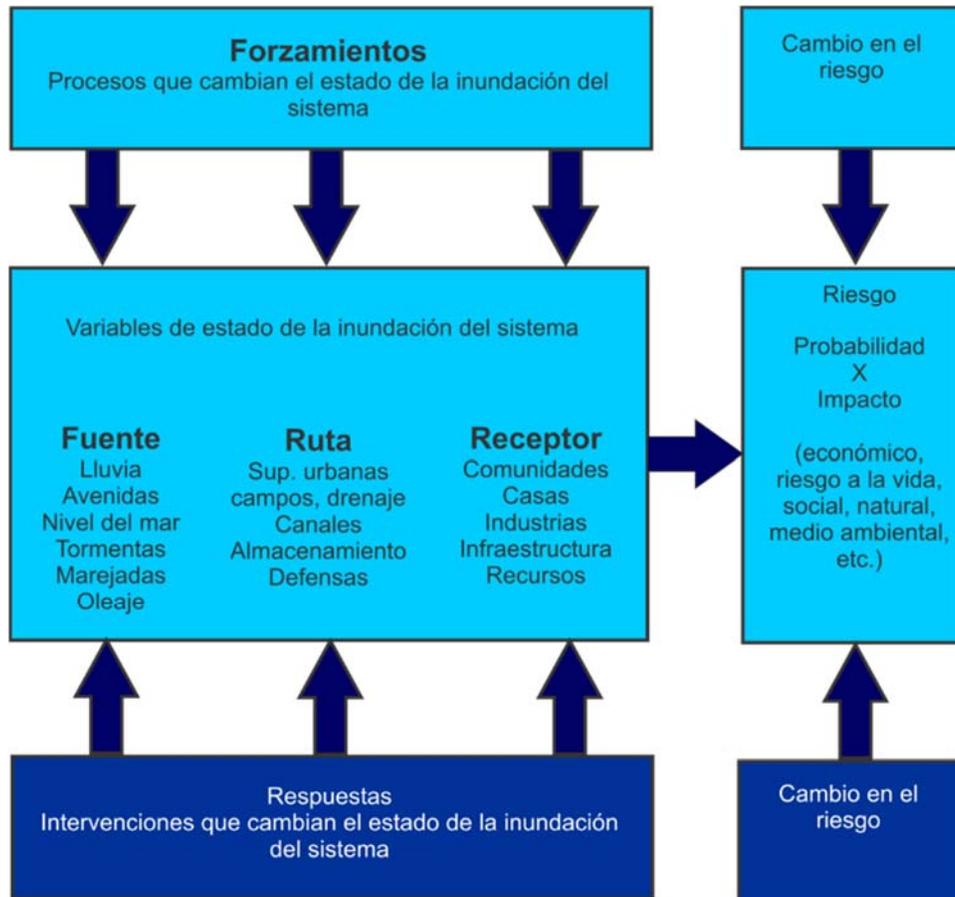


Figura 1.2 Marco de trabajo conceptual para el modelo SPR.

Partiendo de la importancia que requiere la estimación de los impactos asociados a las inundaciones, las metodologías tradicionales de diseño en cuanto a inundaciones se refiere han comenzado a ser completadas o reemplazadas por métodos con un enfoque más integral en cuanto al riesgo se refiere (Merz *et al.*, 2004). El proceso de evaluación del riesgo por inundaciones, requiere del empleo del mejor conocimiento disponible, a fin de determinar los efectos que estos eventos producen sobre los sistemas naturales y productivos, incluyendo medidas de resiliencia, vulnerabilidad, robustez y sostenibilidad.

¿Para qué evaluar el riesgo por inundación?

Ante la necesidad de un uso eficiente de los recursos limitados se fomenta la aplicación de un enfoque orientado a la evaluación del riesgo para mitigar inundaciones (Merz *et al.*, 2009).

Las evaluaciones del riesgo por inundación a menudo no son bien equilibradas (Merz *et al.*, 2010). Se destinan mucho mayores esfuerzos a la parte de la evaluación del peligro, mientras que a la acción de evaluar los daños asociados a inundaciones se les esquematiza como un apéndice en el análisis del riesgo. Merz *et al.* (2007) destacan al análisis de riesgo como el conjunto de conocimientos que describe la probabilidad y evalúa los efectos adversos ante la ocurrencia de un proceso natural, tecnológico, industrial de agentes físicos o químicos.

Aproximadamente en las últimas dos décadas diversas investigaciones (p.e. Merz *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2011) han coincidido, entre otros aspectos, que los mayores esfuerzos asociados con los daños por inundaciones, deberán permitir la generación de un análisis del riesgo confiable a fin de dar certeza a la evaluación del mismo, la cual relaciona los daños económicos directos con daños o pérdidas indirectas. Dichas investigaciones consideran cierta problemática en esta tarea, ya que existe diversidad de posibles indicadores de daño al evaluar las consecuencias adversas sobre la población y sobre las actividades económicas a largo plazo de las zonas propensas a inundaciones.

Si bien los resultados estimados producto de los análisis de riesgo de inundación pueden ser muy inciertos (Merz y Thieken, 2004), son absolutamente útiles en un sentido comparativo.

La generación de mejores estrategias para el manejo del riesgo, pasa de manera forzosa por una mejor comunicación entre la academia, el gobierno y la sociedad (Brito Castillo y Pedrozo-Acuña, 2015). Para ello, la honestidad resalta como la mejor política, pues favorece el incremento en los niveles de confianza de la sociedad hacia las opciones de protección que se propongan desde el gobierno.

El portafolio de respuestas para la mejor gestión del riesgo por inundación deberá estar diseñado para:

- I. Incrementar la resiliencia (reducir la vulnerabilidad de los receptores)
- II. Ser robusto y sostenible

El concepto de resiliencia tiene su origen en el campo de la medicina y se define como la habilidad de un sistema y sus componentes para recuperarse, anticiparse, absorber o acomodar los efectos de una amenaza en un tiempo breve y de una forma eficiente; por medio del aseguramiento de la preservación, restauración o mejoramiento de su estructura básica y funciones.

Mientras que la robustez se refiere a la habilidad del sistema para soportar de manera satisfactoria cambios no previstos, y puede medirse en función del grado en el que una solución es necesaria (en términos del costo, funcionamiento u otro atributo) dados parámetros desconocidos en el futuro o cambios en las hipótesis.

La gestión sostenible de las inundaciones provee la mayor resiliencia social y económica posible ante estos eventos, por medio de la protección y el diseño de soluciones que trabajen de manera armónica con los procesos del medio ambiente, de forma tal que sea justo y asequible en ambos, la actualidad y el futuro

Los planes o programas son evaluados en función no sólo de su aplicabilidad, sino también en función de su impacto y beneficios sobre el medio ambiente, factores sociales, con énfasis en la influencia de la gobernanza.

En el estudio Foresight 2004 se propusieron las siguientes categorías:

- I. Efectividad del costo: El valor monetario de implementar la medida.
- II. Justicia social: El impacto de la medida en diferentes tipos de casa habitación.
- III. Calidad ambiental: El impacto en biodiversidad, así como la calidad y área de los hábitats.
- IV. La capacidad de la medida para enfrentar la incertidumbre asociada a los escenarios previstos en ambos factores socio-económicos y cambio climático (robustez).
- V. La incertidumbre asociada a la capacidad de la medida para enfrentar ante eventos extremos y su operación (precaución).

En la primera iteración del reporte Foresight, no se identificó una medida que fuese de forma simultánea robusta y sostenible, indicando que existen un amplio rango de ellas que son atractivas y no comprometen los objetivos de sostenibilidad, en particular la gestión y planeación del uso del suelo (ej. ordenamiento territorial) y los reglamentos de construcción. Por otro lado, la realineación de defensas costeras, o almacenamientos ingenieriles de avenidas (ej. presas rompepicos), proveen beneficios en la reducción del riesgo por inundación pero no son tan buenas si se les evalúa bajo la perspectiva de la sostenibilidad. Particularmente, bajo la valoración de la justicia social y los impactos diferenciales que se aprecian sobre los miembros más desprotegidos de la sociedad. Un análisis posterior señala que los almacenamientos a nivel de cuenca pueden ser una opción que satisfaga ambos criterios.

1.2 Evaluación de la vulnerabilidad

El impacto o magnitud de los daños ocasionados por inundaciones no sólo depende de las características propias de la *amenaza*⁴ de inundación, sino también de la *vulnerabilidad*⁵ de la zona inundada (Merz *et al.*, 2007, Apel *et al.*, 2008). En el estricto sentido, en términos de intensidad y de probabilidad de excedencia una zona tipificada como más vulnerable experimenta daños más altos ocasionados por la amenaza de inundación.

Existen diversos aspectos en cuanto a vulnerabilidad se refiere y que surgen de factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Por mencionar algunos ejemplos se incluyen el diseño inadecuado y la construcción deficiente de los edificios, la protección inadecuada de los bienes, la falta de información y de concientización pública, un reconocimiento oficial limitado del riesgo y de las medidas de preparación y la desatención a una gestión ambiental sensata o prudente. La vulnerabilidad varía considerablemente dentro de una comunidad y en el transcurso del tiempo. Esta definición identifica a la vulnerabilidad como una característica de los elementos de interés que es independiente de su exposición. Sin embargo, en su acepción común, con frecuencia esta palabra se utiliza más ampliamente para también incluir el grado de exposición de dichos elementos (UN/ISDR 2009).

Hoy en día a nivel mundial hay un drástico y continuo aumento de daños ocasionados por fenómenos naturales extremos. Parte esto se debe al hecho de que la sociedad humana es cada vez más vulnerable a los efectos de estos eventos (Munich Re Group, 2005). Debido principalmente a la movilización tanto de capital como de la misma población hacia zonas de peligro, convirtiéndose en amenaza al modificar sistemas hidrológicos, cuencas de aportación así como llanuras o sistemas naturalmente inundables (Mitchell *et al.*, 2003). Dicha movilización principalmente es gobernada por la falta de conocimiento en cuanto las características climáticas y naturales de una zona inundable que resulta atractiva tanto por las propias condiciones naturales como por un entorno estético (Kron, 2005).

Particularmente en México la inadecuada planificación territorial contribuye notablemente con la vulnerabilidad de la población (Pedrozo-Acuña, 2012). La rápida urbanización que modifica el uso del suelo ha incrementado asentamientos informales en las grandes ciudades, lo que incrementa la vulnerabilidad social a los desastres naturales (OECD 2013). Prueba de ello y dentro de este tópico, Lavell 2005 señala que la contribución de la deforestación y la fragmentación de cuencas hidrológicas, propician incrementos de incidencia e intensidad de las inundaciones y deslizamientos de tierras; la desenfrenada urbanización y una carencia de planeación asociada a estructuras deficientes en el drenaje pluvial ocasionan inundaciones urbanas sin precedentes.

⁴ Se define como amenaza natural al proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UN/ISDR 2009).

⁵ Se define como vulnerabilidad a las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (UN/ISDR 2009).

¿Para qué evaluar la vulnerabilidad?

En muchas ocasiones no es posible actuar sobre la amenaza o es muy difícil hacerlo; bajo este enfoque es factible comprender que para reducir el riesgo no habría otra alternativa que disminuir la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Cardona, 2003). En el mismo sentido, la mitigación de pérdidas asociadas con los riesgos naturales es beneficiada al reducir la vulnerabilidad (Rose *et al.*, 2007)

Brouwer *et al.* (2007) expone que los hogares con ingresos más bajos y menor acceso a los sectores productivos enfrentan una mayor exposición al riesgo por inundaciones. La disparidad en ingresos y distribución de activos a nivel comunitario, tiende a ser mayor en los niveles más altos de exposición al riesgo, lo que implica que hogares individualmente vulnerables también son colectivamente más vulnerables.

Una manera de reducir la vulnerabilidad de una región proclive a inundaciones es a través de la planificación del uso del suelo. En este aspecto, los mensajes clave de programas anteriores en diversas partes del mundo indican lo siguiente:

- I. Las defensas de protección en ríos y costas tienen el mayor potencial para la reducción del riesgo por inundación.
- II. 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.
- III. 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 a través de la reducción de la vulnerabilidad de los bienes expuestos.

En México, la falta de ordenamiento territorial adecuado ha producido la generación de riesgo como resultado de una mala planeación urbana, un ejemplo de lo anterior está claramente dado por la inundación de Acapulco-Diamante en Septiembre de 2013. En el que durante el periodo definido entre los años 2002 y 2009, se autorizó la construcción de nuevos desarrollos urbanos que se asentaron en humedales y zonas naturales de inundación. Los cuales se verían gravemente afectados durante el evento de Septiembre de 2013 (Pedrozo-Acuña y Breña-Naranjo, 2015).

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.

1.3 Caracterización de la incertidumbre

¿Por qué se debe caracterizar la incertidumbre?

Dentro de los retos más claros para una adecuada gestión del riesgo por inundación, la identificación y caracterización de la incertidumbre ha cobrado mucha relevancia (Pedrozo-Acuña, 2012).

Cada etapa del proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, fallas en las observaciones y en la habilidad de los modelos para representar la realidad, los modelos representan idealizaciones de procesos naturales generalmente más complejos. Esto es lo que se conoce como incertidumbre.

Así, los modelos que generan los pronósticos están sujetos a incertidumbres de naturaleza epistémica (limitaciones del conocimiento), además de las asociadas a los datos de entrada, los errores de los datos geográficos y la falta de datos de campo para su correcta calibración (ej. Rauch *et al.*, 2002; Pappenberger y Beven, 2006; Korving *et al.*, 2009; Reeve *et al.*, 2011).

El concepto de incertidumbre va más allá de la ausencia de conocimiento. Por ejemplo, Funtowicz y Ravetz (1990) describen la incertidumbre como una situación de información inadecuada, la cual puede ser de tres diferentes tipos: inexactitud, in-confiabilidad, e ignorancia. Sin embargo, cabe resaltar que la incertidumbre prevalece, incluso en situaciones en las que existe una gran cantidad de información disponible. Adicionalmente, nueva información puede disminuir o aumentar la incertidumbre. Es posible que nuevo conocimiento sobre procesos complejos, revelen la presencia de incertidumbre que previamente no se conocía. De esta manera, el incremento en el conocimiento ilustra que nuestra comprensión está más limitada, o que los procesos son más complejos de lo que se había pensado (Van der Sluis, 1997).

Dentro del contexto de manejo del riesgo por inundaciones, el problema radica en cómo evaluar y cuantificar la incertidumbre. La falta de un conocimiento absoluto sobre el funcionamiento de los sistemas naturales complejos, y las incertidumbres asociadas con el comportamiento humano, las organizaciones y los sistemas sociales, hacen extremadamente complicada la predicción de la vulnerabilidad ante inundaciones. De forma tradicional, se ha buscado incluir de manera implícita a la incertidumbre en el riesgo. La protección estructural contra inundaciones, está basada en el conocimiento acumulado con base en eventos anteriores, en los que el cambio climático estaba conceptualizado como un proceso cuasi-estacionario, donde el pasado es capaz de reflejar el futuro.

La incertidumbre está contenida en distintos componentes, tales como las variaciones estadísticas, la medición de los errores, la ignorancia y la indeterminación, las cuales dan soporte a su característica en común, la incertidumbre reduce la confianza en la estimación dentro de la cadena causa-efecto. Si no es posible explicar la complejidad por medio de métodos científicos, la incertidumbre aumenta. Inclusive relaciones simples pueden estar

asociadas con altos grados de incertidumbre, si el conocimiento que les da sustento está incompleto.

De acuerdo con Walker *et al.* (2003), dentro del marco de trabajo para la toma de decisiones, existen tres diferentes dimensiones de incertidumbre, a saber:

- I. Su ubicación: donde la incertidumbre se manifiesta en sí misma dentro de la complejidad del modelo;
- II. Su nivel: en el que la incertidumbre se manifiesta en sí misma a lo largo de un espectro entre el conocimiento determinista y la ignorancia total (precisión del conocimiento);
- III. Su naturaleza: donde la incertidumbre se debe a la imperfección del conocimiento o se debe a la variabilidad inherente de los fenómenos que se describen (clasificada en epistémica y aleatoria).

Diversos autores reconocen los beneficios de considerar la caracterización de la incertidumbre, a la par de la evaluación del riesgo por inundación, esta información adicional provee indicadores sobre el grado de confiabilidad de los métodos y datos usados para la evaluación del riesgo (Merz y Thieken, 2009, Domeneghetti *et al.*, 2013).

El análisis de incertidumbre requiere entonces de inspecciones minuciosas en los datos de entrada e hipótesis validadas en la estimación de daños, (Merz *et al.*, 2010). Una deficiencia importante en los estudios previos ha sido reconocida en la escasa validación de los modelos tras la estimación de daños por inundación. Esto se debe, por un lado a que no existe la suficiente cantidad de datos para la validación de los resultados numéricos (Hall y Anderson, 2002). Teniendo en cuenta que la mitigación de inundaciones y la gestión integral del riesgo por inundaciones implica decisiones que generalmente están asociadas con un significativo nivel de incertidumbre, la eficacia de un análisis del riesgo radica en la consideración de la incertidumbre (Büchele *et al.*, 2006, Merz y Thieken, 2009). Esto se debe a que diferentes tomadores de decisiones tendrán diferentes perspectivas y actitudes frente al riesgo e incluso diferentes enfoques en la relación costo-beneficio de medidas preventivas (Palmer 2000, Downton *et al.*, 2005).

Estudios experimentales, han demostrado el rol de diferentes fuentes de incertidumbre en la evaluación del riesgo (por ejemplo, Apel *et al.*, 2004, 2008, Domeneghetti *et al.*, 2013). El análisis formal de la incertidumbre es reconocido como el medio más eficaz para proponer medidas de mitigación y valorar el riesgo ante eventos extremos tal y como lo proponen Merz y Thieken (2009).

Este tipo de análisis son imperativos para la adecuada valoración de daños por eventos hidrometeorológicos, más aún en zonas urbanas con una alta variabilidad en la distribución socio-económica de los habitantes en las que exista una alta variabilidad en el tipo de vivienda, y por lo tanto de resistencia ante estos eventos. Este tipo de diferencias, contribuye a incrementar la incertidumbre en la adecuada valorización de las pérdidas debidas a un evento extremo (Merz *et al.*, 2004).

La evaluación de daños por inundación, requiere del establecimiento de curvas de fragilidad que relacionan la pérdida económica con el tirante registrado durante la inundación. Para ello, es necesario conocer la distribución espacial de la inundación, el tirante inundable, la velocidad de los flujos, su duración, entre otros. En particular, este último factor tiene un

efecto considerable en la estimación de los daños asociados a la inundación ya que influye directamente en la paralización de los servicios básicos de la zona o región afectada (Merz *et al.*, 2007). De manera general, la mayoría de los estudios previos consideran al tirante de inundación como el parámetro más importante para la adecuada estimación de daños en casa habitación (Wind *et al.*, 1999, Merz *et al.*, 2007, Aerts *et al.*, 2008).

Además de las incertidumbres asociadas a modelos, datos y caracterización de la vulnerabilidad, un elemento adicional que no debe ser perdido de vista es aquél relacionado con las condiciones de un clima que está cambiando. En este escenario, se anticipa que el pasado no podrá ser utilizado para estimar las condiciones futuras respecto a forzamientos hidrometeorológicos, por lo que la cuantificación y evaluación de la incertidumbre es todavía más pertinente (Serevinatne *et al.*, 2012).

Es por ello que el presente trabajo, incorpora la separación del proceso de pronóstico en etapas, dado que de esta manera se puede diagnosticar con mayor fiabilidad la fuente de incertidumbre y su propagación a lo de la cadena de simulación numérica. Esto se logra a través del escalonamiento de modelos meteorológicos, hidrológicos e hidrodinámicos. La virtud del presente trabajo consiste en utilizar este marco para revisar la influencia de la incertidumbre epistémica en la caracterización de la amenaza, sobre la evaluación del nivel de daño generado por una inundación conocida.

Capítulo 2, Zona de estudio y eventos históricos

El presente capítulo documenta la configuración geográfica y morfológica de la zona de estudio, que corresponde a la cuenca baja del río La Sabana en el estado de Guerrero, México. Así mismo, se ilustra el comportamiento y distribución temporal de eventos históricos producto de inundaciones que históricamente han afectado esta región.

2.1 Zona de estudio

La zona seleccionada para el caso de estudio del presente trabajo de tesis, corresponde a la llanura de inundación del río La Sabana en las inmediaciones del desarrollo turístico conocido como Acapulco-Diamante en el Municipio de Acapulco, en el estado de Guerrero (ver Figura 2.1), la cual se vio gravemente afectado durante el paso del huracán Manuel en Septiembre de 2013 (Mejía-Estrada, 2014).

Históricamente tanto la población de la ciudad de Acapulco como la zona conurbada al noreste, conocida como Acapulco – Diamante, se han visto afectadas por inundaciones, principalmente como consecuencia de precipitaciones pluviales, producto de eventos hidrometeorológicos que han generado crecientes significativas del río La Sabana y en algunas ocasiones el desbordamiento del mismo.

Como parte de las características fisiográficas importantes de la cuenca hidrográfica del río La Sabana, destaca la red de drenaje, la cual ésta inscrita en los límites del parteaguas de la subcuenca, y representa una longitud total entre canales y cauces de poco menos de 106 kilómetros. Este sistema produce escurrimientos superficiales importantes como resultado de la incidencia de eventos climáticos importantes. Los cauces principales de aportación, en orden de importancia, que generan el nacimiento del río La Sabana, son; La Providencia (~20 km), Potrerillos (~23 km) y Moyoapa (~14 km). Otro parámetro fisiográfico considerable dentro de la subcuenca es el área de aportación de 460 km² aproximadamente, considerada por su tamaño como una cuenca *intermedia-pequeña*. De acuerdo a Mejía *et al.* (2014), en el cauce principal se presenta una pendiente media del 2.1% y el tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica es de 5 horas. De manera complementaria, es importante mencionar que una correcta determinación o estimación de parámetros fisiográficos de la cuenca aportan valor agregado en el desarrollo de la modelación hidrológica, ya que éstos entre otros factores, como la precipitación, influyen en la magnitud de los escurrimientos superficiales.

Con objeto de evaluar los efectos estimados producto de inundaciones en la infraestructura que integra la zona de estudio, esta infraestructura se visualiza en un formato tipo *shape*⁶ de polígono, donde dichos polígonos representan la delimitación superficial de las manzanas que integran la zona de estudio. Estos polígonos son generados por el Consejo

⁶ El formato *ESRI Shapefile* es un formato de archivo informático de datos espaciales desarrollado por la compañía *ESRI*. Un “*shapefile*” es un archivo vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. El formato *shape* en la actualidad se ha convertido en un formato estándar para el intercambio de información propia de *Sistemas de Información Geográfica (GIS)*.

Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) con el objetivo de mostrar, en colaboración con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), una serie de indicadores sobre la población y las viviendas, dichos polígonos son integrados en este trabajo para identificar espacialmente posibles afectaciones asociadas a las llanuras inundables dentro de la zona de estudio.



Figura 2.1 Configuración espacial de la zona de estudio, el cauce río La Sabana y la subcuenca de aportación hacia la infraestructura expuesta

De acuerdo a CEPAL 1998 el impacto económico, social y ecológico de los ciclones tropicales en tierras continentales origina numerosos daños causados por viento y precipitaciones, principalmente, al causar movimientos en masa, erosión e inundaciones en zonas bajas (o planicies) de una cuenca.

Con intención de poner en contexto la problemática asociada al evento registrado durante el mes de septiembre de 2013, cuando gran parte de la República Mexicana, sufrió la incidencia simultánea de dos ciclones tropicales, el huracán Ingrid en el Golfo de México y la tormenta tropical Manuel en su vertiente por el Pacífico. Este evento, tal y como lo reportan Pedrozo-Acuña *et al.* (2014) generó lluvias muy intensas en el periodo de tiempo definido entre los días 13 y 20 de septiembre (~700 mm / 48 horas), lo que produjo el desbordamiento del río La Sabana, afectando tal y como se aprecia en las fotografías, los desarrollos urbanos cercanos a las márgenes del cauce en la región conocida como Acapulco – Diamante, llegando inclusive a producir afectaciones dentro del aeropuerto internacional (ver Figura 2.2).



Figura 2.2 Principales afectaciones a la infraestructura producto del desbordamiento del río La Sabana tras la incidencia de los ciclones tropicales Ingrid y Manuel

Tal y como se aprecia en las imágenes de la Figura 2.2, la magnitud de la inundación producida por este evento hidrometeorológico deja claro que las consecuencias observadas en esta región se dan como resultado de una interacción entre la amenaza y la concentración de desarrollos humanos en zonas de alta exposición (Michel-Kerjan y Kunreuther, 2011).

En México, la falta de ordenamiento territorial adecuado ha producido la generación de riesgo como resultado de una mala planeación urbana, un ejemplo de lo anterior está justamente dado por este evento, la inundación de Acapulco-Diamante en septiembre de 2013. Durante el periodo definido entre los años 2002 y 2009, se autorizó la construcción de nuevos desarrollos urbanos que se asentaron en humedales y zonas naturales de inundación, ver Figura 2.3. Los cuales serían gravemente afectados durante el evento de septiembre de 2013.

