



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

SOBRE EL ROL DE LA INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA EN LA MODELACIÓN DE INUNDACIONES A GRAN
ESCALA: RÍO USUMACINTA, TABASCO

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

PRESENTA:
PEDRO NOÉ PAREDES VICTORIA

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

MÉXICO, D. F. ABRIL DE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Ramón Domínguez Mora
Secretario:	Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin
Vocal:	Dr. Adrián Pedrozo Acuña
1 ^{er.} Suplente:	Dr. Rodolfo Silva Casarín
2 ^{do.} Suplente:	Dr. Oscar Pozos Estrada

Lugar: Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

FIRMA

*A mis padres, **Francisco e Irma**
A mis hermanos y hermanas*

Gracias por sus palabras de aliento y bendiciones

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a la **Facultad de Ingeniería**, al **Posgrado de Ingeniería** y al **Instituto de Ingeniería**, por otorgarme una formación y educación del más alto nivel de todo el país, que es uno de los más grandes privilegios.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por otorgarme los recursos necesarios para especializarme como Maestro en Ingeniería y así formar parte de un selecto grupo de posgraduados que contribuyen en el desarrollo de este país y le permiten competir en los más altos estándares a nivel mundial.

A **mis colegas ingenieros**, tanto compañeros de la universidad como compañeros con los que he colaborado profesionalmente, gracias a todos y cada uno de ellos por brindarme su amistad y ayudarme a crecer tanto profesional como personalmente.

A mis **compañeros de cubículo** **Monique Villatoro, Ariadna Cruz, Gerardo Duran, Raúl Martell, Edgar Salazar, Juan Pablo Rodríguez, Cesar Gutiérrez** y muy especialmente a **Alejandra Amaro, Diana Reséndiz, Miguel Laverde e Irving Álvarez** por brindarme su amistad y apoyo.

Gracias al **Dr. Oscar Fuentes**, al **M. en I. Víctor Franco**, al **Dr. Gabriel Echávez**, al **Dr. Ramón Domínguez** y al **Dr. Oscar Pozos** por sus enseñanzas y por brindarme nuevas herramientas del conocimiento en el estudio de la ingeniería hidráulica.

Gracias al **Dr. Rodolfo Silva** y al **Dr. Edgar Mendoza** por su valiosa amistad, sus enseñanzas y sobre todo por ser una gran influencia para mí y despertar en mí un mayor interés en la ingeniería marítima que se ha convertido en un tema que me ha dejado un gran crecimiento en esta etapa de desarrollo profesional.

Gracias al **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, por darme la oportunidad de colaborar en su grupo de trabajo en el instituto de ingeniería; por su confianza, amistad, apoyo, orientación y enseñanza, es sin duda un gran ejemplo de persona del cual he aprendido muchas cosas y constantemente me anima a buscar nuevas metas y mayores retos.

Gracias a mi Familia, porque gracias a ellos no dejo de crecer y querer ser mejor cada día, son la principal y única razón para dar todo de mí.

“Learning is experience. Everything else is just information.”

— Albert Einstein.

Tabla de contenido

Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	VIII
Resumen	IX
Abstract	X
Prólogo	1
<i>Problemática</i>	2
<i>Objetivos</i>	3
<i>Estructura de la tesis</i>	4
1. Modelos hidrodinámicos e incertidumbre	5
1.1 Clasificación de modelos.....	6
1.2 Estimación de áreas de inundación.....	6
1.3 Modelos hidrodinámicos unidimensionales (1D).....	7
1.4 Modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D).....	8
1.5 Principales factores en la modelación numérica.....	10
1.6 Comparación entre los modelos hidrodinámicos 1D y 2D.....	11
1.7 La incertidumbre en los modelos.....	13
1.8 Consideraciones en la modelación de inundaciones a gran escala.....	13
2. Características regionales	15
2.1 Ubicación y características físicas.....	16
2.1.1 <i>Hidrología</i>	16
2.1.4 <i>Hidrografía</i>	17
2.1.2 <i>Fisiología</i>	17
2.1.3 <i>Edafología</i>	18
2.1.5 <i>Clima</i>	18
2.2 Descripción del sistema hidráulico analizado.....	19
2.3 Eventos históricos extremos en el río Usumacinta.....	20
3. Metodología: Modelación de inundaciones a gran escala	23
3.1 Modelo hidrológico.....	24
3.1.1 <i>Fundamentos teóricos: Modelo hidrológico</i>	24
3.1.2 <i>Incertidumbre hidrológica</i>	25
3.1.3 <i>Implementación del modelo hidrológico: Estimación de Probabilidad e Incertidumbre Generalizada (Metodología GLUE)</i>	26
3.1.4 <i>Puesta a punto del modelo hidrológico en la cuenca de estudio</i>	28
3.2 Modelo hidráulico Hec-RAS.....	30
3.2.1 <i>Fundamentos teóricos del modelo Hec-RAS</i>	30
3.2.2 <i>Implementación de Hec-RAS: Metodología para la generación de los mapas de inundación</i>	32
4. Análisis de resultados y estrategias de mitigación	35
4.1 Validación de la metodología con los eventos de inundación en 2008 y 2011.....	36
4.1.1 <i>Modelo hidrológico</i>	36
4.1.2 <i>Modelo hidráulico</i>	36
4.2 Mapas de inundación probabilísticos (GLUE).....	38
4.3 Propuestas para el manejo de inundaciones.....	40
4.3.1 <i>Opción 1. Dragado a lo largo de 22 km de la desembocadura del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su descarga al mar (300 m de anchura)</i>	41
4.3.2 <i>Opción 2. Dragado a lo largo de 22 km de la desembocadura del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su descarga al mar (600 m de anchura)</i>	41
4.3.3 <i>Opción 3. Dragado del río San Pedro San Pablo en su zona de conexión con el río Usumacinta (6 km) y en la su desembocadura al mar (15 km)</i>	41
4.3.4 <i>Opción 4. Dragado del río San Pedro San Pablo en su totalidad, desde zona de conexión con el río Usumacinta y hasta la desembocadura al golfo de México (74 km)</i>	41

4.3.5 Opción 5. Dragado en el río Palizada 6km aguas abajo de la confluencia con el río Usumacinta	42
4.3.6 Opción 6. Combinación de las alternativas 2 y 4.....	42
4.3.7 Opción 7. Combinación de las alternativas 1 y 3.....	42
4.4 Análisis de las alternativas de mitigación estructurales.....	43
4.4.1 Niveles máximos de inundación.....	43
4.4.2 Obtención de los volúmenes y costo de las obras de dragado.....	43
4.4.3 Evaluación de las propuestas de mitigación.....	46
5. Resolución y enfoques integrables	47
5.1 Conclusiones.....	48
5.2 Estudios eventuales.....	48
5.2.1 Sistemas de Alerta Temprana SAT.....	48
5.2.1 Atlas de riesgo.....	49
5.2.2 Ordenamiento territorial y ecológico.....	49
5.2.3 Gestionamiento de inundaciones.....	49
5.2.4 Desarrollo sustentable.....	50
Referencias.....	51
Anexo A.....	56

Lista de Figuras

Figura 1 Balance hídrico, de acuerdo a la USGS.	1
Figura 2 Gastos para la recuperación de infraestructura ante eventos de desastre (FONDEN, 1999 – 2011). El gráfico circular muestra el porcentaje de gasto asociado a un evento adverso particular.....	2
Figura 2.1 a) La zona de estudio comprende 15 subcuencas de la región hidrológica No. 30 que tienen una influencia directa con el escurrimiento en el río Usumacinta, se analizó un área total de 45, 443 Km ² que es equivalente a 30 veces el área del D.F. por lo cual se considera un estudio de inundaciones a gran escala. b) Características hidrográficas de la zona es estudio. El río Usumacinta representa el análisis central en la evaluación de inundaciones en esta región.	17
Figura 2.2 Características del suelo en la zona de estudio. La imagen de la izquierda presenta la edafología y su distribución en la región analizada; de igual forma en la imagen de la derecha se muestra el uso del suelo para la zona. Información de la base de datos del INEGI.	18
Figura 2.3 Ubicación del Río Usumacinta, San Pedro San Pablo y Palizada en el Estado de Tabasco, México. Imagen Landsat tomada en época de estiaje, donde se pueden apreciar las áreas de agua permanente (ríos, lagos, lagunas, pantanos etc.)	20
Figura 2.4 Imágenes de satélite de la inundación 2008 (NASA / GSFC, Respuesta Rápida). La imagen de la izquierda fue captada los días de máxima inundación el 05 de Noviembre de 2008 y la imagen de la derecha corresponde al 24 de Octubre de 2011 durante los días de máxima inundación.	21
Figura 2.5 Imágenes de radar de la cuenca del río Usumacinta (adquiridas por el II-UNAM), en la que las zonas oscuras señalan la zona afectada por este fenómeno hidrometeorológicos. La imagen de la izquierda corresponde al evento de inundación el 28 de Octubre de 2008 y la imagen de la derecha corresponde al evento de inundación el 22 de Octubre de 2011.	21
Figura 3.1 Información necesaria para la implementación del modelo hidrológico de variación de parámetros. Se observa la definición de la cuenca en el río principal, subcuencas y modelo digital de elevación, para el modelo hidrológico se empleó una malla cuadrada de 30 metros, los símbolos verdes indican la ubicación de las estaciones climatológicas, mientras que los símbolos rojos la ubicación de las estaciones hidrométricas.	29
Figura 3.2 Estructura general de la metodología propuesta para la estimación de hidrogramas que consideran la incertidumbre hidrológica y por ende tienen una probabilidad de ocurrencia asociada.	30
Figura 3.3 La energía en la sección 2 es igual a la energía en la sección 1 más las pérdidas por fricción $S_f \Delta x$. En esta figura no se han incluido las pérdidas por expansión / contracción	31
Figura 3.4 En este gráfico se muestran los hidrogramas medidos en la estación Boca del Cerro durante los eventos de inundación de 2008 y 2011, también se puede observar el registro de lluvia máxima diaria en la misma estación en 2008.	32
Figura 3.5 Río Usumacinta (localidad de Jonuta, 2011). Se observa que en ambas márgenes del río se tiene vegetación y el cauce principal en promedio es de 700 metros con una profundidad media de 20 metros, el fondo del río está compuesto principalmente por sedimentos finos y gruesos.	33
Figura 3.6 Modelo Digital de Elevaciones construido con datos de altimetría láser. A partir de altimetría laser se construyó el DEM en una malla cuadrada con una resolución de 30 metros.	33
Figura 3.7 Trazado de la geometría del sistema Usumacinta, San Pedro-San Pablo, Palizada con sus respectivas llanuras de inundación. La configuración geométrica en hec-RAS consta de un cauce principal con secciones transversales perpendiculares al flujo, la extensión de cada sección transversal debe cubrir el área de inundación que se necesita analizar, por lo cual cada sección tendrá diferentes longitudes.	34
Figura 4.1 Hidrogramas probabilísticos asociados al evento de 2008 (en Negro), hidrograma con una probabilidad de ocurrencia de 50% (línea punteada), La banda sombreada representan todos los posibles hidrogramas con probabilidades de ocurrencia de entre 5% (hidrograma máximo) y 95% (hidrograma mínimo).	36
Figura 4.2 Comparación entre los niveles de agua medidos y los calculados por el modelo hidráulico 1D, en los extremos aguas arriba de cada río. Como se puede observar, los niveles calculados por el modelo varían con los niveles medidos entre 0.02m y 0.4m en época de lluvias y entre 0.10 y 0.26 en época de estiaje. Las mayores diferencias se presentan en los ríos San Pedro – San Pablo y Palizada (donde se tiene un error de 8.0% en condiciones de Namu, de acuerdo al gráfico triangular).	37
Figura 4.3 Resultados de modelación numérica para el evento de 2011, el recuadro superior derecho se muestra el error porcentual entre los niveles de inundación obtenido mediante Radar y el modelo 1D, correspondientes al evento de inundación del 22 de Octubre de 2011. Además, se determinó que en el evento de inundación, el agua ocupó una superficie total de 3, 940 km ² y con el modelo 1D se calculó un área inundada de 5,041 km ² , con lo cual se estima un error de 21.8 %, sin embargo se comprobó que si se considera únicamente la cuenca media-alta, el error es de menos del 5%.	37
Figura 4.4 En el grafico superior de presentan para cada localidad analizada los niveles de inundación asociados a una probabilidad de ocurrencia, los puntos, representan niveles de inundación con una probabilidad de excedencia de 95% (verde), y 5% (rojo), respectivamente. Las rectángulos azules, representan los niveles de inundación estimados para cada los eventos de 2008 (límite inferior del rectángulo) y 2011 (límite superior del rectángulo). Se puede observar que en todos los casos el evento de 2008 se encuentra dentro del rango de probabilidades de ocurrencia (aproximadamente 50%, mientras que el evento de 2011 es más cercano a una probabilidad de ocurrencia del 5%. Además se puede apreciar como la incertidumbre es variable (diferencia entre GLUE máximo y mínimo) en cada localidad analizada, siendo en este caso de 1.53 metros para Balancan y de 0.6 metros para Palizada con un rango de incertidumbre menor.	38
Figura 4.5 Mapas de inundación probabilísticos estimados: En el panel superior-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 95%, en el panel intermedio-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 50% y en el panel inferior-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 5%. De igual forma en el panel superior-derecho se muestra la diferencia de los niveles de inundación estimados con una probabilidad de ocurrencia de entre 95% y 50%, en el panel inferior-derecho se muestra la diferencia de los niveles de inundación estimados con una	

probabilidad de ocurrencia de entre 5% y 50%, (como se puede observar, las diferencias son mayores en la parte alta de la cuenca); finalmente en el panel intermedio-derecho, se presenta la extensión de la áreas inundables con una probabilidad de ocurrencia asociada.	39
Figura 4.6 Perfiles en el río Usumacinta de los niveles de inundación máximos para estimaciones de 95% de probabilidad de ocurrencia (en verde), 5% de probabilidad de ocurrencia (en rojo) y para los eventos de inundación estimados en 2008 y 2011. La escala vertical izquierda representa la diferencia en metros entre cada estimación de niveles de inundación con respecto a una inundación de 50% de probabilidad de ocurrencia. La escala vertical derecha representa el nivel máximo de agua en el río, en metros sobre el nivel del mar. Con el rango de incertidumbre asociado al evento de inundación en 2008 se comparó numéricamente los niveles con los inundación en 2011 simulados, dando como resultado que, sobrepasa el rango de predicción para una probabilidad de ocurrencia del 5% en los primeros 250 mil metros a partir de la desembocadura (es decir la parte baja de la cuenca); mientras que en la parte alta de la cuenca los niveles de inundación de 2011 quedaron dentro del rango de incertidumbre en las estimaciones probabilísticas.	40
Figura 4.7 Resumen del resultado de las alternativas de alivio en la llanura de inundación. Cada grafico representa la diferencia de niveles de inundación entre el río Usumacinta sin obras y el sistema con alguna obra de dragado. El cadenamiento 0+000 corresponde al punto de descarga en el Golfo de México.	42
Figura 4.8 Ejemplo de una sección transversal del río Usumacinta obtenida en el levantamiento de 2012 en condiciones actuales (en color Verde) y la propuesta de dragado (en color Azul)	43
Figura 4.9 Ejemplo de Secciones del río San Pedro – San Pablo (en color Marrón) y el río Palizada (en color Púrpura), obtenidas del levantamiento de 2012.	44
Figura 4.10 Costos de dragado para cada alternativa, en millones de pesos (MDP)	44
Figura 4.11 Reducción en los niveles de inundación para los ocho puntos de análisis y para las siete alternativas de mitigación propuestas. Como se observa para la localidad de Boca de Chilapa los niveles de inundación se reducen en 70 centímetros mediante la alternativa de mitigación No. 6 (propuestas de dragar las desembocaduras de los ríos Usumacinta y San Pedro – San Pablo); sin embargo existen otras localidades (p.e. Palizada) en la que los niveles de inundación no pueden ser reducidos de forma significativa mediante las alternativas de dragado, por lo que es necesario optar por otro tipo de soluciones como podría ser la construcción de bordos de protección.	45
Figura 4.12 Niveles máximos de inundación (en metros) calculado en las simulaciones para cada punto de interés y para cada alternativa de dragado. Para la alternativa 7 (ver descripción en el capítulo 4.3.7) se obtuvieron los niveles de inundación más pequeños en todos los puntos de análisis. Como se puede apreciar, para todas las propuestas de dragado, se presentan las reducciones de niveles de inundación en las zonas bajas de la cuenca (puntos 1 a 4) y para las zonas altas (puntos 5 a 8) el efecto de mitigación es mínimo por lo que se necesitan otro tipo de estrategias de alivio para la cuenca alta.	45
Figura 4.13 Comparación entre el costo y niveles de mitigación de inundación para cada alternativa propuesta para cada punto de análisis de la zona de estudio. Para el punto 2 localizado en la Boca de Chilapa, la mayor reducción en los niveles de inundación se logra con la alternativa 6 (ver descripción en el capítulo 4.3), donde se reducen los niveles de inundación del orden de 70 centímetros. También se puede corroborar que para todas las propuestas de dragado, se presentan las reducciones de niveles de inundación en las zonas bajas de la cuenca (puntos 1 a 4) y para las zonas altas (puntos 5 a 8) es mínimo el efecto de mitigación.	46
Figura A.1 Opción 1. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	56
Figura A.1 Opción 2. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	57
Figura A.2 Opción 3. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	58
Figura A.3 Opción 4. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	59
Figura A.4 Opción 5. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	60
Figura A.5 Opción 6. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	61
Figura A.6 Opción 7. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).	62

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Diferentes métodos para el modelado de inundación en llanuras en orden ascendente de complejidad hidráulica.	7
Tabla 1.2 Categorías típicas de datos topográficos requeridos para un modelo unidimensional.	8
Tabla 1.3 Comparación entre un modelos numérico unidimensional contra uno bidimensional.	12
Tabla 4.1 Análisis de sensibilidad con el modelo hidrológico	36
Tabla 4.2 Diferencias entre los niveles máximos de inundación: Sin Obras – Dragado. Datos en metros.	43
Tabla 4.3 Volumen de dragado en metros cúbicos, para los diferentes escenarios de alivio propuestos.	44

Resumen

Existen eventos hidrometeorológicos que, cada año han provocado severas inundaciones en la Cuenca del río Usumacinta, Tabasco (México), dejando severos daños económicos y humanos. El objetivo del presente trabajo es el de evaluar numéricamente las áreas susceptibles a la inundación en la cuenca considerando incertidumbres hidrológicas. Para esto se implementó el uso de un modelo hidrológico en el cual se integraron técnicas de Variación de Parámetros Característicos de la Cuenca para el cálculo de N-hidrogramas, aplicando la metodología GLUE ([Beven & Binley, 1992](#)) para un evento de lluvia establecido en la cuenca. Adicionalmente, se empleó el modelo hidráulico, para modelar la superficie inundada y generar mapas de inundación asociando una probabilidad de ocurrencia para un evento de lluvia extremo dado.

Para los insumos de los modelos se emplearon los principales datos geográficos de la red hidrológica, el modelo de elevación (usando LiDAR), imágenes satelitales y de radar, estaciones hidrológicas, edafología, vegetación y uso de suelo. Se consideraron los eventos de inundación ocurridos en 2008 y 2011 para la calibración y validación de los modelos numéricos utilizados. Los resultados indican que la superficie y niveles de inundación varían de forma significativa para un solo evento de inundación cuando se consideran las incertidumbres hidrológicas. Finalmente se propusieron estrategias de mitigación de inundaciones en el río Usumacinta en respuesta al Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT).

Los modelos aplicados y los resultados de esta evaluación aportan información y validan una metodología útil para la investigación y toma de decisiones sobre las estrategias y medidas de prevención y mitigación de los impactos por inundación.

Palabras clave

Inundación, río Usumacinta, Tabasco, incertidumbre, LiDAR, modelación hidráulica, PHIT.

Abstract

Historically and even recently, meteorological events have caused severe floods in the Usumacinta River in Tabasco (Mexico) resulting in severe economic impacts and loss of life. The objective of the present study is to numerically evaluate areas susceptible to flooding in the watershed, considering hydrological uncertainties. Variation of Parameters Characteristic of the watershed techniques were integrated in order to calculate of N-hydrograph flows applying the GLUE methodology ([Beven & Binley, 1992](#)) for each rainfall event in the watershed. Additionally, the hydraulic model for open channels, Hec-RAS was used to model inundated surfaces and generate flood maps associating a probability of occurrence for a given extreme rainfall event..

Model inputs included main geographical data such as the river or drainage network, digital elevation model (using LiDAR), satellite and radar images, soils and vegetation and land use cover. Were taken into account flood events occurred in 2008 and 2011 for calibration and validation of models. The results indicate that the surface and flood levels vary significantly for a single event of flooding when considering the hydrological uncertainties. Finally proposed flood mitigation strategies in the Usumacinta River in response to "Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT)".

The results and models generated from this study provide information and a valuable methodology for research and decision making regarding strategies and measures of prevention and mitigation by flood impacts.

Key words

Floods, Tabasco, Usumacinta river, uncertainty, LiDAR, hydraulic modelling, PHIT.

Prólogo

Para abordar el tema de las inundaciones es necesario entender el concepto de inundación en los contextos científico, histórico/social y económico; con el fin de tener una perspectiva general de lo que involucra este fenómeno.

El fenómeno hidrológico tiene un comportamiento que responde a un complejo conjunto de interacciones entre diversos procesos físicos que dan origen a lo que se conoce como ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra. Con mayor precisión se puede decir que es una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo, deshielos, escurrimiento (superficial y subterráneo) y nuevamente evaporación (ver **Figura 1**).



Figura 1 Balance hídrico, de acuerdo a la USGS.

Las inundaciones son procesos naturales y forman parte del ciclo hidrológico, por lo tanto no son una casualidad sino una consecuencia que surge de la interacción de los procesos dentro del balance hídrico de la cuenca, incluyendo la incidencia de evento meteorológicos extremos (p.e. precipitación intensa).

El balance hídrico de una cuenca puede modificarse al cambiar las condiciones ambientales (p.e. la tala de árboles y arbustos). Se sabe que cada parte de un sistema tiene su función y en un ecosistema la vegetación es importante para la conservación de los suelos. La tierra árida, tiene menor capacidad de absorción de agua lluvia, la cual en vez de ser conducida hacia el subsuelo, se desliza arrastrando la superficie más fértil, causando esterilidad e inundaciones.

La magnitud de una inundación depende de muchos factores y no sólo está relacionada con el nivel de precipitación que se registre en un punto dado, sino también con la configuración orográfica de la cuenca, con la distribución espacio temporal de la lluvia, con marea de tormenta (en el caso de inundaciones costeras), con el estado de humedad del suelo y evidentemente con la falta de un ordenamiento territorial. Este último aspecto es de gran importancia para prevenir el agravamiento de los daños registrados durante un evento. Los problemas relacionados con las inundaciones y la vulnerabilidad de la población se han incrementado debido a un desordenado proceso de cambios de uso de suelo, urbanización, asentamientos ilegales y viviendas construidas de manera inadecuada y en zonas que naturalmente tienen un alto nivel de riesgo ([Guarín et al., 2004](#)).

De acuerdo con cifras del Centro de Investigación en Epidemiología y Desastres, estos eventos a pesar de ser un fenómeno natural, son los que producen las mayores pérdidas materiales y humanas a nivel mundial ([EM-DAT, 2012](#)).

Problemática

Al permitir la invasión con viviendas, de regiones proclives a inundación, el “Fenómeno Natural” es renombrado erróneamente por el hombre como, “Desastre Natural”, cuando en realidad este riesgo desastre ha sido socialmente construido (p.e. al permitir los asentamientos en estas zonas). Adicionalmente, el mal manejo de las zonas inundables constituye un freno para el desarrollo social y económico para países en vías de desarrollo, la necesidad de hacer frente año con año a estos desastres, distraen recursos que podrían ser utilizados en otras labores. Es por ello que para los países en vías de desarrollo, la generación de mejores estrategias de manejo de estos eventos debe ser una prioridad nacional. En México, el Fondo Nacional de Desastres (FONDEN), emplea más de 70% de sus recursos para ayudar en la recuperación de las zonas damnificadas y en los últimos años se ha incrementado considerablemente (ver **Figura 1**).

A pesar de que las inundaciones han sido recurrentes en diversos estados del país, su estudio sistemático es todavía escaso; sin embargo en los últimos años se han desarrollado diversas metodologías para interpretar las interacciones que se presentan en los ecosistemas y el clima. Adicionalmente, se debe incorporar la complejidad del crecimiento poblacional que aunque sea de mayor o menor proporción, ocasionan una problemática social ([Pedrozo-Acuña, 2013](#)).

Diversos investigadores han resaltado que para enfrentar con éxito estos fenómenos, se requiere generar un enfoque a nivel de cuenca, en donde se incluyan medidas de cambios en el uso de suelo, desarrollo y manejo de bases de datos hidrometeorológicos, y el empleo de herramientas numéricas y de percepción remota de última generación ([Pedrozo-Acuña, 2012b](#)).

Las cuencas hidrológicas representan la unidad idónea para la planeación del desarrollo socioeconómico y el uso racional de los recursos naturales como el agua, suelo y vegetación ([Cotler, 2004](#)). En ese sentido, la evaluación del riesgo por inundaciones es esencial para el tránsito hacia una cultura de prevención del desastre, además se identifica como necesario considerar propuestas estructurales de protección (p.e. bordos, compuertas), junto con estrategias de manejo que permitan una mejor convivencia con el agua (p.e. ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana). Sobre todo en aquellas regiones donde la inundación es inevitable.