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.

La urbanización trae consigo diversas oportunidades para el desarrollo económico y bienestar de la sociedad. Tan sólo en el último siglo, las zonas urbanas han sobrepasado a las zonas rurales en casi todas las dimensiones del desarrollo económico, sea la tasa de innovación, el nivel educativo, salud, esperanza de vida, mortandad infantil, y acceso al agua potable y servicios de sanidad (Reinoso *et al.*, 2015). Con la alta densidad poblacional, la concentración de bienes y más del 80% de las ciudades localizadas en cuencas, las inundaciones representan un reto significativo para su sostenibilidad en el futuro.

Las proyecciones no son muy optimistas por temas como el uso del suelo, y los cambios demográficos y socio-económicos. Las Naciones Unidas estiman un incremento global de 2.9 mil millones de residentes urbanos en los 90's a 5.0 mil millones para el año 2030. La mayor parte de este crecimiento ocurrirá en los países en vías de desarrollo, principalmente en megalópolis como la Ciudad de México, así como en ciudades medianas, con el consecuente incremento en el número de personas expuestas a inundaciones. Se espera que el crecimiento poblacional durante las próximas décadas se concentre en zonas urbanas, con 70% de la población total del planeta concentrándose en ciudades para 2050 (Seto *et al.*, 2010). En este sentido está claro que la concentración de personas y bienes, el aumento de las exposiciones y su valor, la ocupación de zonas de riesgo, son factores que impactan al momento de evaluar el aumento en el promedio de daños económicos registrados en las últimas tres décadas producto de catástrofes naturales (CCS 2008).

2. Zona de estudio y eventos históricos



Figura 2.3 Dinámica del desarrollo urbano en la planicie de inundación de la cuenca hidrográfica del río La Sabana (FUENTE: Google Earth. Imágenes; noviembre 2002 – enero 2015)

2.2 Eventos históricos

Con el propósito de revisar eventos anteriores registrados en el pasado reciente, dentro de la cuenca del río La Sabana, la siguiente figura presenta el registro de la estación hidrométrica conocida como km 21+000, en la que se aprecian los diversos gastos pico que ha presentado esta corriente. Tal y como se observa existen pocos registros históricos en los que dicho afluente ha rebasado los 1,000 m³/s en su caudal máximo.

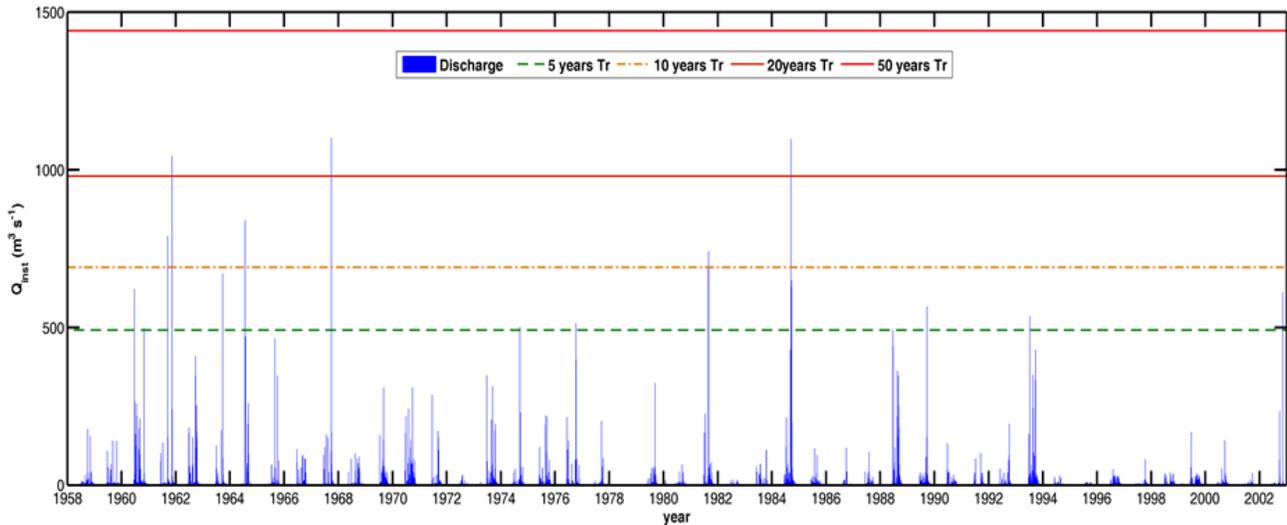


Figura 2.4 Registros históricos de gasto pico, m³/s, en la estación hidrométrica km 21+000

Estimaciones realizadas por CONAGUA, indicaron que el gasto máximo registrado durante el mes de septiembre de 2013 en este río ascendió a 1,300 m³/s, lo que da como resultado un caudal asociado a un periodo de retorno de entre 20 y 50 años. Dada la magnitud de esta avenida, es posible afirmar que en el caso del río La Sabana se presentó una interacción clara y negativa, entre un evento extremo y una mala planeación de desarrollos urbanos en esta zona.

A continuación y a manera de complemento, se presentan los resultados de una búsqueda de información en bases de datos de dominio público, a partir de las cuales es posible proveer un número sobre la frecuencia y los efectos de las inundaciones dentro de la zona de estudio.

Sistema de Inventario de Desastres Naturales, DesInventar

La primera fuente de información corresponde al Sistema de Inventario de Desastres, *DesInventar*, creado en 1994 y que corresponde a un sistema de consulta en línea con despliegue de información sobre desastres naturales de pequeño, mediano y gran impacto. Este sistema se produjo tomando como base datos preexistentes, fuentes hemerográficas

y reportes de instituciones en nueve países de América Latina. A través del mismo, es posible consultar, filtrar y generar una colección o base de datos con información asociada a eventos registrados, almacenados y estructurados que permiten ver a los desastres a diversas escalas temporales y espaciales.

En este sentido, se consultó dicha base de datos a fin de identificar eventos registrados y documentados con un origen hidrometeorológico dentro del municipio de Acapulco de Juárez en el estado de Guerrero. Dicha consulta genera una base de datos, filtrados y depurados bajo características o parámetros específicos de información para poder analizar y evaluar los eventos resultantes. Los eventos característicos, y que fueron filtrados, son definidos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Definición de eventos hidrometeorológicos filtrados en la base de datos DesInventar

Tipo de evento	Descripción
Inundación	Anegamiento o cubrimiento con agua de un terreno donde se localicen poblaciones, cultivos, bienes o infraestructura.
Tempestad	Lluvia acompañada de vientos fuertes y/o de descargas eléctricas (rayos, relámpagos). En general y también en razón de connotaciones regionales, puede no ser posible diferenciar entre -tempestad- y -vendaval-. Palabras claves: tormenta.
Lluvias	Precipitación pluvial. Incluye lluvias puntuales, persistentes o torrenciales en una región específica, así como períodos largos de precipitaciones. Palabras claves: aguacero, chaparrón, chubasco, diluvio, páramo (llovizna persistente cuando desemboca en desastres, por ejemplo en regiones áridas o semiáridas), turbonada.
Avenida torrencial	Flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbita, rápida), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como -avalancha-, cuando la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes, porque éstos implican desprendimiento de hielo o nieve.

Con base en lo publicado por DesInventar y definido en la Tabla 2.1, el total de eventos hidrometeorológicos registrados en Acapulco de Juárez para la ventana de tiempo de 1970 a 2013 alcanzan 128 eventos. Cabe señalar que dentro de esta base de datos, aún no se integra la información correspondiente a los daños producidos por los huracanes Ingrid y Manuel. Dentro de las cifras importantes que merece la pena resaltar, destaca que dentro de la zona analizada se presentan en promedio, 3.18 eventos hidrometeorológicos al año (ver apéndice, Tabla A. 1).

De acuerdo con esta información, la Figura 2.5 ilustra una gráfica con la distribución porcentual de los 130 registros históricos encontrados en la base de datos DesInventar como resultado de la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos en el municipio de Acapulco de Juárez durante el periodo de 1970 – 2013 (véase también la Tabla A. 1 en el apéndice A). En esta figura, se observan los 60 registros asociados a inundaciones, que representan para este periodo de tiempo el 46.88% del total histórico de eventos registrados.

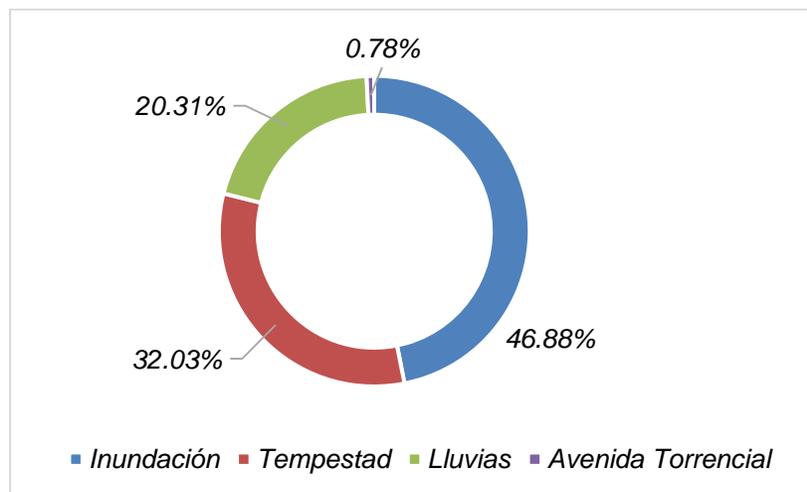


Figura 2.5 Porcentaje total de eventos históricos registrados

Con base en la información de esta base de datos, se registran en el municipio de Acapulco de Juárez pérdidas humanas caracterizadas por el deceso de 302 personas, como resultado de la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Por otro lado, respecto a la magnitud asociada a la incidencia de los huracanes Ingrid y Manuel, se registraron del orden de 157 decesos en todo el país, lo que representó el 52% del total de personas fallecidas reportado por DesInventar (Munich Re Group, 2014).

PreventionWeb

Otra fuente de consulta pública donde se refleja e impulsa la importancia de continuar con la investigación de las amenazas por fenómenos naturales es la fuente integrada por la plataforma *PreventionWeb*, en esta plataforma por medio de una interfaz gráfica es posible realizar, a través de consultas, una exploración bibliográfica de los distintos fenómenos naturales a una escala espacial y temporal.

PreventionWeb es una plataforma web participativa para la comunidad interesada en la Reducción del Riesgo por Desastres (*DDR*, por sus siglas en inglés). El objetivo principal consiste en facilitar la comprensión del tópico; reducción del riesgo por desastres naturales, de esta forma se satisface la necesidad de contar con información valiosa y útil para mejorar el entendimiento de las amenazas naturales.

Por lo tanto para la exploración bibliográfica desarrollada en *PreventionWeb* se decidió analizar la información asociada con los registros históricos producto de inundaciones⁷ y evaluar propiamente aquella información característica de la zona en estudio. Como resultado de la búsqueda en *PreventionWeb* fue posible identificar a través de un archivo

⁷ En términos de CRED una inundación es un desbordamiento de un cuerpo de agua, sea éste un río o lago, que inunda o acumula agua en la superficie de forma anormal debido al exceso de precipitaciones y al incremento del nivel de las aguas subterráneas por encima de la superficie en terrenos impermeables o saturados.

ráster la frecuencia de los eventos asociados con la amenaza de inundación para periodos o ventana de tiempo de 100 años, la Figura 2.6 presenta este resultado de forma gráfica, donde es posible apreciar que para la zona en estudio, se han presentado en promedio dos eventos en los últimos 100 años, tanto en la ciudad de Acapulco como en gran parte de su zona conurbada y la zona de Acapulco-Diamante.

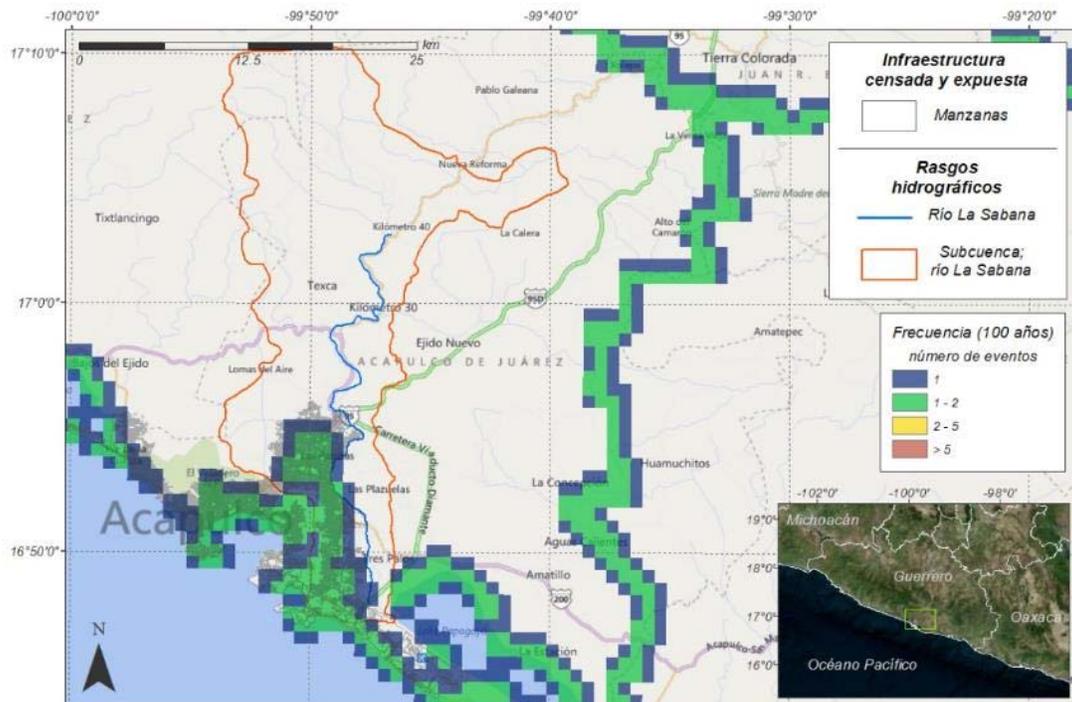


Figura 2.6 Frecuencia de eventos de inundación en una ventana de 100 años (Fuente: PreventionWeb). Diseño del autor.

Munich Re

Otro esquema con el cual se puede dejar antecedente del impacto generado tras la incidencia de los huracanes Ingrid y Manuel es a través de Munich Re Group, 2014. Al generar una comparativa a escala mundial donde se destacó que en el año 2013 (*“El año de las inundaciones”*) se experimentaron grandes inundaciones en varias regiones del mundo al encontrarse sumergidas en el transcurso de ese año. Haciéndose hincapié que esta amenaza rara vez había dominado las estadísticas anuales.

De los datos significativos publicados por Munich Re Group, 2014, destacar las afectaciones generadas por Ingrid y Manuel. Eventos que tras su interacción generaron en un lapso de 10 días una lámina de precipitación de 1,000 mm en algunas zonas costeras. Los centros turísticos de Acapulco y Culiacán en el Pacífico y en el estado de Veracruz, en el Golfo de México fueron particularmente impactados. En el complejo turístico Acapulco – Diamante, decenas de miles de personas quedaron incomunicadas por la intransitabilidad de superficies carreteras y por las afectaciones en el aeropuerto internacional. Alrededor de 13,500 viviendas presentaron algún nivel de inundación.

Tal y como se registra en las diversas bases de datos utilizadas en esta sección, existe en el caso de las inundaciones, una evidente interacción entre amenaza, vulnerabilidad y riesgo. La cual se mostró de manera muy clara en el caso de la llanura de inundación del río La Sabana. Así, no es novedad que cuando existan riesgos significativos, dentro de las respuestas que se planteen ante inundaciones extremas se requiere incorporar, cambios en el uso de suelo y el drenaje de la tierra, de tal suerte que se prevengan o desvíen estos flujos.

La planeación rural y urbana, que surge de una estrategia de reflexión y aprendizaje de experiencias anteriores, comprende parte fundamental del proceso de toma de decisiones, en la que una visión de largo plazo debe de considerar la adaptación de las zonas urbanas a su ubicación geográfica. Donde se considere una visión más sostenible del desarrollo, tomando en cuenta las condiciones climáticas y ambientales, y no exclusivamente basada en criterios socio-económicos. A pesar de lo anterior, cabe mencionar como nota precautoria, que no importa que tan bien planeado se encuentre un sistema o que tan bien preparados estemos, siempre habrá la posibilidad de que la naturaleza nos supere, por lo que nunca se debe perder de vista el aspecto de reacción ante una emergencia de origen hidrometeorológico.

2.3 Reflexión sobre la planeación urbana

El aspecto más importante de un programa para la adecuada gestión del riesgo por inundación en cualquier país, es la manera en la que se planifica el uso del suelo. En este aspecto, los mensajes clave de programas anteriores en diversas partes del mundo indican lo siguiente:

- I. Las defensas de protección en ríos y costas tienen el mayor potencial para la reducción del riesgo por inundación.
- II. 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.
- III. 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.

Existen medidas asociadas al ordenamiento territorial que están diseñadas en función del tipo de zona en la que se presentan, por ejemplo, medidas relacionadas con la ingeniería de ríos se presentan en la Tabla 2.2. Mientras que la Tabla 2.3 resume las medidas relacionadas con la gestión integral de inundaciones en áreas urbanas.

Tabla 2.2 Respuestas potenciales de gestión integral de inundaciones relacionadas a la planeación y gestión de uso de suelo en ingeniería de ríos (adaptada de von Lany y Palmer, 2007).

Grupo de respuesta	Medida específica	Tipo de respuesta
Cambios en la capacidad hidráulica del río y sus llanuras para reducir niveles.	Canalización de los afluentes del río. Construcción de canales de derivación.	Planeación y gestión del uso del suelo.
Almacenamiento de inundaciones.	Presas. Creación de humedales. Incrementar las áreas naturales de almacenamiento en llanuras. Proveer almacenamientos adyacentes al río.	
Construcción de defensas contra inundaciones.	Bordos perimetrales alrededor de zonas vulnerables.	

Tabla 2.3 Respuestas potenciales de gestión integral de inundaciones relacionadas a la planeación y gestión de uso de suelo en ingeniería de ríos (adaptada de Ashley y Saul, 2007).

Grupo de respuesta	Medida específica	Tipo de respuesta
Desarrollo constructivo, operación y forma.	Métodos de construcción. Forma de vivienda. Forma del drenaje local.	Planeación y gestión del uso del suelo.
Desarrollo del área urbana.	Disposición espacial de la ciudad y densidad de población.	Planeación de la ciudad y gestión del uso del suelo.
Control de flujos superficiales.	Almacenamientos locales.	
Almacenamientos sobre y bajo la superficie.	Almacenamientos sobre la superficie.	
Drenaje.	Cuando este sea sobre la superficie en canales y alcantarillas.	

Cuando existan riesgos significativos, las respuestas a las inundaciones requieren cambios en el uso de suelo y el drenaje de la tierra, de tal suerte que se prevengan o desvíen estos flujos. De otra forma, se recomienda que la planificación del uso de suelo sea considerada como parte del programa de gestión de inundaciones. La planeación rural y urbana, que surge de una estrategia de reflexión y aprendizaje de experiencias anteriores, comprende parte fundamental del proceso de toma de decisiones, en la que una visión de largo plazo debe de considerar la adaptación de las zonas urbanas a su ubicación geográfica. Donde se considere una visión más sostenible del desarrollo, tomando en cuenta las condiciones climáticas y ambientales, y no exclusivamente basada en criterios de beneficio económico.

Capítulo 3, Modelización del evento hidrometeorológico extremo

3.1 Estimación del ensamble para un evento de diseño

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 (Rodríguez-Rincón *et al.*, 2015) y el río Pánuco (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2015). 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.

De hecho, este encadenamiento de modelos fue probado con éxito para el evento registrado en Acapulco en 2013, por Mejía-Estrada (2014), sin considerar los efectos que la incertidumbre epistémica tiene en el resultado final. Así, esta tesis incorpora esta evaluación de la incertidumbre y sus efectos en el resultado a partir de tres etapas de modelación a saber: modelo atmosférico, modelo hidrológico y modelo hidrodinámico. Dentro de esta cadena de modelos, la incertidumbre epistémica se incorpora en la generación de ensambles meteorológicos, por medio de la variación de los parámetros de multi-física que permiten la producción de 16 campos de precipitación que representan al evento en cuestión. Estos campos sirven como datos de entrada al modelo hidrológico a fin de determinar diferentes posibilidades para caudal esperado de la incidencia de este evento meteorológico en el río La Sabana.

Estos caudales, son utilizados de manera probabilista como condiciones de forzamiento del modelo hidrodinámico bidimensional, para determinar las zonas afectadas por el evento hidrometeorológico. Así se tienen tres diferentes niveles de amenaza que pueden cruzarse con información correspondiente a la infraestructura urbana. Esto permite determinar los efectos de la incertidumbre en la estimación de daños por un evento climático extremo.

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 de alta resolución, así como imágenes de satélite de la zona afectada.

Este tipo de estrategias, que tienen su base en la caracterización de n eventos para una sola amenaza hidrometeorológica no es nuevo, pues ya ha sido presentada por diversos autores para la estimación de avenidas extraordinarias (Shrestha y Solomatine 2008). La incorporación del modelo hidrodinámico, como en el presente trabajo de tesis, permite revisar los efectos de estos errores epistémicos en la estimación del riesgo por inundación para un evento dado.

Por otro lado, Wang *et al.* (2011) puntualiza que esta noción ha sido ampliamente aceptada y puesta en práctica al considerar el uso de modelos que integren la caracterización de la amenaza y su vulnerabilidad, ya que proporciona una mejor comprensión de los posibles impactos que generan las inundaciones hacia la población.

Es evidente que una de las ventajas de desarrollar trabajos de investigación como el presente, consiste en proveer estimaciones de daño en zonas de información escasa, con lo que se anticipa su utilidad en el mejoramiento de la capacidad de respuesta de

organismos encargados de emergencias, gobiernos locales y la sociedad (IFRC 2008, ISDR, ITC, UNDP, 2010).

3.1.1 Modelo meteorológico

En este contexto, el trabajo desarrollado consideró el empleo de sistemas de predicción por ensambles (*EPS*, por sus siglas en inglés) de los resultados de modelaciones climáticas obtenidas por medio del modelo numérico de investigación y pronóstico meteorológico *WRF* (por sus siglas en inglés), el *WRF* es un sistema numérico de tipo no-hidrostático regional que resuelve las ecuaciones primitivas de la circulación atmosférica. El modelo meteorológico representa el estado de la atmósfera en una retícula o red tridimensional que sigue la topografía en términos de las variables; temperatura, presión, humedad y tres componentes de viento.

Como ha sido documentado, el modelo *WRF*, es una herramienta capaz de representar el estado de la atmósfera y predecir la precipitación asociada a un fenómeno meteorológico (Dudhia *et al.*, 2008). Con el propósito de reproducir el evento de septiembre de 2013, se simuló el periodo de tiempo definido por los días 12 y 20 del mismo mes. Para ello, se utilizaron dos dominios numéricos anidados de diferente resolución: el dominio 1 con una resolución en la malla de 20 km, y el dominio 2 de resolución de 4 km.

Como datos de entrada, se utilizaron los datos del Análisis Final Global (*Global Final Analysis*, FNL) a intervalos de 6 horas, suministrados por el Centro Norteamericano para Predicción del Medio Ambiente (*National Center for Environmental Prediction*, NCEP). Dentro del sistema de modelado con el modelo *WRF*, el uso de diferentes parametrizaciones permite la creación de un ensamble que limita la incertidumbre en las predicciones. Para la generación del ensamble, se utilizó el método de variación de parámetros de multi-física propuesto por diversos autores para la simulación de lluvias extremas (Bukovsky and Karoly 2009; Evans *et al.*, 2012; Efstathiou *et al.*, 2013; Cintineo *et al.*, 2014), así como otros estudios atmosféricos realizados en la región (López-Espinoza *et al.*, 2012).

A manera de un primer resultado, la Figura 3.1 introduce los 16 miembros que presentan los campos de precipitación estimada para este evento, en la que se reporta la precipitación acumulada para todo el evento. Tal y como se observa en la gráfica, existen diferencias sustanciales en cada uno de los resultados, respecto a la cantidad de lluvia estimada para este evento extremo.