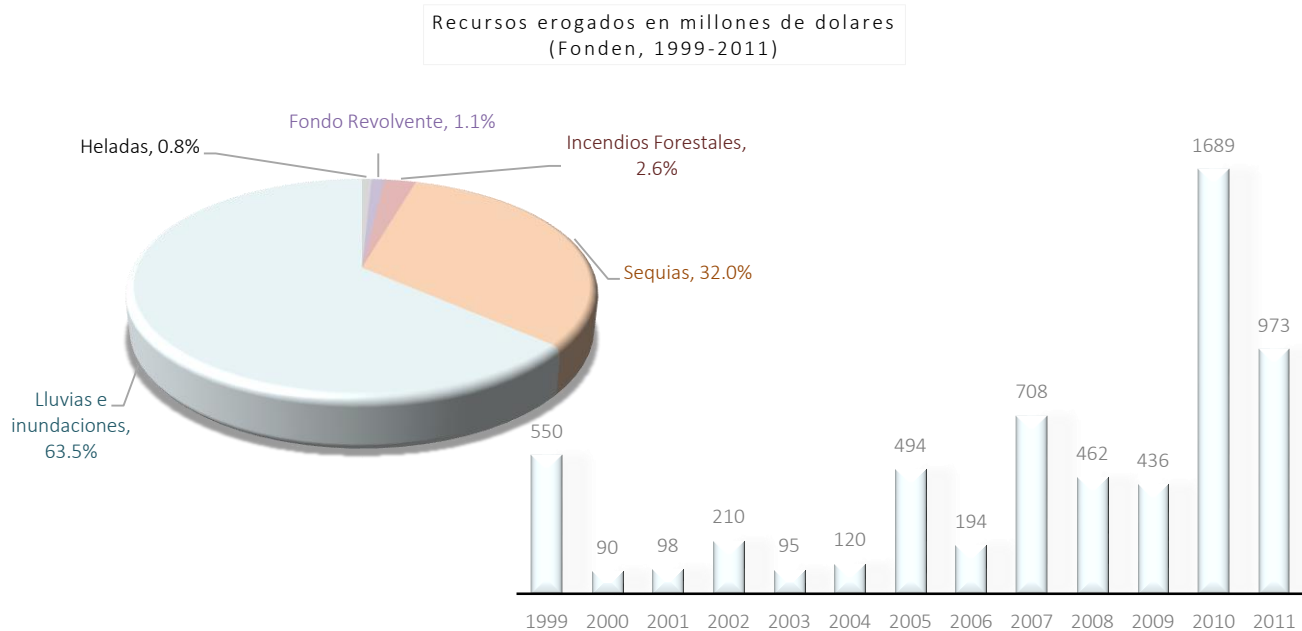


Figura 2 Gastos para la recuperación de infraestructura ante eventos de desastre (FONDEN, 1999 – 2011). El gráfico circular muestra el porcentaje de gasto asociado a un evento adverso particular.

Debido a la ubicación geográfica de nuestro país, las inundaciones afectan gran parte del territorio nacional, particularmente las zonas costeras y las regiones de gran intensidad de precipitación. Aunque existen algunas excepciones como el de Ciudad del Carmen en Campeche, donde se han adaptado para minimizar los daños por inundación. La región más vulnerable se encuentra al sureste del país, particularmente los estados del Golfo de México como son: Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. Durante la última década, estas entidades han ocupado los primeros sitios nacionales en el número anual de inundaciones severas registradas (p.e. Tamaulipas 2011; Tabasco 2007, 2009, 2010, 2011; Veracruz, 2010), las cuales han afectado gravemente a los sectores sociales (gran cantidad de damnificados), productivo (ganadería y agricultura) e infraestructura (vías de comunicación).

Para citar un ejemplo emblemático, en 2007, en el Estado de Tabasco, más de un millón de personas resultaron damnificadas y las pérdidas económicas se estimaron alrededor de más de 700 millones de dólares, lo que lo ubica como segundo mayor desastre nacional en los últimos 50 años, siendo el de mayor costo el siniestro provocado por el huracán Wilma en las costas de Quintana Roo en 2005, donde los daños ascendieron a 1,752 millones de dólares, ([CENAPRED, 2012](#)).

Recientemente, en 2011, el río Usumacinta desbordó su cauce generando una inundación de gran magnitud (área total inundada de 3,940 km²), lo que a su vez produjo una emergencia que requirió la activación del Plan de Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre del Ejército Mexicano, denominado PLAN DN-III-E.

En general, la comunidad científica internacional ha identificado los mapas de inundación como los instrumentos indispensables para el manejo de los riesgos asociados a estos eventos. Estos mapas permiten la ubicación geográfica de la extensión de la mancha de inundación en una región dada, asociada a una probabilidad de ocurrencia específica. La importancia de generar estos mapas estriba en que permiten caracterizar el peligro de inundación, lo que a su vez habilita la planeación de decisiones para la protección civil, la evaluación de daños y el diseño de obras de defensa. Es decir, hacen énfasis en la prevención del desastre en contraste con la reacción ante la contingencia. El reto consiste en cómo obtener mapas confiables que determinen, con cierto grado de confiabilidad, el área inundada para un periodo de retorno dado.

Cabe resaltar que cada etapa en el proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, fallas en los datos observados y en la capacidad de los modelos para representar la realidad. Esto es lo que se conoce como incertidumbre. Así los modelos que se utilizan para la generación de pronósticos están sujetos a incertidumbres de naturaleza epistémica (p.e. limitaciones del conocimiento), además de las asociadas a datos de entrada, errores en los datos geográficos y la falta de datos para su correcta calibración (p.e. [Rauch et al., 2002](#); [Pappenberger & Beven, 2006](#); [Reeve et al., 2010](#)).

La separación del proceso de pronóstico en etapas, por medio de una cascada de modelos, permite diagnosticar con mayor fiabilidad la fuente de error y su propagación a lo largo del mismo. Por ejemplo, al escalar modelos hidrológicos e hidrodinámicos, es posible mostrar como los errores en las predicciones del gasto en un río afectarán la estimación de una zona afectada por la inundación (p.e. [Pedrozo-Acuña et al. En arbitraje](#); [Rodríguez-Rincón et al., 2012](#))

Dentro de los retos actuales a que se enfrentan los especialistas en hidráulica, se encuentra entonces la necesidad de identificar las contribuciones de mecanismos individuales a la incertidumbre total. Es por ello que en este trabajo de investigación, se utiliza la filosofía propuesta por [Rodríguez-Rincón et al. \(2012\)](#) con el propósito de evaluar la incertidumbre hidrológica en la relación lluvia-escurrimiento y cuantificar su impacto, en la estimación de zonas afectadas por un fenómeno de inundación. El caso de estudio en esta tesis es el de la cuenca del río Usumacinta en Tabasco, México, que representa una cuenca de gran tamaño en superficie con los mayores niveles de precipitación en el país.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar la incertidumbre hidrológica en la relación lluvia-escurrimiento y cuantificar su impacto la estimación de zonas afectadas por un fenómeno de inundación. Utilizando para ello la cuenca del río Usumacinta en Tabasco, México.

Adicionalmente, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- *Reproducir, para la cuenca del río Usumacinta, los eventos de inundación ocurridos en 2008 y 2011, a fin de construir un modelo numérico capaz de representar los flujos en este río. Para ello se utilizará información topográfica de alta calidad y resolución (p.e. datos de altimetría laser LiDAR), imágenes de satélite y radar, secciones transversales de los ríos medidos en campañas de campo y la información registrada durante el evento en la estación hidrométrica de Boca del Cerro.*
- *Realizar un análisis hidrológico (lluvia-escurrimiento) de la cuenca del Usumacinta que considere incertidumbres hidrológicas en la estimación del gasto a transitar por el río. Para lograr lo anterior se utilizarán datos de precipitación medidos durante el evento de 2008 y un modelo de parámetros distribuidos para la estimación del gasto.*
- *Aplicar el modelo hidrológico al evento de 2011, de tal forma que a partir de la variación de los parámetros físicos se generen N-hidrogramas para una misma lluvia.*
- *Utilizar el modelo hidrodinámico para simular los hidrogramas probabilistas obtenidos y evaluar alternativas de solución para la mitigación y manejo de inundaciones en esta región. Se anticipa que dentro de las medidas seleccionadas se integrarán alternativas estructurales y NO estructurales.*

Este trabajo propone dar un panorama general y ampliar la perspectiva del problema de inundaciones en la región del río Usumacinta, con la finalidad de ayudar en la generación de soluciones y toma de decisiones ante futuros eventos de inundación en el estado de Tabasco.

Estructura de la tesis

Este trabajo está integrado por cinco capítulos, organizados de la siguiente forma:

Capítulo 1

Modelos hidrodinámicos e incertidumbre

Se describen las características generales de los modelos numéricos hidrodinámicos desarrollados en la actualidad, así como sus ventajas y desventajas en casos particulares de aplicación. También se hace una descripción de la incertidumbre que involucra el utilizar estos modelos y la importancia de su consideración como parte del proceso de simulación en la evaluación y análisis de procesos hidráulicos.

Capítulo 2

Características regionales

Se presenta la información general de la cuenca del río Usumacinta, describiendo el sistema que se modela en este estudio, así como las condiciones de frontera y toda la información empleada para poder implementar los modelos numéricos.

Capítulo 3

Metodología: Modelación de inundaciones a gran escala

En este capítulo se describe la implementación de los modelos hidrológico e hidráulico, su encadenamiento, calibración y validación con ayuda de datos medidos durante el evento de inundación en 2008 y 2011. En el modelo hidrológico se incorpora la metodología *GLUE* para determinar la incertidumbre hidrológica en la cuenca, de tal forma que el escurrimiento generado se incorpora al modelo hidrodinámico para el cálculo hidráulico con el cual se estiman los mapas de inundación.

Capítulo 4

Resultados y estrategias de mitigación

Se muestran las comparaciones en cuanto a áreas y niveles de inundación que se presentan en la zona de estudio y en las localidades más pobladas. Se presenta la variación de las simulaciones de inundación incorporando la incertidumbre hidrológica y finalmente se proponen algunas alternativas de mitigación.

Capítulo 5

Resolución y enfoques integrables

Para finalizar, se presenta una evaluación de la metodología implementada en las simulaciones, considerando la incertidumbre hidrológica y el hecho de analizar un sistema hidráulico a gran escala. Además de las propuestas de mitigación, se plantean medidas no estructurales en el estudio de las inundaciones, respecto a los efectos adversos esperados. Por último se propone la integración de este estudio con los trabajos realizados en el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT).

Capítulo 1

MODELOS HIDRODINÁMICOS E INCERTIDUMBRE

1. Modelos hidrodinámicos e incertidumbre

Con el propósito de realizar una adecuada cuantificación de los daños observados durante y después de un evento de inundación, es necesario contar con información sobre la extensión, profundidad y velocidad del fenómeno, además de la persistencia y la duración. De manera tal que se puedan delimitar las áreas de afectación, lo que permite también la definición de las rutas de evacuación más seguras. Los mapas de inundación, son así la pieza fundamental para la definición de estrategias adecuadas para el manejo del riesgo debido a inundaciones. Actualmente, el avance tecnológico ha permitido el desarrollo de herramientas computacionales, que permiten conocer esta información en toda una región de interés. El uso de estas herramientas, cada vez más sofisticadas, se ha convertido en práctica común alrededor del mundo. Sin embargo, existe una gran variedad de modelos que pueden ser utilizados para realizar este análisis, y dependiendo de la escala del dominio de interés y la información disponible, un modelo tendrá ventajas sobre otro.

Por otra parte, es bien sabido que la modelación numérica de flujos de inundación sobre llanuras y humedales, es una herramienta de gran utilidad práctica, no sólo para determinar los impactos ecológicos de una región sino también para proteger los bienes y/o comunidades aledañas. El presente estudio, documenta los modelos numéricos que son utilizados con mayor frecuencia en la literatura para determinar los flujos de inundación sobre llanuras (p.e. humedales). De tal manera que sus resultados proveen información vital para la determinación del área, duración, frecuencia y magnitud de la inundación.

1.1 Clasificación de modelos

En los campos de la hidrología y la hidráulica fluvial, existe una gran variedad de modelos numéricos que se utilizan para resolver problemas de inundación y flujos en llanuras. Con objeto de clasificar las hipótesis a las que se ajustan las diversas aproximaciones existentes, [Chow et al. \(1988\)](#) dividieron los modelos en diversas categorías con base en tres parámetros clave: aleatoriedad, espacio y tiempo. Una división alternativa, frecuentemente utilizada por los modeladores, es la que se define a través de los conceptos aplicados en el modelo para describir el comportamiento del sistema. Definiéndose de esta forma tres categorías:

Modelos de caja negra.- Este tipo de modelos son aquellos que se basan en el comportamiento de datos, en los que se adopta una relación entre dos variables de interés (entrada-salida). Ejemplos de este tipo de modelos están representados por los métodos de redes-neuronales ([Cameron et al., 2002](#)) y correlaciones entre bases de datos ([Young et al., 1997](#), [Lees, 2000](#)). Para utilizar este tipo de aproximación, se requiere una gran cantidad de información (p.e. gastos en los ríos, niveles, elevaciones, clima etc.) de tal forma que se pueda establecer cierta correlación entre la causa y el efecto que se desea investigar. Usualmente, las funciones desarrolladas bajo este tipo método no reflejan la física del problema en estudio. Por lo que en México, su uso está limitado dada la poca cultura de medición que existe.

Modelos basados en la física.- Este tipo de modelos, también conocidos como modelos de procesos, son los más complejos de todos. Tienen su base en los principios fundamentales de la física del problema hidráulico, y se requiere de una adecuada adaptación mediante condiciones de frontera apegadas a la realidad. En su aplicación para la simulación de flujos en ríos y grandes dominios de inundación, se requiere de un proceso de calibración que a su vez necesita mediciones de campo a fin de validar la herramienta numérica ([Madsen, 2003](#)).

Modelos conceptuales.- Se refieren a aquellos que ofrecen cierto compromiso práctico entre los modelos de procesos y los modelos de caja negra ([Viney et al., 2000](#)). Estos modelos utilizan ecuaciones empíricas de los procesos considerados como dominantes en un sistema, en lugar de resolver las ecuaciones fundamentales de la física. No requieren de una considerable cantidad de datos de campo como en el caso de los modelos de procesos, pero tienen una clara desventaja en el hecho de que estos modelos requieren pasar por un arduo y largo proceso de calibración (con un conjunto ideal de datos, que no siempre está disponible).

Sistemas de Información Geográfica en los modelos.- Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se definen como la captura, manejo y análisis de datos e información geográficamente representados, son amplia y mundialmente implementados por instituciones gubernamentales, no-gubernamentales y académicos, como una herramienta indispensable para la planeación territorial, manejo integrado de cuencas, evaluación y mitigación de desastres, así como para la conservación de recursos naturales ([Lang, 1998](#); [Morain, 1999](#); [Brady et al., 2002](#); [INE, 2003](#); [Sánchez et al., 2004](#); [Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004](#)). La zonificación de áreas susceptibles a la inundación, por lo general, implica la integración de los SIG; en ésta, se usan datos topográficos, edafológicos, hidrológicos, climáticos, de vegetación y uso de suelo, con la modelación hidrológica e hidráulica; con todo ello se determina espacial y cuantitativamente las áreas inundadas y los riesgos asociados ([Rosso & Rulli, 2002](#); [Abdalla et al., 2006](#)).

Antes de seleccionar un modelo numérico para describir el flujo en llanuras de inundación, se debe poner particular atención en los datos geográficos disponibles (p.e. topografía, batimetría, rugosidad del suelo etc.). En primer lugar, la escala disponible de los datos geográficos determinará en gran medida la precisión y confiabilidad de los resultados numéricos. Es muy probable que las bases de datos existentes, no contengan la información a la escala requerida por un modelo, por lo que se requiere cierta experiencia para seleccionar la escala apropiada de resolución ([Beven, 2001c](#)).

1.2 Estimación de áreas de inundación

El cálculo de áreas inundables en llanuras y humedales es fundamental para la evaluación, administración y la protección de zonas propensas a ser dañadas a nivel social. A pesar de que el público en general puede considerar que toda inundación es inaceptable, es claro para la comunidad científica internacional que este objetivo es inalcanzable. El grado de aceptación de inundación para un evento probable, se establece a través de una evaluación económica, comparando las pérdidas potenciales en la zona, con el costo de construcción de obras de defensa para la misma ([Dutta et al., 2003](#)). Una vez evaluadas las zonas inundables, el problema estriba en determinar los niveles de inundación. Para finalmente generar un mapa que defina la extensión de la inundación, los niveles máximos, y en algunos casos las velocidades de flujo asociadas; todo esto asociado a posibles escenarios adversos previstos. El problema entonces consiste en cómo definir mapas confiables que determinen el área de inundación para unos probables eventos extraordinarios.

La **Tabla 1.1** proporciona una revisión de la variedad de modelos disponibles para la determinación de la extensión de inundación en llanuras. El método más simple, consiste en estimar un nivel plano de superficie libre del agua por medio de niveles de agua observados en estaciones hidrométricas. Esta superficie plana se intersecta con datos de elevación provenientes de un modelo digital de terreno (MDE) ([Priestnall et al., 2000](#)). Esta metodología no toma en cuenta la hidráulica de la llanura ni el río, y su extrema simplicidad se refleja en la deficiencia de sus resultados ([Horritt & Bates, 2001](#)). En consecuencia, se considera que su aplicación para la delimitación de humedales y áreas de inundación en cuencas pequeñas o zonas urbanas, es inviable.

Por otra parte, el método de la celda de almacenamiento desarrollado por [Cunge \(1975\)](#) ha sido ampliamente aplicado en la determinación del área de inundación ([Cunge, 1980](#); [De Jonge et al., 1996](#); [Romanowicz & Beven, 1998](#)). En este método, la llanura o humedal es dividido en grandes celdas de almacenamiento, con agua fluyendo de los ríos hacia estas celdas y con intercambio de flujo entre celdas. El nivel del agua en las celdas es constante y se determina por medio del balance entre flujos de entrada y salida, similar a un volumen de control, y los flujos se determinan por medio de ecuaciones de flujo uniforme. En este tipo de aproximaciones, la extensión de la inundación y en consecuencia la confiabilidad del modelo está determinada por la forma en la que se definen las celdas (p.e. tamaño, elevación).

Además se incluyen los modelos hidrodinámicos que resuelven las ecuaciones de continuidad de flujo en una dimensión y en dos dimensiones. En la **Tabla 1.1** se incluyen, ejemplos de aplicación de estos modelos que están disponibles en la literatura junto con los códigos disponibles para su utilización.

Tabla 1.1 Diferentes métodos para el modelado de inundación en llanuras en orden ascendente de complejidad hidráulica.

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
Superficie libre del agua	Se define una superficie libre del agua (plana) a través de los valores de nivel obtenidos de estaciones hidrométricas en los ríos. Esta superficie se superpone a un MDE para obtener la inundación.	NINGUNO	Priestnall et al., 2000
Celda de almacenamiento grandes	El río y la llanura se modelan de forma independiente, la llanura se discretiza como celdas de inundación y el flujo en el río se describe a través de ecuaciones basadas en el flujo uniforme (p.e. Manning).	NINGUNO	Cunge, 1975 ; De Jonge et al., 1996
Celda de almacenamiento pequeñas	Similar a la anterior, pero en lugar de discretizar la llanura en celdas asignadas, éstas se determinan en función del MDE. El río es modelado de forma unidimensional.	FLOODSIM, LISFLOOD-FP	Bechteler et al., 1994 ; Bates & De Roo, 2000
Modelos hidrodinámicos de una dimensión (1D)	Resuelven las ecuaciones de Saint-Venant (1D) por medio de una serie de secciones transversales del río y llanura de inundación, perpendiculares al flujo del río. Los niveles de agua resultantes en puntos 1D, pueden ser dibujados en 2D por medio de una interpolación espacial de los resultados.	HEC-RAS, ISIS, MIKE11, SOBEK	Tate & Maidment, 1999 ; Penning-Rowsell & Tunstall, 1996 ; Gourbesville, 1998 ; Werner, 2001
Modelos hidrodinámicos de dos dimensiones (2D)	Resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D, en algunos casos con modelos de cierre de turbulencia. Es posible discretizar la llanura de inundación por medio de mallas regulares (rectángulos) o adaptables (triángulos).	TELEMAC-2D, MIKE21, GUAD-2D, DELFT-FLS, DELFT3D, TUFLOW, DIVAST, TRENT	Hervouet, 2000 ; McCowan & Collins, 2001 ; Murillo et al., 2008 ; Beffa & Connell, 2001 ; Stelling & Duinmeijer, 2003

1.3 Modelos hidrodinámicos unidimensionales (1D)

Los modelos hidrodinámicos en una dimensión (1D) han sido aplicados con cierto éxito para el estudio de los niveles de inundación y descargas en sistemas ribereños a escalas que incluyen las decenas y centenas de kilómetros ([Wijbenga et al., 1994](#); [Lammersen et al., 2002](#); [Yoshida & Dittrich, 2002](#)). Este tipo de modelos, permiten una evaluación rápida de la distribución del nivel del agua y los gastos en un río considerando efectos de advección y difusión.

Este tipo de códigos se basan en la hipótesis de que el flujo es unidimensional, siendo la dimensión relevante la longitud del problema, a lo largo de la cual se evalúan el gasto y los niveles de agua en el río. Se considera flujo gradualmente variado, de tal forma que se considera presión hidrostática. La topología del río se define como una serie de ramas interconectadas en nodos, mientras que la geometría se define a través de secciones transversales perpendiculares a la dirección de flujo, con los niveles de agua en cada sección considerada como constante a lo largo de la misma.

Como se ha visto existe una variedad de códigos comerciales y no-comerciales disponibles (ver **Tabla 1.1**) y éstos varían dependiendo del objetivo de aplicación y su solución matemática y numérica, aunque todos se basan en los principios descritos

por las ecuaciones de continuidad y momento en su versión de 1D. Además, utilizan la rugosidad de Manning para definir la fricción del fondo tal que:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (\text{ec. 1.1})$$

Dado que no existe solución analítica para las ecuaciones descritas en (ec. 1.1), los códigos resuelven el sistema de ecuaciones de forma numérica, principalmente por medio de la técnica de diferencias finitas y más recientemente se utiliza volumen finito, en cualquier caso, básicamente se utilizan tres tipos de discretización espacial:

- El esquema de caja o Preissmen, donde el nivel del agua y el gasto son definidos de forma conjunta en puntos a lo largo de la malla.
- Se utilizan esquemas anidados donde el nivel del agua y el gasto se definen de forma alternada en los nodos de la malla (Cunge, 1980).
- Para simular a detalle subareas mediante modelados dinámicos se utilizan las mallas telescópicas (ALASKA et al., 1999).

La **Tabla 1.2** presenta un resumen de los tipos de datos típicos que se necesitan para la puesta a punto de los modelos unidimensionales. Cabe resaltar, que los datos más importantes para la fiabilidad de los resultados generados con este tipo de modelos, son las secciones transversales que determinan la forma del cauce del río.

Tabla 1.2 Categorías típicas de datos topográficos requeridos para un modelo unidimensional.

Datos	Descripción	Fuente posible
Configuración del río	Disposición del sistema de ríos.	Mapa, fotos aéreas y de satélite.
Nodos	Ubicación de condiciones de contorno y confluencias.	Mapas, fotos aéreas y de satélite.
Canal principal	Determinación del canal principal (cauce del río).	Mapas, fotos aéreas y de satélite.
Planicie de inundación	Elevaciones en la llanura de inundación	Cartografía o levantamiento topográfico de campo
Ubicación/Descripción de estructuras de control	Ubicación, dimensiones y operación de las estructuras.	Levantamiento topo-batimétrico en campo
Secciones transversales (ubicación y configuración)	Ubicación y elevación de las estructuras de control	Levantamiento topo-batimétrico en campo

Por otro lado, es posible generar mapas de inundación en 2 dimensiones a partir de los resultados de un modelo unidimensional, bajo la hipótesis de que los niveles de agua modelados en 1D permanecen constantes a lo largo de la sección transversal modelada. Dado que esta sección no representa sólo un punto, sino una línea sobre el mapa de la llanura. Haciendo uso de esta hipótesis, se pueden proyectar mapas de inundación en 2D, a través de una interpolación entre los niveles de agua descritos en cada nodo (p.e. Marche et al., 1990; Werner, 2001).

A pesar de que estos métodos de interpolación otorgan una poderosa representación visual de los resultados de un modelo 1D, los resultados generados de esta forma son solamente eso, por lo que no hay una explícita representación hidráulica detallada entre las secciones utilizadas (Bates & De Roo, 2000). A pesar de esta limitación, su versatilidad reside en la capacidad que tienen para representar zonas de afectación en áreas de gran magnitud (del orden de kilómetros cuadrados). Sin embargo, es necesario hacer notar que la fiabilidad de los resultados está íntimamente relacionada a la calidad de la información base que se utiliza en la construcción numérica del problema.

1.4 Modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D)

Dado que la aplicación de modelos hidrodinámicos unidimensionales está basada en la determinación de niveles de aguas horizontales (p.e. constantes) a lo largo de la sección transversal, es muy probable que no se les pueda utilizar en situaciones donde las condiciones de flujo son más complejas. Este puede ser el caso tanto de un desbordamiento de un río (Hesselink et al., 2003), como el de un flujo sobre una planicie o humedal con pendiente muy suave en el terreno (Aronica et al., 1998). A pesar de que es posible emplear modelos 1D representando una red de canales intercomunicados (p.e. Doull & Bright, 1996), la dirección del flujo en cualquier punto del dominio estará restringida por la delineación de dichos canales, proporcionando resultados no satisfactorios en donde la dirección del flujo pueda cambiar significativamente, dependiendo de la condición de

forzamiento (p.e. [Beffa & Connell, 2001](#)). En estas condiciones, se requiere como mínimo, el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional (2D).