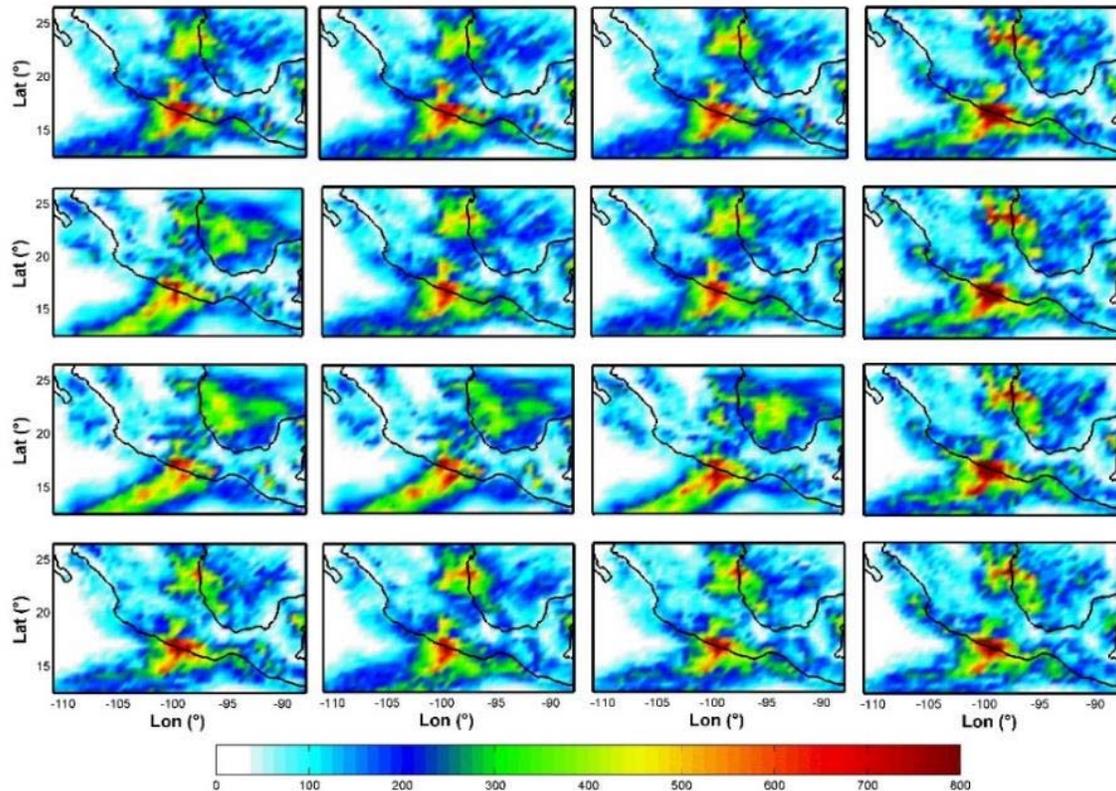


Figura 3.1 Resultados de 16 campos de precipitación acumulada, ciclones tropicales Ingrid y Manuel 2013

3.1.2 Modelo hidrológico

El modelo hidrológico utilizado para la generación de los hidrogramas en el río La Sabana es el *Modelo para Pronóstico de Escurrimiento* (MPE) desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., el cual estima la relación lluvia-escurrimiento en una cuenca por medio de la asignación de parámetros en celdas de cómputo, es decir es un modelo de parámetros distribuidos (Domínguez *et al.*, 2008). El modelo determina la relación lluvia-escurrimiento tomando como base el método del Número de Curva del *Soil Conservation Service* (SCS-CN) (USDA 1972), con una modificación que permite considerar el secado progresivo del suelo después de la ocurrencia de una tormenta, para calcular un hidrograma en cada celda de cómputo. Este modelo es capaz de reproducir; la precipitación media de la cuenca en un hietograma, la lluvia en exceso, las pérdidas asociadas a la evapotranspiración e infiltración y el hidrograma de salida de la cuenca. Una de las ventajas del MPE es la reproducción numérica de los efectos de evaporación por saturación del suelo en el tiempo, situación que resulta favorable en simulaciones que duran varios días. Este modelo ha resultado útil en el estudio de otras cuencas en México (Rodríguez-Rincón *et al.*, 2012; Pedrozo-Acuña *et al.*, 2013).

El MPE considera información detallada tanto de las características de la cuenca como de datos de precipitación. Específicamente, para determinar el número de curva en la cuenca, es indispensable considerar información que determine la edafología, cobertura vegetal y uso de suelo, así como información asociada a la dirección del flujo dentro de la cuenca (ver Tabla 3.1 y Figura A. 1 del apéndice). Cabe señalar que dentro del proceso de modelado, se presenta la influencia de incertidumbre en la definición de un conjunto de parámetros válido para el evento a reproducir.

Por otro lado en la simulación hidrológica, desde hace varios años diversos autores han reconocido el problema de la equifinalidad, que corresponde a la validez de varios conjuntos de parámetros que permiten simular de manera adecuada un hidrograma medido, es decir no hay una solución única (Beven y Binley, 1992). En este sentido, la misma herramienta numérica permite llegar a la misma solución a través de diferentes variaciones en los parámetros.

Este problema dio lugar a la metodología conocida como Estimación de Probabilidad e Incertidumbre Generalizada (*GLUE*, por sus siglas en inglés), la cual ha sido desarrollada de forma continua por Beven (2000) y Beven (2001). Esta técnica representa una extensión del análisis de sensibilidad en el que muchos conjuntos de parámetros del modelo se eligen al azar, con lo que se tiene la posibilidad de generar varias simulaciones de hidrogramas que pueden representar la realidad.

En el caso de este trabajo de investigación, lo que se propone es revisar los efectos de la incertidumbre epistémica generada en el modelo atmosférico para la estimación de la avenida y los daños inducidos. Es por ello que los parámetros en el modelo hidrológico son tomados de una manera determinista (ej. Fijos), y lo que cambia de miembro a miembro son los campos de precipitación utilizados para el forzamiento del caudal.

Para ello, se utilizan como datos de entrada en el MPE los 16 campos de precipitación resultantes del ensamble meteorológico (ej. Producido con la variación de parámetros de multi-física), de esta forma es posible propagar la incertidumbre hacia el modelo hidrológico para la estimación de la escorrentía. La Figura 3.2 muestra el ensamble hidrológico resultante para la cuenca del río La Sabana, asociado a la caracterización del ciclón tropical Manuel. En esta gráfica se muestran 16 hidrogramas igualmente válidos, que pueden representar la avenida generada por la incidencia del evento hidrometeorológico en cuestión.

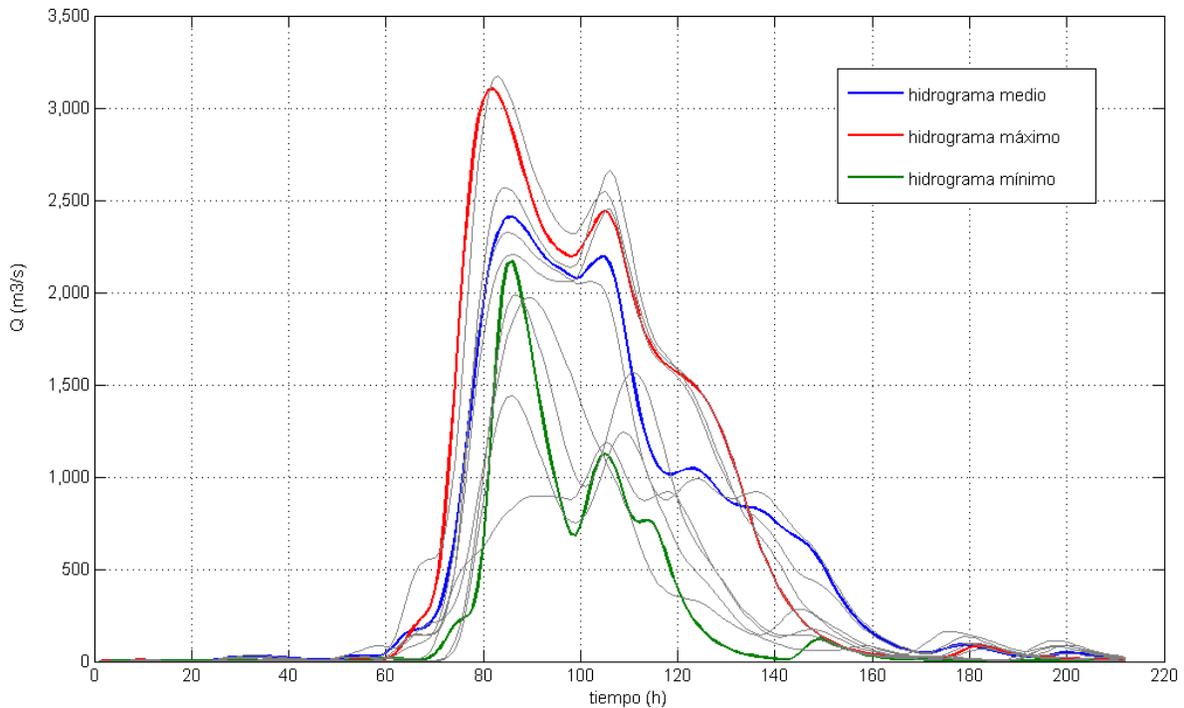


Figura 3.2 Hidrograma de descarga; río La Sabana

Para la puesta a punto del modelo hidrológico se utiliza información fisiográfica de la cuenca del río La Sabana, disponible en el sitio web del INEGI, esta información vectorial es integrada dentro de sistemas de información geográfica que permite relacionar topografía, cobertura vegetal y uso de suelo, así como de tipo de suelo definidos para la cuenca hidrográfica de la zona en estudio.

En la Tabla 3.1 se especifican parámetros complementarios y característicos utilizados para la cuenca en estudio. Estos parámetros son integrados para representar de manera fiel, la hidrología y los escurrimientos en la cuenca de estudio.

Tabla 3.1 Clasificación de características fisiográficas representativas en la cuenca del río La Sabana de

Parámetro	Descripción
Topografía	Parámetro indispensable en la caracterización de la red de drenaje, influye en la dirección y acumulación de flujo, así como en el orden de la corriente. (Elevación mínima, media y máxima; 0, 492 y 2,205 m.s.n.m.m.)
Tipo de suelo (edafología)	Parámetro que influye en la velocidad de infiltración en el suelo, relativo a la permeabilidad del suelo. (7 tipos de suelos).
Cobertura vegetal y uso de suelo	La presencia o ausencia de este parámetro determina la velocidad con que se desplaza el agua en la cuenca. Además se caracteriza por ser el elemento que amortigua e infiltra la precipitación. (5 usos de suelo y cobertura vegetal).

La información detallada correspondiente a la configuración espacial de los parámetros presentados en la Tabla 3.1 se presenta en el Apéndice de esta tesis, en la Figura A. 1, en donde se reportan además de los parámetros descritos, los límites del parteaguas, área de aportación, corrientes tributarias y cauce principal de la cuenca del río La Sabana.

3.2 Estimación de llanuras de inundación

3.2.1 Modelo hidrodinámico

Una vez definidos los hidrogramas asociados al escurrimiento considerando los 16 miembros del modelo meteorológico, la siguiente etapa de simulación consiste en utilizar esta información como condición de forzamiento de un modelo hidrodinámico de dos dimensiones. Esta última herramienta permite generar mapas de inundación que identifican de manera geográfica, las áreas afectadas por este evento climático y el nivel máximo alcanzado durante la incidencia del evento.

Con el propósito de disminuir el costo computacional asociado a la ejecución de 16 simulaciones con el modelo hidrodinámico, se decidió reducir los 16 hidrogramas a tres escenarios que contienen las condiciones de flujo mínimo, medio y máximo. De esta manera, se pueden establecer diferencias claras entre estos escenarios, los cuales serán utilizados para establecer los niveles de daño esperado (con niveles mínimo y máximo) por la incidencia de este evento hidrometeorológico.

Para ello se utilizó el modelo hidrodinámico bidimensional conocido como MIKE21, que resuelve numéricamente las ecuaciones promediadas de Reynolds, asumiendo hipótesis de incompresibilidad, suposiciones de flujo de Boussinesq y presión hidrostática. Esta herramienta, desarrollada por el *Danish Hydraulic Institute* (DHI, 2014) resuelve las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento considerando un esquema de cierre de turbulencia.

La puesta a punto del modelo hidrodinámico requiere de la discretización de información topográfica y batimétrica, con una resolución que sea capaz de reproducir de la manera real el terreno y las condiciones de rugosidad en la zona de estudio. En este trabajo, y siguiendo el esfuerzo presentado por Mejía-Estrada (2014), para la zona urbana en la vecindad del río La Sabana, se utilizó información correspondiente a datos de elevación adquiridos por medio de un sistema de altimetría láser (LiDAR por sus siglas en inglés), a partir de los cuales fue posible producir un modelo digital de elevaciones con resolución de 2m y alta precisión vertical (suficientes para la simulación adecuada de inundaciones urbanas). En aquellas zonas donde se requirió (fuera de la zona urbana) se utilizó de manera complementaria la información de libre acceso proveniente de la misión de la Agencia Espacial Estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés) conocida como *Shuttle Radar Topographic Mission* con una resolución de 90 m.

En la Tabla 3.2, se presentan los gastos diarios simulados con el modelo hidrológico para los tres hidrogramas considerados en este ejercicio. En donde se aprecia que el gasto máximo alcanzado, bajo el hidrograma de menor condición de flujo simulado en este marco de trabajo, está dado por un caudal de 1,811m³/s, mientras que el máximo caudal esperado es de 2,761m³/s. La simulación de estas avenidas permite revisar los efectos de la incertidumbre en la estimación del gasto pico en el hidrograma a dos variables clave para la estimación de daños: el área afectada y el tirante máximo.

Tabla 3.2 Gastos diarios simulados en los hidrogramas mínimo, medio y máximo en el río La Sabana

hidrogramas:		
mínimo (m³/s)	medio (m³/s)	máximo (m³/s)
0	0	0
1.0	2.0	5.7
0.2	2.0	1.6
2.6	26.4	4.4
0.6	9.5	1.1
4.4	29.4	13.6
9.0	175.8	227.0
300.8	1,512.3	2,761.9
1,811.5	2,326.0	2,590.5
735.5	2,081.9	2,236.6
767.5	1,496.3	1,968.0
279.2	1,044.1	1,527.0
44.4	841.77	943.7
22.0	679.5	268.2
63.1	285.0	69.0
11.2	72.0	17.6
3.8	84.2	39.9
0.9	38.5	50.3
5.2	44.7	17.5
0.0	13.6	4.1

3.2.2 Mapas de inundación

Los resultados numéricos producidos para los tres escenarios seleccionados permiten producir tres mapas de inundación que resumen el rango de afectaciones esperadas por la incidencia de este evento extremo. La Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5 presentan estos resultados de manera geográfica, en donde se aprecian claras diferencias en la distribución espacial de la inundación para las tres condiciones de flujo simuladas. De manera complementaria, estas figuras incorporan, por medio de polígonos a nivel manzana, la

ubicación espacial de la infraestructura expuesta (casas habitación) dentro de los desarrollos urbanos construidos en la llanura de inundación del río La Sabana.

Para mayor claridad, los niveles alcanzados por el tirante de agua durante el evento, se representan por medio de una escala de colores, en la que el azul claro representa tirantes pequeños de 0.1 m mientras que colores azules más oscuros representan cotas de inundación de hasta 5 m.

Mapa de inundación considerando el hidrograma de menor gasto

La Figura 3.3, presenta la inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma con menor condición de gasto, en donde se aprecia que dentro de la zona afectada por la inundación, se registran tirantes menores a 2.5 m en el 86% de la superficie total inundada. Mientras que el 14% del área restante, registró tirantes superiores a este valor. Cabe señalar que las zonas donde se generó mayor tirante, están localizadas en zonas adyacentes al cauce del río La Sabana. Por otro lado, se calculó el tirante promedio en la zona inundada bajo esta condición de flujo, obteniéndose un valor de 1.51 m.

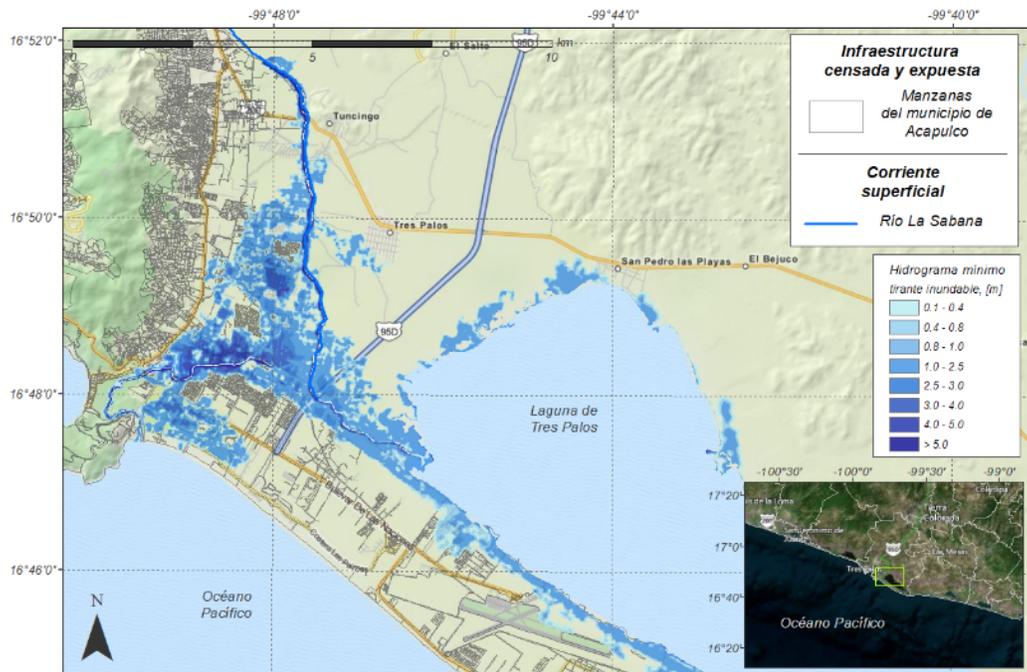


Figura 3.3 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma con menor condición de gasto

En el mapa de inundación producido para la menor condición de flujo, se identifican zonas de inundación que efectivamente resultaron afectadas durante el paso del huracán Manuel en septiembre de 2013. Entre estas zonas están la colonia Las Gaviotas, la parte sur de la colonia Alborada Cardenista y la zona de Acapulco Diamante, en la vecindad del Centro comercial COSTCO y el Hotel *Princess*. Adicionalmente, cabe señalar que bajo esta

condición de flujo (la más favorable de los 16 ensambles), se aprecia el desbordamiento de la Laguna de Tres Palos, particularmente en la zona del aeropuerto internacional de Acapulco, el cual resultó afectado por lo que tuvo que suspender su operación durante unas horas del 16 de septiembre.

Mapa de inundación considerando el hidrograma con gasto promedio

De igual manera, la Figura 3.4 presenta los resultados de la superficie inundada bajo las condiciones de flujo definidas por el promedio de los 16 hidrogramas que resultaron de los ensambles meteorológicos. En este caso, la zona afectada por la inundación es considerablemente mayor a la del caso anterior. Además, los tirantes de agua menores a 2.5 m representan el 75% de la superficie total afectada, mientras que el 25% del área superó los niveles de agua definidos por este umbral. Tal y como se aprecia en el resultado, las zonas con tirantes más grandes son aquellas cercanas al cauce del río La Sabana y a la Laguna de Tres Palos. El valor promedio estimado para el nivel de agua dentro de la zona afectada por la inundación fue de 1.68 m, lo que corresponde a un nivel de agua 12% mayor que aquél calculado para la condición mínima.

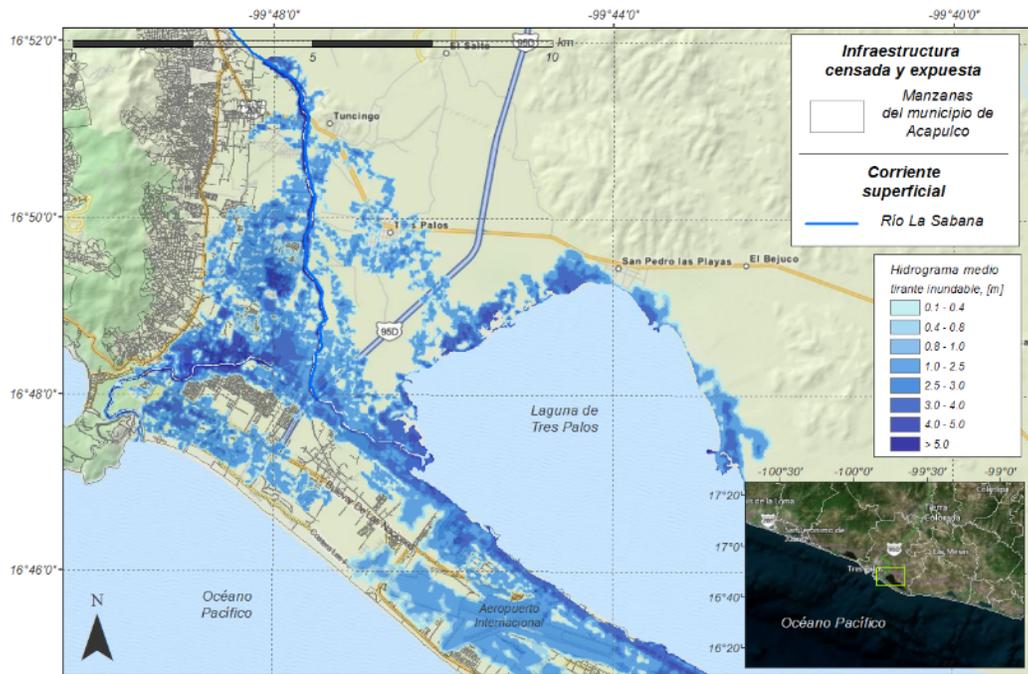


Figura 3.4 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma de condición de gasto promedio

En esta Figura 3.4 se aprecia una completa inundación de la zona del aeropuerto internacional de Acapulco, así como el desbordamiento severo (con niveles de agua muy altos) en la región de la margen de la laguna de Tres Palos. De acuerdo con la comparación de las afectaciones registradas durante el evento de 2013, a manera de ejemplo, se

presentó la inundación parcial del aeropuerto hasta una cota de +3m sobre el nivel del mar; mientras que en los resultados numéricos del hidrograma promedio se estima una inundación más severa con una cota de inundación en el aeropuerto correspondiente a la elevación +5.4m. Además, el área de inundación reproducida de forma numérica, es en este caso más grande que aquella registrada en imágenes de satélite.

Mapa de inundación considerando el hidrograma de mayor gasto

En el caso de la simulación del hidrograma con la condición de flujo más desfavorable (gasto máximo), los resultados son muy similares a aquellos encontrados para el gasto de condiciones promedio. El mapa de inundación se presenta en la Figura 3.5, donde una vez más se registran afectaciones graves en la zona del aeropuerto internacional. Para estas condiciones de flujo, el 75% de la zona inundada presenta tirantes menores a los 2.5m, mientras que el 25% restante de la mancha de inundación contiene niveles de agua por encima de ese nivel. El tirante promedio para el total de la superficie inundada en este ejercicio numérico fue de 1.74 m (15% superior al tirante estimado para la simulación con el hidrograma de menor gasto y 3.5% mayor al calculado para las condiciones promedio).

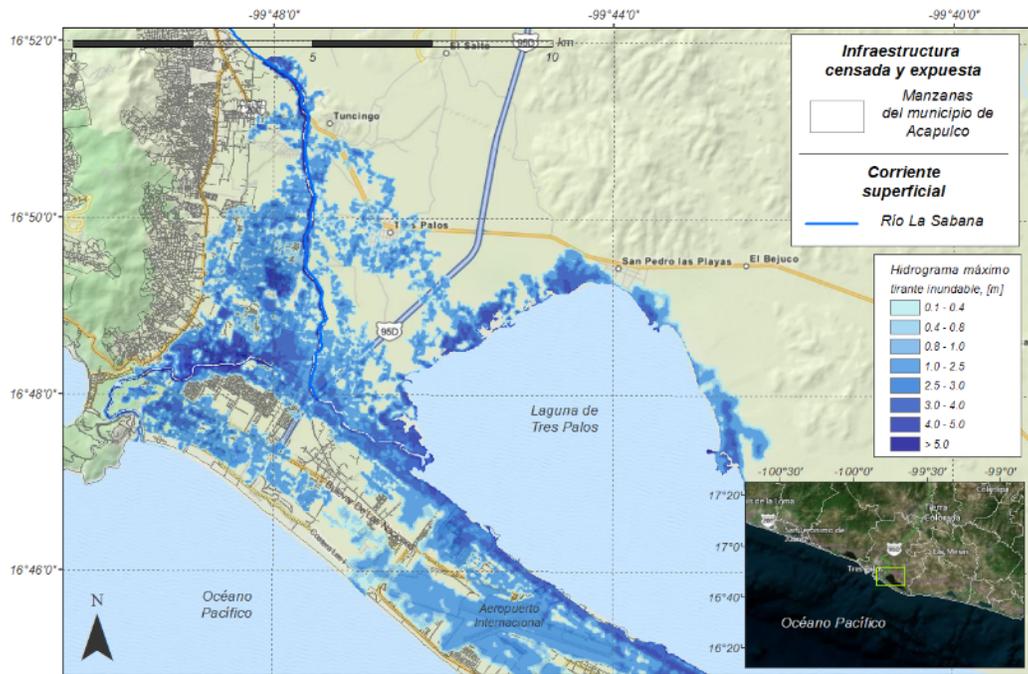


Figura 3.5 Inundación generada por la simulación hidrodinámica del hidrograma con mayor condición de gasto

Finalmente, a manera de resumen, y considerando los resultados presentados bajo las tres condiciones de flujo seleccionadas para este evento hidrometeorológico, se presentan dos tablas con la comparación del área total inundada registrada bajo cada condición, y la

distribución espacial de los tirantes máximos en toda la zona inundable. Estos resultados se reportan en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4, respectivamente.

En la Tabla 3.3 reporta para el caso del hidrograma de menor gasto, una superficie inundada de 23 km², mientras que para el caso del hidrograma promedio fue de un poco menos de 48 km², lo que representa, un incremento considerable de 107.8% respecto a la condición de menor gasto.

Por último, para el caso de las condiciones de flujo con el gasto máximo, se registra una superficie afectada de 50.53 km², lo que representa sólo un incremento muy moderado de 5.6% respecto al hidrograma promedio.

Tabla 3.3 Superficie inundable asociada al tránsito de los tres hidrogramas

hidrograma	llanura inundable (km ²)	incremento porcentual	superficie inundada en km ²
mínimo	23.01	-	
medio	47.82	107.8 %	
máximo	50.53	5.6 %	

Estos resultados, señalan que los cambios drásticos de las áreas inundables identificadas se presentan entre aquellas simuladas bajo condiciones de flujo con menor gasto y las estimadas para condiciones promedio y de gasto máximo (que son similares). En este sentido y para efectos prácticos, la incertidumbre en la caracterización de la amenaza tiene implicaciones considerables, pues hay una diferencia de 119.6% en el área estimada para un mismo evento.

El contar con la cuantificación de los valores máximo y mínimo del área inundada que se pueden presentar por un evento, es crucial para la definición de pólizas de seguro a la infraestructura, y puede ser útil para un adecuado ordenamiento territorial de la zona.

Por otro lado, la Tabla 3.4, presenta un análisis de la información referente a los niveles de inundación dentro del área afectada bajo los tres escenarios simulados. En esta tabla, se presentan los porcentajes en función del área total inundada que contiene cotas de inundación por encima y por debajo de un valor umbral definido por 2.5 m. (ver Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5). Es evidente también en este resultado, que la severidad de la inundación es muy parecida para las condiciones de flujo definidas por el promedio y el gasto máximo considerados.

Tabla 3.4 Porcentajes característicos de tirantes inundables en las llanuras de inundación

Tirante inundable	hidrograma		
	mínimo	medio	máximo
< 2.5 m	85.7 %	75.1 %	74.6 %
> 2.5 m	14.3 %	24.9 %	25.4 %
tirante promedio [m]	1.51	1.68	1.74
< 0.4 m	14.8 %	10.9 %	10.5 %
0.4 – 4.0 m	81.5 %	84.7 %	83.8 %
> 4.0 m	3.7 %	4.4 %	5.6 %

Por último, para tener una relación de que tan buenos son los resultados numéricos respecto a aquello registrado durante el evento de 2013, la Figura 3.6 presenta la comparación de las áreas inundadas con el hidrograma de menor condición de gasto (panel izquierdo) con la imagen infrarroja de satélite tomada el 18 de septiembre de 2013 (panel derecho). En el caso de la imagen de satélite, se determinó un área afectada por la inundación de 18.1 km², obtenida por medio del Índice Diferencial de Agua Normalizado (*Normalized Difference Water Index*⁸). En el caso de la condición de flujo mínimo, el área inundada resultado de la simulación fue de 23 km², con lo que de las tres condiciones empleadas, fue la que presentó mayor similitud respecto a lo observado durante el evento.

Notablemente, para el caso de la simulación de este evento, es posible afirmar que el marco de trabajo seleccionado sobreestima bajo todas las condiciones consideradas, la magnitud del área afectada por la inundación. Cabe señalar que existe además una posible fuente de incertidumbre en esta comparación de zonas inundadas, que se debe a la no simultaneidad de la imagen de satélite con el máximo nivel de afectación registrado durante el evento. La imagen utilizada corresponde a un momento durante el evento que está entre 48 y 72 horas después del paso de la avenida máxima. Por lo que es probable que para el momento en el que se tomó la imagen parte de las zonas afectadas ya estuvieran drenadas.

⁸ El Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés) se utiliza como una medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Generalmente se estima a partir de imágenes satelitales que brindan información de reflectancia de una determinada zona en diferentes bandas de frecuencia del espectro electromagnético.

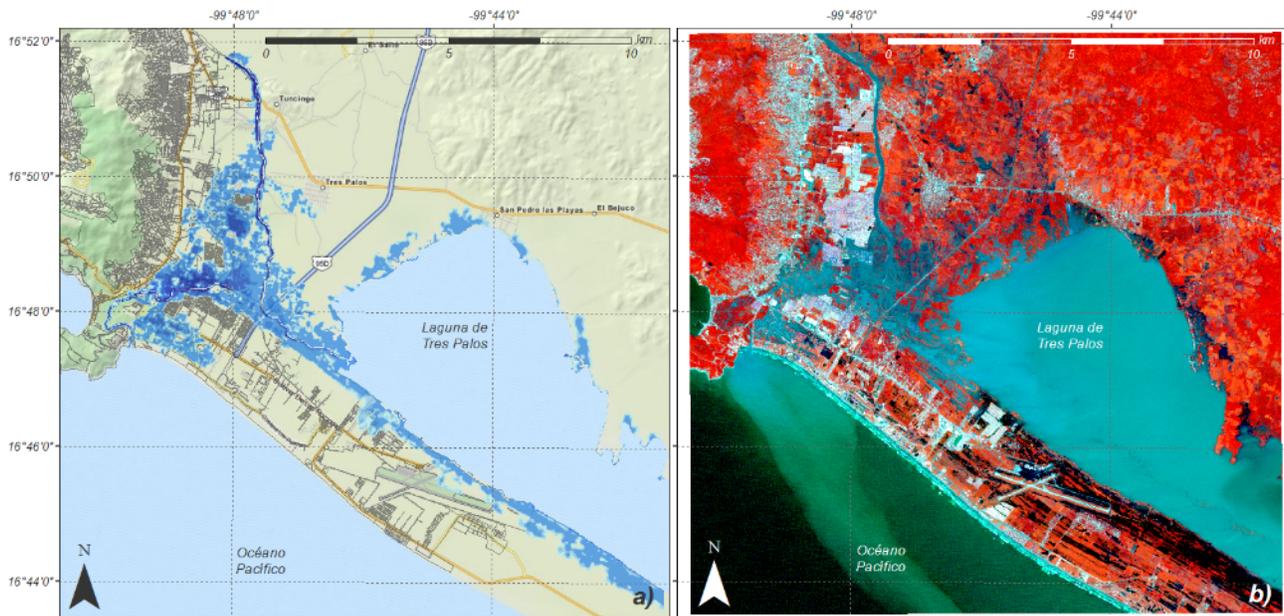


Figura 3.6 Comparativa de la distribución espacial de las llanuras de inundación; a) tránsito del hidrograma mínimo, b) imagen infrarroja de satélite

Los resultados presentados en este trabajo, respecto a la incertidumbre en la caracterización de una amenaza para un evento en particular, ejemplifican de manera clara lo susceptible de la estimación del riesgo ante errores en la amenaza. Además, de la dificultad intrínseca en la valoración de las afectaciones ocurridas en la realidad.

Es por ello que la generación de mejores estrategias para el manejo del riesgo, pasa de manera forzosa por una mejor comunicación entre la academia, el gobierno y la sociedad. Para ello, la honestidad resalta como la mejor política, pues favorece el incremento en los niveles de confianza de la sociedad hacia las opciones de protección que se propongan desde el gobierno (Pedrozo-Acuña, 2012). Una vía natural para hacer frente a los eventos extremos que se avecinan, es a través de la aplicación del principio de precaución, en el que la acción preventiva se realiza sin esperar los resultados concretos de la evidencia científica (Stirling, 2007). Es decir, la prevención toma un rol decisivo durante la evaluación y el manejo del riesgo de inundaciones.

En países en vías de desarrollo, la predicción adecuada de eventos extremos (ej. inundaciones) es trascendental para permitir una mejor gestión de los recursos disponibles, que por otro lado están limitados debido a la alta vulnerabilidad de la sociedad durante su incidencia. La exposición continua a eventos extremos no anticipados, es un factor determinante en la persistencia de la pobreza y la desigualdad social. Es posible prever que la diseminación de pronósticos probabilísticos a una comunidad informada, reducirán el crecimiento de la pobreza producida por la exposición de las poblaciones a eventos no anticipados (ej. Webster y Hoyos, 2004). Además, permitirán una mejor adaptación de la sociedad ante estos fenómenos en el corto y largo plazo.

Capítulo 4, Estimación de vulnerabilidad

La gestión del riesgo por desastres requiere de la definición de conceptos básicos como son amenaza, exposición, vulnerabilidad, resistencia, resiliencia y capacidad de respuesta ante un evento así como capacidad adaptativa. Sin embargo, en la mayoría de estos conceptos, es difícil encontrar un consenso tal y como lo señalan Gallopin, (2006) y Cutter *et al.* (2008).

La amenaza o peligro, representa la probabilidad de un fenómeno capaz de producir daño. En el contexto de inundaciones fluviales, como la que nos atañe en este trabajo, esta se expresa por la probabilidad e intensidad de las avenidas que resultan en inundaciones y depende de los procesos hidrológicos asociados a la relación lluvia-escurrimiento y a su tránsito hacia la llanura de inundación.

La vulnerabilidad representa los procesos sociales, y está comprendida por la exposición y la susceptibilidad, así como la capacidad de respuesta (Merz *et al.*, 2010).

Por ejemplo, la exposición de una comunidad propensa a inundaciones es igual a los bienes que pueden ser afectados. En su sentido más amplio, los bienes comprenden la infraestructura construida, los sistemas socio-económicos, y el medio ambiente. Y su ubicación no está restringida a la llanura de inundación, pues avenidas extremas pueden invadir zonas que no se hayan identificado con anterioridad, además de que los daños indirectos tienen impacto fuera de la zona de inundación.

Por otro lado, la susceptibilidad representa el grado de daño ocasionado al sistema por ciertas inundaciones. Por ejemplo, edificios con medidas preventivas son afectados de manera menos grave, o ciudadanos preparados y un adecuado sistema de alertamiento también reducen el daño.

La capacidad de respuesta describe la habilidad de un sistema para recuperarse después de un evento. En este caso, los dueños de los edificios con mayor capacidad económica o con pólizas de seguro contra inundaciones, tienen mayor capacidad de reparar los daños y recuperarse.

Por último, la capacidad de adaptación es la habilidad para ajustarse a cambios observados o esperados en la estimación del riesgo. Esta adaptación puede darse por medio del cambio en la susceptibilidad, el incremento en la capacidad de respuesta o en la reducción de la vulnerabilidad.

El concepto de vulnerabilidad involucra varias dimensiones (De Bruijn, 2005; Cutter *et al.*, 2008; McDaniels *et al.*, 2008), por ejemplo: la social (e.g. edad; nivel educativo, cohesión social), económica (e.g. abundancia de recursos económicos), y organizacional/institucional (e.g. libre acceso a la información, ordenamiento territorial, reglamentos de construcción). A pesar de que la vulnerabilidad es una característica local, está influenciada por aspectos nacionales y regionales.

Diversos estudios han intentado evaluar las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad en poblaciones debido a peligros naturales (ej. Laverde-Barajas, 2013) y a pesar de que existen diversos indicadores para su cuantificación, los problemas debidos a la generación de métricas consistentes en todos los casos permanecen (Cutter *et al.*, 2008).

En esta sección, considerando que el riesgo por inundación es función del producto de la amenaza por la vulnerabilidad; se utilizarán para el caso de las inundaciones por el huracán Manuel en Acapulco-Diamante, las tres condiciones de flujo que resultaron de incorporar la incertidumbre en la definición de la amenaza de inundación. El propósito de este ejercicio consiste en demostrar el grado de variación en la estimación del daño, que se produce cuando no hay certeza en la valoración de la amenaza por inundación. En este sentido, se presenta la caracterización de la vulnerabilidad a través de la descripción a nivel local de la infraestructura construida sobre la llanura de inundación, en su mayoría constituida por casas habitación de descanso. Los fraccionamientos utilizados en este estudio incluyen *Joyas del Marqués II* y *Llano Largo* (integrado por las colonias habitacionales Las Gaviotas, La Marquesa y Llano Largo).

4.1 Infraestructura expuesta

En sintonía con la conceptualización propuesta por Merz *et al.* (2011), donde la vulnerabilidad es igual al producto de exposición y susceptibilidad, es necesario definir el grado de exposición dentro de la zona de estudio. Por las características de la infraestructura, en este caso se define a la exposición como la infraestructura asociada al sector vivienda.

Para mayor claridad, la Figura 4.1 presenta la distribución espacial de la zona a revisar, tal y como se observa, la zona se ubica en la margen derecha del río La Sabana, que resultó gravemente afectada durante las inundaciones producidas por los ciclones tropicales Ingrid y Manuel en 2013. Para mayor claridad, se delimita en la figura con un cuadro de color naranja. La infraestructura expuesta dentro de esta zona está integrada por el conjunto de viviendas ubicado dentro de las colonias Las Gaviotas y La Marquesa.



Figura 4.1 Distribución geográfica del desarrollo urbano en la zona de influencia
(FUENTE: Google Earth. Imagen enero 2015)

Por otra parte, la susceptibilidad, es decir el concepto que define la manera en que serán dañados o afectados los elementos expuestos, se describe de manera regular por medio de funciones de daño o fragilidad que valoran el nivel de daño económico a partir de relacionar el tirante de inundación máximo con el uso y características estructurales de los elementos expuestos (Wind *et al.*, 1999; NRC 2000).

La información referente a las características de la infraestructura inscrita en el área de influencia, se obtuvo a partir de bases de datos del Inventario Nacional de Viviendas

producido por el INEGI, emitido con la información del Censo de Población y Vivienda 2010. La base de datos vectoriales integra un total 10,000 viviendas distribuidas en 638 manzanas, de las cuales 333 manzanas se encuentran habitadas. Esto representa 1,306 viviendas involucradas con un total estimado de 2,240 habitantes considerando un promedio de 1.7 habitantes por vivienda (ver Figura 4.2).



Figura 4.2 Distribución geográfica de la infraestructura censada y expuesta (conjunto habitacional Joyas del Marqués II Llano Largo)

Adicionalmente, la Tabla 4.1 presenta un resumen tabular de estos datos vectoriales asociados al sector vivienda considerados en este trabajo dentro del área de influencia. Las variables analizadas comprenden: el número de manzanas, viviendas, así como la población susceptible a inundaciones.

Tabla 4.1 Descripción de la estructura de datos vectoriales. Infraestructura y características del área de influencia expuesta

Variable	Descripción y categoría	Total
Total de viviendas	Viviendas particulares habitadas, deshabitadas, de uso temporal y colectivas ¹ .	10,000
Total de viviendas habitadas	Viviendas particulares y colectivas habitadas ¹ .	776
Viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas, incluye viviendas móviles y refugios ¹ .	461
Viviendas particulares en departamento en edificio	Viviendas particulares habitadas cuya clase es departamento en edificio.	69

Variable	Descripción y categoría	Total
Población total	Total de personas que residen habitualmente. Incluye la estimación del número de personas en viviendas particulares sin información de ocupantes, así como la población que no especificó su edad.	2,240

¹ Incluye a las viviendas particulares sin información de ocupantes.

FUENTE: INEGI. *Censo de Población y Vivienda 2010*

Una vez definida esta información de exposición, es posible cruzar los escenarios de amenaza encontrados en el capítulo anterior de tal manera que, para el evento en cuestión se definan las condiciones de vulnerabilidad en caso de no contar con una definición certera de la amenaza.

Los resultados para los tres escenarios de flujo definidos se presentan en la Figura 4.3 donde por medio del color se identifican a las manzanas o bloques habitacionales expuestos a la inundación. En esta figura, el panel superior presenta las condiciones de flujo con menor gasto, el panel intermedio las condiciones de flujo con gasto promedio y el panel inferior las condiciones de gasto más desfavorables. Para su mejor comparación se utiliza un código de colores que representa el grado de afectación dentro de la zona de influencia, por ejemplo aquellos bloques en color azul representan tirantes de agua entre 10 y 40 cm, mientras que aquellos en color rojo identifican a aquellos bloques expuestos a niveles de agua que rebasan los 4 m.

De la comparación de los tres escenarios, es posible observar los efectos de una amenaza incierta (definida con tres hidrogramas) en la estimación espacial de los niveles de inundación para la zona urbana en cuestión. En el panel superior, claramente se observa que solo una manzana rebasa los 4 m de tirante inundable mientras que en el caso de los hidrogramas más desfavorables (ej. Mayor gasto), la parte central del área es gravemente afectada por este evento.

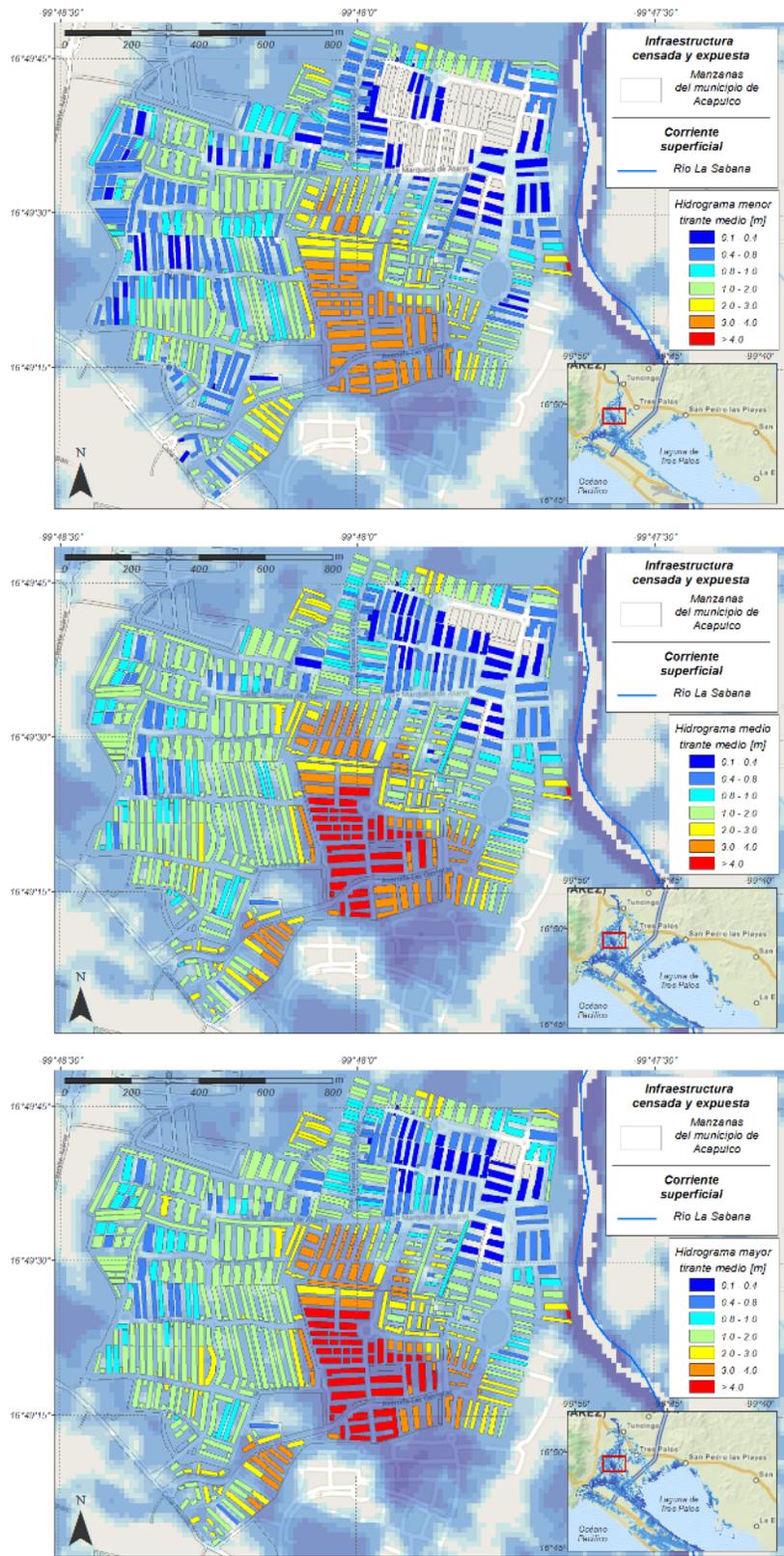


Figura 4.3 Tirantes medios inundables en las delimitaciones de manzanas, producto de las simulaciones de los hidrogramas; a) mínimo, b) medio, c) máximo

4.2 Caracterización de niveles de vulnerabilidad

Es posible definir a la vulnerabilidad como la susceptibilidad de una unidad social, estructura física o actividad económica a sufrir afectaciones tras la incidencia de una amenaza. Es decir, no solo es resultado de un evento extremo que sucede en la atmósfera, sino también y de forma muy importante, de un desarrollo no planificado de la infraestructura. (Eger y Aquino, 2006).

Existe hoy en día una vasta literatura sobre los cambios que se avecinan en el peligro por inundación a nivel global para diversas regiones del mundo. Así en el estricto sentido, considerando la intensidad y probabilidad de excedencia de una inundación dentro de una zona vulnerable, se anticipa que si esta área permanece estática en el tiempo, dentro de un futuro inmediato experimentará daños más severos por las condiciones de un clima cambiante (Merz *et al.*, 2007; Apel *et al.*, 2008). Sin embargo, la interacción con el desarrollo de las ciudades y los países es algo que poco a poco comienza a ser tomado en cuenta. Pues tal y como se observa en el evento de Acapulco, el riesgo puede aumentar en función de un desarrollo económico poco planificado. Por lo tanto, hoy día se reconocen a los forzamientos sociales y económicos del riesgo por inundación (Mitchell, 2003).

De esta forma una vez que se ha cruzado la información sobre la amenaza y la infraestructura expuesta, es posible determinar y caracterizar la vulnerabilidad de los bloques de vivienda estudiados.

Para ello, se utiliza la información correspondiente a los tirantes de inundación a escala de bloque o manzana, considerando para ello los tres hidrogramas definidos por la incidencia del huracán Manuel en la región.

Bajo los tres escenarios simulados, se presentan a nivel manzana, diferentes zonas de afectación definidas con respecto al porcentaje del área del bloque cubierta por el agua. En este sentido, se utiliza esta información para definir cinco niveles de vulnerabilidad (ver Tabla 4.2), muy bajo cuando el área inundada sea de un máximo de 20% del total, hasta muy alto que considera un nivel de inundación superior al 80% del área de la manzana.

Tabla 4.2 Niveles de vulnerabilidad a nivel manzana en función de la llanura inundable

Superficie inundable	Nivel de vulnerabilidad
0 – 20 %	Muy bajo
20 – 40 %	Bajo
40 – 60 %	Medio
60 – 80 %	Alto
80 – 100 %	Muy alto

La Figura 4.4 ilustra los niveles de vulnerabilidad identificados en la zona, a partir de los tres hidrogramas considerados en la simulación hidrodinámica. Es evidente que existen claras diferencias entre las condiciones de flujo más favorables (menor gasto) y las dos restantes (gasto promedio y máximo esperado). En particular se aprecia una zona en la parte noreste del dominio que bajo las condiciones de menor gasto que no se inunda, y por lo tanto no representa una vulnerabilidad alta ante este evento.

De forma complementaria, la Tabla 4.3 presenta las cifras del número de habitantes y de viviendas que integraron cada uno de los niveles de vulnerabilidad asociados con el tránsito de los tres hidrogramas.

Tabla 4.3 Distribución ponderada de niveles de vulnerabilidad a nivel manzana

Nivel de Vulnerabilidad	Hidrograma:					
	mínimo		medio		máximo	
	viviendas	habitantes	viviendas	habitantes	viviendas	habitantes
Muy Bajo	1,828	369	650	151	446	138
Bajo	453	119	389	68	440	54
Medio	1,085	228	553	149	309	82
Alto	450	104	320	57	284	53
Muy Alto	6,184	1,420	8,088	1,815	8,521	1,913

Una vez definidos ambos, el nivel de la inundación y la vulnerabilidad dentro de la zona de estudio, para unas condiciones de amenaza inciertas, es posible evaluar el efecto que esta incertidumbre tiene sobre el análisis y evaluación del daño, lo cual se presenta en el siguiente capítulo de este trabajo de investigación.