Este tipo de modelos fueron primeramente desarrollados y aplicados a estuarios y para el modelado de flujos costeros ([Li & Falconer, 1995](#)). [Bates et al. \(1996\)](#) enumeraron una lista de requisitos que un modelo bidimensional deberá cubrir para ser utilizado en la descripción de flujos de inundación en llanuras, estos son:

- *El campo de flujo debe ser representado en al menos 2 dimensiones de tal forma que se representen procesos dinámicos conocidos.*
- *Se debe utilizar un algoritmo numérico eficiente que haga tratable el problema desde el punto de vista computacional.*
- *El modelo deberá representar la topografía del terreno y la forma arbitraria de los ríos en la planicie (p.e. meandros).*
- *El esquema numérico deberá ser capaz de manejar fronteras movibles en la planicie de inundación, asociadas con el mojado y secado de elementos.*

La aplicación de modelos hidrodinámicos en dos dimensiones (2D) para la evaluación del comportamiento del flujo en llanuras de inundación, es hoy por hoy un tópico que ha sido abordado con mucha frecuencia por la comunidad científica internacional. En las últimas dos décadas, se han documentado diversas investigaciones abocadas al flujos extremos (p.e. inundación) en ambientes rurales y urbanos (p.e. [Gee et al., 1990](#); [Bates et al., 1998](#); [Horritt, 2000](#); [Nicholas & Mitchell, 2003](#); [Romanowicz & Beven, 2003](#); [Néelz et al., 2006](#); [Patro et al., 2009](#); [Pedrozo-Acuña et al., 2012a](#); [Pedrozo-Acuña et al., 2012b](#); [Alcrudo & Navarro, 1994](#); [García-Navarro et al., 1995](#); [Borthwick et al., 2001](#)).

En consecuencia, se han desarrollado una gran cantidad de códigos que satisfacen los requerimientos por [Bates et al. \(1996\)](#). Estos resuelven las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, las cuales sin considerar la fricción de viento, se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} &= 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{ec. 1.2})$$

Los códigos difieren en el método numérico utilizado para resolver estas ecuaciones y en la discretización empleada para la topografía. Existen tres principios fundamentales:

- *Mallas estructuradas o regulares.*
- *Mallas no estructuradas.*
- *Mallas curvilíneas.*

De las cuales, la primera y la segunda representan las más utilizadas para el modelado numérico de inundación en llanuras.

Cuando se utilizan este tipo de modelos, se debe tener cuidado en el balance que representa el costo computacional de la solución del problema y la escala espacio-temporal que se desea resolver.

La creciente disponibilidad de datos de elevación a una resolución adecuada, por ejemplo, altimetría laser o de radar, ha provocado que la aplicación de este tipo de códigos, sea práctica común alrededor del mundo. Desafortunadamente, todavía hay escasez de datos batimétricos para determinar, con la misma precisión, la batimetría de los cauces principales de los ríos, por lo que existe el requerimiento de campañas de campo para obtener datos de precisión adecuada. Esto se debe a que el cauce principal es el forzador dominante y de no contar con una batimetría adecuada en este tipo de modelos, es posible que se añada una incertidumbre adicional a pesar de contar con datos de elevación confiables. Además de la configuración del cauce principal, en análisis de menor escala, es necesario considerar la evolución espacio-temporal de los meandros en la llanura de inundación (lo cual modifica la configuración del DEM), mediante la modelación de arrastre de sedimentos.

A pesar de la limitación mencionada respecto a la información disponible, es claro que la más completa representación de flujos hidrodinámicos complejos sobre planicies o llanuras de inundación, está dada por los modelos bidimensionales. Sin embargo, en casos como el del río Usumacinta desde Boca del Cerro hasta su desembocadura, que es el que se presenta en este trabajo de investigación, su aplicación está limitada por la escala espacial del problema (miles de kilómetros cuadrados). En este sentido, es necesario planear una alternativa distinta que permita resolver el flujo, sus niveles y áreas de afectación a lo largo de todo el río.

1.5 Principales factores en la modelación numérica

[Gupta et al. \(1998\)](#) notaron que la confiabilidad de los resultados de cualquier modelo hidrodinámico está limitada por las hipótesis, datos de entrada y parámetros utilizados durante su ejecución. Esto conlleva a dos dificultades, la primera de ellas concierne a la selección de la estructura del modelo y la segunda, a la estimación de los parámetros asociados, de tal forma que el modelo reproduzca el comportamiento del sistema en estudio ([Sorooshian & Gupta, 1995](#)). El proceso por el cual se seleccionan parámetros adecuados para el modelo y se comparan los resultados con datos independientes (idealmente provenientes de campo) a fin de demostrar su capacidad para describir el sistema, es conocido como calibración y validación.

Investigaciones recientes han demostrado que a pesar del considerable mejoramiento en los recursos computacionales disponibles, la calibración de los modelos numéricos usados de forma cotidiana en la ingeniería hidráulica es un proceso complicado ([Sorooshian & Gupta, 1983](#)). La mayoría de los modelos hidráulicos y notablemente aquellos clasificados como de procesos y conceptuales, contienen alguna descripción de los flujos dinámicos que se consideran más importantes, ya sea a través del uso de ecuaciones con sustento físico (p.e. continuidad y momento) o por medio del empleo de relaciones empíricas entre datos de entrada y salida. Evidentemente, entre más procesos son incorporados en la descripción de un sistema, se mejora la capacidad del modelo para reproducir su respuesta real. Sin embargo, cada una de las funciones utilizadas para describir un proceso físico requerirá de proceso de calibración, para lo que se requiere contar con datos de campo que permitan identificar los valores adecuados para caracterizar al sistema. Sin embargo, existen casos en que la capacidad de predicción de escenarios no es directamente proporcional al número de funciones que incorpora, por lo que si no se cuenta con información suficiente es preferible utilizar modelos simplificados.

El problema estriba en que es muy común que no se cuente con los datos necesarios para caracterizar todos los procesos de forma individual, más aún tal y como lo señaló [Beven \(2006\)](#), existen varias combinaciones de parámetros que podrán dar la impresión de que se cuenta con un modelo calibrado. Esto se conoce como principio de equifinalidad, el cual representa de forma muy clara la gran cantidad de incertidumbre que puede estar asociada a los resultados numéricos.

La selección de un modelo sobre otro, depende básicamente de la escala espacial y temporal del problema a resolver, además de los recursos computacionales disponibles y las necesidades de cada usuario. Sin embargo, cabe resaltar que un modelo puede ser considerado tan bueno como los datos utilizados para la definición de parámetros, su calibración y validación. La información necesaria para la correcta aplicación de un modelo hidráulico se centra en 4 categorías:

- *Datos topográficos.*
- *Condiciones iniciales.*
- *Condiciones de frontera.*
- *Datos de fricción o rugosidad del terreno.*

A continuación se presenta una descripción general de cada una de estas condiciones.

Datos topográficos.- La elevación del terreno es considerada como el dato clave para el modelado de flujos de inundación. Las pendientes naturales del terreno determinan la ruta del flujo, por lo que se necesitan datos de gran precisión y resolución espacial. Tradicionalmente, los modelos hidrodinámicos se ponían a punto con secciones transversales de los ríos tomadas con un espaciamiento de entre 100 m y 1000 m. Este tipo de información tiene una precisión de milímetros y puede ser considerada en modelos hidrodinámicos 1D. Por otra parte, los datos provenientes de levantamientos topográficos son costosos y tampoco proveen información con una resolución espacial adecuada. En consecuencia, la ingeniería ha visto un aumento considerable en el uso de herramientas de percepción remota.

Existen tres alternativas que han mostrado un potencial razonable para adquirir datos útiles en el modelado hidrodinámico de inundaciones. La estereofotogrametría ([Baltasvias, 1999](#); [Lane, 2003](#); [Westaway et al., 2003](#)), la altimetría láser o LiDAR ([Krabill et al., 1984](#); [Gomes Pereira & Wicherson, 1999](#)) y la interferometría de radares de apertura sintética ([Hodgson et al., 2003](#)). Dentro de estas tres opciones, desde el punto de vista económico se destaca la tercera de ellas por la disponibilidad gratuita de los datos provenientes de la Misión Topográfica de Radar (SRTM, por sus siglas en inglés, [Rabus et al., 2003](#)).

Condiciones iniciales.- Las condiciones de inicio que se requieren para modelo hidráulico, son diferentes para cada modelo utilizado y se utilizan para otorgar un valor a las variables en todos los nodos de cómputo para el tiempo $t=0$. En la práctica, es imposible conocer las condiciones iniciales en todo el sistema que se va a modelar, por lo que se requiere hacer ciertas suposiciones adicionales. Para simulaciones en estado estacionario (p.e. flujo uniforme), la simulación se inicia considerando los primeros pasos de simulación como un periodo de calentamiento, considerando los resultados válidos una vez que la solución muestra cierto equilibrio con las condiciones de frontera que se han especificado. En general esto es necesario para modelos que no resuelven ciclos, mientras que los modelos que si lo hacen no necesitan calentamiento.

Condiciones de frontera.- La definición de cada condición de frontera depende de cada modelo y generalmente están asociadas a las condiciones que determinan el comportamiento físico de un sistema. Por ejemplo, el caudal de un río, el tránsito de un hidrograma, o la serie de tiempo del nivel medio del mar en una desembocadura. Estos datos, son generalmente determinados a partir de mediciones en campo y permiten que el modelo numérico esté limitado por condiciones de flujo asociadas a la realidad del sistema. Básicamente se pueden considerar modelos de fondo fijo y móvil donde las fronteras analizadas son estudiadas en tres dimensiones, en el primer caso la morfología es constante (no erosionable) y en el segundo caso la morfología es erosionable y se considera dinámica.

Perdidas de energía.- La resistencia hidráulica es un parámetro que representa la suma de una variedad de efectos: la fricción, el arrastre, y el impacto de la aceleración/ desaceleración del flujo. Estos se combinan para determinar un coeficiente de arrastre general C_d , que en hidráulica se expresa en términos de los coeficientes de resistencia al flujo como la n de Manning y la C de Chezy, los cuales se determinan a partir de la teoría de flujos uniformes. Esto implica la hipótesis de que la tasa de disipación de energía para flujos no uniformes es igual que la que se presenta para flujos uniformes con la misma pendiente en la superficie libre. Los efectos precisos representados por el coeficiente de fricción para un modelo en particular dependen de su dimensión, ya que la parametrización compensa las pérdidas de energía debidas a procesos no representados en el modelo, a esto se le conoce como flujo darciano. Por lo tanto, la buena o mala representación del arrastre en el modelo numérico depende de la discretización seleccionada para representar las secciones transversales del río y sus meandros. Por ejemplo, una discretización con una alta resolución espacial (Δx pequeño), representará de forma explícita una mayor proporción del arrastre en el sistema que una baja resolución (Δx grande) para el mismo modelo.

Sin embargo, existen algunos componentes de la resistencia hidráulica que son más fáciles de abordar. Por ejemplo, la fricción es un parámetro que para el flujo en ríos y canales principales está determinado en función del tamaño medio de grano d_{50} (p.e. [Hey, 1979](#)), siempre y cuando no se presente mucho transporte por suspensión, fondo y/o saltación (con la presencia de rizos u ondulaciones en el fondo, cuyo análisis no es tan trivial). De igual forma, en llanuras de inundación donde dominan los procesos de flujo más que de almacenamiento, se debe determinar un coeficiente de arrastre debido a la vegetación presente en la zona. Sin embargo, la determinación de este coeficiente es bastante complicada dado que las pérdidas de fricción se generan como resultado de la interacción entre las propiedades biofísicas de las plantas y el flujo ([Kouwen, 1988](#)).

La determinación de este tipo de parámetros en campo es, al igual que la topografía, muy complicada y consume bastantes recursos económicos y tiempo. Por lo que en años recientes, se han empezado a desarrollar técnicas de percepción remota para su definición. Ejemplos de este tipo técnicas están representados por la fotogrametría ([Butler et al., 2001](#)) y análisis detallado de información de LiDAR ([Mason et al., 2003](#)), sin embargo los trabajos de campo son imprescindibles para la vegetación subacuática en donde aún es muy complejo implementar esta metodología.

Calibración y validación.- En todos los casos de modelación de flujos sobre llanuras de inundación, se requiere algún tipo de calibración de la herramienta numérica, a fin de que esta reproduzca las condiciones reales en un sistema. Este proceso consiste en identificar valores adecuados para los parámetros y condiciones de frontera (asociados a la realidad), que determinan el comportamiento del modelo numérico. Lo ideal, sin duda es determinar los valores de dichos parámetros (p.e. gastos, rugosidades, variaciones en el nivel medio) por medio de campañas de campo intensas (p.e. [Pedrozo-Acuña et al., 2009](#)).

Sin embargo, en la mayoría de los casos este proceso de calibración se realiza a través de un ciclo de iteraciones sobre valores estimados hasta aproximar el evento que se desea reproducir. Los valores definidos a través de este último proceso, no tienen ninguna interpretación física y deben ser tomados como valores efectivos desde el punto de vista numérico, el cual posee una serie de posibles errores inherentes que añaden cierta duda o incertidumbre a los resultados numéricos. Principalmente, los errores se relacionan a la falta de datos de campo, la representación topográfica del sistema y los gastos en las condiciones de frontera.

1.6 Comparación entre los modelos hidrodinámicos 1D y 2D

En la actualidad, la disponibilidad de modelos digitales de elevación digital (DEM's) para representar la superficie de la tierra permite el acoplamiento de modelos hidráulicos con sistemas de información geográfica (SIG) para determinar la extensión de una inundación y los niveles del agua en la llanura de inundación. Muchos estudios de mapeo de inundaciones se han realizado usando modelos hidrodinámicos unidimensionales y bidimensionales (1D/2D). Algunos autores indican que los modelos hidráulicos 2D son la tecnología de punta para la modelación de inundaciones. Sin embargo, éstos modelos tienen la desventaja de que su aplicación está limitada por los altos requerimientos de datos, hardware y software. A su vez, los modelos 1D son ampliamente usados y dan resultados precisos en el cauce principal del río, pero son menos exactos para modelar el flujo de desbordamiento sobre las márgenes hacia las planicies adyacentes.

Muchos estudios de mapeo de inundaciones han sido realizados usando modelos hidrodinámicos 1D y 2D ([Ahmad & Simonovic, 1999](#); [Horritt & Bates, 2002](#); [Bates et al., 1997](#); [Sinnakaudan et al., 2002](#)). Como afirma [Mason et al. \(2002\)](#), los modelos hidráulicos 2D son el estado del arte para la modelación de inundaciones.

Aunque los modelos 1D son precisos en el cauce principal del río, éstos no son exactos para el flujo sobre los bancos ([Bates et al., 1997](#)), por ejemplo para la modelación de la onda de propagación desde el río hacia la llanura de inundación.

Por otra parte, en los modelos hidrodinámicos 2D las ecuaciones de conservación de la masa y momento son expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución. Los modelos 2D pueden resolverse usando el método de los elementos finitos, volumen finito y técnicas de Galenkin Discontinuo.

La precisión del modelo 2D en comparación con el modelo cuasi-2D no aumenta significativamente. Por lo tanto, el modelo cuasi-2D en este caso debe preferirse para áreas grandes y simulaciones continuas de largo plazo ([Castro & Willems, 2011](#)).

La **Tabla 1.3** presenta una comparación de ventajas y desventajas entre un modelo unidimensional y uno bidimensional, con lo cual queda en evidencia que de acuerdo al nivel de detalle con el que se necesite hacer un estudio, es el modelo que deberá implementarse en las modelaciones.

En general, es más simple la implementación de los modelos 1D en contraste con los 2D, en caso de ser correctamente construidos por lo general proporcionan información aceptable para la toma de decisiones en ingeniería. Los modelos en 2D no solo involucran una mayor complejidad en la modelación (lo cual requiere más recursos de computo), sino que también es necesario disponer de una base detallada de datos y mediciones (topografía, rugosidades direccionales, etc.) para su correcta implementación. La omisión de algunos detalles geométricos, obligan a simplificaciones adicionales para tener en cuenta la segunda dimensión.

En muchas ocasiones en el análisis unidimensional surge la necesidad de considerar (aunque sea de forma aproximada), efectos bidimensionales. Los programas actuales suelen abordar este problema mediante dos técnicas diferentes: la consideración específica de llanuras de inundación y las denominadas aproximaciones cuasibidimensionales.

Finalmente, el modelo unidimensional tiene la capacidad de considerar llanuras de inundación mediante la creación de “*ineffective flow*” (zonas donde el agua es almacenada pero no fluye). También puede considerar aproximaciones cuasibidimensionales mediante estructuras laterales, áreas de almacenamiento de agua y conexiones entre estas áreas. No considera lecho móvil (transporte de sedimentos), sin embargo esta capacidad no es necesaria, tal como actualmente lo reportan estudios en el desarrollo de los modelos que incorporan esta modalidad a menos de que se analice la ruptura de cortinas de presas, de bordos o cambios importantes de la forma de los meandros. La **Tabla 1.3** presenta un resumen de los distintos modelos utilizados en el estudio de flujos de inundación, resaltando las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 1.3 Comparación entre un modelos numérico unidimensional contra uno bidimensional.

Concepto	Modelos hidrodinámicos			
	En una dimensión (1D)		En dos dimensiones (2D)	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Capacidad del Sistema computacional	No necesita gran capacidad computacional			Su implementación queda limitada principalmente por los altos requerimientos de computo
Adquisición del modelo numérico	El software es de uso libre y de acceso publico			Aunque existen modelos numéricos comerciales los modelos más populares requieren de la adquisición de una licencia.
Simulación de Niveles y Gastos en ríos	Permiten una rápida evaluación de la distribución de los niveles de agua y gastos en el río			Los tiempos de simulación en que se realiza la evaluación de la destrucción de los niveles de agua y gastos son muy lentos
Simulación en desbordamiento de ríos y en Planicies o humedales con baja pendiente en el terreno		Al ser modelos simplificados, tienen baja precisión al modelar el desbordamiento en ríos y planicies de inundación	Modela de manera adecuada el desbordamiento en ríos y los flujos sobre las planicies de inundación o humedales	
Simulación en Lagunas, Estuarios y Flujos Costeras		Necesitan condiciones de frontera establecidas cuando se trata de flujos costeros, lagunas y estuarios	El método de cálculo, permite la adecuada modelación de lagunas, estuarios y flujos costeros	
Velocidad del Cauce principal en el espacio		Al ser unidimensional, los valores de velocidad no pueden ser representados de una forma físicamente correcta	La distribución de la velocidades es físicamente aceptable ya que el modelo es bidimensional	

1.7 La incertidumbre en los modelos

Como se ha mencionado en este capítulo, los modelos utilizados para la simulación de un evento de inundación varían dependiendo de la escala del problema y de la capacidad de cómputo disponible. Estos modelos requieren información topográfica, datos hidrológicos y condiciones de frontera que estarán en función de la escala temporal y espacial que requiera el estudio. Sin embargo, asociada a los resultados provenientes de modelos numéricos existe una gran cantidad de incertidumbre. A pesar de ello, las herramientas numéricas son indispensables para realizar el estudio de un evento de inundación.

El mejoramiento de los resultados de un modelo, pasa de forma necesaria por el mejoramiento de la calidad de los datos de entrada, lo que a su vez brinda una mayor confiabilidad a sus resultados. Adicionalmente, existe otra porción de incertidumbre asociada a las limitaciones del conocimiento, el modelo es la idealización de una realidad mucho más compleja ([Beven, 2001c](#)). Más aun, la caracterización de procesos de medición incorporan incertidumbres adicionales al proceso de predicción, el conocimiento en esta área es altamente incierto debido a la escasez de mediciones en las correspondientes escalas espacio-temporal ([Beven, 2006](#)).

En consecuencia, los esfuerzos recientes destinados a la generación de nuevas estrategias de gestión del riesgo de inundación, han señalado que una forma posible para una mejora en este campo se basa en la reducción de la incertidumbre asociada al sistema de predicción ([Demeritt et al., 2007](#); [Bao et al., 2011](#)).

Con el fin de reducir estos errores, este trabajo integra dos enfoques presentados por [Pedrozo-Acuña et al. \(2012a\)](#). La metodología considera la combinación de un conjunto de datos de precipitación de alta calidad y un modelo numérico validado. Además, el estudio emplea un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) construido con información de altimetría láser (LiDAR). En general la calidad y precisión de la ortofotografía LiDAR depende fundamentalmente de la altura del vuelo (entre 200m a 600m) y el ángulo de escaneo (entre 10° a 75°), pueden obtenerse hasta 12 puntos por metro cuadrado y dividirse en mallas de entre 0.3m y 5m, la precisión en la vertical es de $\pm 0.1m$ ([INEGI, 2008](#)). Puesto que los datos LiDAR son obtenidos sobre los objetos elevados (por ejemplo copas de vegetación), se usan sofisticados algoritmos para eliminar los puntos relativos a estos objetos, con lo cual se pueden extraer cotas de terreno.

Tal y como lo señalan [Clope & Pappenberger \(2009\)](#) el uso conjunto de modelos de hidrológicos con modelos hidrodinámicos de inundación, se está convirtiendo en una actividad ampliamente utilizada. Por lo tanto, en este trabajo se emplean ambos, un modelo lluvia-escurrimiento y un modelo flujos de inundación. Adicionalmente, se considera la incertidumbre hidrológica en la relación lluvia-escurrimiento dentro de la cuenca, a través de la variación de parámetros físicos del modelo hidrológico, lo que permite para una lluvia medida en campo, la generación de N-posibles hidrogramas que la representan.

La caracterización de un solo evento con una serie de hidrogramas posibles, da lugar a la estimación probabilista de mapas de inundación. Este es un paso importante hacia una mejor comunicación social del riesgo para las comunidades afectadas, tal y como lo mencionan [Rayner et al. \(2005\)](#), un resultado probabilista permite la mejora de las actuales estrategias de gestión del riesgo de inundación, por ejemplo, limitando la generación de falsas alarmas y falsos negativos.

1.8 Consideraciones en la modelación de inundaciones a gran escala

Geomorfología cambiante en grandes llanuras de inundación.- Las llanuras de inundación no son estáticas ni estables. Están compuestas de sedimentos no consolidados, se erosionan rápidamente durante inundaciones y crecidas de agua, o pueden ser el lugar donde se depositen nuevos estratos de lodo, arena y limo. En tal virtud, el canal de un río puede cambiar de posición en la amplia llanura de inundación y ésta, a su vez, es modificada periódicamente por las inundaciones, a medida que el canal se desplaza de un lugar a otro.

El ancho de una llanura de inundación está en función del caudal del río, velocidad de la tasa erosionante, pendiente del canal, y dureza de su pared. Las llanuras de inundación no son usuales en los canales de las partes altas de la cuenca fluvial, porque los ríos son de poco caudal, las pendientes y la velocidad de profundización son altas y las paredes del valle frecuentemente muestran roca firme sin cobertura.

En ríos moderadamente pequeños, la llanura de inundación usualmente se encuentra sólo en el interior de la curva de un meandro y la ubicación de la llanura de inundación se alterna de lado a lado a medida que el río fluye en meandros de un lado del valle al otro. En ríos muy grandes (p.e. río Usumacinta), la delimitación de la llanura de inundación ocupa de forma desproporcional todas las zonas bajas que reconoce el flujo de agua sin considerar la configuración de canales secundarios.

Características del terreno en grandes superficies.- La planificación para el desarrollo regional a gran escala debe tomar en cuenta las siguientes características de superficie, relacionadas con las inundaciones:

- Topografía o pendiente del terreno, especialmente su en zonas planas.
- Geomorfología, tipo y calidad de suelos, especialmente material de base de depósitos fluviales no consolidados.
- Hidrología y la extensión de las inundaciones recurrentes.

Frecuencia de inundaciones de gran escala.- Las llanuras de inundación de algunos ríos que desembocan al Golfo de México (p.e. río Pánuco, río Tonalá), son frecuentemente inundadas con intervalos de 10 o más años. Se han propuesto varias razones y factores que influyen en la frecuencia de las inundaciones, el más importante en grandes cuencas es el clima.

Un número de años de intensa actividad de inundaciones son seguidos por muchos años durante los cuales ocurren muy pocas inundaciones. La llanura de inundación se puede desarrollar y ser ocupada durante los años con menor actividad de inundaciones. Como resultado, este desarrollo está sujeto al riesgo de inundaciones a medida que se va cumpliendo el ciclo.

Las actividades de desarrollo, particularmente de silvicultura y producción intensiva de cultivos, pueden variar drásticamente las condiciones de descarga incrementando así el caudal de los ríos durante los ciclos normales de precipitación, aumentando el riesgo de inundación. El uso más intenso de la llanura de inundación, aún bajo un estricto control, casi siempre resulta en tasas de descargas mayores, debido a la saturación del suelo.

Duración de inundaciones de acuerdo a la escala.- El tiempo durante el cual una llanura de inundación permanece inundada, depende del caudal del río, la pendiente del canal, y las características climáticas. Si se trata de ríos pequeños, las inundaciones inducidas por la precipitación generalmente duran sólo unas horas o unos pocos días, pero en el caso de ríos grandes la descarga de la inundación puede exceder la capacidad del canal durante un mes o más. En 2011, la cuenca del río Usumacinta, estuvo sujeta a grandes inundaciones desde mediados de Octubre de 2011 hasta mediados de Diciembre 2011. La duración de una inundación causada por tormentas tropicales y lluvias intensas de esa intensidad, comúnmente cubren la llanura varias veces durante un mismo mes, como el caso de 2011.

Incorporación de imágenes satelitales en inundaciones a gran escala.- El objetivo primario de los métodos de percepción remota para la cartografía de áreas inundables muy grandes, es proporcionar a los planificadores y a las instituciones de manejo de desastres una metodología práctica y costo-efectiva para identificar llanuras de inundación, y otras áreas susceptibles, y evaluar el grado del impacto del desastre.

El método de percepción remota con satélites, involucra varias técnicas para la evaluación del peligro de inundaciones a gran escala. La metodología generalmente tiene las siguientes características:

- Hace uso de datos de percepción remota correspondientes a determinada fecha, o múltiples fechas o eventos.
- Permite el análisis digital (con computadora) o foto-óptico (película positiva o negativa).
- Se le usa mejor como complemento de otros datos hidrológicos y climáticos disponibles.
- Es útil para evaluaciones preliminares durante las etapas iniciales de un estudio de la planificación para el desarrollo, debido a la pequeña-a-intermedia resolución de la información producida y al hecho de que satisface las limitaciones de costos y tiempo. Los datos también pueden ser aplicables a otros aspectos del estudio.

Capítulo 2

Características regionales

2. Características regionales

El estado de Tabasco tiene una superficie de 24, 578 km², ubicándose entre los 17°15' y 18°39' de latitud norte, y los 91°00' y 94°17' de longitud oeste; desde los llanos costeros hasta las serranías de Chiapas; lo atraviesan numerosos ríos, algunos de gran caudal como el Usumacinta y otros más pequeños como el Puyacatengo, también posee numerosos cuerpos de agua, como humedales y pantanos. De hecho, en su territorio se encuentran los pantanos de Centla que es una región de alto valor ecológico por la abundante biodiversidad que en ella se encuentra. Su clima es tropical, caracterizado por ser caluroso y con abundantes precipitaciones, de hecho, esta entidad tiene año con año el registro de la mayor precipitación dentro del territorio nacional. Históricamente y como resultado de este marco climático y geográfico (p.e. grandes planicies aluviales de baja pendiente), el estado de Tabasco sufre las inundaciones de mayor envergadura en el territorio nacional, las cuales están asociadas a la época de avenidas que corresponde al segundo semestre de cada año.

En este sentido, dada la importancia de estos eventos extremos en la región, el presente estudio está abocado a investigar la generación de inundaciones en el río más caudalosos del país, ubicado en el estado de Tabasco: el río Usumacinta. Este capítulo incorpora una breve introducción de la ubicación y las características más importantes de la zona de estudio.

2.1 Ubicación y características físicas

La cuenca del Grijalva-Usumacinta se localiza en el sureste de México y al oeste de Guatemala, del lado de México comprende los estados de Tabasco, Chiapas y pequeñas porciones de Campeche. La conformación litológica de los márgenes de los ríos y de los suelos de la región, la sinuosidad de los cauces, con abundantes meandros y las grandes descargas de sedimentos y materiales de las cuencas altas hacen de la planicie un área fácilmente erosionable y sujeta a las grandes inundaciones que se dan periódicamente en la llanura costera. Esta situación ha obligado a la construcción de estructuras emergentes de defensa que, lamentablemente, no han solucionado los problemas en épocas de avenidas y de fenómenos extremos como los que se presentaron en los últimos años.

Actualmente, se presentan problemas críticos de inundaciones en 10,531 ha de la planicie costera, especialmente en la zona central de Tabasco y en las llanuras del Usumacinta, cuyas graves consecuencias se ven exacerbadas por el crecimiento desordenado y sin planeación de cientos de comunidades rurales, además del crecimiento desordenado de las periferias urbanas en zonas de alto riesgo: áreas bajas, planicies inundables e incluso dentro de los cauces y los vasos de presas, lo que ha obligado a realizar costosas e inefectivas obras de defensa.

Como se ha mencionado, el estado de Tabasco representa una de las regiones más vulnerables ante fenómenos hidrometeorológicos extremos, su cauce más importante es el río Usumacinta, que tiene dos derivaciones hacia el Golfo de México, una identificada como el río Palizada que descarga en la Laguna de Términos, y otra conocida como río San Pedro-San Pablo en el municipio de Centla, que descarga hacia el Golfo.

El río Usumacinta es de los ríos más caudalosos de México y tiene una capacidad de descarga de 4,979 m³/s en condiciones máximas ordinarias ([CONAGUA, 2008-12](#)). En esta región del Golfo se presentan mareas en régimen micromareal (con un rango medio de mareas en primavera de 0.6 m) y oleaje medio de pequeña amplitud (media Hs <1 m). La marea de tormenta en la región varía de 0.1 m a 0.3 m (durante un evento de inundación este valor afecta retardando el tiempo de drenado de las zonas afectadas). La temperatura media en Tabasco es entre 24-28 °C, con un clima influenciado por una intensa temporada lluviosa (Julio-Diciembre), en combinación con la incidencia de los huracanes y las tormentas que llegan desde el Norte. La humedad relativa fluctúa entre 80-86% y la nubosidad es alta la mayor parte del año. La región tiene la más alta tasa de precipitación media en México, con un promedio de 2-3 m cada año.

Existen varias zonas urbanas y localidades ubicadas en ambos márgenes del río a lo largo de su recorrido, principalmente en los municipios de Centla, Macuspana y Jonuta, localizados dentro del estado de Tabasco. Además, existen zonas con instalaciones industriales asociadas a la empresa nacional de petróleo (PEMEX). Por lo tanto, las graves inundaciones pueden causar un gran impacto socio-económico en esta región.

2.1.1 Hidrología

El estado de Tabasco es la zona del país donde se localiza la red hidrológica más compleja y se registran las mayores precipitaciones pluviales; aquí, a diferencia de otras entidades, es el excedente y no la falta de agua lo que ocasiona problemas, pues en algunas áreas se carece de la infraestructura adecuada para drenarla. La abundancia de escurrimientos superficiales, así como el escaso relieve de la llanura costera, da lugar a la formación de drenaje: anastomosado, dendrítico y lagunar, por tal motivo se ha desarrollado un gran número de cuerpos de agua de variadas dimensiones, al igual que pantanos y llanuras de inundación. Al sur del estado, donde se localizan las sierras del norte de Chiapas, el patrón de drenaje predominante es de tipo dendrítico, influenciado principalmente por estructuras geológicas. Toda el agua que escurre por territorio tabasqueño corresponde a la vertiente del Golfo de México.

Desde el punto de vista hidrológico, el estado de Tabasco merece especial atención, en él se desarrolla un complejo sistema de escurrimientos relacionados con fenómenos de carácter geológico, climático y biológico, que interactúan y se desarrollan en extensas llanuras deltaicas, sistemas lagunares, esteros, pantanos y marismas, que se extienden de forma paralela al litoral en una distancia de más de 160Km entre los ríos Tonalá, San Pedro y San Pablo. Es en esta región del país donde se encuentran dos de los ríos más importantes a nivel nacional, el Mezcalapa-Grijalva y el Usumacinta, así como parte de las regiones hidrológicas Coatzacoalcos (RH-29) y Grijalva Usumacinta (RH-30); se considera que aproximadamente 30% de las aguas superficiales que escurren en el país lo hacen por este estado. La **Figura 2.1a** presenta la región de estudio compuesta por las subcuencas de la región hidrológica, cuyo escurrimiento influye directamente al río Usumacinta desde el cañón Boca del Cerro, hasta la incorporación con el río Grijalva antes de su desembocadura al Golfo de México.

Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30).- Esta región se desarrolla en territorio mexicano y guatemalteco, sus límites dentro del territorio nacional quedan definidos al norte con el Golfo de México y al sur por el parteaguas continental de la Sierra del Soconusco. Dentro del estado de Tabasco, la RH-30 se ubica en el centro y este de su territorio, está representada

en la entidad por tres cuencas: A) Río Usumacinta, C) Laguna de Términos y D) Río Grijalva- Villahermosa, comprende 75.22% de la superficie total del estado. El sistema Grijalva Usumacinta incluye, entre otros, a los ríos Santa Ana, Palizada, San Pedro, El Lagartero, Pimiental, Tepetitán y Tacotalpa; aun cuando existen corrientes divagantes menores dentro del área que corresponde a la región, el hecho de que su recorrido sea a través de la planicie costera, las convierte en tributarias del sistema Grijalva-Usumacinta.

2.1.4 Hidrografía

El agua en Tabasco es tan abundante, que aquí se concentra el 30% de los recursos hidráulicos del país. Su sistema hidrográfico pertenece a la vertiente del Golfo y en él destaca el río Usumacinta, como el más caudaloso de la república, su extensión es de 400 km en territorio mexicano; así como el río Grijalva, el cual ocupa el segundo lugar en extensión con 117 km.

Sólo quedan fuera de este sistema el río Tonalá y el Tancochapa o Pedregal, que sirven de límite entre Tabasco y Veracruz. A los numerosos ríos, riachuelos y arroyos que cruzan en todos los sentidos al estado de Tabasco, se añaden algunas albuferas (lagunas junto al mar) y un número elevado de lagunas diseminadas en su territorio, destacándose los sistemas lagunares de El Carmen, Pajonal, Machona y Mecoacán. Esta abundancia de recursos hidráulicos ha determinado la vocación por la pesca. La mayor parte del Estado, casi en un 60% esta cubierto por ríos, lagunas y pantanos. Su sistema fluvial lo constituyen: el Río Usumacinta (Mono Sagrado) el más caudaloso de la República. El Río Grijalva, el Tonalá y Tamcochapa o Pedregal, que sirve de límite entre Tabasco y Veracruz. Al oeste de Huimanguillo, el Río Chontalpa y el González, desprendido del Mezcalapa, el cual desemboca al mar por la Barraca Chiltepec (ver **Figura 2.1b**).

El alto Usumacinta fluye 200 km a partir de la unión de Salinas y la Pasión hasta la Boca del Cerro; en su margen izquierda se encuentran las ruinas de Yaxchilan. Los famosos raudales de anaité, El cayo, Piedras Negras y San José y los desfiladeros que el río abrió entre las montañas impiden la navegación en algunos tramos, hasta Boca del Cerro.

El bajo Usumacinta comienza en Boca del Cerro, el más caudaloso de sus afluentes: el río San Pedro, procedente del Petén guatemalteco se encuentra ubicado aguas abajo de Tenosique. En su recorrido por el territorio tabasqueño ya no encuentra ningún obstáculo montañoso. Al norte de Emiliano Zapata recibe el tributo del río Chacamax, que nace en las sierras cercanas a Palenque y, pasando por esta población vuelve a enriquecerse con numerosos riachuelos hasta que se divide en varios brazos, uno de los cuales es el río Palizada, con drenaje hacia la laguna de Términos en el estado de Campeche. Al norte de Jonuta, nace otra derivación de menor importancia conocida como río San Pedro y San Pablo, que sirve de limite entre Tabasco y Campeche y desemboca hacia el golfo de México en la barra de San Pedro.

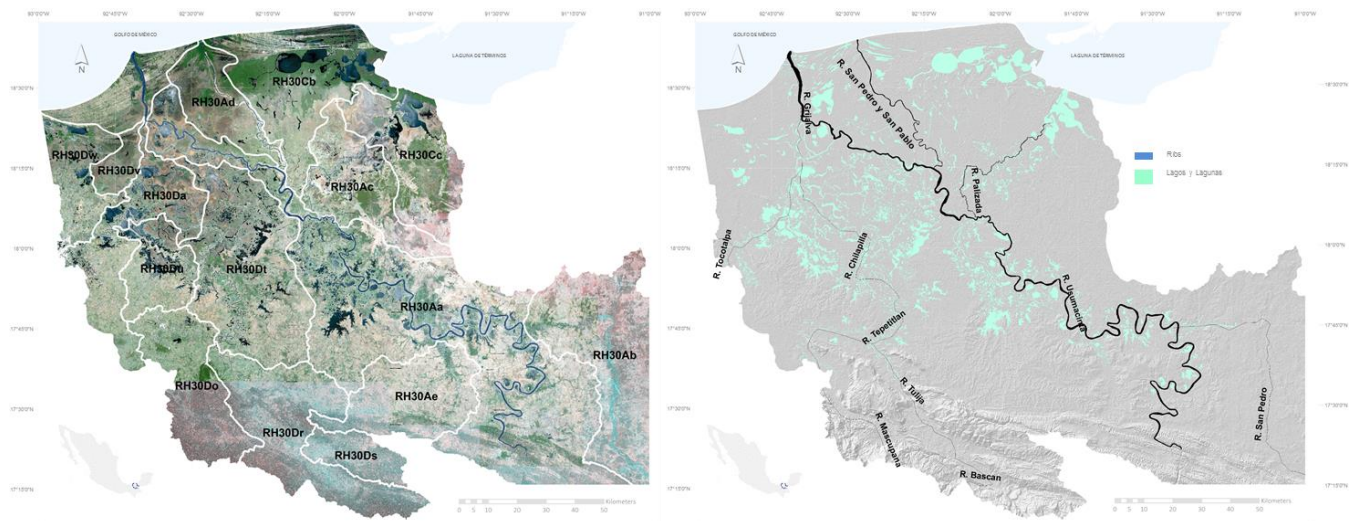


Figura 2.1 a) La zona de estudio comprende 15 subcuencas de la región hidrológica No. 30 que tienen una influencia directa con el escurrimiento en el río Usumacinta, se analizó un área total de 45, 443 Km² que es equivalente a 30 veces el área del D.F. por lo cual se considera un estudio de inundaciones a gran escala. **b)** Características hidrográficas de la zona es estudio. El río Usumacinta representa el análisis central en la evaluación de inundaciones en esta región.

2.1.2 Fisiología

El Estado de Tabasco está comprendido por dos provincias fisiográficas: Llanura Costera del Golfo Sur que cubre la mayor parte del área norte del estado y la Sierra de Chiapas y Guatemala que se distribuye en la porción sur tocando los municipios de Huimanguillo, Teapa, Tacotalpa, Macuspana y Tenosique.

Provincia Llanura Costera del Golfo Sur.- Esta planicie bordea la zona Norte del estado de Tabasco y bordea la costa sur del Golfo de México de donde toma su nombre. Abarca la mayor proporción de superficie en el estado (70%) y está salpicada en algunas áreas pequeñas con ligeras ondulaciones o lomeríos suaves con alturas no mayores a 50 msnm con dirección este – oeste, comprende a los siguientes municipios: Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso, Comalcalco, Cunduacán, Centro, Jalpa de Méndez, Nacajuca, Centla, Jonuta, Macuspana, Jalapa, Teapa, Emiliano Zapata, Balancán y Tenosique. Con excepción del municipio de Tacotalpa el cual se encuentra en su mayoría en la provincia Sierra de Chiapas y Guatemala, los dieciséis municipios restantes tienen una mayor proporción de planicie costera.

Esta provincia a su vez comprende a la Sub Provincia Llanura y Pantanos que incluye parte de los municipios de Macuspana, Huimanguillo y Tenosique así como la totalidad de los municipios de Balancán, Emiliano Zapata y Jonuta por parte de la cuenca del Usumacinta y los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Jalpa, Nacajuca y Paraíso por parte del Río Grijalva.

Finalmente los municipios de Jalapa y Centro por parte del Río la Sierra. Todo esto integrado a un desagüe natural en el municipio de Centla, en la zona conocida como tres brazos. En la llanura costera los ríos presentan cursos inestables y erráticos por la falta de pendiente y la gran acumulación de material aluvial en sus márgenes.

2.1.3 Edafología

Los suelos de la llanura costera del Golfo son, en su mayor parte, de origen aluvial; la mayoría de los suelos son jóvenes, como los gleysoles, vertisoles, cambisoles, regosoles y fluvisoles. Existen suelos más maduros, como los acrisoles y luvisoles. Las características del relieve de esta provincia fisiográfica dan lugar a un proceso de gleyzación (Morfologicamente: formación de Gleyzol), la reducción o ausencia de oxígeno, lo cual ocasiona una coloración gris azulosa o verdosa en el suelo, que corresponde al paso de hierro férrico a hierro ferroso.

Los suelos de la provincia de las Sierras de Chiapas y Guatemala son de origen residual, formados in situ, a partir de rocas sedimentarias e ígneas y de suelos aluviales. La mayor parte de los suelos de la subprovincia de las sierras del Norte de Chiapas son suelos maduros, acrisoles y luvisoles y el resto son suelos jóvenes, fluvisoles y rendzinas; todos tienen un grado considerable de acidez debido al arrastre de nutrientes por las lluvias frecuentes. En la subprovincia de las Sierras Bajas del Petén, los suelos más importantes son litosoles, luvisoles, regosoles y gleysoles; debido al relieve de la región, el 90% de los suelos de la superficie son recientes y muy someros (ver **Figura 2.2**).

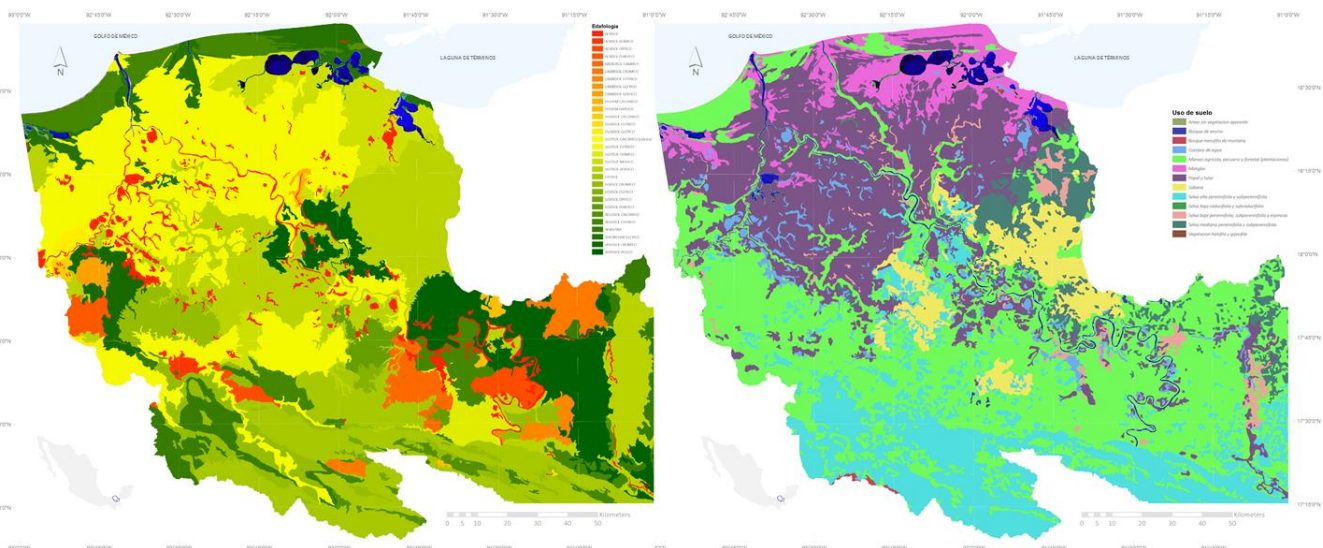


Figura 2.2 Características del suelo en la zona de estudio. La imagen de la izquierda presenta la edafología y su distribución en la región analizada; de igual forma en la imagen de la derecha se muestra el uso del suelo para la zona. Información de la base de datos del INEGI.

2.1.5 Clima

El Estado de Tabasco está definido por tres tipos de clima, dos de ellos cubren más del 95 % del territorio: Af, Am y Ax, cálido húmedo con lluvias todo el año, cálido húmedo con lluvias abundantes en verano y cálido subhúmedo con lluvias en verano respectivamente. El primero de ellos Af (w) está distribuido en las áreas montañosas correspondientes a la provincia Sierra de Chiapas y Guatemala. Esto permite la distribución de especies de selva húmeda o selva alta perennifolia.

El segundo tipo de clima Am (w) está distribuido en la gran planicie de la llanura del Golfo y al igual que el clima anterior presenta periodos marcados de precipitación y sequía definidos por las siguientes características.

Temporada de estiaje.- De fines de Febrero a principios de Junio se presenta la temporada seca, caracterizada por altas temperaturas, ausencia de nubosidad, y lapsos sin lluvia durante varias semanas, que en ocasiones llegan a rebasar el mes, ocurren también vientos cálidos del sur y sureste. Si bien es cierto que en esta temporada la precipitación sufre un descenso drástico, esto no quiere decir que deja de llover, ya que siempre se presentan lluvias aisladas, que abarcan zonas reducidas. Los valores mínimos de precipitación se presentan en el mes de Abril.

El tercer tipo de clima es el Cálido Subhúmedo con lluvias en verano, este se localiza en una pequeña porción en la parte noroeste del estado, en el municipio de Balancán y a pesar de ser el menos húmedo de los climas del estado, mantiene un promedio de lluvias entre los 1500 y 2000 mm anuales.

Temporada de lluvias.- Esta temporada abarca de mediados de Junio a mediados de Septiembre y se origina por precipitaciones de tipo convectivo - orográfico producto de los vientos alisios del este y noreste (masas de aire caliente húmedo) con lluvias que en general son de corta duración pero intensas, presentándose casi siempre por las tardes y noches con altas temperaturas y por las mañanas con una buena insolación. Las lluvias inician a mediados del mes de Junio, unos días antes del solsticio de verano y se puede considerar a los meses de Junio, Julio y Agosto como un periodo medio lluvioso, presentando lluvias moderadas a fuertes. Mientras que el mes de Septiembre es ya muy lluvioso, ocurriendo en este lapso lluvias de fuertes a torrenciales.

Dentro de este periodo se presenta la canícula o sequía intraestival (sequía acumulada de varios años) que abarca de la segunda quincena de Julio a gran parte del mes de Agosto, caracterizada por altas temperaturas y días secos, bochornosos dentro de una fase húmeda.

Además la zona se ve afectada indirectamente por perturbaciones atmosféricas de tipo ciclónico que se producen en el verano y principios del otoño en el Mar Caribe y Mar de las Antillas, así como en el Golfo de Tehuantepec y que favorecen la ocurrencia de lluvias intensas en la región.

Tormentas extremas.- A partir del mes de Octubre la planicie es invadida por vientos anticiclónicos cargados de humedad a los cuales se les denomina nortes. Estos se originan por el intercambio de aire de un ciclón que se aleja por el Mar Caribe y Golfo de México, así como por vientos del NE provenientes de los Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, de nominados frentes fríos. Cuando se presentan los nortes y a la par existen sistemas de baja presión en el Caribe se dan las condiciones más desfavorables y es cuando se presentan las lluvias más intensas.

Los nortes ocasionan nublados constantes, disminución de la temperatura y lluvias de ligeras a fuertes, pero que a veces duran varios días e inclusive varias semanas. Los nortes se presentan del mes de Julio al mes de Diciembre, raramente se extienden al mes de Enero; dando lugar a los meses de Septiembre y Octubre como el bimestre más lluvioso del año, descendiendo a medio lluvioso en los meses de Noviembre y Diciembre, para amortiguar drásticamente las lluvias en el mes de Enero. Así la temporada de lluvias en la zona es de seis meses aproximadamente.

2.2 Descripción del sistema hidráulico analizado

La **Figura 2.3** presenta la ubicación de la zona de estudio y el dominio que será estudiado en este trabajo de investigación. En ella se aprecia la dimensión espacial del problema en cuestión. La conformación litológica de los márgenes de los ríos y de los suelos de la región, la sinuosidad de los cauces, con abundantes meandros y las grandes descargas de sedimentos y materiales de las cuencas altas hacen de la planicie un área fácilmente erosionable y sujeta a las grandes inundaciones que se dan periódicamente en la llanura costera. Actualmente, se presentan problemas críticos de inundaciones en 10, 531 km² de la planicie costera, especialmente en la zona central de Tabasco y en las llanuras del Usumacinta, cuyas graves consecuencias se ven magnificadas por el crecimiento desordenado y por la falta de planeación territorial de cientos de comunidades rurales y por el crecimiento explosivo de las periferias urbanas en zonas de alto riesgo.

El sistema hidráulico que se analiza en este trabajo se integra por el río Usumacinta (desde aguas arriba en Boca de Cerro y hasta su descarga al Golfo de México), además de sus afluentes y derivaciones caracterizados por los ríos Palizada y San Pedro y San Pablo. Con este sistema se analizaron los escenarios de alivio hacia éstos utilizando los cauces secundarios, los cuales descargan hacia el Golfo de México y la Laguna de Términos (ver **Figura 2.3**).

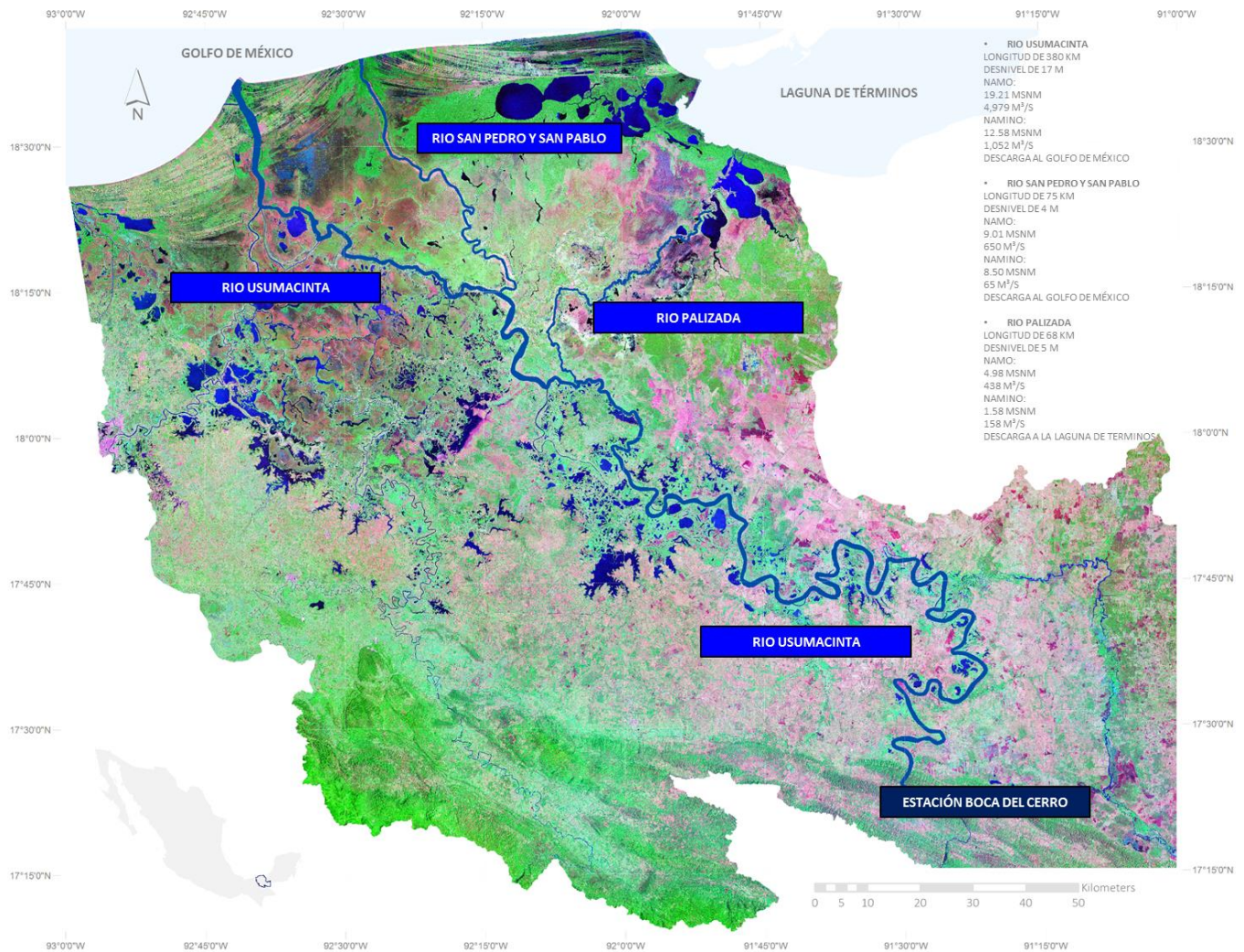


Figura 2.3 Ubicación del Río Usumacinta, San Pedro San Pablo y Palizada en el Estado de Tabasco, México. Imagen Landsat tomada en época de estiaje, donde se pueden apreciar las áreas de agua permanente (ríos, lagos, lagunas, pantanos etc.)