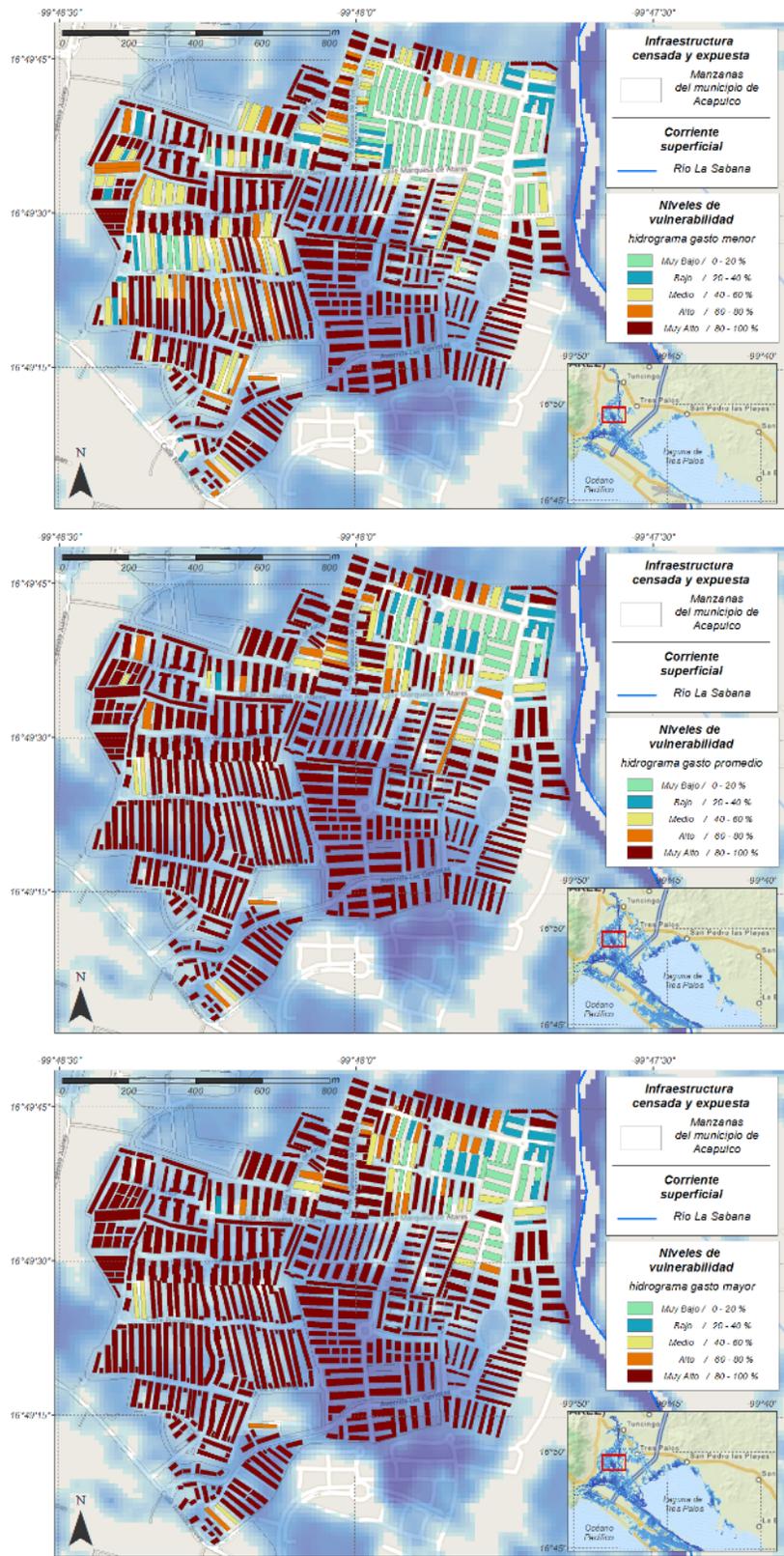


Figura 4.4 Niveles de vulnerabilidad en las delimitaciones de manzanas, producto de las simulaciones de los hidrogramas; a) mínimo, b) medio, c) máximo

Capítulo 5, Análisis y evaluación del daño

El análisis y la evaluación del daño representan una etapa esencial para la gestión del riesgo por inundación, que se utiliza para definir políticas públicas y pólizas de seguro. En Holanda, por ejemplo, estas estimaciones de daño se emplean para determinar los estándares de protección económica óptima para los elementos estructurales, lo que permite priorizar inversiones o comparar el impacto bajo diferentes estrategias de gestión de riesgo por inundación.

El método de pérdida unitaria es el más común para el análisis del daño (de Bruijn, 2005). En este método, se analiza el daño para cada unidad por separado y tiene su base en la definición de un valor máximo de daño por objeto y una función de fragilidad. Estas funciones relacionan alguna característica física de la inundación (frecuentemente el nivel del agua) con una fracción de pérdida económica que ocurre si el objeto es dañado.

Existe una amplia diversidad de modelos para la evaluación del daño, los cuales han sido desarrollados para países específicos, región o tipo de inundación. Por ejemplo, SSM en Holanda (Kok *et al.* 2005), el manual multi-color del Reino Unido (Penning-Rowsell *et al.* 2005), HAZUS en Estados Unidos de América (Scawthorn *et al.* 2006) y FLEMO en Alemania (Thieken *et al.* 2008; Kreibich *et al.* 2010). Todos estos modelos están basados en modelos simplificados de juicios de expertos o datos de pocos eventos de inundación o combinaciones entre éstos. Por lo que no es de extrañar que provean diferentes resultados cuando se les aplica al mismo evento de inundación (De Moel y Aerts, 2011; Jongman *et al.*, 2012). Estas diferencias se deben a que cada modelo está ajustado a las características de los objetos inundables en la región de interés. Por ejemplo, Chatterton *et al.* (2014) analizó un evento de inundación en una región del Reino Unido, con varios de estos modelos, encontrando diferencias entre el daño residencial y comercial de hasta 5 y 6 veces respectivamente. Estas diferencias indican la gran cantidad de incertidumbre involucrada en la aplicación de estos modelos y por lo tanto en la evaluación del daño por inundación.

Por otro lado, las diferencias documentadas también señalan la presencia de errores potencialmente grandes en las estimaciones del daño. Por lo tanto, es muy importante documentar y cuantificar la incertidumbre involucrada en este propósito, a fin de poder interpretar los resultados de forma correcta.

En este sentido, el presente capítulo aboca sus esfuerzos a la cuantificación del daño bajo condiciones de amenaza inciertas, las cuales resultan de una valoración no confiable de ésta. El conocimiento de los costos potenciales de una decisión tomada con base en una estimación errónea del daño, permitirá hacer hincapié en la importancia de la incertidumbre en todas las etapas de la estimación del riesgo por inundación en zonas urbanas.

Para ello, este trabajo considera un análisis y evaluación de daño considerando menaje y sistema estructural en la infraestructura urbana. El análisis se aplica dentro de la zona de interés, a aquellas manzanas o bloques de vivienda que registraron un nivel de vulnerabilidad muy alto (es decir 80-100% del área inundada) y para las tres condiciones de amenaza definidas por los hidrogramas del río La Sabana (con gastos bajo, medio y alto).

5.1 Análisis de daño

Para llevar a cabo el análisis de daño, considerando menaje y sistema estructural se utilizan funciones de fragilidad que relacionan la severidad de la inundación (en este caso tirante de agua) con el porcentaje de daño esperado. En el presente estudio, se considera el tirante de inundación promedio dentro de cada polígono o bloque de viviendas, que resultó afectado durante la simulación hidrodinámica de cada hidrograma. Para este análisis, se consideran sólo aquellos polígonos con un nivel de vulnerabilidad alto, es decir, que resultaron cubiertos de agua en más del 80% de su superficie.

Una vez definida la información de exposición, el nivel de vulnerabilidad dentro de la zona y los tirantes de inundación, es posible llevar a cabo un análisis del daño para cada una de las condiciones de amenaza definidas con anterioridad.

Con la intención de ilustrar de forma gráfica, el proceso de análisis y evaluación del daño, la Figura 5.1 presenta un diagrama de flujo en el que este análisis se divide en diferentes etapas de análisis. En el que los paneles superiores presentan la definición de la amenaza que resultó de la simulación hidrodinámica de cada uno de los tres hidrogramas seleccionados. En los paneles intermedios superiores, se presenta un acercamiento a la zona urbana de interés, en donde cada polígono o bloque de viviendas es coloreado en función del nivel de inundación registrado durante el tránsito de cada hidrograma. Los paneles medios inferiores presentan en color guinda, el número de bloques considerados en el análisis de daño, es decir aquellos con un nivel de vulnerabilidad muy alto. Por último, los paneles inferiores documentan las diferencias espaciales en el análisis de daño considerado con las tres condiciones de flujo consideradas para esta amenaza. Como se ve, errores en la amenaza son propagados de manera directa a la estimación del porcentaje de daño esperado en esta región.

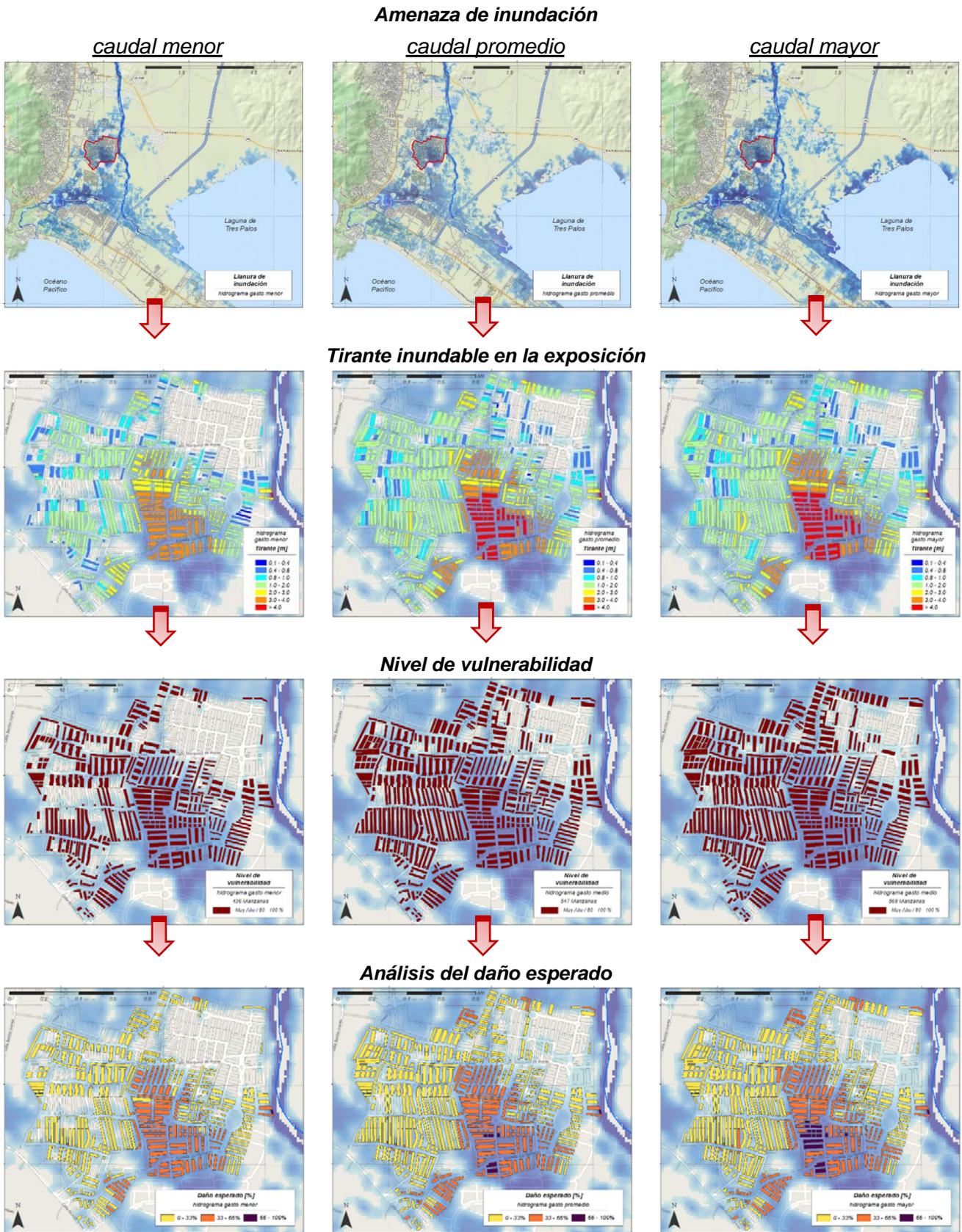


Figura 5.1 Esquema de trabajo desarrollado en el análisis y evaluación de daño

La infraestructura expuesta y población afectada tras la simulación de las tres condiciones de caudal empleadas, son las siguientes: para la simulación del caudal menor, se identifican un total de 6,184 viviendas inscritas en 436 manzanas, lo que define a una población afectada de 1,420 habitantes. Bajo la condición de caudal promedio los resultados se llevaron a cabo con el análisis de 547 manzanas inundadas, lo que define 1,815 habitantes ubicados en un total de 8,088 viviendas afectadas. Por último, la condición de mayor caudal requirió el análisis del daño para 8,521 viviendas inscritas en 568 manzanas y una población afectada de 1,913 habitantes.

Para la definición de funciones de fragilidad, se utilizaron las características propias del tipo de vivienda que se encuentra en la región. Esto hizo posible relacionar el tipo de menaje y la condición estructural de las casas habitación. A manera de ejemplo, la Figura 5.2, presenta fotografías del tipo de residencias afectadas en la zona de interés, durante la incidencia de la tormenta tropical Manuel.



Figura 5.2 Infraestructura característica del tipo vivienda dentro las colonias Las Gaviotas y La Marquesa

5.1.1 Pérdida en menaje

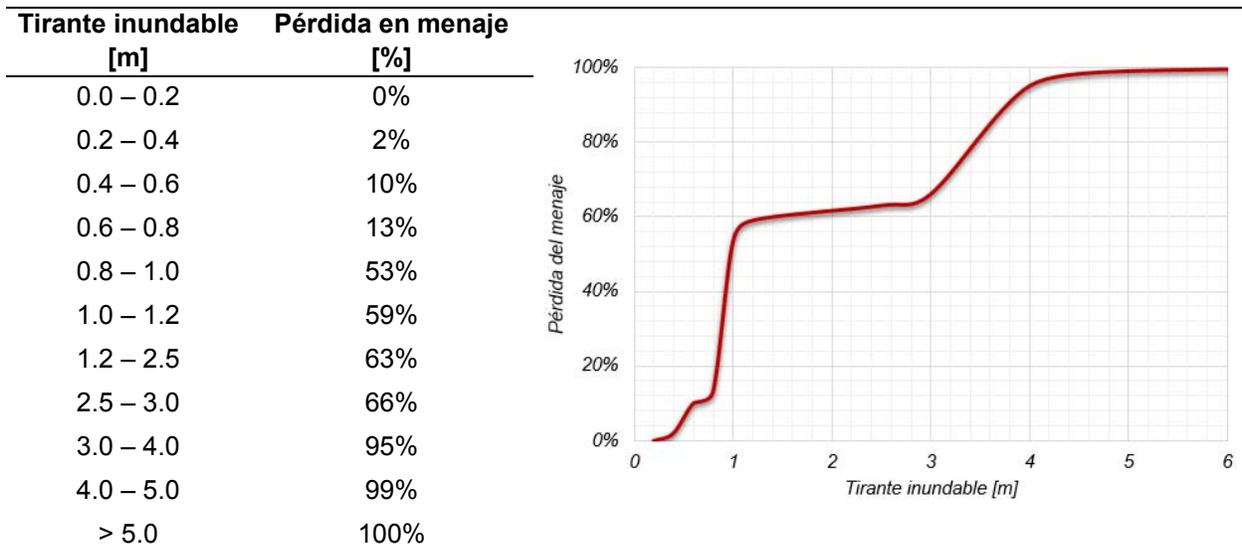
El análisis de daño esperado en menaje para el tipo de vivienda característico del conjunto habitacional Joyas del Marqués II Llano Largo, se realizó considerando para ello la definición de menaje presentada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006) que define como menaje al conjunto de muebles y enseres menores que corresponden a una vivienda de tipo residencial construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor. La Figura 5.3 presenta un ejemplo del menaje que se ha considerado para elaborar la función de vulnerabilidad de una vivienda tipo V (CENAPRED 2006).



Figura 5.3 Menaje para la vivienda Tipo V (dos plantas)
FUENTE: CENAPRED 2006

La Tabla 5.1 presenta la estructura y función de vulnerabilidad asociada al porcentaje de pérdida en menaje para el tipo de vivienda dentro del conjunto habitacional expuesto (tipo V). Esta función se encuentra documentada en la serie del CENAPRED: *Atlas Nacional de Riesgos* (Fenómenos Hidrometeorológicos, 2011).

Tabla 5.1 Estructura de la función de vulnerabilidad para menaje en vivienda Tipo V.



FUENTE: CENAPRED 2011. Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo V

El resultado generado por los tres escenarios de caudal empleados, permite representar el porcentaje de daño que se espera derivado de la incidencia de un evento extremo en particular, sobre todo cuando no hay certeza en la amenaza generada por el evento hidrometeorológico extremo. La Figura 5.4 presenta una comparación del porcentaje de daño estimado bajo cada condición de flujo, en donde se reporta que el porcentaje promedio de daño en menaje bajo el escenario de gasto menor presenta es de 57.7%, mientras que para las condiciones de flujo definidas por los hidrogramas de caudales promedio y mayor, producen resultados similares con porcentaje de daño promedio de 63.4% y 64%, respectivamente. Estos resultados promedio indican que bajo condiciones de amenaza incierta, el daño en menaje que se espera de un evento como el del huracán Manuel es de al menos 57.7% y máximo 64%.

Por otro lado, con el propósito de ilustrar las diferencias espaciales en la distribución del daño por menaje asociado a estos escenarios de flujo, la Figura 5.4 presenta de manera espacial este resultado. En esta Figura, es más claro identificar las diferencias entre cada escenario, en donde claramente se concentran en la parte central de la zona de interés seleccionada.

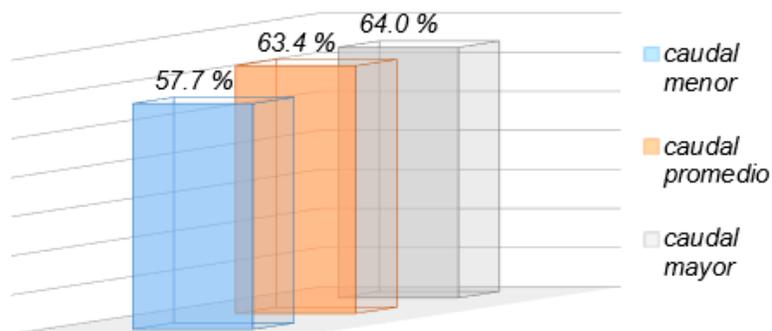


Figura 5.4 Comparativa del porcentaje de pérdida en menaje bajo tres condiciones de caudal

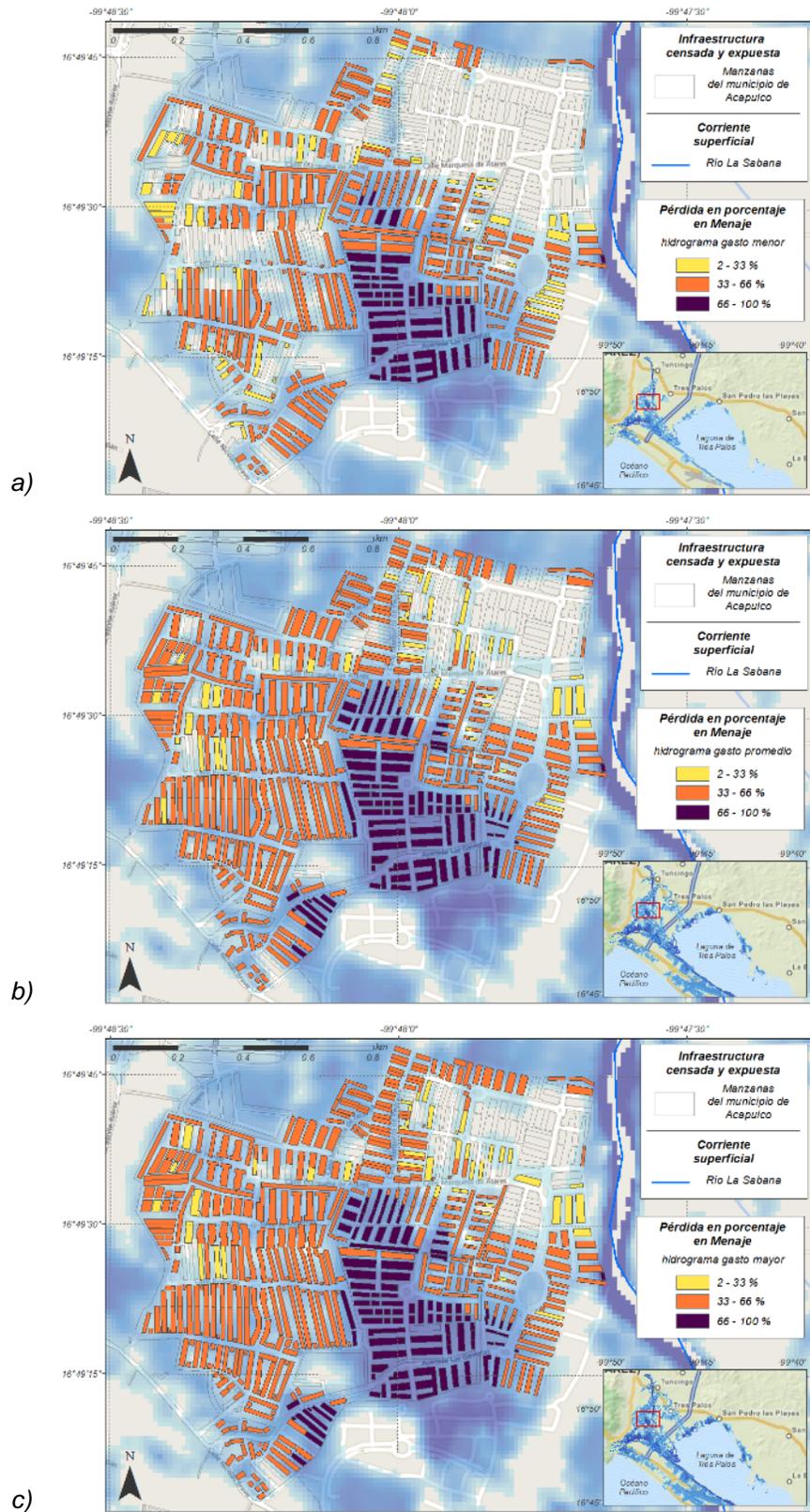


Figura 5.5 Porcentaje de pérdida en menaje bajo condiciones de caudales; a) menor, b) promedio, c) mayor

5.1.2 Pérdida en sistemas estructurales

Respecto al análisis de daño para sistemas estructurales de mampostería con 2 niveles, como aquellos que se encuentran en la zona de estudio, ver por ejemplo las viviendas del conjunto habitacional Joyas del Marqués II, Llano Largo conjunto. La Figura 5.6 presenta la función de vulnerabilidad seleccionada para el sistema estructural de las viviendas tipo dentro del conjunto habitacional expuesto.

Esta función de vulnerabilidad forma parte de la base de datos de funciones del Programa CAPRA (*Probabilistic Risk Assessment Program*, CAPRA, 2013). Esta función de daño para sistemas estructurales funciona de igual manera que aquella para daño en menaje, es decir, relaciona la severidad física de la inundación (tirante de agua) con un porcentaje de daño que podría presentar el sistema estructural de mampostería.

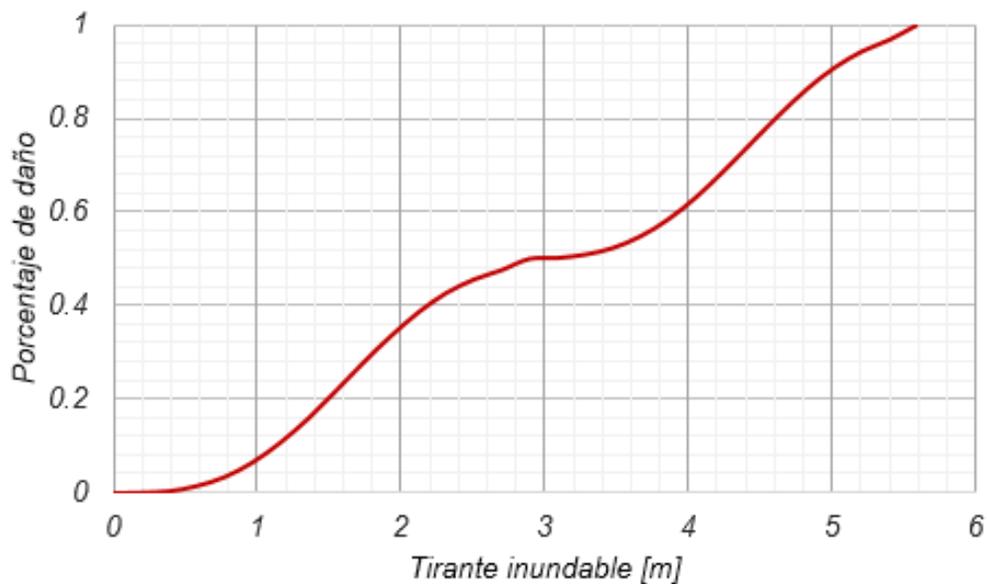


Figura 5.6 Función de vulnerabilidad para sistemas estructurales característicos de viviendas del conjunto habitacional

El resultado generado por los tres escenarios de caudal permite representar tres mapas con el porcentaje de daño en sistemas estructurales, que se presentan en la Figura 5.7, donde se reporta la distribución espacial de daño. Una vez más, se registran diferencias claras bajo los tres escenarios en la zona central de la región de análisis.