2.3 Eventos históricos extremos en el río Usumacinta

En México, año con año se presentan inundaciones, siendo las más notorias las que están asociadas a los ríos que desembocan en el Golfo de México, como quedó de manifiesto durante los recientes eventos ocurridos en los Estados de Tabasco (1999, 2007, 2008, 2009), Veracruz y Nuevo León (2010) y Tabasco (2011).

Para citar un ejemplo, en los últimos años el estado de Tabasco ha sufrido inundaciones de medias a muy severas, afectando gravemente a los sectores sociales (gran cantidad de damnificados), productivo (ganadería y agricultura) e infraestructura del Estado (vías de comunicación). Sólo en 2007, más de un millón de personas resultaron damnificadas y las pérdidas económicas se estimaron alrededor de más de los 3 mil millones de dólares, lo que lo ubica como el segundo mayor desastre nacional en los últimos 50 años (el primero ocasionado por el huracán Wilma en Quintana Roo en 2005).

De hecho, en 2008, estas áreas se vieron gravemente afectadas por varias tormentas asociadas a intensas lluvias generando una inundación extrema en el cuenca baja del río Usumacinta. El Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) a bordo del satélite Terra EOS AM y Aqua EOS PM de la NASA, capturó imágenes en 2008 y 2011 usando una combinación de luz infrarroja y visible para aumentar el contraste entre el agua y la tierra, identificando la región de agua en color azul oscuro, la vegetación es verde brillante, y las nubes en color azul claro (ver la Figura 2.4).

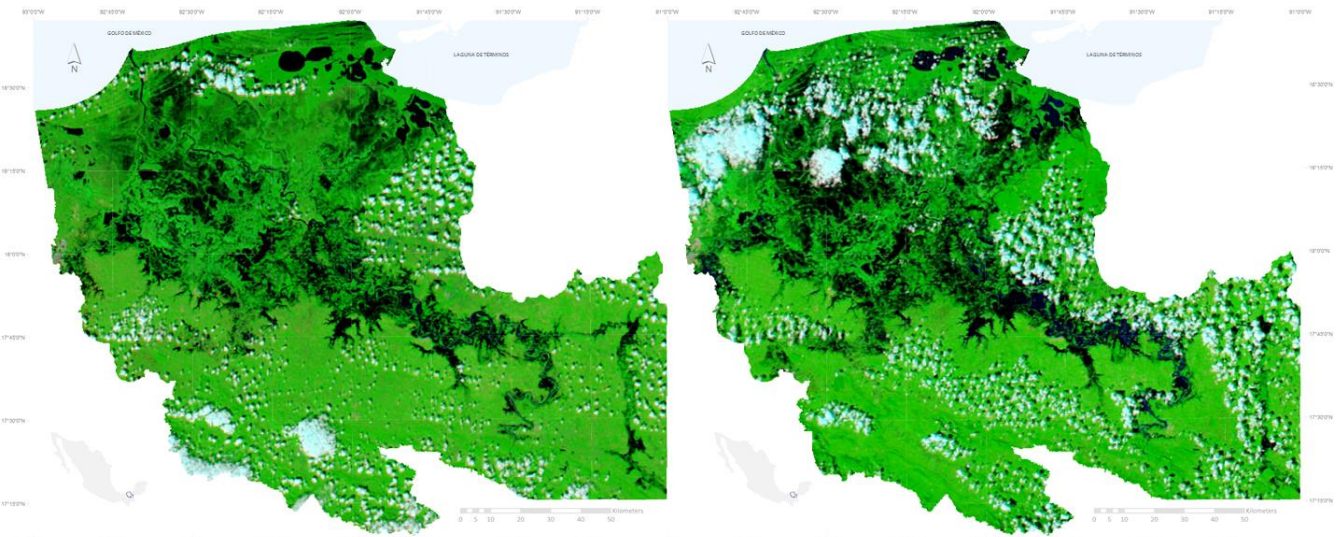


Figura 2.4 Imágenes de satélite de la inundación 2008 (NASA / GSFC, Respuesta Rápida). La imagen de la izquierda fue captada los días de máxima inundación el 05 de Noviembre de 2008 y la imagen de la derecha corresponde al 24 de Octubre de 2011 durante los días de máxima inundación.

Recientemente las inundaciones debidas al desbordamiento del río Usumacinta, fueron causadas por uno de los fenómenos meteorológicos más importantes de la región. El 19 de Octubre de 2011, las fuertes lluvias causaron graves inundaciones en El Salvador, Costa Rica, Honduras, Guatemala y Nicaragua, así como en México. La nubosidad persistente impidió a MODIS obtener una visión clara de algunas de estas áreas. El 24 de Octubre de 2011, la tormenta tropical Rina, formada en las costas de Centroamérica, se convirtió en un huracán el 25 de Octubre. La tormenta ocasiono intensas lluvias a la región. En la **Figura 2.5** se presentan las imágenes de radar obtenidas durante los eventos de inundación en 2008 y en 2011, la zona sombreada indica la región afectada por los fenómenos hidrometeorológicos.

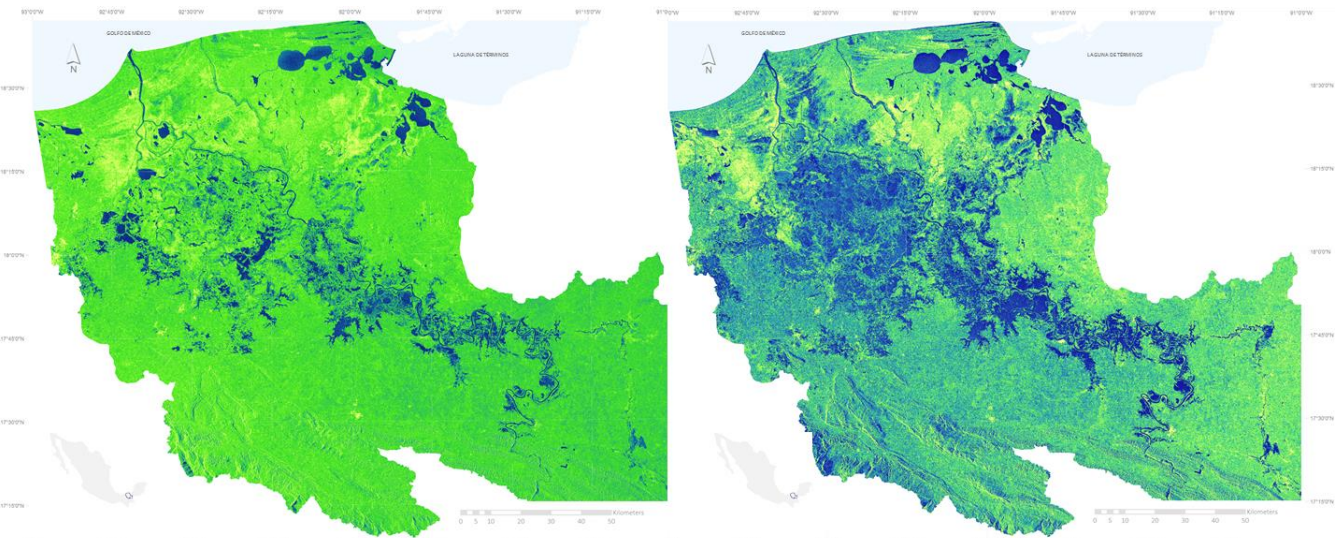


Figura 2.5 Imágenes de radar de la cuenca del río Usumacinta (adquiridas por el II-UNAM), en la que las zonas oscuras señalan la zona afectada por este fenómeno hidrometeorológicos. La imagen de la izquierda corresponde al evento de inundación el 28 de Octubre de 2008 y la imagen de la derecha corresponde al evento de inundación el 22 de Octubre de 2011.

Tanto en las Imágenes del satélite Aqua de la NASA, como en las imágenes de Radar se pueden comparar los eventos de inundación en los años de 2008 y 2011, con lo cual se puede ver claramente las diferencias en cuanto a extensión de las áreas de inundación y la variabilidad de respuesta de la cuenca, sobretodo en la zona de planicie, en la parte baja de la cuenca; ya que en la parte alta parece tener el mismo comportamiento (áreas inundables). Principalmente, el desbordamiento del río Usumacinta, el cual cruza cinco municipios tabasqueños en su ruta hacia el Golfo de México, inunda un centenar de colonias urbanas y comunidades rurales ribereñas, al sobrepasar esa corriente en cinco centímetros su Nivel de Aguas Máximo Extraordinario (NAME). El NAME oficial del Usumacinta es de 21.35 metros, y en el evento de 2011 alcanzó los 21.52 metros. En el 2008 alcanzó el nivel record histórico al llegar a los 21.57 metros. La escala crítica o Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) del Usumacinta, medida hasta donde el río puede contener su corriente, son de 19.21 metros. Las autoridades de

Protección Civil informaron que el Usumacinta afectó 86 localidades de los municipios de Centla, Jonuta, Balancín, Emiliano Zapata y Tenosique ([SIGA, 2008-12](#)).

El desbordamiento del cauce afectó carreteras estatales, municipales y caminos rurales. En el municipio de Jonuta mantenía incomunicadas a varias poblaciones, afectando a 27 localidades entre ellos Chinal, Bajo Amatitán, Monte Grande, Los Pájaros, Playa Chiquita y Boca de San Gerónimo. En el municipio de Emiliano Zapata, contabilizaron 17 localidades. La unidad municipal de Protección Civil de Tenosique reportó 21 localidades afectadas. En Balancán afectó 21 localidades ([CENAPRED, 2012](#)).

Capítulo 3

METODOLOGÍA: MODELACIÓN DE INUNDACIONES A GRAN ESCALA

3. Metodología: Modelación de inundaciones a gran escala

Como se presentó en los apartados anteriores, es posible utilizar herramientas numéricas que resuelven las ecuaciones básicas de la hidráulica, en sus versiones de unidimensional y bidimensional, para investigar la naturaleza de los flujos de inundación. Para un problema dado, la selección del tipo de modelo a utilizar, está sujeta a las características particulares de dicho problema (p.e. el tamaño del dominio). También se debe considerar, la información base y las condiciones del sistema con la que se cuenta, estos representan los factores principales que determinan la selección del modelo a utilizar. En este trabajo de investigación, el área de estudio comprende la región hidrológica del río Usumacinta, donde se analizan 15 subcuencas, abarcando una superficie total de 45, 443 km². Dada la escala de la cuenca hidrológica en estudio, la posibilidad de emplear un modelo bidimensional que resuelva las ecuaciones de aguas someras se descarta, ya que esta actividad requeriría una capacidad de cómputo muy superior al utilizado en la práctica común. Sobre todo, si se consideraran tamaños de celda apropiados para resolver los flujos de inundación en llanura (p.e. $\Delta x=20\text{m}$) de una manera adecuada.

Por lo tanto, la metodología utilizada en este trabajo, incorpora el empleo de un modelo unidimensional que permite el análisis de sistemas hidráulicos a gran escala. A pesar de que se sabe que la selección de esta herramienta puede inducir errores en el cálculo de áreas de inundación, esta incertidumbre se reduce con el empleo de datos de elevación de alta resolución obtenidos a partir de altimetría laser ([Paredes-Victoria et al., 2012a](#); [Paredes-Victoria et al., 2012b](#)).

Adicionalmente, la metodología incorpora el análisis hidrológico de la cuenca de estudio, de tal manera que se puedan estimar los hidrogramas de salida a partir de datos de precipitación recabados en campo, por medio de las Estaciones Automáticas de la CONAGUA. Para ello, se utiliza el modelo de parámetros distribuidos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (p.e. [Dominguez et al., 2008](#)). Una vez estimados los hidrogramas, se utilizan como condiciones de frontera del modelo numérico unidimensional. Este último desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadounidense y conocido como HEC-RAS.

El trabajo que se presenta en esta tesis, incorpora además el uso de imágenes de satélite y de radar, para la caracterización de zonas afectadas durante eventos de inundación registrados en la cuenca del río Usumacinta (años 2008 y 2011). Esta información de gran importancia, sirvió para validar la zona afectada descrita por el encadenamiento de modelos mencionados.

3.1 Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos son empleados para determinar las avenidas extraordinarias que generan inundaciones, típicamente en función de la relación lluvia-escorrentamiento que está asociada a una probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno del evento de precipitación ([Barillas-Cruz et al., 2003](#), [Martín Vide et al., 2003](#)).

En la actualidad, los modelos hidrológicos existentes no siempre pronostican correctamente la forma de las avenidas, ni cuando se genera un pico en el hidrograma de entrada. Por lo general, se acepta que existen dos metodologías principales para determinar la relación lluvia-escorrentamiento, los que se basan en técnicas estadísticas con datos observados disponibles o aquellos que involucran representaciones matemáticas del sistema físico.

Existen numerosas clasificaciones de los modelos hidrológicos, fundamentalmente se clasifican desde tres perspectivas, la primera considera el tipo de representación espacial del modelo, la segunda la forma de representar los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca y la última la extensión temporal en la que se puede aplicar el modelo ([Ponce, 1989](#); [Beck, 1991](#); [Sempere, 1996](#); [Wheater et al., 1993](#); [Kokkonen & Jakeman, 2001](#)).

En función de la representación espacial se pueden clasificar en tres grupos:

- *Modelos agregados: Son aquellos que consideran una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca, utilizando como variable la precipitación media, y supone que los parámetros de los diferentes submodelos, que simulan los diferentes procesos hidrológicos, son globales para toda la cuenca y permanecen constantes a lo largo de un episodio.*
- *Modelos semidistribuidos: Son aquellos que permiten una cierta variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros de los submodelos que lo componen, mediante la división de la cuenca en multitud de pequeñas subcuencas con lluvia y parámetros constantes en cada uno de ellos.*
- *Modelos distribuidos: Son aquellos que permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros, mediante la división de la cuenca en celdas, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos.*

Diversos autores han realizado diferentes clasificaciones de los modelos lluvia-escorrentamiento, entre ellos, [Kokkonen & Jakeman \(2001\)](#); [Todini \(1988\)](#); [Chow et al. \(1988\)](#); [Singh & Woolhiser \(2002\)](#), generalmente basadas en los siguientes criterios:

- *Alcance de los principios físicos que se aplican en el modelo de estructura.*
- *El tratamiento de datos del modelo y de los parámetros como una función del espacio y el tiempo (descripción de los procesos físicos).*

De acuerdo a la literatura se encuentran principalmente dos estrategias de modelación: los deterministas y estocásticos, el modelo determinista no considera la aleatoriedad, una entrada dada siempre conduce a la misma salida. El modelo estocástico tiene salidas que son al menos parcialmente aleatorias.

La descripción de los procesos hidrológicos determinísticos se consideran empíricos, conceptuales o de base física. La mayoría de los modelos conceptuales son agregados o globales, y los modelos físicamente basados o de base física son modelos determinísticos. Los modelos distribuidos realizan una descripción de los procesos que se llevan a cabo al interior de la cuenca por medio de la discretización de la misma en una malla cuadrangular.

Estos modelos matemáticos toman en cuenta variables hidrológicas como: precipitación, escorrentamientos, gastos y la geometría del cauce. Por lo general, comprenden la integración de datos georreferenciados, como pueden ser climáticos, topográficos, hidrológicos, edafológicos, de vegetación y uso de suelo, y permiten modelar y evaluar, espacialmente, la respuesta del caudal bajo distintos escenarios de precipitación o periodos de retorno.

La respuesta de los caudales en cada cuenca depende de factores como: la pendiente, la geometría del cauce, el tipo de suelo y el escorrentamiento. De esta manera, las cuencas conforman un sistema de procesos y respuestas en donde el escorrentamiento superficial es de los factores más importantes, relacionados con los desastres naturales y daños de las inundaciones ([Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004](#)).

Los modelos hidrológicos distribuidos permiten tener en cuenta estas heterogeneidades mediante una discretización de la cuenca en celdas. En el análisis hidrológico realizado en este trabajo, se utilizó el programa MPE (Modelo para Pronóstico de Escorrentamiento), desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (UNAM), que es un modelo de parámetros distribuidos ([Dominguez et al., 2008](#)).

3.1.1 Fundamentos teóricos: Modelo hidrológico

Esta herramienta cuenta con una base numérica simplificada en mallas y ha sido desarrollado para estimar los procesos de precipitación-escorrentamiento dentro de los sistemas de cuencas, y es similar a la presentada por [Cluckie et al. \(2006\)](#).

El modelo utiliza el método del Número de Curva, que tiene su base en la ecuación de balance hídrico y la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo. Es decir, indica que el escurrimiento es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. Este método tiene su base en el del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) con una modificación que permite la consideración de procesos de secado en el suelo después de la ocurrencia de lluvia.

Los parámetros de entrada para determinar una curva de escurrimiento son: el grupo hidrológico del suelo, uso del suelo, edafología y vías de circulación dentro de la cuenca.

La ecuación de balance de hídrico y los parámetros correspondientes se expresan como sigue:

$$P = Pe + Ia + Fa \quad (\text{ec. 3.1.1.1})$$

$$\frac{Pe}{P-Ia} = \frac{Fa}{S} \quad (\text{ec. 3.1.1.2})$$

$$Ia - \lambda S \quad (\text{ec. 3.1.1.3})$$

Donde P es la precipitación, Pe la precipitación efectiva, Ia es la abstracción inicial, Fa es la abstracción acumulada, S es el potencial máximo del suelo de retención de la humedad después del inicio del escurrimiento y λ es el factor de escala de la pérdida inicial. El valor de λ se relaciona a la infiltración máxima potencial en la cuenca. A través de la combinación de (ec. 3.1.1.1) a (ec. 3.1.1.3) y que expresa la abstracción inicial (Ia) por $0.2 \cdot S$ se tiene:

$$Pe = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (\text{ec. 3.1.1.4})$$

Donde, el valor de S [cm] es determinado por:

$$S = \frac{2450 - (25.4CN)}{CN} \quad (\text{ec.3.1.1.5})$$

CN es el número de curva de escurrimiento, según lo definido por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. ([USDA-SCS, 1985](#)). Los valores asignados para este parámetro varían desde 30 a 100, donde los números pequeños indican potencial de escurrimiento bajo, mientras que las grandes cifras indican un aumento en el potencial de escurrimiento. Por lo tanto, la permeabilidad del suelo es inversamente proporcional al número de curva seleccionada.

El modelo incluye un parámetro para reproducir los efectos de la evaporación en la saturación del suelo (Fx). Este parámetro es útil cuando el evento a ser reproducido dura varios días. El cálculo del escurrimiento en la cuenca se lleva a cabo siguiendo el método de Clark, que resume el escurrimiento estimado en cada celda para calcular el hidrograma general.

3.1.2 Incertidumbre hidrológica

Cada etapa del proceso de pronóstico induce errores, por ejemplo, puede haber problemas en la adquisición de datos en campo o limitaciones en el conocimiento que redundarán en una reducción de la capacidad de los modelos para representar la realidad de forma fidedigna.

Diversos autores, han señalado la necesidad de clasificar la incertidumbre en diferentes tipos ([Wynne, 1992](#); [van Asselt & Rotmans, 2002](#)). Esencialmente, se argumenta que las evaluaciones numéricas del riesgo están condicionadas a las hipótesis de los modelos, por lo que se requieren diferentes tipos de incertidumbre para justificar su validez. Por ejemplo, la indeterminación se presenta cuando existe la duda abierta sobre la posibilidad de adaptar un conocimiento dado (p.e. modelo) a un problema práctico específico. Mientras que la ignorancia, representa todo aquello que se desconoce de lo que todavía no se sabe, y que por definición no podemos identificar.

Los modelos hidrológicos están compuestos de forma típica por modelos matemáticos que tienen su base en el conocimiento de los procesos dominantes, los cuales se definen por medio de parámetros que determinan el balance de los mismos al interior del sistema. Por lo tanto, dentro del proceso de modelado es posible pensar la clasificación de la incertidumbre en dos ramas. Por un lado, los residuales de la predicción para un modelo y parámetros determinado, la cual es de naturaleza aleatoria y por otro, la incertidumbre asociada a la selección de estos parámetros que es de naturaleza epistémica (del conocimiento).

En la literatura se han presentado diferentes intentos por clasificar los diferentes tipos de incertidumbre, por ejemplo, [Yen & Ang \(1971\)](#) clasifican las incertidumbres en dos tipos: incertidumbre objetiva que se asocia a cualquier proceso aleatorio o deducible a partir de muestras estadísticas y la incertidumbre subjetiva cuando no existe información cuantitativa disponible. Por otro lado, [Kaufman & Gupta \(1991\)](#) clasifican la incertidumbre en dos categorías: aleatoria y difusa, posteriormente [Kaufman & Gupta \(1991\)](#) identificaron tres componentes de incertidumbre: falta de claridad, omisiones y aleatoriedad.

En el contexto de modelación numérica, [Van Gelder \(2000\)](#) y [Hall \(2003\)](#) clasifican la incertidumbre como inherente y epistémica. La inherente representa la aleatoriedad y variabilidad observada en la naturaleza (tanto en el espacio y el tiempo), mientras que epistémica se refiere al estado de los conocimientos de un sistema físico y nuestra capacidad para medir y modelo. [Abebe & Price \(2004\)](#) clasifican la incertidumbre en estructurada y no estructurada, basada en las características de la brecha entre el modelo y el sistema físico como se revela en la forma de errores.

En general se acepta que existen 5 niveles de incertidumbre: 1) de eventos que se relacionan con la impredecibilidad natural, 2) de parámetros dentro de los modelos asociadas a las limitaciones de información, 3) de estructura del modelo debidas a las limitaciones del conocimiento, 4) de fuentes conocidas resultado de la aplicación inadecuada de los modelos y 5) todas aquellas que tienen influencia pero que todavía no se conocen. ([Pedrozo-Acuña, 2012a](#)).

En el caso de los modelos lluvia-escurrimiento, las incertidumbres epistémicas (de conocimiento) son las más importantes. En realidad, cada componente de cada modelo posee su propia fuente de incertidumbre (p.e. infiltración, tipo de suelo, flujos subterráneos, variabilidad temporal de los parámetros), por lo que se genera una propagación de los errores a lo largo del proceso de modelación que involucra el paso de las condiciones atmosféricas a las predicciones de lluvia, y de la lluvia a la predicción del escurrimiento ([Pappenberger et al., 2005](#)).

Adicionalmente, es necesario considerar la incertidumbre en los datos observados en campo, por ejemplo, precipitación, temperatura y de gasto. Estos errores están compuestos por dos elementos: los errores de medición (instrumentales y humanos) y los errores debidos a la insuficiente representatividad de una muestra de datos. Este último se denomina a veces la incertidumbre del muestreo ([Abebe & Price, 2004](#)). Estos dos componentes de error tienen características muy diferentes que pueden diferir de una variable a otra, por lo que las estadísticas de ambos errores se deben considerar y especificar adecuadamente.

Dentro de estos conceptos se tiene una incertidumbre natural, la cual se caracteriza por presentar cambios espaciales y temporales que interfieren en los procesos físicos durante la generación de escorrentía superficial; esta incertidumbre afecta directamente los datos de entrada, los parámetros del modelo y la estructura del modelo. La incertidumbre que se considera en este trabajo de investigación, corresponde a aquella asociada a la definición de los parámetros del modelo hidrológico para representar al gasto.

3.1.3 Implementación del modelo hidrológico: Estimación de Probabilidad e Incertidumbre Generalizada (Metodología GLUE)

El propósito último de cualquier modelo lluvia-escurrimiento, consiste en que sus resultados sean útiles para el mejoramiento de la toma de decisiones sobre algún problema hidrológico, sea éste la planeación de los recursos hídricos o la protección contra inundaciones. Como se ha descrito en la sección anterior, existen diversos modelos que describen los procesos hidrológicos a través de diferentes perspectivas y bases matemáticas, las cuales no siempre señalan las grandes simplificaciones para representar una realidad que resulta, la mayoría de las veces, mucho más compleja.

La complejidad del ciclo hidrológico es evidente, pero establecer una descripción cuantitativa adecuada sobre cómo se dan los balances entre los procesos dominantes, es mucho más difícil e involucra algún grado de simplificación o aproximación. Desde luego, estos enfoques son aplicables al modelo hidrológico utilizado en este trabajo de investigación. Los modelos hidrológicos distribuidos determinan el comportamiento físico de la cuenca y la relación lluvia-escurrimiento, a través de criterios prácticos y relaciones empíricas. Por lo tanto, una interrogante válida sobre los resultados de estos modelos consiste en conocer o determinar hasta qué punto, con sus aproximaciones de procesos y parámetros distribuidos en elementos de malla, son capaces de representar la realidad. Este cuestionamiento natural en el proceso de modelación de cualquier sistema físico, abre la puerta a una serie de preguntas que cualquier modelador de la naturaleza debería enfrentar. Por ejemplo: ¿Cómo las condiciones iniciales o precedentes en el sistema, alteran la relación entre las variables durante el proceso de simulación?; ¿Cómo todo aquello que no está representado en el modelo, pero que está presente en la realidad, afecta un resultado dado?