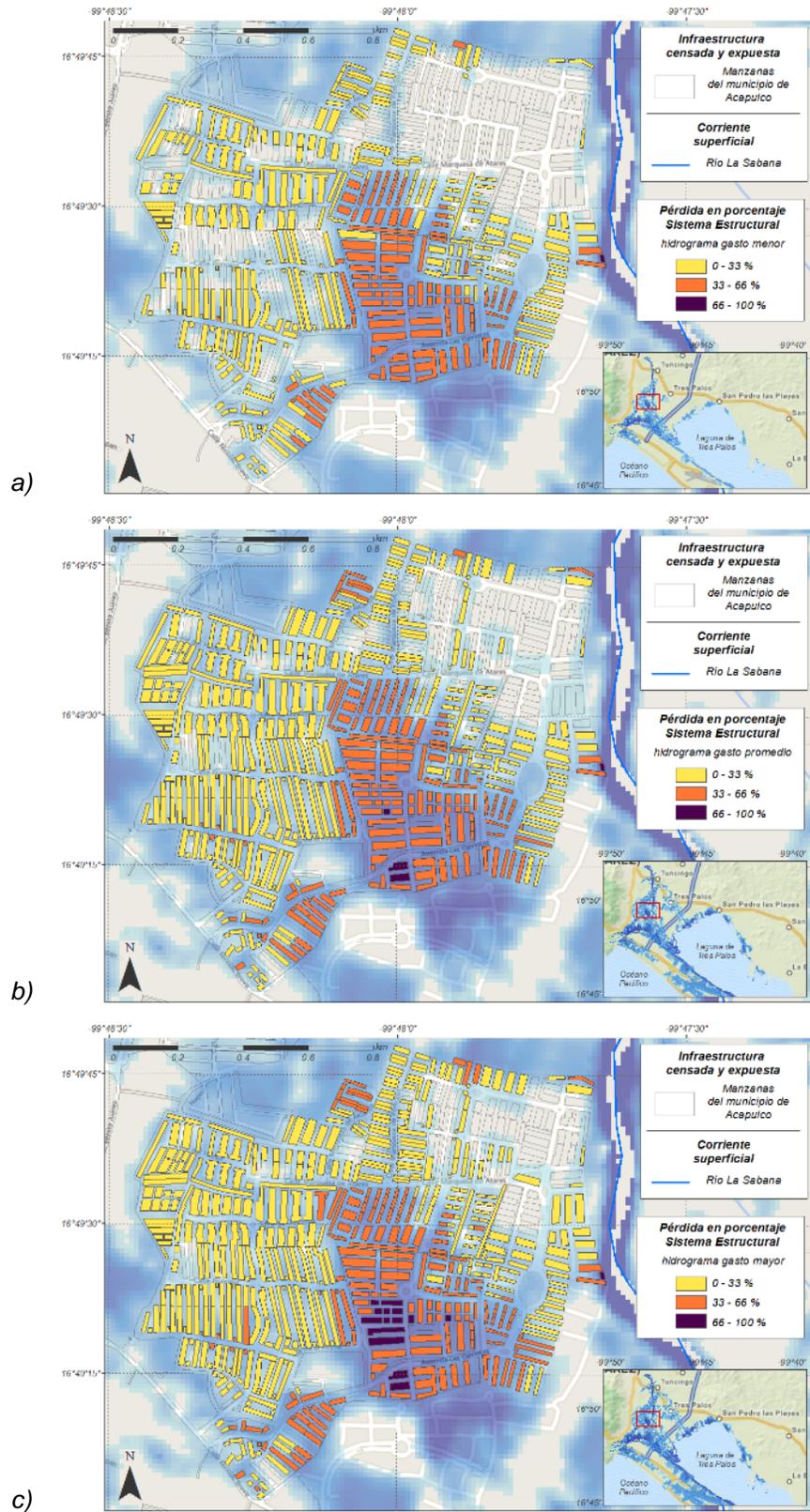


Figura 5.7 Porcentaje de pérdida en sistemas estructurales bajo las condiciones de caudales; a) menor, b) promedio, c) mayor

A manera de resumen, la Figura 5.8 documenta una comparación del valor promedio estimado para el daño en sistemas estructurales bajo las tres condiciones de flujo definidas en este trabajo de tesis. En esta figura, se reporta que para la simulación del hidrograma de menor caudal, el porcentaje promedio de daño en sistemas estructurales es de 20.4%, mientras que para las condiciones de flujo definidas por los hidrogramas promedio y mayor estos valores son de 24.2% y 25.1%, respectivamente. De manera notable, la diferencia en el porcentaje de daño estimado bajo los tres escenarios es pequeña (menor al 5%), esto se debe a que la estructura de mampostería es igual en las tres condiciones y las variaciones en el nivel del agua que se registraron para las condiciones de flujo no son determinantes en el porcentaje de daño estructural.

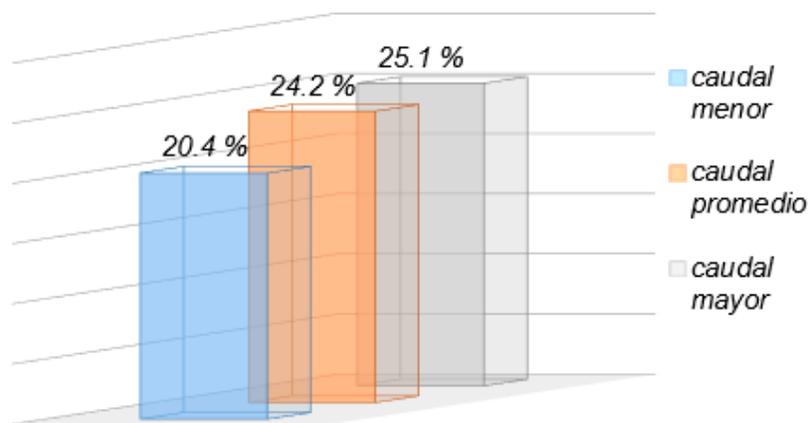


Figura 5.8 Comparativa del porcentaje de pérdida en sistemas estructurales bajo tres condiciones de caudal

5.2 Evaluación de daño

Una vez que han sido analizados los porcentajes de daño respecto a menaje y sistemas estructurales de las viviendas, esta sección presenta la evaluación del daño en términos económicos. Esta evaluación se lleva a cabo para las tres condiciones de flujo consideradas en la caracterización del hidrograma del evento; bajo la condición de menor flujo, con 6,184 viviendas expuestas y bajo las condiciones de gasto promedio y gasto máximo 8,088 y 8,521 viviendas, respectivamente.

De acuerdo a cifras publicadas por CENAPRED (2006), el valor económico del menaje promedio para una vivienda tipo en los fraccionamientos Joyas del Marqués II y Llano Largo se estima en un valor de \$450,000.00, cifra que representa el daño total al considerarse la pérdida absoluta de los contenidos que integran la vivienda.

Los resultados de esta valoración del daño debida al menaje se presentan en la Tabla 5.2, donde para cada condición de flujo se reporta el valor promedio de daño económico en toda la zona de interés y el correspondiente valor total del daño al menaje calculado para todas las viviendas afectadas. Como se aprecia en la columna de total de daño, la diferencia económica entre la condición de menor caudal y la de mayor es de 785 millones de pesos. Esta cifra, representa en términos económicos, el impacto de una valoración incierta de la amenaza sobre los daños generados por la inundación producida por el huracán Manuel. Esta diferencia (1.5 veces de diferencia entre condiciones extremas) hace evidente el importante rol de la incertidumbre en la evaluación de daños por eventos hidrometeorológicos extremos. Por lo tanto, la incertidumbre epistémica en la definición de la amenaza tiene efectos considerables en la valoración del daño.

Tabla 5.2 Resumen del daño o pérdida económica en menaje tras la simulación de tres hidrogramas de caudal variado

Caudal	Daño económico promedio	Total de daño económico
menor	\$3,796,833.72	\$1,655,419,500.00
promedio	\$4,219,387.57	\$2,308,005,000.00
mayor	\$4,297,095.95	\$2,440,750,500.00

Por otro lado, la evaluación de daño para sistemas estructurales característico del tipo de vivienda en Joyas del Marqués II y Llano Largo, considera el costo de las viviendas en septiembre del año 2013, el cual se estimó en \$600,000.00; actualmente, el valor comercial de esta vivienda oscila en los \$750,000.00 M.N., por lo que para el ejercicio de valoración presentado en esta tesis, se tomó un valor unitario por residencia de \$700,000.00.

La Tabla 5.3 presenta el resumen de resultados obtenidos para a valoración del daño estructural para las tres condiciones de flujo consideradas en este trabajo. En este caso, se presentan también los valores promedio para toda la zona de interés y el valor total del daño calculado para las viviendas afectadas. Como se ve, se registra una diferencia de 540 millones de pesos entre la condición de flujo con más gasto y aquella de menor flujo. Lo que representa que bajo la condición de mayor flujo se tienen 1.6 veces más daños económicos. Esta diferencia no es menor y confirma, al igual que en el caso anterior, la importancia de la incertidumbre en la adecuada evaluación de daños por inundación.

Tabla 5.3 Resumen del daño o pérdida económica en sistema estructural tras la simulación de tres hidrogramas de caudal variado

Caudal	Daño económico promedio	Total de daño económico
menor	\$2,058,584.44	\$891,721,849.32
promedio	\$2,428,700.20	\$1,320,422,832.25
mayor	\$2,535,366.39	\$1,431,920,576.87

Capítulo 6, Conclusiones y comentarios

6.1 Conclusiones

El presente trabajo de investigación incluyó de manera destacada un estudio detallado sobre los efectos de la incertidumbre en el análisis y evaluación de la vulnerabilidad y daño por inundación en ambientes urbanos. Para ello, se utilizó un evento reciente del que se tiene información suficiente que corresponde al desbordamiento del río La Sabana, en el estado de Guerrero, tras la ocurrencia de los huracanes Ingrid y durante el año 2013. Este tipo de estudios son escasos en nuestro país, por lo que su pertinencia es bienvenida dentro del estado del arte (ej. Sánchez-Rodríguez y Cavazos, 2015).

La incertidumbre en la amenaza se considera por medio de tres escenarios de flujo, menor, promedio y máximo, diseñados a partir de diferentes condiciones físicas de la atmósfera, que pueden representar con igual validez, la lluvia asociada al evento hidrometeorológico extremo. La evaluación de los daños se llevó a cabo en un par de zonas urbanas afectadas, caracterizadas por viviendas de clase media alta (ej. Tipo V en manual de CENAPRED).

Dentro de las conclusiones más importantes se rescatan las siguientes:

- La influencia de la incertidumbre hidrometeorológica en la estimación del daño por inundación es grande. Este estudio, demostró que esta incertidumbre tiene una influencia que por duplica las estimaciones de daño generadas entre los escenarios considerados (mínimo y máximo).
- Estos efectos se reflejan también en las estimaciones de daño por menaje y sistema estructural, aunque sus efectos son menores pues las diferencias entre escenarios fueron menores al 10%.
- Sin embargo, cabe destacar que estas diferencias no pueden ser generalizadas para otras regiones o ríos, pues la inundación y sus impactos pueden cambiar considerablemente dependiendo del tipo de bienes expuestos y características fisiográficas de la llanura.
- Este estudio representa una primera iteración para cuantificar los efectos de la incertidumbre por medio del modelo de evaluación de daño más utilizado en México.
- La información proveniente de este tipo de metodologías se anticipa valiosa para compañías encargadas de asegurar los bienes expuestos a eventos climáticos extremos, así como a municipios encargados del desarrollo urbano.
- La estrategia presentada es útil en la cuantificación del daño por eventos extremos bajo condiciones de amenaza inciertas, debido a que los resultados permiten definir un intervalo mínimo y máximo de los daños potenciales esperados por inundaciones.

6.2 Futuras líneas de trabajo

Este trabajo de investigación representó un primer esfuerzo por incorporar a la incertidumbre en el esquema tradicional para los estudios de evaluación de riesgo por inundación en México. Sin embargo, deja diversas líneas de investigación abiertas, las cuales permitirán mejorar de manera significativa los estudios de análisis y riesgo por inundación. Por este motivo, se destacan las siguientes como futuras líneas de trabajo:

- Realizar un estudio de los efectos de la incertidumbre, considerando otros modelos para la evaluación del daño por inundación.
- Aplicar el marco de trabajo a zonas urbanas con mayor diversidad en el tipo de inmuebles localizados en la zona de afectación.
- Complementar el análisis con información geográfica más detallada, resolviendo el daño a menaje y sistema estructural a una escala de casa por casa.

Bibliografía

- Aerts, J. C. J. H.**, Sprong, T., and Bannink, B. A.: "*Aandacht voor Veiligheid*", 009/2008, Leven met Water, Klimaat voor Ruimte, DG Water, 2008.
- Aon Benfield**, "*Annual Global Climate and Catastrophe Report*". Impact Forecasting - 2013, London, England (2014), 68 pp.
- Apel, H.**, Thielen, A. H., Merz, B. & Blöschl, G. [2004] "*Flood risk assessment and associated uncertainty*," Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 4(2), 295 – 308.
- Apel, H.**, Thielen, A., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). "*A probabilistic modelling system for assessing flood risks*". Natural Hazards, 38 (1-2).
- Apel, H.**, Merz B., Thielen A.H. "*Quantification of uncertainties in flood risk assessments*". Int J River Basin Manage 2008; 6(2):149 – 62.
- Ashley, R.M. and Saul, A.J.** (2007) Chapter 19: "*Responses to Future intra-urban Flood Risks, Future Flooding and Coastal Erosion Risks*". Thomas Telford, pp 320-339. ISBN 978-0-7277-3449-5.
- Aubrecht, C.**, Freire, S., Neuhold, C., Curtis, A., Steinnocher, K. "*Introducing a temporal component in spatial vulnerability analysis*" (2012) Disaster Advances, 5 (2), pp. 48-53.
- Beven, K. y Binley, A.** (1992). "*The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*". Hydrological processes, 6, 279-298.
- Beven, K.** (2000). "*On the future of distributed modelling in hydrology*". Hydrological Processes, 14, 3183-3184.
- Beven, K.** (2001). "*On landscape space to model space mapping*". Hydrological Processes, 15, 323-324.
- Brito-Castillo, L.** Pedrozo-Acuña A., (2015). "*Inundaciones, Heladas e Incenidos Forestales. Conviviendo con la Naturaleza: El Problema de los Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos en México*". Editor Tereza Cavazos, Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (CONACYT).
- Brouwer, R.**, Akter, S., Brander, L., Haque, E., "*Socioeconomic vulnerability and adaptation to environmental risk: A case study of climate change and flooding in Bangladesh*" (2007) Risk Analysis, 27 (2), pp. 313-326.
- Bukovsky, M. S.** and D. J. Karoly (2009). "*Precipitation simulations using WRF as a nested regional climate model*." Journal of applied Meteorology and Climatology 48(10): 2152-2159.
- Burton, C.**, Cutter, S.L. "*Levee failures and social vulnerability in the sacramento-San Joaquin delta area, California*" (2008) Natural Hazards Review, 9 (3), pp. 136-149.
- Büchele, B.**, Kreibich, H., Kron, A., Thielen, A., Ihringer, J., Oberle, P., Nestmann, F., 2006. "*Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks*". Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 6 (4), 485 – 503.

- Cardona, O.** (2003). *“La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo; Una crítica y una revisión necesaria para la gestión”* Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- CAPRA**, Probabilistic Risk Assessment Program, 2013. Available from: <http://www.ecapra.org/>
- CENAPRED**, (2006) *“Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos Hidrometeorológicos”*. Secretaría de Gobernación - Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, D.F. 453 pp.
- CENAPRED**, (2011) *“Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. Fenómenos Hidrometeorológicos”*. Secretaría de Gobernación - Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, D.F. 68 pp.
- CENAPRED**, (2014) *“Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2013”*. Secretaría de Gobernación - Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, D.F. 14 pp.
- CEPAL** Naciones Unidas. Comisión para América Latina y el Caribe. 1998. República Dominicana: *“Evaluación de los daños ocasionados por el huracán Georges. Sus implicaciones para el desarrollo del país”*. CEPAL. México, D. F. pp: 56-58.
- Cintineo, R., J. A. Otkin, et al.,.** (2014). *“Evaluating the performance of planetary boundary layer and cloud microphysical parameterization schemes in convection-permitting ensemble forecasts using synthetic GOES-13 satellite observations.”* Monthly Weather Review 142(1): 163-182.
- CCS**, Consorcio de Compensación de Seguros. Ministerio de Economía y Hacienda. *“La cobertura aseguradora de las catástrofes naturales. Diversidad de sistemas”* Madrid, España, 2008. 219 pp.
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J.** (2008) *“A place-based model for understanding community resilience to natural disasters”*, Global Environmental Change, 18, 598–606.
- Chatterton, J., Penning-Rowsell, E., and Priest, S.:** The Many Uncertainties in Flood Loss Assessments, in: Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management, Imperial College 20 Press, London, 2014
- De Bruijn, K. M.** (2005), *“Resilience and flood risk Management. A systems approach applied to lowland rivers”*, PhD Thesis – Delft University of Technology, Delft University Press, ISBN 90-407-2599-3, 2005
- De Bruijn, K.M., Klijn, F.** *“Risky places in the Netherlands: A first approximation for floods”* (2009) Journal of Flood Risk Management, 2 (1), pp. 58-67. Cited 20 times.
- De Moel, H. and Aerts, J. C. J. H.:** Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates, Nat. Hazards, 58, 407–425, 2011.
- Desinventar** 2015. Sistema de Inventario de efectos de desastres. (Última consulta: 25/02/2015) <http://online.desinventar.org/>
- Di Baldassarre, G. and S. Uhlenbrook** (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.

- Domeneghetti, A.**, Vorogushyn, S., Castellarin, A., Merz, B., and Brath, A.: “*Probabilistic flood hazard mapping: effects of uncertain boundary conditions*”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3127-3140, 2013.
- Domínguez, M.**, G. Esquivel, *et al.* (2008). “*Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento*.” Serie Manuales, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Downton M.W.**, Morss R.E., Wilhelmi O.V., Grunfest E., Higgings M.L. (2005) “*Interactions between scientific uncertainty and flood management decisions: two case studies in Colorado*”. *Environ. Hazards* 6:134–146.
- Dudhia, J.**, D. Gill, *et al.* (2008). “*A description of the advanced research WRF version 3*”, NCAR technical note, NCAR/TN–475+ STR.
- Dung, N.V.**, Merz, B., Bárdossy, A., Thang, T.D., and Apel, H.: “*Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data*”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 1339-1354, 2011.
- Dutta, D.**, Herath, S., and Musiak, K. “*A mathematical model for flood loss estimation*”. *Journal of Hydrology*. Vol. 277, 2003, pp. 24-49.
- Efstathiou, G.**, N. Zoumakis, *et al.*, (2013). “*Sensitivity of WRF to Boundary Layer Parameterizations in Simulating a Heavy Rainfall Event using Different Microphysical Schemes. Effect on Large-Scale Processes*.” *Atmospheric Research*.
- Eger, H.** y Aquino, A. (2006) “*Actuar ante el riesgo, porque los desastres NO son naturales*”. Importancia de la Gestión del Riesgo para el Desarrollo Sostenible de la Región Amazónica. Lima, Perú. 35 pp.
- 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, London.
- 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, London.
- Evans, J. P.**, M. Ekström, *et al.*, (2012). “*Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia*.” *Climate Dynamics* 39(6): 1241-1258.
- Falter, D.**, Vorogushyn, S., Lhomme, J., Apel, H., Gouldby, B. and Merz, B. (2013), “*Hydraulic model evaluation for large-scale flood risk assessments*”. *Hydrol. Process*, 27: 1331–1340.
- Fournier d'Albe, M.** (1985) “*The quantification of seismic hazard for the purposes of risk assessment*”, International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, Yugoslavia.
- Funtowicz, S.O.**, **Ravetz, J.R.** (1990). “*Uncertainty and Quality in Science for Policy*”. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Galopin, G. C.**, (2006) “*Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity, Global Environmental Change*”, 16, 293–303.
- Guha-Sapir, D.** Hoyois Ph., Below. R., “*Annual Disaster Statistical Review 2013: The Numbers and Trends*”. Brussels - Belgium. CRED; 2014. 50 pp.
- Hall, J.**, **Anderson, M.**, (2002) “*Handling uncertainty in extreme unrepeatably hydrological processes—the need for an alternative paradigm*”. *Hydrol. Process* 16: 1867–1870.

- Huang, Y.**, Zou, Y., Huang, G., Maqsood, I., Chakma, A. "Flood vulnerability to climate change through hydrological modeling: A case study of the swift current creek watershed in Western Canada" (2005) *Water International*, 30 (1), pp. 31-39.
- INEGI** (2008). "Nube de Puntos LIDAR ajustada al Terreno, Bloque conformado por las cartas 1:50,000: E15A75, E15A76, E15A85, E15A86 del Instituto Nacional de Estadística." *Geografía e Informática*.
- IFRC**, 2008: "Análisis de la vulnerabilidad y la capacidad. Caja de herramientas con fichas de referencias". Ginebra, Suiza. Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja.
- ISDR, ITC, UNDP**, 2010: *Local Governments and Disaster Risk Reduction. Good Practices and Lessons Learned. A contribution to the "Making Cities Resilient" Campaign*. Geneva, Switzerland. The United Nations Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction.
- Jenelius, E.**, Mattsson, L.-G. "Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study" (2012) *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46 (5), pp. 746-760.
- Jongman, B.**, Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., and Ward, P. J.: Comparative flood damage model assessment: towards a 15 European approach, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3733–3752, doi:10.5194/nhess-12- 3733-2012, 2012
- Kaplan, S. & Garrick, B.J.** (1981): "On the quantitative definition of risk". - *Risk Analysis* 1(1): 11-27
- Kjeldsen, T.R.**, Macdonald, N., Lang, M., Mediero, L., Albuquerque, T., Bogdanowicz, E., Bra'zdil, R., Castellarin, A., David, V., Fleig, A., Gu'ı, G.O., Kriauciuniene, J., Kohnova', S., Merz, B., Nicholson, O., Roald, L.A., Salinas, J.L., Sarauskiene, D., S'raj, M., Strupczewski, W., Szolgay, J., Toumazis, A., Vanneuville, W., Veijalainen, N., Wilson, D. "Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation". (2014) *Journal of Hydrology*, 517, pp. 963-973.
- Kok, M.**, Huizinga, H. J., Vrouwenvelder, A. C. W. M., and van den Braak, W. E. W.: Stan-25 daardmethode 2005, Schade en Slachtoffers als gevolg van overstroming, HKV, TNObouw, Rijkswaterstaat DWW, 2005..
- Korving, H.**, Van Noordwijk, J.M., Van Gelder, P.H.A.J.M., Clemens, F.H.L.R. (2009). "Risk-based design of sewer system rehabilitation". *Structure and Infrastructure Engineering*, 5(3), 215 – 227.
- Kreibich, H.**, Petrow T, Thieken AH, Müller M, Merz B (2005a) "Consequences of the extreme flood event of August 2002 in the city of Dresden (Germany)". In: Savic DA, Marino MA, Savenije HHG, Bertoni JC (eds) Sustainable water management solutions for large cities, IAHS red book publ. 293:164–173.
- Kreibich, H.**, Seifert, I., Merz, B., and Thieken, A.: Development of FLEMOcs – a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector, *Hydrolog. Sci. J.*, 55, 1302–1313, 2010.
- Kron, W.**, "Flood risk = Hazard * values * vulnerability" (2005) *Water International*, 30 (1), pp. 58-68.
- Kundzewicz, Z.W.**, Kaczmare, Z. "Coping with hydrological extremes" (2000) *Water International*, 25 (1), pp. 66-75.