Finalmente con un modelo hidrológico de esta naturaleza, se busca una representación realista de los procesos al interior de una cuenca, esta representación debe ser útil en la predicción de eventos que todavía no han ocurrido. De hecho, comúnmente al usar modelos distribuidos en hidrología es necesario utilizar modelos sencillos los cuales puedan ser calibrados con datos históricos, para que tengan un comportamiento más veraz, de tal forma que estos modelos puedan hacer simulaciones de respuestas en otros períodos u otras condiciones (por ejemplo [Beven & O'Connell, 1982](#); [Beven, 1985](#)).

Los hidrólogos saben muy bien las dificultades de la verificación o la aplicación de las ecuaciones de balance de masa y energía en sistemas abiertos ([Beven, 2001d](#); [Beven, 2002](#); [Beven, 2001b](#); [Beven, 2001a](#)). Esto no significa, por supuesto, que tales

principios o leyes no se deben aplicar en la práctica, sólo que se debe tener cuidado con las limitaciones de su ámbito de validez. En particular, existen tres problemas fundamentales que se deben considerar:

El problema de la no-linealidad.- El tema de la no linealidad representa la principal problemática al tratar de aplicar los conceptos de modelado distribuido en la hidrología, a pesar de que durante muchos años se han adoptado modelos lineales (p.e. el hidrograma unitario) y funciones lineales de transferencia; estos han sido utilizados y se ha demostrado que funcionan bien (p.e. [Beven, 2001d](#)), sobretodo en las grandes cuencas ([Goodrich et al., 1997](#)). Principalmente se aplica a la relación entre algunas entradas de lluvia efectiva y la descarga de un río (y en ocasiones solo al escurrimiento superficial que compone la descarga). No se aplica a la relación entre la entrada de precipitación y la descarga fluvial, dada que se sabe que es una función no lineal en la que las principales componentes se determinan a través de las condiciones iniciales del sistema. Es decir, el volumen de lluvia y la interacción de los procesos superficiales y generadores de escurrimiento subsuperficial. Los sistemas hidrológicos son no-lineales y las implicaciones de esta no-linealidad deben tomarse en cuenta en la formulación y aplicación de modelos distribuidos.

Todos los modelos distribuidos no-lineales tienen funciones diseñadas para describir procesos locales superficiales y de generación de escurrimiento subsuperficial, cuando estos modelos se basan en la ecuación de Richards o el número de curva SCS. En términos hidrológicos, no es recomendable utilizar la ecuación de Richards en la escala de elemento de modelo (y mucho menos en la escala de cuadrícula GCM), donde la heterogeneidad de las variaciones de los parámetros locales se espera que sea importante ([Beven, 1989](#)). La heterogeneidad local significará que el valor de las ecuaciones promediadas sea diferente a la descripción a escala local. En otras palabras, el uso de los valores locales promediados de parámetros a diferentes escalas no dan los resultados correctos, especialmente cuando están acoplados parámetros de flujo de superficie con flujos subsuperficiales ([Binley et al., 1989](#)). Esto sugiere, que el uso de funciones de transferencia para estimar un conjunto de parámetros de suelo promediados (en la escala de los elementos de un modelo hidrológico distribuido) no puede generar resultados exactos.

No existe una base física teórica para reemplazar la ecuación de Richards, ya que las alternativas de parámetros distribuidos son puramente conceptuales. Estudios como los realizados por [Reggiani et al. \(1998, 1999, 2000\)](#) en un intento de formular ecuaciones directamente en la subcuenca o directamente a la escala del elemento de flujo, en términos de las ecuaciones de masa, energía y cantidad de movimiento, pero no han resuelto el problema de la parametrización de los intercambios entre los elementos integrados en los dominios de flujo heterogéneos.

Hay otras implicaciones de no linealidad que se sabe que son importantes. Los sistemas no lineales son sensibles a las condiciones iniciales y de frontera que a menudo exhiben un comportamiento caótico. Las condiciones iniciales y de frontera son poco conocidas en hidrología ([Stephenson & Freeze, 1974](#)), ya que a menudo son los valores observados con los que se comparan las predicciones del modelo, pero afortunadamente las soluciones están necesariamente limitados por balances de masa y energía. Esencialmente, la conservación de la masa y los balances energéticos permiten a estos modelos generar buenas aproximaciones a la realidad, sobre todo después de la etapa de calibración con los valores de los parámetros. Eso no significa, que sea fácil obtener predicciones confiables (incluso teniendo en cuenta el error de observación), para los eventos extremos.

El problema de la equifinalidad.- El reconocimiento de lo que se conoce como equifinalidad, surgió de experimentos de Monte Carlo en la aplicación de modelos con conjuntos de diferentes parámetros en la simulación de descargas en cuencas de gran escala ([Beven & Binley, 1992](#); [Duan et al., 1992](#); [Beven, 1993](#)). La equifinalidad consiste en la existencia comprobada de un conjunto de parámetros óptimos que de implementarse en un modelo hidrológico son capaces de reproducir un escurrimiento medido en campo. Es decir, con la misma herramienta numérica existen varias variaciones en los parámetros que permitirán llegar a una misma solución.

Este problema condujo a [Beven & Binley \(1992\)](#) a producir una 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 \(2000b\)](#) y [Beven \(2001d\)](#).

GLUE representa una extensión del análisis de sensibilidad generalizada de Hornberger, Lanza y Young ([Hornberger & Spear, 1981](#); [Spear et al., 1994](#)) en la que muchos conjuntos diferentes 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 *GLUE* las predicciones de los modelos son ponderados por una medida de probabilidad con base en los resultados para formar una distribución acumulativa ponderada de cualquier variable de interés predicha. Los marcos tradicionales de probabilidad y estadística pueden ser utilizados, en cuyo caso las distribuciones de predicción de salida pueden considerarse como probabilidades de predicción de la variable de interés. Sin embargo, la metodología es general, incluyendo medidas difusas, en cuyo caso sólo delimitan las predicciones. Con la ecuación de Bayes pueden combinarse diferentes marcos de probabilidad ([Beven, 2000a](#); [Beven, 2001d](#)).

Hay otra implicación de equifinalidad que es de particular importancia en el modelado distribuidos ya que estos tienen el potencial de utilizar diferentes valores de parámetros para cada elemento en la discretización espacial. En general, esto significa que muchos cientos o miles de valores de los parámetros deben ser especificados. Está claro que no es posible optimizar todos los valores de estos parámetros, por lo que deben estimarse empleando información de la cuenca, tal como la tipo del suelo, tipo de vegetación, etc. que generalmente están varían de acuerdo a cada diferente tipos de suelo, la vegetación, etc. Además, estos valores deben ser recalculados y optimizados de acuerdo a las observaciones recogidas en lugares específicos bajo un conjunto particular de condiciones de forzamiento. Una de las enseñanzas de los estudios de GLUE es que una buena caracterización de los parámetros da un buen ajuste en las modelaciones. Es muy raro el caso en que las simulaciones sean tan sensibles a un determinado parámetro y que sólo ciertos valores de ese parámetro generen buenas aproximaciones. Aun así, reuniendo diferentes valores de parámetros de diferentes fuentes, esto no es garantía de que (incluso si fueron óptimas las situaciones en las que se determinaron), darán buenos resultados como conjunto en diferentes circunstancias.

El problema de la incertidumbre.- El objetivo de la metodología de *GLUE* es producir un conjunto de valores que reflejan adecuadamente la incertidumbre derivada del proceso de modelado y que reproduzcan el comportamiento observado de la cuenca dentro del rango de resultados. Esto no siempre es fácil, en virtud de los errores en los datos de entrada y en la estructura del modelo, estos errores pueden ser difíciles de evaluar a priori.

En principio, la incertidumbre adicional derivada de los errores en las estimaciones de datos de entrada y otras condiciones de frontera también podrían incluirse en el *GLUE*, pero esto normalmente no se hace, principalmente por los altos requerimientos computacionales. De esta forma, los resultados serán condicionados a: los datos de entrada, la estructura del modelo seleccionado, la elección de los parámetros a variar y las medidas de probabilidad elegidas para la evaluación del modelo. Cada elección, deben ser explícita y debe estar sujeta a una revisión crítica de los usuarios finales.

Es evidente, que el conocimiento sobre la relación lluvia-escorrentía no está acabado, nuestra capacidad de predicción es limitada, sin embargo muchos modeladores modernos argumentan que a pesar de sus limitaciones, son los mejores modelos disponibles (a menudo dando simulaciones bastante aceptables) y de los que se tiene que hacer uso en la predicción con fines prácticos.

En este entendido, este trabajo de investigación incorpora el empleo de la metodología *GLUE* al modelo hidrológico MPE con lo cual se delimita la incertidumbre hidrológica en el proceso de validación para este caso de estudio.

3.1.4 Puesta a punto del modelo hidrológico en la cuenca de estudio

Para el análisis hidrológico de la cuenca del río Usumacinta, se empleó información de campo que permitió la caracterización de la zona de estudio como sigue:

Configuración topológica de la cuenca.- Empleando información de elevaciones a partir de una nube de puntos LiDAR ([INEGI, 2008](#)) se calculó el modelo digital de elevaciones representado en una malla cuadrada con una resolución espacial de 30 metros. La superficie estimada de la cuenca hidrológica es de 45,443 km², físicamente se caracteriza por terrenos planos con una pendiente media de 3.5% lo cual implica una alta capacidad de escurrimiento.

Datos de lluvia.- Se utilizaron datos de lluvia correspondientes al evento de inundación de 2008, los cuales se adquirieron a través de las estaciones hidrológicas al interior de la cuenca, y disponibles en las bases de datos de CLICOM (IIUNAM) y de CONABIO.

Configuración del suelo.- Los datos edafológicos y de uso de suelo se obtuvieron mediante la información que presenta INEGI, mediante el portal de CONABIO, para el estado de Tabasco, con actualizaciones en 2011. Con esta información se determinaron los parámetros empleados en el modelo MPE, mediante el número de curva *CN* (con la metodología descrita anteriormente).

En la **Figura 3.1** se muestran las estaciones climatológicas e hidrométricas dentro de la zona de estudio de las cuales se utilizó la base de datos de lluvia en el año 2008.

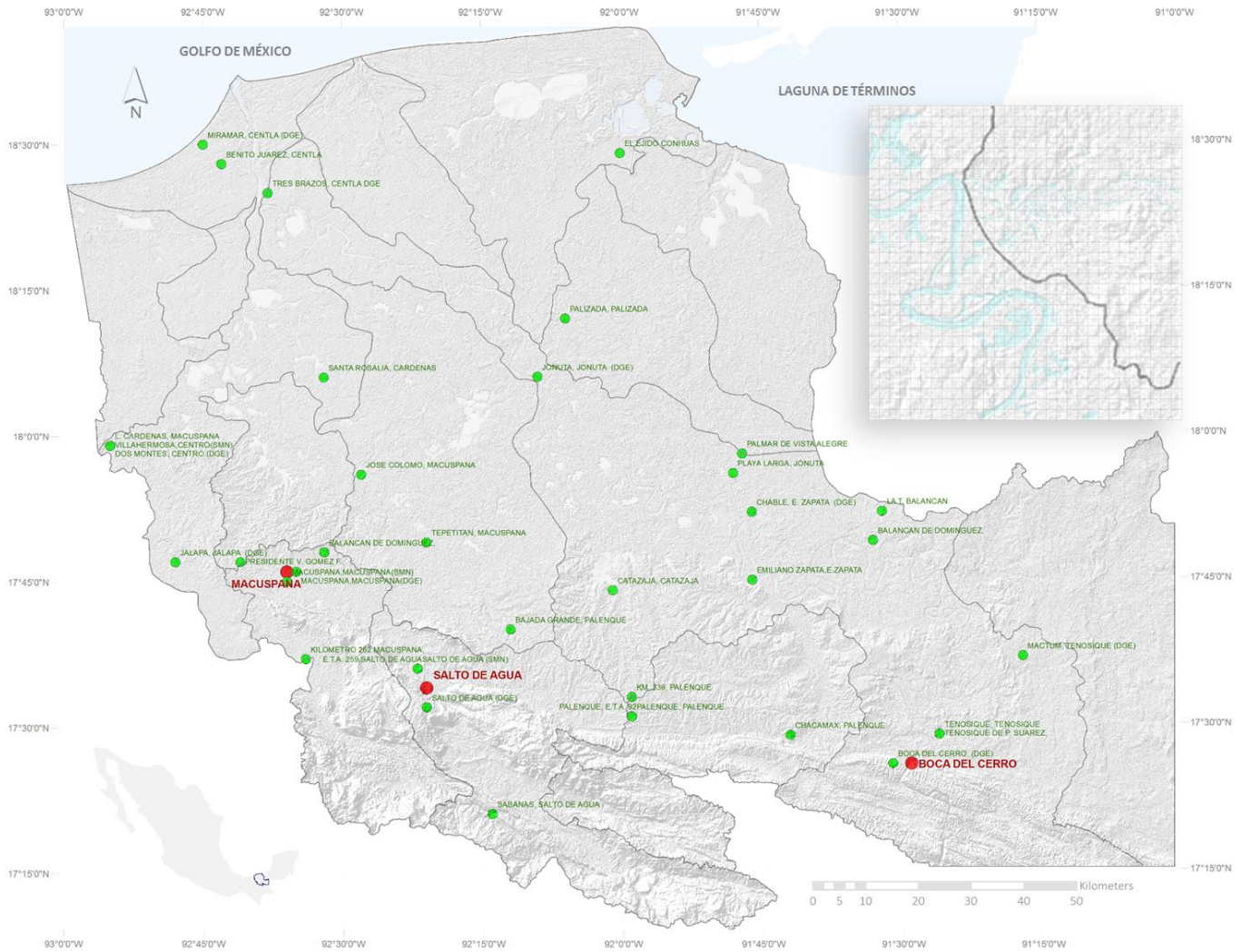


Figura 3.1 Información necesaria para la implementación del modelo hidrológico de variación de parámetros. Se observa la definición de la cuenca en el río principal, subcuencas y modelo digital de elevación, para el modelo hidrológico se empleó una malla cuadrada de 30 metros, los símbolos verdes indican la ubicación de las estaciones climatólogicas, mientras que los símbolos rojos la ubicación de las estaciones hidrométricas.

El período simulación comprende los meses de Agosto hasta Noviembre de 2008, periodo en el que se observaron varias tormentas que produjeron escurrimientos considerables que a su vez ocasionaron inundaciones. La avenida más importante del periodo se presentó a finales del mes de Octubre en donde se presentaron áreas de inundación máximas.

La lluvia observada, se produjo principalmente por la presencia de frentes fríos, que se mantuvieron estacionarios en la región durante un promedio de cuatro días. De acuerdo con los registros de datos del Servicio Meteorológico Nacional de México, la precipitación máxima diaria para el periodo se registró por encima de 260 mm, mientras que la precipitación acumulada para las 72 horas del 19 al 21 de Octubre se estimó superior a 810 mm.

El empleo de *GLUE* para la estimación de diferentes hidrogramas por medio del modelo MPE, permite estimar y limitar la incertidumbre hidrológica asociada al proceso de predicción. La implementación de *GLUE* para el caso de la cuenca del río Usumacinta se resume en la **Figura 3.2**, en la que se describe el proceso de estimación de la incertidumbre asociada a un mismo evento de inundación para diferentes condiciones iniciales de la cuenca.

Los hidrogramas así generados, son empleados como condición de frontera dentro del modelo hidráulico, con lo que se puede proveer información sobre los límites inferior y superior de los niveles de inundación esperados para un evento dado.

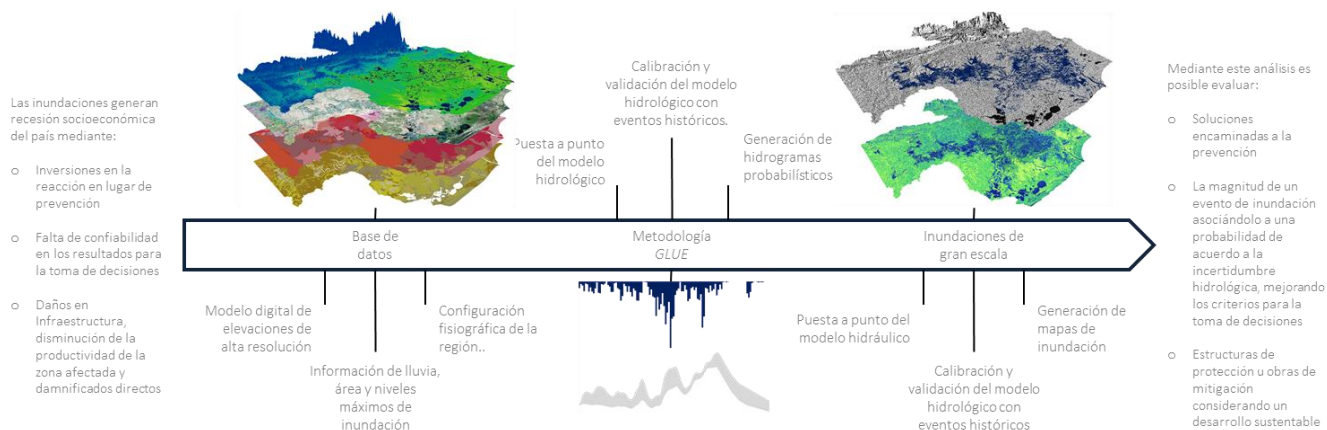


Figura 3.2 Estructura general de la metodología propuesta para la estimación de hidrogramas que consideran la incertidumbre hidrológica y por ende tienen una probabilidad de ocurrencia asociada.

3.2 Modelo hidráulico Hec-RAS

Como ya se explicó anteriormente, los modelos numéricos hidráulicos bidimensionales, son la herramienta con mejores resultados al analizar llanuras de inundación, sin embargo, al ser limitados por la capacidad de cómputo éstas son inadaptables en proyectos a nivel de ingeniería que estudien eventos de inundación a gran escala.

En general modelos hidráulicos unidimensionales, analizan los flujos de los ríos y canales por secciones transversales de los cauces, de acuerdo al escurrimiento y caudal del agua en el sistema hídrico. En el análisis hidráulico de este trabajo se utilizó el modelo Hec-RAS, (*Hydrologic Engineering Center-River Assessment System*), desarrollado por el *United States Army Corps of Engineers* (USACE). Hec-RAS es un modelo unidimensional de régimen permanente, gradualmente variado, que genera como resultado el perfil de la superficie libre de agua, calculando el nivel y velocidad del agua y el “área mojada” en cada tramo o sección transversal del río ([Martín Vide et al., 2003](#); [Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004](#)).

Existen estudios de la “*International Commission on Large Dams, (ICOLD)*”, realizados por el subcomité de “*Analysis of dambrak flooding an related parameter normally assumed*”, en el que se describen y evalúan 27 modelos existentes, de los cuales únicamente algunos están normalmente extendidos en la práctica y son accesibles de forma libre. Hec-RAS está incluido dentro de estos 27 modelos, por lo que es un modelo certificado para la simulación de flujos de inundación ([ICOLD, 2012](#)).

Para evaluar inundaciones con este modelo numérico, se requiere de información relacionada con la fisiografía y los caudales del sistema fluvial (que son sistematizados en el modelo como datos geométricos), flujos de agua o aforos, así como las especificaciones para la simulación de escurrimiento superficial y áreas inundadas, relacionados con los periodos de retorno de precipitación o en este caso asociados a una probabilidad de ocurrencia.

3.2.1 Fundamentos teóricos del modelo Hec-RAS

Este modelo permite la alternancia de régimen crítico y subcrítico en la misma simulación, para ello utiliza el método LPI (*Local Partial Inertia*) o método del paso directo, que añade un término a las ecuaciones para reducir los términos de inercia cuando el número de Froude se acerca a la unidad y por tanto habrá un cambio de régimen y una posible discontinuidad. Este método hace posible que el modelo no se vuelva inestable en esos puntos donde se produce una discontinuidad del flujo, a cambio de una pérdida de precisión en los resultados.

Para ello, es necesario conocer las secciones transversales, la distancia entre las secciones transversales, el coeficiente de Manning en cada porción de cada sección transversal, el caudal de diseño y la condición de borde. Si el flujo es sub-crítico, la condición de borde a usar es aguas abajo, si el flujo es supercrítico, la condición de borde a usar es aguas arriba. En un tramo sólo es necesario conocer una condición de borde, a menos que el flujo sea mixto. En este caso, se debe contar con una condición de borde aguas arriba y otra, aguas abajo. Es frecuente que ésta condición ocurra, sobre todo en ríos de la Vertiente Occidental de los Andes, tales como el río Lurín y Rímac, en los cuales se presentan flujos mixtos.

El método del paso directo. El método del paso directo se basa en la ecuación de la energía. Si se tienen dos secciones adyacentes (ver [Figura 3.3](#)), la energía de la sección que se encuentra aguas arriba (Sección 2) debe ser igual a la energía de la sección que se encuentra aguas abajo (Sección 1) más las pérdidas que se generan por fricción y por turbulencia (expansión / contracción) en el tramo. Se deben tener en cuenta las siguientes premisas:

- o No existe variación de caudal en el tramo. Si existe variación de caudal, debe dividirse el canal en tramos que transporten el mismo caudal.
- o La pendiente del canal es pequeña. (menor a 10°).
- o El fondo del canal es rígido.
- o La pendiente de la línea de energía puede calcularse usando la ecuación de Manning.
- o El flujo es gradualmente variado (no ocurre una disipación violenta de energía).
- o El flujo es permanente.

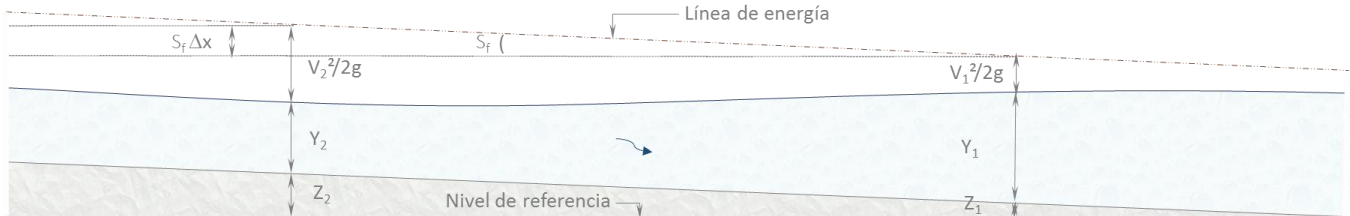


Figura 3.3 La energía en la sección 2 es igual a la energía en la sección 1 más las pérdidas por fricción \$S_f \Delta x\$. En esta figura no se han incluido las pérdidas por expansión / contracción

Por ejemplo, en el procedimiento para el cálculo de \$Y_2\$ en la **Figura 3.3** es el siguiente. (Se supone que la condición de borde es el tirante aguas abajo, es decir \$Y_1\$).

Primer paso.- En la sección conocida se calcula el Área (A), Perímetro (P), Radio hidráulico (\$R = A/P\$), Velocidad (\$V = Q/A\$). La cota de la línea de energía será:

$$H = Z + Y + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{ec. 3.2.1.1})$$

Se calcula la pendiente de la línea de energía:

$$S_f = \frac{V^2 n^2}{R^{4/3}} \quad (\text{ec. 3.2.1.2})$$

Segundo paso.- En la sección 2, se calcula el nivel de fondo del canal. Si la pendiente es constante:

$$Z_2 = Z_1 + S_0 A_x X_{1-2} \quad (\text{ec. 3.2.1.3})$$

Se supone un tirante \$Y_2\$, con el tirante \$Y_2\$, se calcula el área \$A_2\$, el perímetro \$P_2\$, el radio \$R_2\$, la velocidad \$V_2 = Q/A_2\$. Se calcula:

$$H_{1\ 2} = Z_2 + Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{ec. 3.2.1.4})$$

Tercer Paso.- Calcular la pendiente de la línea de energía en el punto 2:

$$S_{f\ 2} = \frac{V_2^2 n^2}{R_2^{4/3}} \quad (\text{ec. 3.2.1.5})$$

Calcular la media de la \$S_{f\ 1}\$ y \$S_{f\ 2}\$

$$S_{f\ 1-2} = \frac{S_{f\ 1} + S_{f\ 2}}{2} \quad (\text{ec. 3.2.1.6})$$

$$H(2) = H + S_{f\ 1-2} A_x + h_e \quad (\text{ec. 3.2.1.7})$$

Se compara \$H_1(2)\$ con \$H(2)\$ de ec. 3.2.1.4. Deben ser iguales. Si no lo son, se aplica una corrección al tirante.

Cuarto Paso.- Se calcula la corrección, \$\Delta Y_2\$

$$\Delta Y_2 = \frac{H_1 - H}{1 - Fr_2^2 + \frac{3S_{f\ 2} A_x}{2R_2}} \quad (\text{ec. 3.2.1.8})$$

Iterando, \$Y_2(i) = Y_2(i-1) - \Delta Y_2(i-1)\$, donde \$i\$, es el número de iteración.

Se continúa en la sección 2 hasta que \$H_1\$ y \$H\$ convergen con una tolerancia adecuada. Una vez que el nivel es hallado se toma esta sección como la conocida y se pasa a la tercera sección. Es necesario notar que en este caso se consideró que el flujo es subcrítico y que la condición de borde fue el nivel del agua AGUAS ABAJO del tramo. Además se debe recordar que los canales irregulares cambian de sección transversal (ensanchamiento o angostamiento). Esto induce pérdidas de carga que son

proporcionales a la diferencia de las cargas de las velocidades de secciones adyacentes ($V^2/2g$). Los coeficientes de expansión y contracción son 0.3 y 0.1 respectivamente.

3.2.2 Implementación de Hec-RAS: Metodología para la generación de los mapas de inundación

La mayor parte del sistema hidráulico en su parte baja, se ubica en la planicie de inundación, formada por los pantanos de Centla, en donde el río Usumacinta tiene muy poca pendiente y por lo tanto el régimen subcrítico es predominante. En contraste, en su parte alta, cerca de la condición de entrada en la región del cañón Boca del Cerro, se tienen desniveles importantes, sin embargo la pendiente del río no es tan grande como para generar flujos en régimen supercrítico.

En sus salidas al mar, conformadas por las derivaciones de los ríos Palizada y San Pedro – San Pablo, la pendiente es aún más pequeña que en Usumacinta, por lo que los flujos también se generan en régimen subcrítico. Debido a lo anterior, en todo el sistema se consideró este régimen para las simulaciones hidráulicas. Para la puesta a punto del modelo hidrodinámico que representara todo este río junto con su llanura de inundación, se empleó información de diversas fuentes tal y como se describe a continuación:

Gasto de entrada.- Se utilizaron los hidrogramas medidos en la estación hidrométrica Boca del Cerro. El hidrograma se empleó en la etapa de calibración y corresponde al medido en el evento de inundación ocurrido en 2008 y para la etapa de validación se utilizó el hidrograma medido en el evento de inundación de 2011. En la **Figura 3.4** se presentan los hidrogramas medidos en la estación Boca del Cerro durante los eventos de inundación de 2008 y 2011, en la que se aprecian gastos máximos que sobrepasan los 8,000 m³/s en ambos casos.



Figura 3.4 En este gráfico se muestran los hidrogramas medidos en la estación Boca del Cerro durante los eventos de inundación de 2008 y 2011, también se puede observar el registro de lluvia máxima diaria en la misma estación en 2008.

Condiciones de frontera.- El sistema hidráulico que se modeló tiene cuatro condiciones de frontera, la primera se encuentra aguas arriba del río Usumacinta, justamente donde inicia el flujo del sistema, es ahí donde se encuentra la estación hidrométrica Boca del Cerro y por lo tanto en donde se conocen los niveles iniciales y gasto de entrada al sistema. La segunda y tercer condición de frontera son, las descargas al Golfo de México, la principal en su salida por la Ciudad de Frontera, Tabasco y la del río San Pedro – San Pablo, en el límite con el estado de Campeche. Las condiciones de frontera aquí son gobernadas por el nivel del mar ya que las mareas son de régimen micromareal y tienen un efecto nulo en el análisis hidráulico del río Usumacinta. La cuarta y última condición de frontera se ubica en la descarga del río Palizada a la laguna de Términos, en donde también se establece el nivel del mar como condición de frontera.

Coefficiente de Manning.- Por defecto, el Hec-RAS admite que el cauce está dividido en tres partes: la margen izquierda, el cauce principal y la margen derecha. Por lo tanto en cada tramo, entre secciones transversales, se tienen tres coeficientes de Manning diferentes. Por lo general, los ríos tienen partículas de mayor tamaño en el cauce principal y vegetación en ambas márgenes como se observa en la imagen de la **Figura 3.5**.

Características geométricas. El primer paso en la puesta a punto del modelo geométrico consistió en la asimilación de la información de campo y los datos de altimetría láser para construir una malla numérica lo suficientemente detallado y estable para la correcta simulación numérica de los flujos en el sistema en estudio. A pesar de la complejidad de la zona, se divide al sistema en tres cauces principales asociados a la presencia de los ríos Usumacinta, San Pedro San Pablo y Palizada, en conjunto con un área de regulación, representada por la planicie de inundación asociada.

El Modelo Digital de Elevación (MDE) que se seleccionó para las modelaciones numéricas proviene de un vuelo de altimetría láser realizado por INEGI en el 2008. Una perspectiva de esta información se presenta en la **Figura 3.6**. Los puntos generados por LiDAR en el DEM fueron corregidos en los cauces de los ríos utilizando los levantamientos de secciones transversales adquiridas durante la campaña de campo correspondiente a la cuarta etapa del Plan Hídrico Integral de Tabasco. La **Figura 3.7** presenta el esquema geométrico utilizado para la representación del sistema en su totalidad.



Figura 3.5 Río Usumacinta (localidad de Jonuta, 2011). Se observa que en ambas márgenes del río se tiene vegetación y el cauce principal en promedio es de 700 metros con una profundidad media de 20 metros, el fondo del río está compuesto principalmente por sedimentos finos y gruesos.

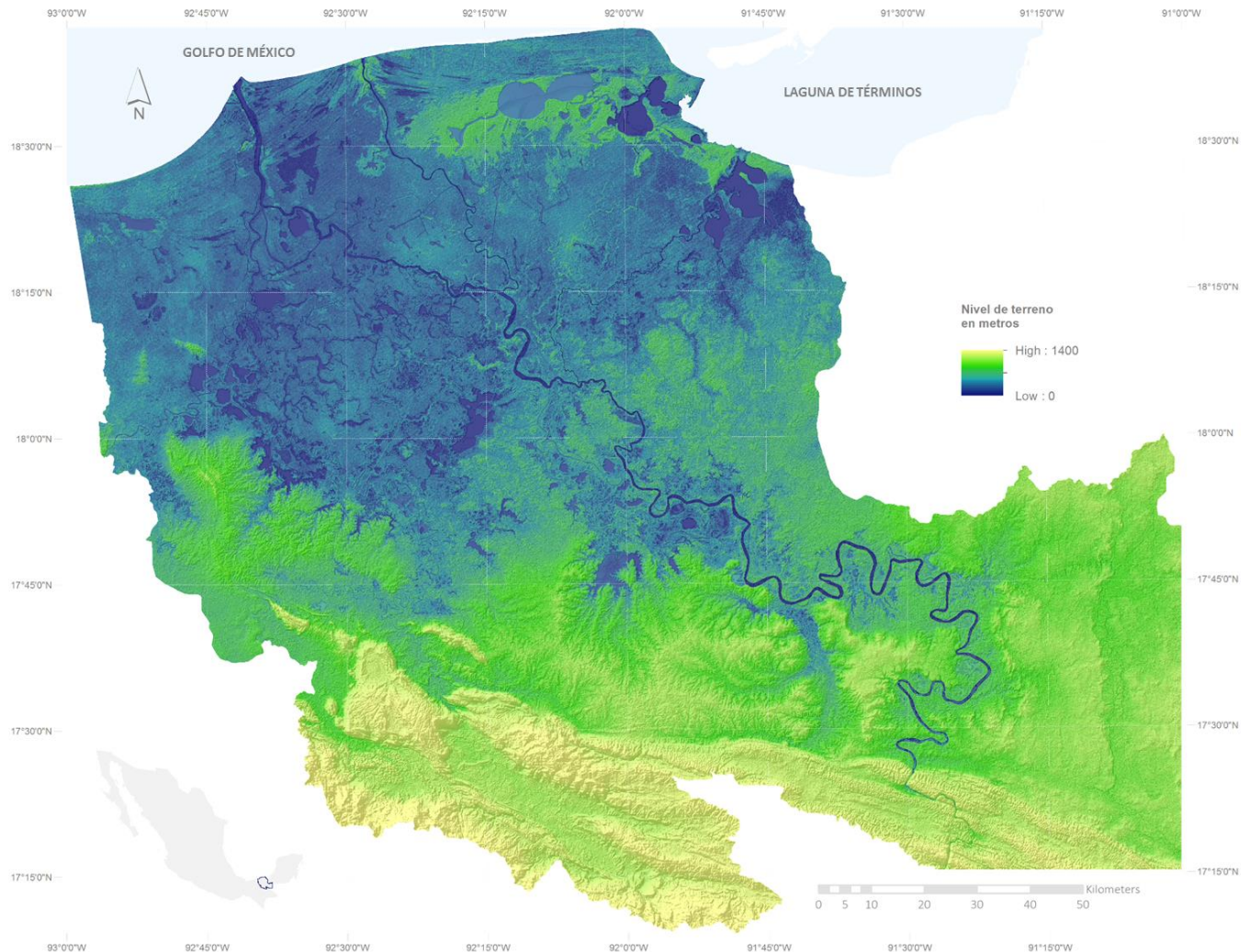


Figura 3.6 Modelo Digital de Elevaciones construido con datos de altimetría láser. A partir de altimetría laser se construyó el DEM en una malla cuadrada con una resolución de 30 metros.

Los valores de rugosidad fueron estimados en función de la vegetación en la llanura y la composición de los sedimentos al interior del cauce. Dada la escala del problema se utilizaron una $n=0.095$ para el cauce del río y $n=0.200$ para las llanuras de inundación.



Figura 3.7 Trazado de la geometría del sistema Usumacinta, San Pedro-San Pablo, Palizada con sus respectivas llanuras de inundación. La configuración geométrica en hec-RAS consta de un cauce principal con secciones transversales perpendiculares al flujo, la extensión de cada sección transversal debe cubrir el área de inundación que se necesita analizar, por lo cual cada sección tendrá diferentes longitudes.

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

4. Análisis de resultados y estrategias de mitigación

En el capítulo anterior se describen los factores físicos y características geométricas implementados, tanto en el modelo hidrológico como en el hidráulico para la estimación de escurrimientos y niveles de flujo respectivamente, con lo cual se determinaron valores que pudieron calibrar y validar ambos modelos considerando datos reales de varias fuentes. De tal forma que empleando la metodología propuesta se realizaron una serie de cálculos con el objetivo de evaluar los efectos de eventos de inundación en el río Usumacinta (p.e. niveles, áreas inundables).

Debido a que las estimaciones realizadas tienen una probabilidad de ocurrencia asociada a la incertidumbre hidrológica dentro de la cuenca se determinaron los rangos para los escenarios extremos tanto mínimo como máximo.

Para finalizar y utilizando el modelo hidrodinámico validado se evaluaron posibles estrategias para reducir los efectos adversos de inundación en la zona. En los siguientes subcapítulos se presentan los resultados finales para cada modelo numérico.

4.1 Validación de la metodología con los eventos de inundación en 2008 y 2011

Los modelos hidrológicos e hidráulicos se corroboran, ideal y preferiblemente, con datos medidos en el sitio; como son: los gastos o caudales de los escurrimientos, la profundidad y áreas inundadas; para este estudio se empleó la información de tres estaciones hidrométricas y trece climatológicas (CONABIO, 2012), ubicadas geográficamente dentro de la zona de estudio, con información hidrológica dentro del banco de datos de CLICOM y BANDAS. Considerando la limitación del número de estaciones hidrométricas y datos hidrológicos para la cuenca del río Usumacinta, se incorporó información satelital (p.e. RADARSAT, LANDSAT y NASA), con la cual se determinaron las áreas de inundación en los eventos de 2008 y 2011.

4.1.1 Modelo hidrológico

Para validación del modelo hidrológico, se compararon los gastos reportados en tres estaciones hidrométricas (Macuspana, Salto de Agua y Boca del Cerro); y en la desembocadura de la cuenca con los gastos calculados por el modelo en las mismas ubicaciones (CONAGUA, 2008-12).

Los gastos registrados para las estaciones hidrométricas se obtuvieron de la base de datos BANDAS de la CONAGUA, la información de 2008 permitió la calibración del modelo numérico mientras que la de 2011 fue usada para la validación del mismo. Adicionalmente, se utilizó la metodología de GLUE (Beven & Binley, 1992), aplicando el concepto equifinalidad mediante la variación de los parámetros físicos de la cuenca, determinando así, N-hidrogramas para un mismo evento de tormenta (en este caso evento de 2008). Dentro del rango de los N-hidrogramas generados, se encuentra el medido para el evento de 2008, validando el cálculo que permite estimar las incertidumbres hidrológicas.

Hidrogramas asociados a una probabilidad de ocurrencia.- El análisis de sensibilidad de parámetros libres se llevó a cabo asignando una misma probabilidad de ocurrencia a los parámetros asociados al factor de escala; el parámetro de pérdida de escala fue variado en un rango de 0.10 a 1.00, mientras que el parámetro de retención potencial se varió en un rango de 0.10 a 5.0. Haciendo combinaciones entre estos factores y dejando el factor de olvido en 1.0 se generaron cien simulaciones, un ejemplo de la asociación de estos parámetros se encuentra en la **Tabla 4.1**; con las cien estimaciones lluvia-escurrimiento se estimaron cien hidrogramas correspondientes al análisis de sensibilidad del modelo hidrológico con lluvia registrada durante el periodo seleccionado de 2008. El uso de estos hidrogramas permitió limitar la incertidumbre generada en el modelo hidrológico, dado que estima las bandas de confianza asociadas a un escurrimiento, además a cada caso se le asignó una probabilidad de ocurrencia para los cien casos (ver **Figura 4.1**).

Tabla 4.1 Análisis de sensibilidad con el modelo hidrológico

No.	Factores de escala		Factor de Olvido (fx)
	Pérdida Inicial (λ)	Retención Potencial (fs)	
1	0.10	0.10	1.0
2	0.10	0.50	1.0
3	0.10	1.00	1.0
4	0.10	2.00	1.0
5	0.10	3.00	1.0
6	0.10	5.00	1.0
7	0.50	0.10	1.0
8	0.50	0.50	1.0
9	0.50	1.00	1.0
10	0.50	2.00	1.0
11	0.50	3.00	1.0
12	0.50	5.00	1.0
13	1.00	0.10	1.0
14	1.00	0.50	1.0
15	1.00	1.00	1.0
16	1.00	2.00	1.0
17	1.00	3.00	1.0
18	1.00	5.00	1.0

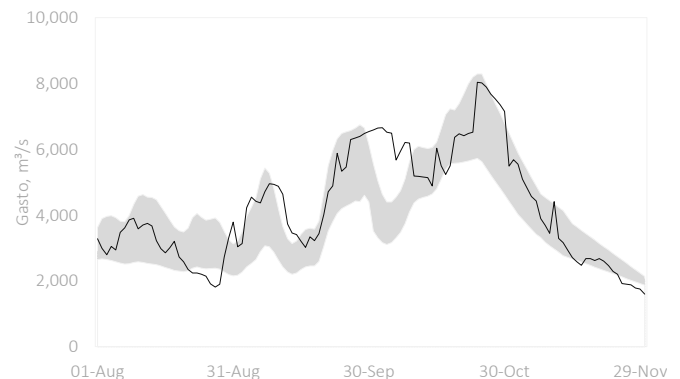


Figura 4.1 Hidrogramas probabilísticos asociados al evento de 2008 (en Negro), hidrograma con una probabilidad de ocurrencia de 50% (línea punteada), La banda sombreada representan todos los posibles hidrogramas con probabilidades de ocurrencia de entre 5% (hidrograma máximo) y 95% (hidrograma mínimo).

4.1.2 Modelo hidráulico

Las superficies y zonas inundadas que generó el modelo hidráulico fueron corroboradas, en parte, con el uso de una imagen de RADAR de 2011 que muestra las zonas inundadas después de la severa inundación de este año. Como complemento, datos puntuales sobre la localización de sitios inundados en la cuenca del río Usumacinta, derivados de diversas fuentes de información (por ejemplo, registros de Protección Civil del estado de Tabasco, CFE y CONAGUA) y verificaciones en campo, fueron evaluados para corroborar el modelo, considerando gastos y niveles de agua en época de estiaje y en época de lluvias es condiciones ordinarias. Los resultados de la calibración y validación del modelo hidráulico se muestran en las **Figuras 4.2 y 4.3** respectivamente.

Tal y como se reporta, el modelo numérico una vez construido, pasa por un proceso de calibración y validación antes de ser utilizado para explorar alternativas de alivio dentro del sistema.

En esta etapa el estudio prevé la generación de manchas de inundación a fin de identificar las potenciales áreas de afectación, con particular énfasis en las localidades aledañas. Así mismo, se prueban algunas alternativas de reducción de zona inundable por medio de la simulación numérica de dragado de los ríos en la zona.

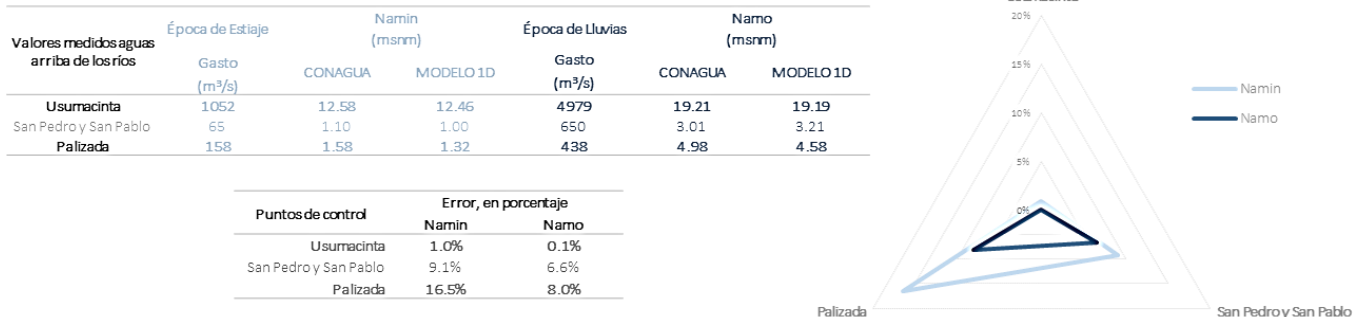


Figura 4.2 Comparación entre los niveles de agua medidos y los calculados por el modelo hidráulico 1D, en los extremos aguas arriba de cada río. Como se puede observar, los niveles calculados por el modelo varían con los niveles medidos entre 0.02m y 0.4m en época de lluvias y entre 0.10 y 0.26 en época de estiaje. Las mayores diferencias se presentan en los ríos San Pedro – San Pablo y Palizada (donde se tiene un error de 8.0% en condiciones de Namo, de acuerdo al gráfico triangular).

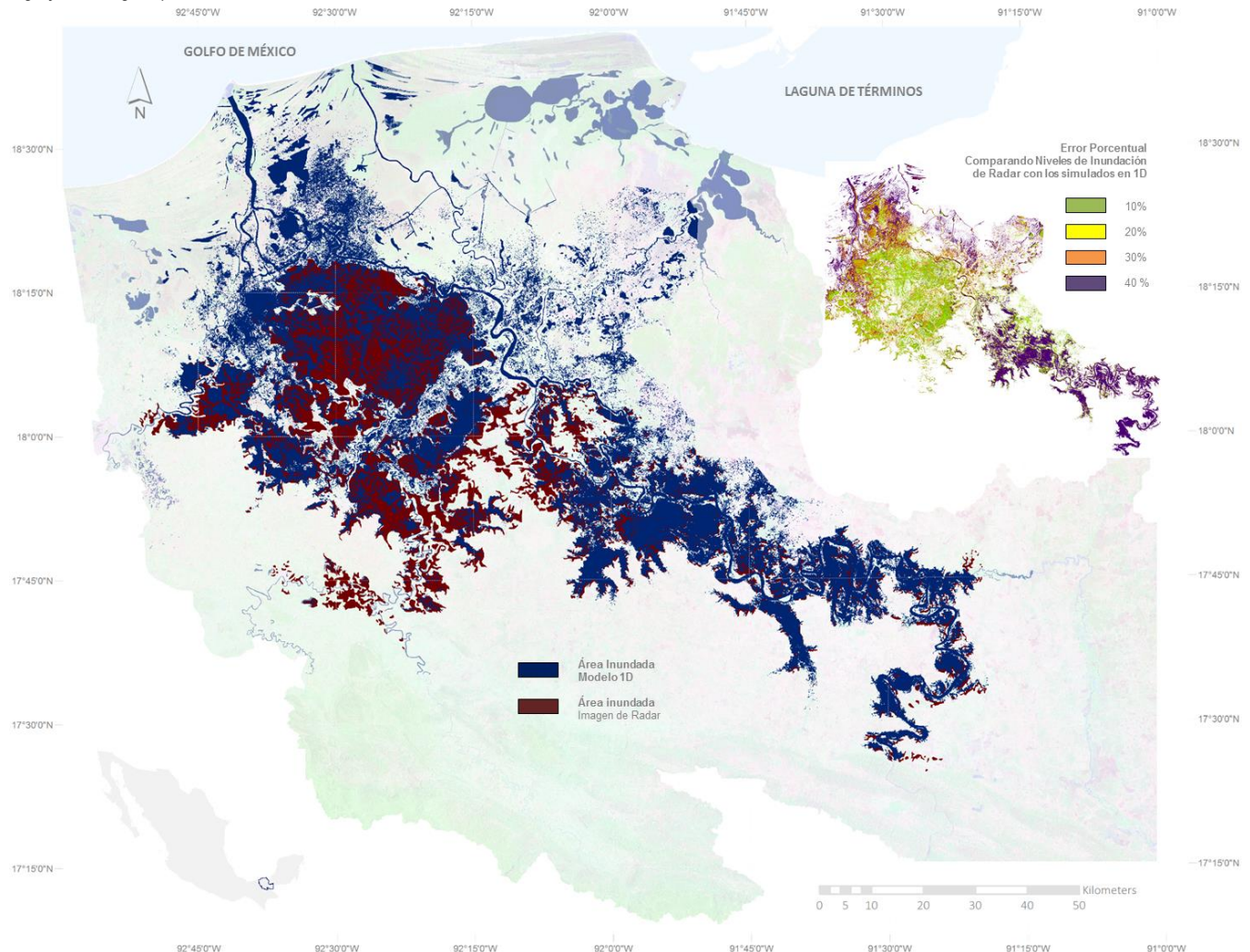


Figura 4.3 Resultados de modelación numérica para el evento de 2011, el recuadro superior derecho se muestra el error porcentual entre los niveles de inundación obtenido mediante Radar y el modelo 1D, correspondientes al evento de inundación del 22 de Octubre de 2011. Además, se determinó que en el evento de inundación, el agua ocupó una superficie total de 3,940 km² y con el modelo 1D se calculó un área inundada de 5,041 km², con lo cual se estima un error de 21.8 %, sin embargo se comprobó que si se considera únicamente la cuenca media-alta, el error es de menos del 5%.

4.2 Mapas de inundación probabilísticos (GLUE)

En este trabajo, al presentar los mapas de inundación, es muy importante dar a conocer de forma clara, las zonas inundables asociadas a una probabilidad de ocurrencia, lo cual permitirá a las poblaciones y a las autoridades responsables, tener una mejor información para la toma de decisiones. El modelo numérico empleado, representa la simplificación de los principales procesos físicos necesarios para asimilar y distribuir las áreas inundables en una llanura.

La diferencia observada en un solo evento extremo, resalta la importancia de incorporar mapas de inundación probabilísticos para facilitar la comunicación de los riesgos de inundación en las comunidades locales. En la **Figura 4.4** se muestran las estimaciones probabilísticas hechas a ocho poblaciones importantes distribuidas en la llanura de inundación y la comparación de estas predicciones con los eventos de inundación simulados para los años 2008 y 2011, de tal forma que se determinó el rango de incertidumbre en estos puntos de estudio.

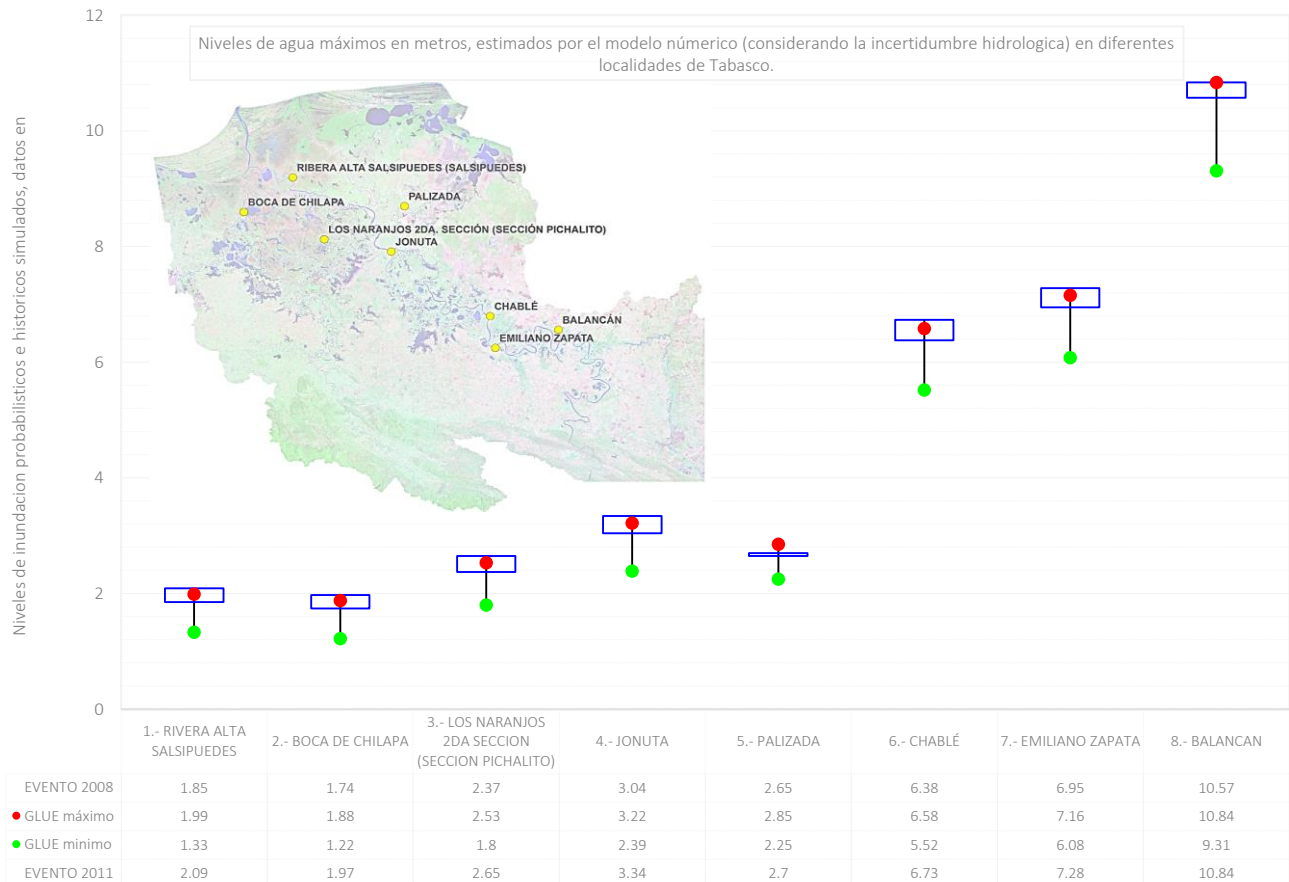


Figura 4.4 En el gráfico superior se presentan para cada localidad analizada los niveles de inundación asociados a una probabilidad de ocurrencia, los puntos representan niveles de inundación con una probabilidad de excedencia de 95% (verde), y 5% (rojo), respectivamente. Los rectángulos azules, representan los niveles de inundación estimados para cada los eventos de 2008 (límite inferior del rectángulo) y 2011 (límite superior del rectángulo). Se puede observar que en todos los casos el evento de 2008 se encuentra dentro del rango de probabilidades de ocurrencia (aproximadamente 50%, mientras que el evento de 2011 es más cercano a una probabilidad de ocurrencia del 5%. Además se puede apreciar como la incertidumbre es variable (diferencia entre GLUE máximo y mínimo) en cada localidad analizada, siendo en este caso de 1.53 metros para Balancan y de 0.6 metros para Palizada con un rango de incertidumbre menor.