- Lavell, A.** (2005), "Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica", en: Fernández, Armando (comp.), Comarcas vulnerables: riesgos y desastres en Centroamérica y el Caribe, Editorial CRIES, Buenos Aires, pp. 11-44.
- Laverde-Barajas, M.A.**, (2013) "Análisis integral del riesgo por inundación en la cuenca baja del Río Tonalá" (Tesis de Maestría). Posgrado de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Lindenschmidt, K. E.**, Fleischbein, K., Petrow, T., Vorogushyn, S., Theobald, S., and Merz, B.: "Model system development and uncertainty for the provisional management of extreme floods in large river basins". *Adv. Geosci.*, 5, 99-104, 2005.
- López-Espinoza, E.**, J. Zavala-Hidalgo, et al.,. (2012). "Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central Mexico." *Atmósfera* 25(2): 127-154.
- McDaniels, T.**, Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., and Longstaff, H.: "Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation", *Global Environ. Chang.*, 18, 310–318, 2008.
- Mejía, P.I.**, Rodríguez, J.P, Pedrozo, A., "Análisis del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco, Guerrero, 2013: lecciones aprendidas" XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014.
- Mejía Estrada, P.I.**, (2014) "Caracterización del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco, Guerrero, en septiembre de 2013" (Tesis de Maestría). Posgrado de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Merz, B.**, Thielen, A., Gocht, M. "Probabilistic risk assessment as a planning tool for flood design" (2000) PIK Report, (65 VOL1), pp. 346-355.
- Merz, B.**, Kreibich H, Thielen A, Schmidtke R (2004) "Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings". *Nat Hazard Earth Sys* 4(1):153–163
- Merz, B., Thielen, A.H.** (2004) "Flood risk analysis: concepts and challenges". *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft* 56:27–34.
- Merz, B., Thielen, A.H.**, 2005. "Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis". *J. Hydrol.* 309, 114–132.
- Merz, B.**, Thielen, A.H., Gocht, M. "Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges" (2007) *Flood Risk Management in Europe: Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Volume 25, pp 231-251.
- Merz, B., Thielen, A.H.**, 2009. "Flood risk curves and uncertainty bounds". *Nat. Hazards* 51, 437-458.
- Merz, B.**, Elmer, F., and Thielen, A. H.: "Significance of "high probability/low damage" versus "low probability/high damage" flood events", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1033-1046, 2009.
- Merz, B.**, Hall, J., Disse, M., Schumann, A., 2010. "Fluvial flood risk management in a changing world". *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* 10, 509–527.
- Merz, B.**, Kreibich H, Schwarze R, Thielen AH (2010) Review article "Assessment of economic flood damage." *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:1697–1724.

- Merz, B.**, Thieken, A., Kreibich, H. “*Quantification of socio-economic flood risks*” (2011) Flood Risk Assessment and Management: How to Specify Hydrological Loads, Their Consequences and Uncertainties, pp. 229-247.
- Merz, B.**, Kreibich, H., and Lall, U.: “*Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 53-64, 2013.
- Merz, B.**, Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L.M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J.M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H.-H., Lall, U., Merz, R., Nissen, K., Salvati, P., Swierczynski, T., Ulbrich, U., Viglione, A., Ward, P.J., Weiler, M., Wilhelm, B., Nied, M., 2014. “*Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14, 1921–1942.
- Michel-Kerjan, E., Kunreuther, H.** “*Redesigning flood insurance*” (2011) Science, 333 (6041), pp. 408-409.
- Mileti, D.S.** (1999): “*Disasters by design. A reassessment of natural hazards in the United States*”. Joseph Henry Press, Washington D.C.
- Milutinović, Z.**, Petrovski J. (1985): “*Earthquake Vulnerability and Loss Assessment for Physical and Urban Planning*”, International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, IZIS, Skopje, Yugoslavia.
- Mitchell, J.K.**, “*European river floods in a changing world*” (2003) Risk Analysis, 23 (3), pp. 567-574.
- Munich Re Group**, 2005: Topics Geo – Annual review: natural catastrophes 2004, Publication No. 302-04321, (última consulta: 09/06/2015) http://www.preventionweb.net/files/1528_30204321en.pdf
- Munich Re Group**, 2014: Topics Geo – Natural catastrophes 2013, Analyses, assessments, positions 2014 issue Publication No. 302-08121, (última consulta: 09/06/2015) <https://www.munichre.com/touch/naturalhazards/en/publications/topics-geo/2013/index.html>
- Nadal, N.C.**, Zapata, R.E., Pagán, I., López, R., Agudelo, J. “*Building damage due to riverine and coastal floods*” (2010) Journal of Water Resources Planning and Management, 136 (3), art. no. 006003QWR, pp. 327-336.
- Nascimento, N.**, Machado, M.L., Baptista, M., and De Paula e Silva, A. “*The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context*”. Urban Water Journal. Vol. 483, 2007, pp. 195-210.
- Neumayer, S.**, Zussman, G., Cohen, R., Modiano, E. “*Assessing the vulnerability of the fiber infrastructure to disasters*” (2009) Proceedings - IEEE INFOCOM, art. no. 5062074, pp. 1566-1574.
- NRC** (National Research Council) (2000) “*Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies*”, National Academy Press, Washington, DC
- Odeh, D.J.**, “*Natural hazards vulnerability assessment for statewide mitigation planning in Rhode Island*” (2002) Natural Hazards Review, 3 (4), pp. 177-187.
- OECD, 2013**: “*OECD Reviews of Risk Management Policies: Mexico 2013*”. Review of the Mexican Civil Protection System. Paris, OECD.

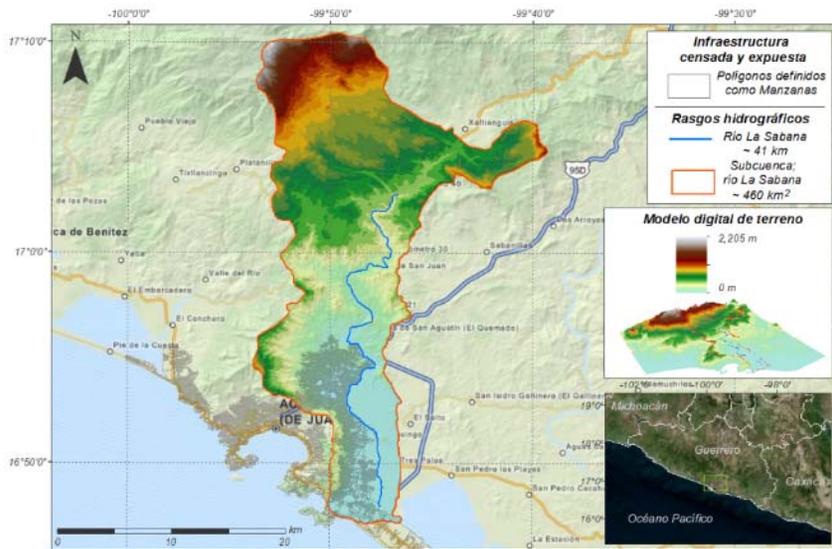
- Palmer T.N.** (2000) "*Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate*". Rep. Prog. Phys. 63: 71 – 116.
- Pappenberger, F.,** K. Beven, *et al.* (2005). "*Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS)*." Hydrology and Earth System Sciences 9(4): 381-393.
- Pappenberger, F. and Beven, K.J.** (2006), "*Ignorance is bliss: 7 reasons not to use uncertainty analysis*", Water Resources Research, 42, W05302, doi:10.1029/2005WR004820.
- Pedrozo-Acuña, A.,** (2012). "*Inundaciones: Evaluación y manejo del riesgo*". AGUA en Quintana Roo, Año 2, No.2, Enero-Marzo 2012. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo.
- Pedrozo-Acuña, A.,** J. P. Rodríguez-Rincón, *et al.,* (2013). "*Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México*." Journal of Flood Risk Management: n/a-n/a.
- Pedrozo-Acuña, A.,** Breña-Naranjo, J. A. and Domínguez-Mora, R. (2014), "*The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico*". Weather, Vol. 69, No. 11, 295–302 Wiley and Sons.
- Pedrozo-Acuña, A.,** Mejía-Estrada, P. I.; Rodríguez-Rincón, J. P.; Domínguez Mora, R.; and González-Villarreal, F. J., "*Flood Risk From Extreme Events In Mexico*" (2014). International Conference on Hydroinformatics. Paper 137. http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/137
- Pedrozo-Acuña, A.,** Breña-Naranjo, J.A., (2015). "*Respuestas ante el incremento del riesgo por inundación en México*". Revista H2O No.8, Octubre-Diciembre, pp. 12-17. http://issuu.com/helios_comunicacion/docs/h2o_-_8
- Penning-Rowell, E. C.,** Johnson, C., and Tunstall, S.: The benefits of Flood and Coastal Risk 5 Management: A Manual of Assessment Techniques, Middlesex University Press, London, 2005.
- Petrow, T.,** Thieken AH, Kreibich H, Merz B, Bahlburg CH (2006) "*Improvements on flood alleviation in Germany: lessons Learned from the Elbe flood in August 2002*". Environ Manage 38(5):717–732
- Petrow, T.,** Zimmer, J., Merz, B., 2009. "*Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns*". Nat.Hazard Earth Syst. 9 (4), 1409–1423.
- Pitt Review,** (2008). "*Learning lessons from the 2007 floods*", Cabinet Office, 22 Whitehall, London SW1 A2 WH.
- Rauch, W.,** Bertrand-Krajewski, J.-L., Krebs, P., Mark, O., Schilling, W., Schütze, M., Vanrolleghem, P.A. (2002). "*Deterministic modelling of integrated urban drainage systems*". Wat. Sci. & Tech., 45(3), 81-94.
- Rauken, T.,** Kelman, I. "*River flood vulnerability in Norway through the pressure and release model*" (2010) Journal of Flood Risk Management, 3 (4), pp. 314-322.
- Reeve, D. E.,** Horrillo-Caraballo, J.M., Pedrozo-Acuña, A. (2011). "*Handling Uncertainty in Coastal Modelling, in Flood Risk Science and Management*" (eds G. Pender and H. Faulkner), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444324846.ch16

- Reinoso, E.**, Pedrozo-Acuña A, Torres, M. (2015). "*Riesgo por inundación. En: La Ciudad de México en el Siglo XXI. Principales Transformaciones y Tendencias*". Coordinado por A. Aguilar, SECITI-GDF.
- Roca, M.**, Davison, M. "Two dimensional model analysis of flash-flood processes: Application to the Boscastle event" (2010) *Journal of Flood Risk Management*, 3 (1), pp. 63-71.
- Rodríguez-Rincón, J.**, A. Pedrozo-Acuña, et al. (2012). "*Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach*." *Comprehensive Flood Risk Management: Research for Policy and Practice*: 183.
- Rodríguez-Rincón, J.P.**, Pedrozo-Acuña, A., and Breña-Naranjo, J. A.: "*Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction*", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2981-2998, doi:10.5194/hess-19-2981-2015, 2015.
- Rose, A.**, Porter, K., Dash, N., Bouabid, J., Huyck, C., Whitehead, J., Shaw, D., Eguchi, R., Taylor, C., McLane, T., Tobin, L.T., Ganderton, P.T., Godschalk, D., Kiremidjian, A.S., Tierney, K., West, C.T. "*Benefit-cost analysis of FEMA hazard mitigation grants*" (2007) *Natural Hazards Review*, 8 (4), pp. 97-111.
- Sánchez-Rodríguez R. y T. Cavazos**, 2015: "*Capítulo 1: Amenazas naturales, sociedad y desastres*". En T. Cavazos (Ed.), *Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. REDESCLim, México, Ediciones ILCSA, pp.1-45.
- Scawthorn, C.**, Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., and Lawrence, M.: HAZUS-MH flood loss estimation methodology II. Damage and loss assessment, *Natural Hazards Review*, 7, 72–81, 2006.
- Schröter, K.**, H. Kreibich, K. Vogel, C. Riggelsen, F. Scherbaum, and B. Merz (2014), "*How useful are complex flood damage models?*" *Water Resour. Res.*, 50, 3378–3395.
- Seneviratne, S.I.**, Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., Mc Innes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L.V., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., Conway, D., Della-Marta, P.M., Gerber, M., Gong, S., Goswami, B.N., Hemer, M., Huggel, C., Van den Hurk, B., Kharin, V.V., Kitoh, A., Klein Tank, A.M.G., Li, G., Mason, S., Mc Guire, W., Van Oldenborgh, G.J., Orłowsky, B., Smith, S., Thiaw, W., Velegakis, A., Yiou, P., Zhang, T., Zhou, T., Zwiers, F.W. "*Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*" (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 109-230.
- Seto, K., R. Sánchez Rodríguez**, and M. Fragkias, 2010: "*The New Geography of Contemporary Urbanization and the Environment*". *Annual Review of the Environment and Resources*, 35, 167-19.
- Shrestha, D. L. y D. P. Solomatine** (2008). "*Data-driven approaches for estimating uncertainty in rainfall-runoff modelling*." *International Journal of River Basin Management* 6(2): 109-122.
- Stedinger, J.R.** "*Expected probability and annual damage estimators*" (1997) *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (2), pp. 125-135.

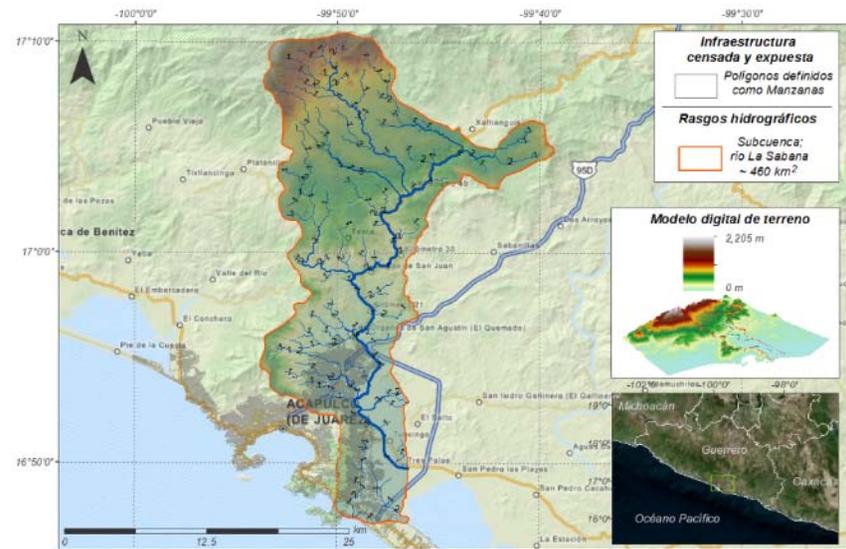
- Stewart, M.G.**, Rosowsky, D.V., Huang, Z. "Hurricane risks and economic viability of strengthened construction" (2003) *Natural Hazards Review*, 4 (1), pp. 12-19.
- Stirling, A.** (2007). "Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate". *EMBO reports*, 8(4), 309-315.
- Thieken, A. H.**, Müller, M., Kreibich, H., and Merz, B.: "Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany", *Water Resour. Res.*, 41, W12430, 2005.
- Thieken, A.H.**, Kreibich, H., Meike Müller, Nicklisch, M., Merz, B. "Flood losses in private households: Analysis of influencing factors and implications for flood loss modelling". (2007) IAHS-AISH Publication, (317), pp. 312-316.
- Thieken, A. H.**, Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., and Merz, B.: Development and evaluation of FLEMOPs – A new flood loss estimation model for the private sector, *WIT Transac- 25 tions on Ecology and the Environment*, 118, 315–324, 2008.
- USDA, S.** (1972). "National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology." Washington, DC.
- UN/ISDR.** 2009. Terminology. <http://www.preventionweb.net/english/professional/terminology/>
- Van der Sluis, J.P.** (1997). "Anchoring Amid Uncertainty: On the Management of Uncertainties in Risk Assessment of Anthropogenic Climate Change", Ph.D. dissertation, University of Utrecht, Netherlands.
- Vogel, K.**, Riggelsen, C., Merz, B., Kreibich, H., Scherbaum, F. (2012): "Flood Damage and Influencing Factors: A Bayesian Network Perspective" - Proceedings, 6th European Workshop on Probabilistic Graphical Models - PGM 2012 (Granada, Spain 2012), p. 347-354.
- Von Lany P H, and Palmer J:** "River Engineering" in Future Flooding and Coastal Erosion Risks, Thorne, C R, Evans, E P and Penning-Rowse, E (ed's) 2006, Thomas Telford, London, ISBN 978-0-7277-3449-5, 514 pages
- Vorogushyn, S.**, B. Merz, K.-E. Lindenschmidt, and H. Apel (2010) "A new methodology for flood hazard assessment considering dike breaches", *Water Resour. Res.*, 46, W08541.
- Vorogushyn, S.**, Apel, H., and Merz, B. (2011). "The impact of the uncertainty of dike breach development time on flood hazard." *Phys. Chem. Earth*, 36(7–8), 319–323.
- Walker, W. E.**, Harremoës, P., Rotmans, J., Van der Sluijs, J. P., Van Asselt, M. B. A., Janssen, P. & Kraymer von Krauss, M. P. (2003) "Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support". <http://resolver.tudelft.nl/uuid:fdc0105c-e601-402a-8f16-ca97e9963592>.
- Wang, Y.**, Li, Z., Tang, Z., Zeng, G. "A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China" (2011) *Water Resources Management*, 25 (13), pp. 3465-3484.
- Webster, P. J., & Hoyos, C.** (2004). "Prediction of monsoon rainfall and river discharge on 15-30-day time scales". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11), 1745-1765.
- Wind H.G.**, Nierop T.M., de Blois C.J., de Kok J.L. (1999) "Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods". *Water Resour Res* 35(11):3459–3465

Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., Zeng, G. “*A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China*” (2011) *Water Resources Management*, 25 (13), pp. 3465-3484.

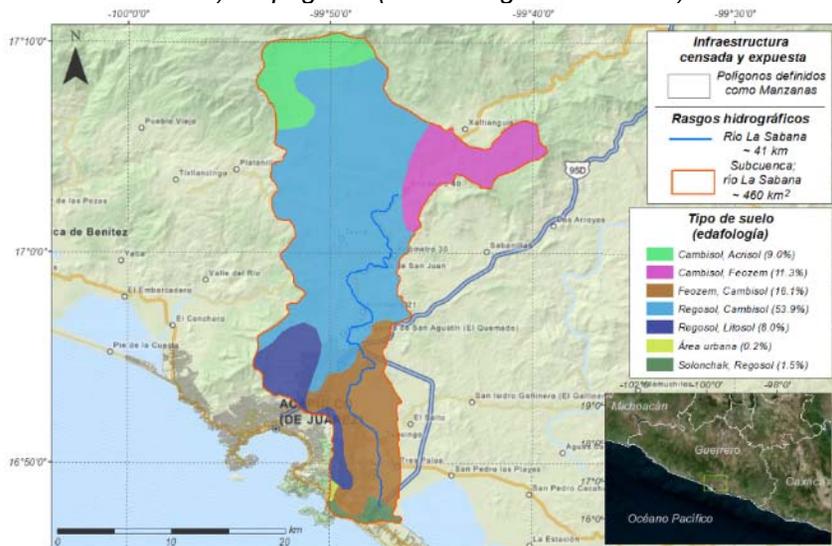
Apéndice



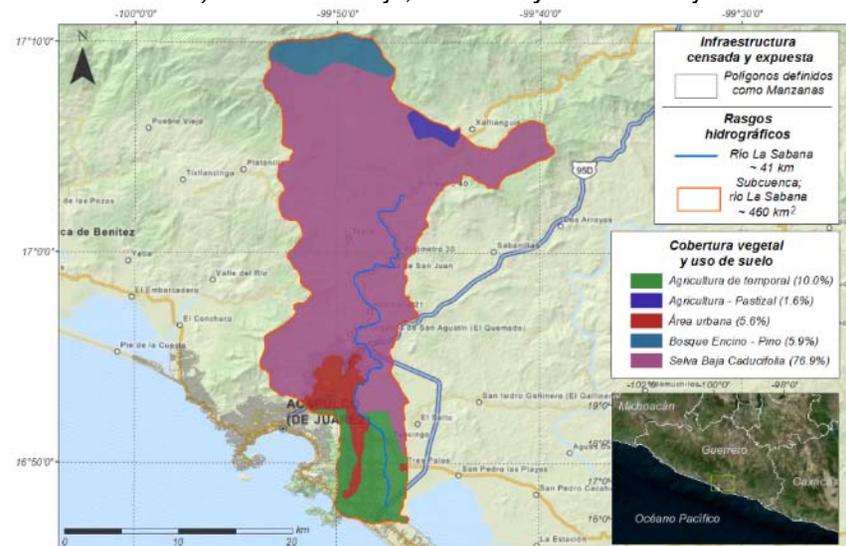
a) topografía (modelo digital de terreno)



b) red de drenaje, dirección y orden de flujo



c) clasificación en los tipos de suelo



d) clasificación en cobertura vegetal y uso de suelo

Figura A. 1 Distribución geográfica de características fisiográficas representativas en la cuenca del río La Sabana

Tabla A. 1 Eventos de inundación históricos registrados por DesInventar (1970 – 2013)

Fecha del registro	Fuente	Tipo y observaciones de la causa	Vidas humanas pérdidas
30/08/1970	El Universal	Tempestad	2
24/09/1970	Excélsior	Desbordamiento de los ríos Papagayo y Quetzalá	-
07/09/1979	El Universal	Huracán Guillermo; Inundaciones y deslizamientos	2
26/08/1981	Excélsior	Tormenta Tropical	2
26/06/1982	Excélsior	Lluvias; con duración de 8 horas	-
17/07/1982	Excélsior	Lluvias	1
20/10/1983	Excélsior	Huracán Tico	-
31/05/1984	Excélsior y El Universal	Tormenta Tropical Boris	1
04/09/1984	El Universal	Huracán Odilia	40
17/09/1984	El Universal	Tormenta Tropical Norbert	-
03/09/1986	El Universal	Lluvias	-
20/06/1988	El Universal	La Niña	-
17/08/1988	La Jornada y El Universal	La Niña	6
31/08/1988	La Jornada	La Niña	-
04/09/1988	Excélsior	La Niña; Intensas lluvias por varios días	-
07/09/1988	Excélsior	Tormenta Tropical Debby y Cristina; varios ríos desbordados	2
20/07/1989	El Universal	Lluvias	1
19/09/1991	La Jornada	Tormenta Tropical Ignacio	-
11/10/1991	La Jornada	Lluvias; Inundaciones de hasta 1.5 m de altura	-
04/07/1992	La Jornada	Huracán Darby	3
22/02/1993	La Jornada	Tempestad; Duración de varios días	4
22/06/1993	La Jornada	Tormenta Tropical Beatriz	1
01/07/1993	Excélsior	Lluvias; Depresión tropical #3	-
10/07/1998	La Jornada	Lluvias	-
07/10/1998	La Jornada	La Niña	1
26/06/1999	La Jornada	Lluvias; Inundaciones y derrumbes	-
07/07/1999	El Universal	Lluvias	1

Fecha del registro	Fuente	Tipo y observaciones de la causa	Vidas humanas pérdidas
01/09/2000	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #38; desbordamiento río La Sabana	-
09/06/2002	El Universal	Tormenta Tropical Boris; El agua alcanzó 50 cm	-
06/11/2002	El Universal	El Niño; Desbordamiento del río Papagayo, Sabana y Laguna Negra	-
05/10/2003	La Jornada	Huracán Olaf	-
31/05/2004	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #3	1
04/07/2004	La Jornada	Lluvias	-
22/06/2005	La Jornada	Tormenta Tropical	-
20/08/2005	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #28	1
21/08/2005	La Jornada	Tormenta Tropical Hillary	-
25/09/2005	El Universal	Lluvias	-
26/09/2005	La Jornada	Lluvias; Desbordamiento de ríos	1
30/05/2006	El Universal	Tormenta Tropical Aletta	-
04/06/2006	La Jornada	Lluvias; Perturbación tropical	-
20/06/2006	La Jornada	Marejada	-
05/07/2006	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #11	2
07/08/2006	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #22	-
17/10/2006	La Jornada	Tormenta Tropical Norman; Desbordamiento del río La Sabana	-
17/07/2007	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #14.	-
27/06/2008	La Jornada	Lluvias; El agua alcanzó un metro de altura	-
07/07/2008	La Jornada	Lluvias; Depresión tropical #5-E	-
08/07/2008	La Jornada	Lluvias; Depresión tropical #5-E	-
09/07/2008	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #10.	-
13/08/2008	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #21	-
21/06/2009	La Jornada	Lluvias; Onda tropical #1-E.	-
25/07/2009	El Universal	Marejada; El agua alcanzó 50 cm de altura	-
02/11/2009	La Jornada	Lluvias; Frente Frío #9	-
05/02/2010	La Jornada	Lluvias; Frente Frío #29. Inundaciones y fuertes vientos	-
06/08/2010	La Jornada	Lluvias	-

Fecha del registro	Fuente	Tipo y observaciones de la causa	Vidas humanas pérdidas
01/09/2010	La Jornada	Desbordamiento de los ríos La Sabana, La Marquesita y laguna Tres Palos	-
01/07/2011	La Jornada y El Universal	Tormenta Tropical Arlene	-
18/07/2011	El Universal	Lluvias; Onda tropical #9	-
18/08/2011	La Jornada	Tormenta Tropical Greg	-
08/09/2012	La Jornada	Condiciones atmosféricas	-

Tabla A. 2 Comparativa del porcentaje de área inundable asociada a los tres hidrogramas para las manzanas habitadas

CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma;			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	Máximo
404100	66.7	88.9	88.9	57A028	74.8	74.8	74.8	349014	90.8	90.8	90.8
57A045	62.9	62.9	62.9	584026	100.0	100.0	100.0	349003	64.2	64.2	64.2
404106	100.0	100.0	100.0	584012	100.0	100.0	100.0	349038	100.0	100.0	100.0
404105	86.0	86.0	86.0	57A022	0.0	0.0	0.0	349034	100.0	100.0	100.0
404104	100.0	100.0	100.0	57A021	100.0	100.0	100.0	349028	100.0	100.0	100.0
404050	100.0	100.0	100.0	57A011	0.0	0.0	0.0	349023	69.9	69.9	69.9
57A037	100.0	100.0	100.0	57A012	0.0	0.0	0.0	349018	100.0	100.0	100.0
57A040	58.8	58.8	58.8	584005	99.8	99.8	99.8	349006	100.0	100.0	100.0
57A029	93.3	93.3	93.3	584006	100.0	100.0	100.0	349004	100.0	100.0	100.0
57A016	93.6	93.6	93.6	57A013	52.1	52.1	52.1	349015	100.0	100.0	100.0
57A015	100.0	100.0	100.0	57A004	99.2	99.2	99.2	349016	79.5	79.5	79.5
57A009	100.0	100.0	100.0	57A005	100.0	100.0	100.0	349022	100.0	100.0	100.0
584015	0.0	0.0	0.0	57A001	80.6	80.6	80.6	349026	100.0	100.0	100.0
584019	0.0	0.0	0.0	584033	98.5	98.5	98.5	353036	0.0	100.0	100.0
584023	100.0	100.0	100.0	372014	54.6	72.8	72.8	599020	100.0	100.0	100.0
584018	0.0	0.0	0.0	372011	0.0	0.0	0.0	599022	94.9	94.9	94.9
584022	0.0	0.0	0.0	372015	0.0	56.4	70.6	368044	100.0	100.0	100.0
565013	0.0	0.0	0.0	372009	52.2	69.6	75.4	349009	100.0	100.0	100.0
565014	100.0	100.0	100.0	368033	42.3	98.8	98.8	349010	100.0	100.0	100.0
565002	45.7	45.7	45.7	372001	95.0	100.0	100.0	349008	100.0	100.0	100.0
57A035	100.0	100.0	100.0	368012	0.0	65.2	65.2	349029	100.0	100.0	100.0
57A030	100.0	100.0	100.0	349021	68.6	100.0	100.0	349039	81.5	81.5	81.5
349042	99.7	99.7	99.7	368027	0.0	99.0	99.0	57A018	100.0	100.0	100.0
349046	99.5	99.5	99.5	368017	0.0	59.9	79.8	57A026	98.0	98.0	98.0
349045	92.5	92.5	92.5	368013	0.0	100.0	100.0	584025	84.1	100.0	100.0
353033	18.0	90.1	90.1	368004	25.5	100.0	100.0	57A032	74.1	100.0	100.0
353039	100.0	100.0	100.0	368003	0.0	41.6	41.6	584028	0.0	0.0	0.0
353040	49.2	49.2	49.2	368008	0.0	73.9	86.2	57A038	0.0	0.0	20.0
353046	100.0	100.0	100.0	368020	0.0	0.0	0.0	584031	0.0	21.8	43.5
353045	0.0	100.0	100.0	368021	0.0	0.0	12.1	57A042	25.0	25.0	25.0
353047	58.0	87.0	87.0	368026	0.0	72.3	72.3	584036	0.0	0.0	0.0
353048	98.0	98.0	98.0	372004	100.0	100.0	100.0	57A043	0.0	70.9	70.9
368042	100.0	100.0	100.0	372005	40.6	71.0	71.0	565023	100.0	100.0	100.0
368043	100.0	100.0	100.0	599038	94.7	94.7	94.7	565026	0.0	83.3	83.3
372017	100.0	100.0	100.0	599035	66.7	66.7	66.7	565015	100.0	100.0	100.0
372016	95.6	95.6	95.6	599034	100.0	100.0	100.0	565016	81.8	81.8	81.8
368040	100.0	100.0	100.0	599032	98.3	98.3	98.3	565008	100.0	100.0	100.0
372012	72.0	86.4	100.0	599026	84.2	84.2	84.2	565017	100.0	100.0	100.0
372006	100.0	100.0	100.0	599006	100.0	100.0	100.0	550013	90.4	90.4	90.4
372003	75.2	90.2	90.2	599013	51.5	51.5	51.5	550012	66.7	66.7	66.7
372002	38.6	38.6	38.6	584016	100.0	100.0	100.0	550014	100.0	100.0	100.0

CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma;			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	Máximo
372007	100.0	100.0	100.0	584021	100.0	100.0	100.0	550008	100.0	100.0	100.0
368038	0.0	89.4	89.4	599036	100.0	100.0	100.0	550015	100.0	100.0	100.0
368028	0.0	79.3	79.3	599021	100.0	100.0	100.0	550006	77.0	77.0	77.0
368024	0.0	97.8	97.8	599014	93.4	93.4	93.4	550017	100.0	100.0	100.0
368001	77.6	77.6	77.6	599010	100.0	100.0	100.0	550027	100.0	100.0	100.0
368007	0.0	0.0	100.0	599009	82.3	82.3	82.3	550018	100.0	100.0	100.0
368015	0.0	0.0	100.0	599002	74.8	74.8	74.8	550026	94.3	94.3	94.3
368025	0.0	0.0	0.0	599017	100.0	100.0	100.0	550025	82.3	82.3	82.3
368037	0.0	80.4	80.4	599015	100.0	100.0	100.0	550024	100.0	100.0	100.0
550028	93.8	93.8	93.8	57A098	0.0	0.0	0.0	391012	89.6	89.6	89.6
57A093	69.5	69.5	69.5	404054	96.5	96.5	96.5	391019	100.0	100.0	100.0
57A096	70.1	70.1	70.1	334037	93.9	93.9	93.9	391016	100.0	100.0	100.0
57A097	100.0	100.0	100.0	334013	100.0	100.0	100.0	391017	100.0	100.0	100.0
57A085	100.0	100.0	100.0	334031	99.4	99.4	99.4	391007	87.5	87.5	87.5
57A079	100.0	100.0	100.0	334008	99.6	99.6	99.6	391002	71.4	71.4	71.4
57A086	82.5	82.5	82.5	334028	90.8	90.8	90.8	391001	95.1	95.1	95.1
57A080	82.5	82.5	82.5	334005	95.6	95.6	95.6	391006	83.3	83.3	83.3
57A068	100.0	100.0	100.0	334030	100.0	100.0	100.0	391011	79.4	79.4	79.4
57A065	100.0	100.0	100.0	334033	90.9	90.9	90.9	391005	71.6	71.6	71.6
57A063	100.0	100.0	100.0	334034	100.0	100.0	100.0	391004	100.0	100.0	100.0
57A047	95.4	100.0	100.0	404078	100.0	100.0	100.0	391008	100.0	100.0	100.0
57A057	92.5	92.5	92.5	404075	56.2	56.2	56.2	391009	66.2	66.2	66.2
57A060	100.0	100.0	100.0	404076	62.1	62.1	62.1	391028	100.0	100.0	100.0
57A059	100.0	100.0	100.0	404085	89.3	89.3	89.3	391032	71.7	71.7	71.7
57A062	64.5	64.5	64.5	404082	100.0	100.0	100.0	391027	87.2	87.2	87.2
57A051	100.0	100.0	100.0	404102	68.9	68.9	68.9	391024	99.2	99.2	99.2
57A046	84.8	84.8	84.8	404063	100.0	100.0	100.0	391025	100.0	100.0	100.0
584020	100.0	100.0	100.0	404038	98.6	98.6	98.6	404044	100.0	100.0	100.0
550023	38.2	38.2	38.2	404072	88.8	88.8	88.8	334021	100.0	100.0	100.0
57A024	61.1	61.1	61.1	404070	88.5	88.5	88.5	334020	100.0	100.0	100.0
57A017	95.6	95.6	95.6	404066	89.8	89.8	89.8	334018	93.9	100.0	100.0
599001	100.0	100.0	100.0	052042	100.0	100.0	100.0	334016	98.8	98.8	98.8
404053	100.0	100.0	100.0	404048	86.2	86.2	86.2	052011	93.6	93.6	93.6
57A044	100.0	100.0	100.0	57A036	74.1	74.1	74.1	052016	86.5	86.5	86.5
404116	100.0	100.0	100.0	404047	100.0	100.0	100.0	052015	100.0	100.0	100.0
550030	100.0	100.0	100.0	391040	97.0	97.0	97.0	052014	76.6	76.6	76.6
334024	86.7	86.7	86.7	391044	69.0	69.0	69.0	052013	77.5	77.5	77.5
052012	100.0	100.0	100.0	052036	87.5	87.5	87.5	419021	93.6	100.0	100.0
419008	100.0	100.0	100.0	052022	89.5	100.0	100.0	419022	71.0	71.0	71.0
052025	100.0	100.0	100.0	419015	99.1	99.1	99.1	419033	100.0	100.0	100.0
052018	100.0	100.0	100.0	419003	97.0	97.0	97.0	419025	100.0	100.0	100.0
052029	72.6	72.6	72.6	419009	88.3	88.3	88.3	419026	68.8	68.8	68.8
052038	93.0	93.0	93.0	419017	62.5	78.1	78.1	052008	100.0	100.0	100.0

CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma;			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma			CVEGEO	Porcentaje de área inundable asociada al hidrograma		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	Máximo
052041	100.0	100.0	100.0	419036	100.0	100.0	100.0	052001	91.8	91.8	91.8
052017	100.0	100.0	100.0	404015	78.2	78.2	78.2	052002	100.0	100.0	100.0
052010	49.8	49.8	49.8	404016	100.0	100.0	100.0	052005	93.5	93.5	93.5
052009	100.0	100.0	100.0	404020	93.2	93.2	93.2	419028	77.0	77.0	77.0
052003	100.0	100.0	100.0	404011	81.3	81.3	81.3	349040	87.8	87.8	87.8
052004	92.4	92.4	92.4	404006	99.7	99.7	99.7	349036	100.0	100.0	100.0
052006	100.0	100.0	100.0	404005	100.0	100.0	100.0	349030	100.0	100.0	100.0
052031	71.4	71.4	71.4	404001	100.0	100.0	100.0	349025	100.0	100.0	100.0
052026	68.1	68.1	68.1	404009	100.0	100.0	100.0	349031	85.1	85.1	85.1
052027	100.0	100.0	100.0	404013	100.0	100.0	100.0	349013	71.3	100.0	100.0
052028	60.7	60.7	60.7	404021	84.4	84.4	84.4	349020	100.0	100.0	100.0
052037	100.0	100.0	100.0	404024	82.6	82.6	82.6	349011	49.3	98.5	98.5
052040	70.2	70.2	70.2	404027	100.0	100.0	100.0	349012	65.6	100.0	100.0
052024	100.0	100.0	100.0	404032	100.0	100.0	100.0	353035	87.6	87.6	87.6
419016	100.0	100.0	100.0	404003	0.0	0.0	0.0	353034	100.0	100.0	100.0
419012	89.6	89.6	89.6	404017	0.0	0.0	0.0	353026	100.0	100.0	100.0
419013	80.5	80.5	80.5	404030	100.0	100.0	100.0	353025	0.0	0.0	0.0
419007	71.5	71.5	71.5	404035	93.6	93.6	93.6	353027	87.8	87.8	87.8
419001	100.0	100.0	100.0	349037	100.0	100.0	100.0	353028	98.5	98.5	98.5
419002	83.4	83.4	83.4	419029	86.7	86.7	86.7	353029	47.3	100.0	100.0
052032	98.6	98.6	98.6	419030	80.4	80.4	80.4	353030	22.7	100.0	100.0
052033	75.0	100.0	100.0	419020	65.3	65.3	65.3	353031	47.0	93.9	93.9
052034	29.5	100.0	100.0	419031	100.0	100.0	100.0	353032	40.6	81.2	81.2
353022	0.0	73.4	73.4	353009	0.0	76.3	76.3	353007	0.0	100.0	100.0
353021	70.2	100.0	100.0	353001	0.0	100.0	100.0	353011	0.0	100.0	100.0
353014	0.0	0.0	0.0	353002	0.0	100.0	100.0	353023	0.0	75.8	75.8
353013	50.2	75.3	100.0	353003	0.0	100.0	100.0	391026	69.4	81.0	81.0

Tabla A. 3 Comparativa de los tirantes inundables asociados a los tres hidrogramas para las manzanas habitadas

CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo
404100	0.43	0.57	0.60	584026	2.69	3.18	3.28	349038	2.02	2.43	2.51
57A045	3.67	4.16	4.25	584012	2.33	2.83	2.92	349034	2.02	2.43	2.51
404106	3.39	3.88	3.98	57A022	1.83	2.32	2.42	349028	1.95	2.36	2.44
404105	3.15	3.65	3.75	57A021	1.89	2.38	2.48	349023	1.79	2.21	2.29
404104	3.07	3.56	3.66	57A011	1.70	2.15	2.24	349018	1.68	2.09	2.17
404050	3.63	4.12	4.21	57A012	2.15	2.64	2.73	349006	1.41	1.82	1.90
57A037	3.84	4.33	4.43	584005	0.74	1.16	1.25	349004	1.10	1.51	1.59
57A040	3.34	3.84	3.94	584006	1.12	1.58	1.67	349015	0.89	1.27	1.34
57A029	3.58	4.08	4.17	57A013	2.02	2.52	2.61	349016	0.87	1.24	1.32
57A016	2.32	2.81	2.91	57A004	1.60	2.03	2.12	349022	0.92	1.28	1.35
57A015	1.30	1.79	1.89	57A005	1.58	2.07	2.17	349026	0.83	1.18	1.25
57A009	0.73	0.99	1.03	57A001	2.00	2.46	2.55	353036	0.18	0.39	0.41
584015	2.11	2.61	2.71	584033	2.73	3.22	3.32	599020	0.41	0.64	0.69
584019	2.38	2.87	2.97	372014	0.21	0.33	0.35	599022	0.31	0.52	0.56
584023	2.56	3.05	3.15	372011	0.00	0.00	0.00	368044	0.26	0.47	0.50
584018	2.36	2.85	2.95	372015	0.15	0.23	0.24	349009	0.63	1.03	1.11
584022	2.52	3.01	3.11	372009	0.62	0.79	0.80	349010	0.66	0.98	1.08
565013	1.61	2.02	2.10	368033	0.22	0.36	0.39	349008	0.98	1.46	1.54
565014	2.69	3.17	3.27	372001	0.71	0.94	1.00	349029	0.70	1.09	1.18
565002	1.62	2.10	2.19	368012	0.00	0.33	0.34	349039	0.52	0.83	0.91
57A035	3.58	4.07	4.17	349021	0.35	0.38	0.43	349042	0.47	0.81	0.91
57A030	3.64	4.14	4.24	349014	0.49	0.65	0.75	349046	0.92	1.29	1.36
57A028	3.52	4.02	4.12	349003	0.86	1.17	1.28	349045	0.77	1.09	1.16
353033	0.35	0.93	1.02	368003	0.00	0.36	0.34	57A038	0.14	0.19	0.18
353039	0.63	1.03	1.10	368008	0.00	0.40	0.36	584031	0.12	0.23	0.22
353040	0.66	1.05	1.12	368020	0.00	0.00	0.11	57A042	0.20	0.41	0.45
353046	0.59	0.73	0.81	368021	0.00	0.18	0.15	584036	0.00	0.13	0.15
353045	0.00	0.46	0.59	368026	0.00	0.20	0.22	57A043	0.19	0.25	0.26
353047	0.63	0.74	0.85	372004	0.85	1.26	1.36	565023	0.53	0.87	0.95
353048	0.58	0.86	0.95	372005	0.46	0.51	0.56	565026	0.30	0.55	0.62
368042	1.03	1.43	1.50	599038	2.24	2.73	2.83	565015	2.89	3.39	3.49
368043	1.22	1.62	1.69	599035	1.39	1.86	1.95	565016	1.98	2.45	2.54
372017	1.59	2.10	2.22	599034	1.56	2.04	2.13	565008	1.07	1.53	1.62
372016	1.26	1.61	1.74	599032	1.81	2.29	2.38	565017	1.67	2.16	2.25
368040	2.21	2.75	2.86	599026	0.53	0.85	0.93	550013	2.58	3.08	3.17
372012	1.28	1.62	1.57	599006	0.65	0.94	1.01	550012	2.44	2.94	3.03
372006	1.23	1.72	1.90	599013	0.40	0.65	0.69	550014	2.62	3.11	3.20
372003	1.01	1.28	1.46	584016	1.01	1.47	1.56	550008	2.33	2.82	2.92
372002	0.50	0.74	0.82	584021	0.56	0.97	1.06	550015	3.10	3.60	3.70
372007	1.32	1.86	1.98	599036	1.49	1.98	2.07	550006	2.95	3.45	3.55

CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo
368038	0.00	0.50	0.62	599021	0.49	0.81	0.88	550017	2.78	3.28	3.37
368028	0.00	0.35	0.42	599014	0.98	1.33	1.41	550027	1.86	2.36	2.45
368024	0.00	0.28	0.32	599010	0.61	0.91	0.97	550018	2.56	3.05	3.15
368001	0.22	0.32	0.36	599009	0.62	0.89	0.96	550026	2.48	2.99	3.08
368007	0.00	0.00	0.55	599002	2.37	2.68	2.75	550025	2.80	3.30	3.40
368015	0.00	0.00	0.33	599017	0.39	0.59	0.63	550024	2.55	3.05	3.15
368025	0.00	0.00	0.00	599015	0.32	0.60	0.65	550028	1.96	2.46	2.56
368037	0.00	0.48	0.52	57A018	1.23	1.71	1.80	57A093	3.36	3.86	3.96
368027	0.00	0.55	0.64	57A026	0.70	1.17	1.26	57A096	3.71	4.21	4.31
368017	0.00	0.17	0.24	584025	0.25	0.46	0.53	57A097	3.82	4.31	4.41
368013	0.11	0.32	0.38	57A032	0.32	0.49	0.55	57A085	3.94	4.44	4.53
368004	0.16	0.31	0.35	584028	0.14	0.28	0.31	57A079	3.83	4.32	4.42
57A086	3.89	4.38	4.48	334005	1.16	1.62	1.71	391011	0.48	0.89	0.97
57A080	3.81	4.30	4.40	334030	0.83	1.28	1.38	391005	0.31	0.66	0.73
57A068	3.53	4.03	4.13	334033	0.78	1.21	1.30	391004	0.90	1.31	1.37
57A065	2.89	3.37	3.47	334034	1.23	1.71	1.81	391008	0.63	1.08	1.18
57A063	2.04	2.52	2.62	404078	1.15	1.57	1.66	391009	0.74	1.20	1.31
57A047	0.72	0.91	0.98	404075	0.71	1.19	1.29	391028	1.14	1.62	1.73
57A057	1.62	2.02	2.10	404076	0.90	1.34	1.42	391032	1.25	1.52	1.57
57A060	1.62	2.08	2.17	404085	2.53	3.34	3.48	391027	0.86	1.22	1.30
57A059	1.51	1.95	2.03	404082	2.29	3.09	3.22	391024	1.00	1.34	1.40
57A062	0.78	1.16	1.24	404102	1.02	1.73	1.86	391025	0.58	0.84	0.90
57A051	0.55	0.82	0.88	404063	0.84	1.28	1.38	404044	0.77	1.34	1.47
57A046	0.99	1.38	1.46	404038	1.19	1.64	1.75	334021	0.72	1.15	1.24
584020	2.57	3.06	3.16	404072	1.02	1.49	1.59	334020	0.48	0.84	0.93
550023	1.88	2.38	2.48	404070	0.96	1.20	1.28	334018	0.50	0.87	0.97
57A024	1.79	2.28	2.38	404066	2.02	2.51	2.61	334016	0.69	1.28	1.40
57A017	1.11	1.59	1.68	052042	0.40	0.73	0.82	052011	1.29	1.73	1.81
599001	0.83	1.17	1.25	404048	1.74	2.49	2.61	052016	1.41	1.86	1.95
404053	3.92	4.42	4.51	57A036	3.62	4.12	4.21	052015	1.28	1.73	1.82
57A044	3.87	4.36	4.46	404047	2.36	3.18	3.32	052014	1.30	1.76	1.85
404116	2.34	3.16	3.30	391040	0.49	0.83	0.90	052013	1.12	1.60	1.69
550030	2.43	2.93	3.02	391044	0.81	1.13	1.20	052012	1.58	2.07	2.17
334024	1.71	2.42	2.54	391012	0.65	1.06	1.13	419008	1.91	2.41	2.51
57A098	3.72	4.21	4.30	391019	1.09	1.51	1.59	052025	0.72	1.15	1.23
404054	3.46	3.96	4.06	391016	0.47	0.83	0.91	052018	0.50	0.88	0.96
334037	2.63	3.11	3.21	391017	0.34	0.65	0.70	052029	0.45	0.80	0.87
334013	1.87	2.36	2.45	391007	0.60	1.02	1.10	052038	0.44	0.76	0.83
334031	1.34	1.80	1.90	391002	1.12	1.55	1.62	052041	0.43	0.73	0.79
334008	0.83	1.24	1.32	391001	0.97	1.39	1.46	052017	1.16	1.60	1.69
334028	0.80	1.21	1.30	391006	0.42	0.82	0.89	052010	1.37	1.78	1.86
052009	1.27	1.68	1.76	404020	1.43	1.91	2.01	419028	0.84	1.23	1.31

CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;			CVEGEO	Tirante inundable medio, en m, asociado al hidrograma;		
	mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo		mínimo	medio	máximo
052003	1.36	1.79	1.88	404011	0.68	1.17	1.26	349040	1.31	1.80	1.89
052004	1.48	1.92	2.02	404006	0.57	1.03	1.11	349036	1.21	1.70	1.79
052006	1.38	1.83	1.92	404005	0.55	1.00	1.09	349030	1.26	1.72	1.82
052031	1.41	1.83	1.92	404001	1.26	1.71	1.81	349025	0.78	1.18	1.28
052026	1.04	1.50	1.58	404009	1.34	1.81	1.91	349031	0.89	1.32	1.42
052027	0.84	1.26	1.35	404013	1.30	1.77	1.87	349013	0.69	0.87	1.00
052028	0.84	1.23	1.31	404021	1.13	1.62	1.73	349020	0.63	0.87	1.00
052037	0.52	0.82	0.88	404024	0.89	1.36	1.46	349011	0.66	0.85	0.99
052040	0.41	0.70	0.77	404027	0.98	1.49	1.59	349012	0.72	0.75	0.92
052024	0.69	1.08	1.16	404032	0.57	0.86	0.94	353035	0.93	1.40	1.50
419016	1.22	1.62	1.70	404003	2.20	2.69	2.79	353034	1.10	1.58	1.68
419012	0.88	1.29	1.38	404017	1.85	2.34	2.45	353026	0.69	1.17	1.27
419013	0.95	1.35	1.43	404030	0.37	0.82	0.92	353025	0.75	1.22	1.31
419007	0.94	1.31	1.39	404035	0.49	0.81	0.89	353027	0.44	0.84	0.94
419001	0.80	1.11	1.18	349037	0.68	1.03	1.10	353028	0.36	0.66	0.74
419002	0.72	1.15	1.24	419029	0.67	1.02	1.09	353029	0.68	0.82	0.90
052032	0.69	1.14	1.23	419030	1.04	1.40	1.48	353030	0.50	0.57	0.65
052033	0.47	0.87	0.95	419020	0.45	0.75	0.82	353031	0.43	0.95	1.03
052034	0.29	0.63	0.70	419031	0.83	1.15	1.22	353032	0.35	1.11	1.20
052036	0.40	0.71	0.79	419021	0.57	0.82	0.90	353022	0.00	0.40	0.45
052022	0.26	0.51	0.60	419022	0.57	0.96	1.05	353021	0.38	0.70	0.79
419015	0.64	1.10	1.19	419033	0.69	1.10	1.19	353014	0.00	0.22	0.17
419003	1.10	1.53	1.62	419025	1.08	1.48	1.57	353013	0.16	0.40	0.43
419009	1.02	1.42	1.51	419026	0.41	0.73	0.79	353009	0.00	0.49	0.54
419017	0.66	0.99	1.08	052008	1.05	1.45	1.54	353001	0.00	0.74	0.80
419036	1.04	1.50	1.60	052001	1.10	1.52	1.61	353002	0.00	0.59	0.65
404015	0.97	1.49	1.59	052002	1.04	1.47	1.56	353003	0.00	0.82	0.89
404016	1.54	2.02	2.13	052005	1.15	1.58	1.67	353007	0.00	0.31	0.33
353011	0.00	0.45	0.47	353023	0.00	0.58	0.60	391026	0.25	0.46	0.52