La **Figura 4.5** presenta los mapas de inundación estimados para los hidrogramas que reproducen el evento de 2008. El panel superior muestra el resultado de la envolvente máxima, el panel medio presenta los resultados para la envolvente mínima, mientras que el panel inferior ilustra el hidrograma medio. Los tres mapas de inundaciones se presentan en el mismo instante de tiempo, después que se transitaron los flujos máximos en el río Usumacinta. Por otra parte, el recuadro anexo en cada resultado presenta la zona de afectación observada durante el evento.

A pesar de que existen diferencias significativas en las áreas afectadas en los hidrogramas inferior, superior y medio, es interesante observar que los tres resultados muestran inundaciones en las mismas áreas. La zona más afectada en este ejercicio numérico se encuentra principalmente en la cuenca media y baja del río Usumacinta. Estas zonas, son desde luego las más afectadas durante el evento de acuerdo a la imagen de satélite. Las diferencias entre el tamaño de las zonas inundadas con los hidrogramas probabilísticos, indican que efectivamente la incertidumbre en el proceso de modelación hidrológica se propaga hacia la estimación de un área afectada.

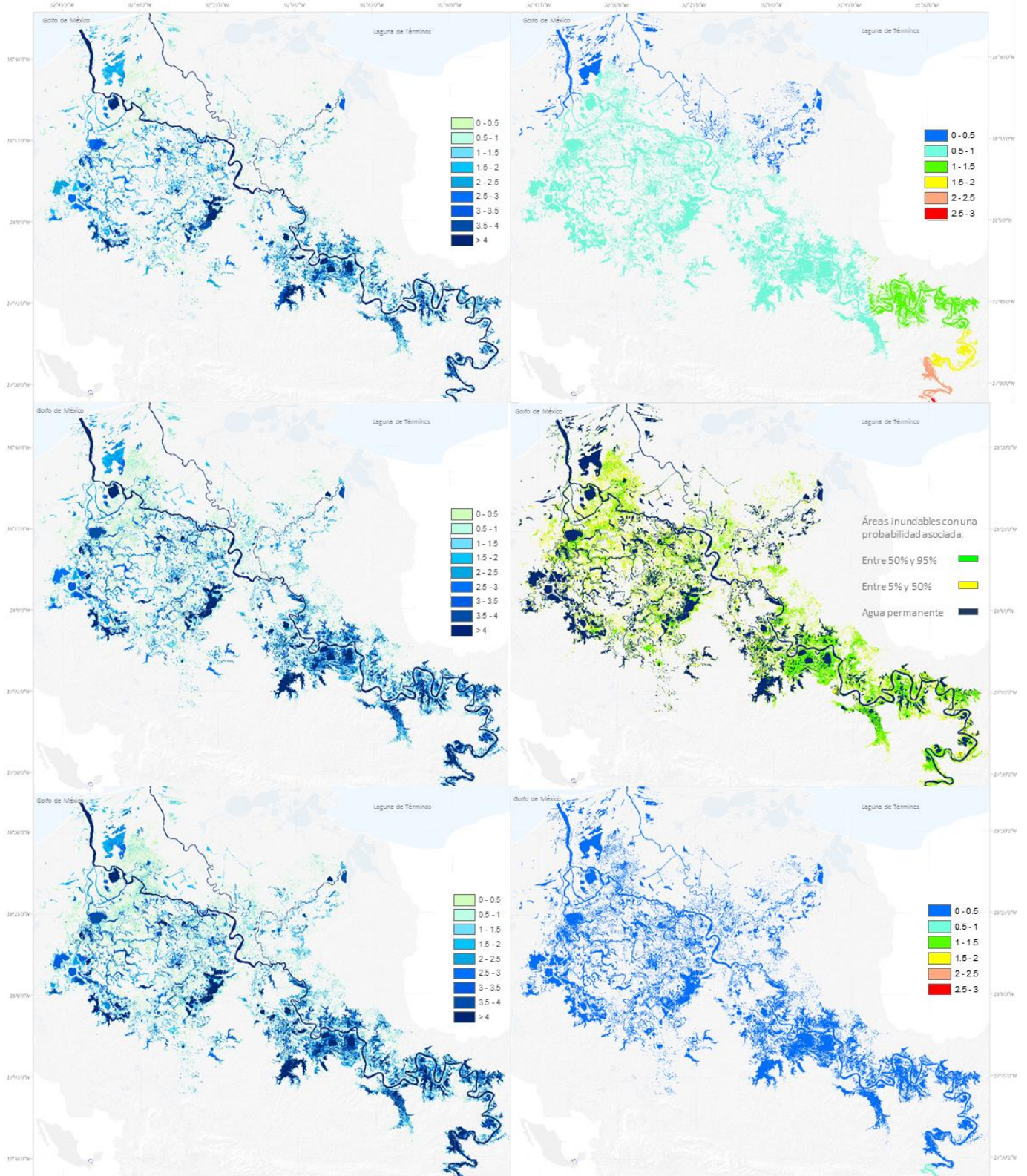


Figura 4.5 Mapas de inundación probabilísticos estimados: En el panel superior-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 95%, en el panel intermedio-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 50% y en el panel inferior-izquierdo con una probabilidad de ocurrencia de 5%. De igual forma en el panel superior-derecho se muestra la diferencia de los niveles de inundación estimados con una probabilidad de ocurrencia de entre 95% y 50%, en el panel inferior-derecho se muestra la diferencia de los niveles de inundación estimados con una probabilidad de ocurrencia de entre 5% y 50%, (como se puede observar, las diferencias son mayores en la parte alta de la cuenca); finalmente en el panel intermedio-derecho, se presenta la extensión de las áreas inundables con una probabilidad de ocurrencia asociada.

Cabe resaltar que existen otras fuentes de incertidumbre asociadas al proceso de modelado de una inundación. Las cuales pueden ser significativas. Por ejemplo, la geometría del sistema (incluyendo estructuras de defensa de inundaciones); posibilidad de fallas en la infraestructura (diques o bordos de seguridad de los desagües), las características del sistema (por ejemplo, rugosidad), y en las limitaciones de los modelos disponibles para representar plenamente los procesos (por ejemplo la superficie y sub-superficie de los procesos de flujo en la generación de inundaciones y enrutamiento).

A pesar de la incertidumbre identificada, es posible afirmar que la metodología propuesta es útil para reproducir las condiciones observadas durante un fenómeno extremo en campo. Los resultados estimados son lo suficientemente satisfactorios para realizar otros diagnósticos de operación del sistema, tanto en condiciones normales como en condiciones extremas (ver **Figura 4.6**). De la misma forma, esta metodología es un buen principio para estimar los efectos de otro tipo de medidas de manejo de inundaciones, como forestación de la cuenca o en general cambio en el uso del suelo.

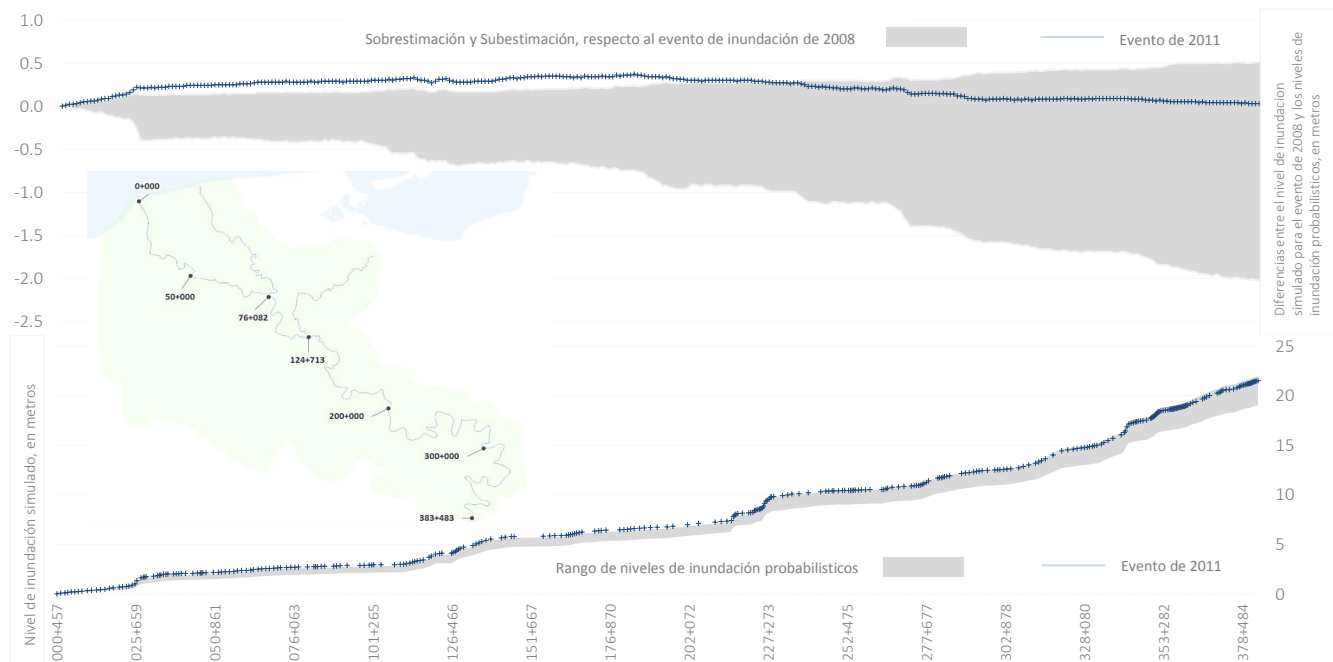


Figura 4.6 Perfiles en el río Usumacinta de los niveles de inundación máximos para estimaciones de 95% de probabilidad de ocurrencia (en verde), 5% de probabilidad de ocurrencia (en rojo) y para los eventos de inundación estimados en 2008 y 2011. La escala vertical izquierda representa la diferencia en metros entre cada estimación de niveles de inundación con respecto a una inundación de 50% de probabilidad de ocurrencia. La escala vertical derecha representa el nivel máximo de agua en el río, en metros sobre el nivel del mar. Con el rango de incertidumbre asociado al evento de inundación en 2008 se comparó numéricamente los niveles con los inundación en 2011 simulados, dando como resultado que, sobrepasa el rango de predicción para una probabilidad de ocurrencia del 5% en los primeros 250 mil metros a partir de la desembocadura (es decir la parte baja de la cuenca); mientras que en la parte alta de la cuenca los niveles de inundación de 2011 quedaron dentro del rango de incertidumbre en las estimaciones probabilísticas.

4.3 Propuestas para el manejo de inundaciones

En este punto se presentan algunos de los resultados de la simulación numérica de distintas obras que podrían implementarse en el sistema en estudio, con el objetivo de ampliar la capacidad hidráulica de los ríos. El objetivo de estos ejercicios numéricos es analizar la efectividad de obras de dragado en el sistema de estudio. Para ello se consideran las siguientes alternativas:

1. Dragado de 300 m de ancho a lo largo de 22 km del río Grijalva, desde la conexión con el río Usumacinta y hasta su desembocadura al Golfo de México.
2. Dragado de 600 m de ancho a lo largo de 22 km del río Grijalva, desde la conexión con el río Usumacinta y hasta su desembocadura al Golfo de México.
3. Dragado del río San Pedro San Pablo en su zona de conexión con el río Usumacinta (6 km) y en la su desembocadura al mar (15 km).
4. Dragado del río San Pedro San Pablo en su totalidad (74 km).
5. Dragado en el río Palizada 6km aguas abajo de la confluencia con el río Usumacinta.
6. Combinación de las alternativas 2 y 4.
7. Combinación de las alternativas 1 y 3.

4.3.1 Opción 1. Dragado a lo largo de 22 km de la desembocadura del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su descarga al mar (300 m de anchura)

En esta sección se presentan los resultados numéricos de incrementarse la capacidad hidráulica del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su desembocadura al golfo de México, lo cual representan aproximadamente 22 km. Se define un ancho del dragado de 300 m, con una profundidad máxima de 15 m (actualmente ~10 m), por lo tanto se propone el dragado de ~5m.

Se espera que la eficiencia hidráulica de la desembocadura del río Usumacinta aumente considerablemente y se reduzca la inundación en la zona central del área de estudio. Para ello como condiciones de forzamiento, se considera el tránsito del gasto extraordinario observado en 2011. El resultado de esta simulación se presenta en el anexo A, en la *Figura A.1*.

4.3.2 Opción 2. Dragado a lo largo de 22 km de la desembocadura del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su descarga al mar (600 m de anchura)

En esta sección se presentan los resultados numéricos de incrementarse la capacidad hidráulica del río Grijalva después de la conexión con el río Usumacinta y hasta su desembocadura al golfo de México, lo cual representan aproximadamente 22 km. Se define un ancho del dragado de 600 m, con una profundidad máxima de 15 m (actualmente ~10 m), por lo tanto se propone el dragado de ~5m.

Se espera que la eficiencia hidráulica de la desembocadura del río Usumacinta aumente considerablemente y se reduzca la inundación en la zona central del área de estudio. Para ello como condiciones de forzamiento, se considera el tránsito del gasto extraordinario observado en 2011. El resultado de esta simulación se presenta en el anexo A, en la *Figura A.2*.

4.3.3 Opción 3. Dragado del río San Pedro San Pablo en su zona de conexión con el río Usumacinta (6 km) y en la su desembocadura al mar (15 km)

Uno de los resultados más relevantes de las simulaciones numéricas realizadas en la llanura de inundación del río Usumacinta, fue la poca eficiencia hidráulica del río San Pedro San Pablo. Esta salida alternativa al golfo de México, tiene una anchura promedio de 100 m y una profundidad promedio de 2 m en la zona cercana a la desembocadura, mientras que en la bifurcación del río Usumacinta reporta una profundidad de 6 m. Esto indica el azolve que se presenta en la región cercana a la desembocadura lo que reduce en gran medida su capacidad para descargar agua hacia el Golfo de México, por lo tanto se propone el dragado de ~4m para hacer coincidir las platillas en la unión de los ríos.

Con el objetivo de evaluar si es posible reducir la inundación en las márgenes del río Usumacinta, se propone el dragado de este río en dos zonas, una cercana a la bifurcación y otra cercana a la desembocadura. Los resultados se presentan en el anexo A, en la *Figura A.3*.

4.3.4 Opción 4. Dragado del río San Pedro San Pablo en su totalidad, desde zona de conexión con el río Usumacinta y hasta la desembocadura al golfo de México (74 km)

Uno de los resultados más relevantes de las simulaciones numéricas realizadas en la llanura de inundación del río Usumacinta, fue la poca eficiencia hidráulica del río San Pedro San Pablo. Esta salida alternativa al golfo de México, tiene una anchura promedio de 100 m y una profundidad promedio de 2 m en la zona cercana a la desembocadura, mientras que en la bifurcación del río Usumacinta reporta una profundidad de 6 m. Esto indica el azolve que se presenta en la región cercana a la desembocadura lo que reduce en gran medida su capacidad para descargar agua hacia el Golfo de México, por lo tanto se propone el dragado de ~4m para hacer coincidir las platillas en la unión de los ríos.

Con el objetivo de evaluar si es posible reducir la inundación en las márgenes del río Usumacinta, se propone el dragado de este río en dos zonas, una cercana a la bifurcación y otra cercana a la desembocadura. Los resultados se presentan en anexo A, en la *Figura A.4*.

4.3.5 Opción 5. Dragado en el río Palizada 6km aguas abajo de la confluencia con el río Usumacinta

Otra de las opciones propuestas para el alivio de esta zona comprende el dragado del río Palizada. Sin embargo, cabe resaltar que esta opción es la que se antoja menos viable ya que su implementación implicaría el incremento del riesgo de inundación de la Ciudad de Palizada en Campeche.

Sin embargo, para completar el análisis se propone un dragado en los primeros 6 km del río a partir de la bifurcación, en éste caso se propone el dragado de ~4m para hacer coincidir las platillas en la unión de los ríos. Los resultados se presentan en el anexo A, en la **Figura A.5**,

4.3.6 Opción 6. Combinación de las alternativas 2 y 4

Al implementar dos opciones simultáneas se planteó que una opción que considera un manejo más integral del agua en la región considera la combinación de las opciones presentadas en las alternativas 2 y 4. Es decir, el dragado de la desembocadura del río Grijalva desde su conexión con el río Usumacinta (ancho 600 m) en combinación con el mejoramiento de la capacidad hidráulica del río San Pedro San Pablo (75 Km). Los resultados se presentan en el anexo A, en la **Figura A.6**.

4.3.7 Opción 7. Combinación de las alternativas 1 y 3

Por último, una opción que considera un manejo integral del agua en la región considera la combinación de las opciones presentadas en las alternativas 1 y 3. Es decir, el dragado de la desembocadura del río Grijalva desde su conexión con el río Usumacinta (ancho de 300 m) en combinación con el mejoramiento de la capacidad hidráulica del río San Pedro San Pablo (15 Km). Los resultados se presentan en el anexo A, en la **Figura A.7**.

Una comparación de todas las alternativas de mitigación propuestas en este capítulo se muestran en la **Figura 4.7**, en donde se pueden ver los beneficios de reducción de los niveles de inundación para el mismo evento de tormenta extrema (en este caso, similares al evento de 2011).

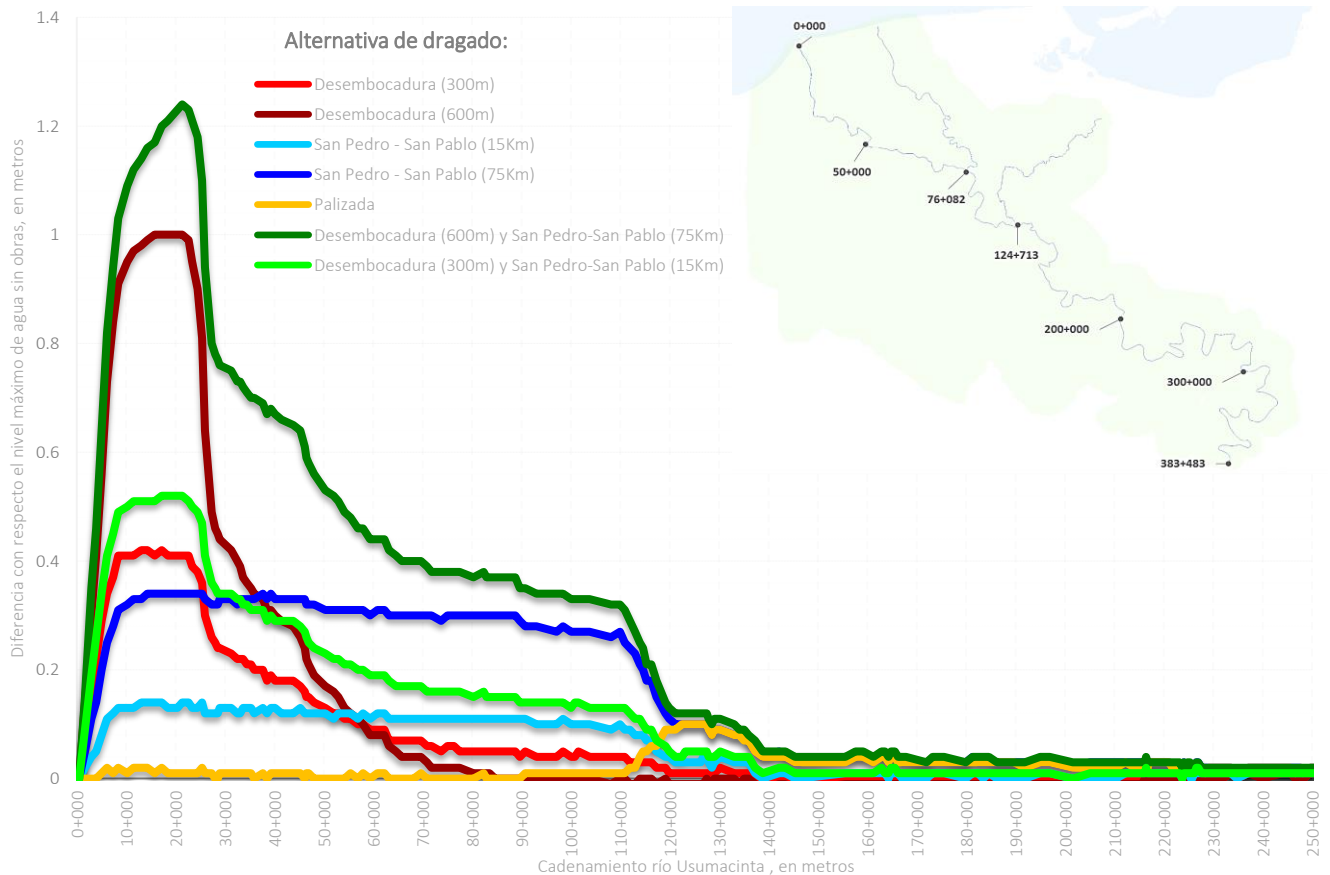


Figura 4.7 Resumen del resultado de las alternativas de alivio en la llanura de inundación. Cada grafico representa la diferencia de niveles de inundación entre el río Usumacinta sin obras y el sistema con alguna obra de dragado. El cadenamamiento 0+000 corresponde al punto de descarga en el Golfo de México.

4.4 Análisis de las alternativas de mitigación estructurales

Con el objetivo de complementar el análisis de los resultados presentados en la sección anterior, se presenta la cuantificación de las áreas de inundación obtenidas bajo cada escenario modelado numéricamente. Esto con el fin de establecer una evaluación que señale, aunque sea de forma indicativa, la mejor solución posible de las estudiadas en este trabajo de investigación. El análisis de las alternativas consiste en lo siguiente:

1. Calcular los niveles de inundación para cada alternativa, en su condición final.
2. Obtener volúmenes de dragado de acuerdo a la profundidad y anchura utilizadas en la simulación.
3. Determinar el costo de dragado para cada alternativa (para ello se utiliza un costo nominal de \$100.00 pesos/m³).

Comparar resultados de costo y niveles de inundación obtenidas para cada alternativa de solución a fin de establecer cuál es la más conveniente.

4.4.1 Niveles máximos de inundación

El cálculo de niveles de inundación se realizó para el estado final del sistema, bajo todos los escenarios estudiados. Para ello se utilizó el programa de información geográfica GIS, por medio de la escala del dominio de cálculo se ubicaron puntos de comparación de niveles de inundación en cada resultado de simulación. Los resultados de este procedimiento se presentan en la **Tabla 4.2**, donde se aprecia la diferencia de niveles que se tendrían en cada alternativa al compararlos con el nivel de inundación máximo, en ocho localidades analizadas. Este resultado es significativo, ya que indica el posible ahorro de recursos económicos para la realización de este tipo de obra.

Tabla 4.2 Diferencias entre los niveles máximos de inundación: Sin Obras – Dragado. Datos en metros.

NOMBRE DE LA LOCALIDAD	Desemboca dura (300m)	Desemboca dura (600m)	San Pedro - San Pablo (15Km)	San Pedro - San Pablo (75Km)	Palizada	Desembocadura (600m) y San Pedro-San Pablo (75Km)	Desembocadura (300m) y San Pedro-San Pablo (15Km)
1.- RIVERA ALTA SALSIPUEDES	0.15	0.22	0.12	0.32	0.01	0.51	0.26
2.- BOCA DE CHILAPA	0.2	0.34	0.12	0.33	0	0.7	0.31
3.- LOS NARANJOS 2DA SECCION (SECCION PICHALITO)	0.06	0.02	0.11	0.3	0	0.31	0.16
4.- JONUTA	0.02	0	0.05	0.15	0.06	0.18	0.07
5.- PALIZADA	0	0	0.02	0.08	0	0.1	0.03
6.- CHABLÉ	0	0	0.01	0.03	0.03	0.04	0.01
7.- EMILIANO ZAPATA	0	0	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01
8.- BALANCAN	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01

4.4.2 Obtención de los volúmenes y costo de las obras de dragado

A fin de cuantificar el volumen y costo del dragado propuesto en los escenarios simulados, se determinó de forma indicativa una sección tipo de la desembocadura del río Usumacinta al golfo de México.

La **Figura 4.8** presenta una sección transversal del río Usumacinta, cerca de su desembocadura al golfo de México. En color rojo se indica la condición actual de la sección con una anchura de 800 m y una profundidad de 9 m. En color azul se presenta la opción de dragado que considera una anchura de 300 m y una profundidad de 14 m. Finalmente se plantea dragar del orden de 22.2 km, exactamente en la incorporación del río Usumacinta con el río Grijalva y desde ese punto hasta la desembocadura al golfo de México.

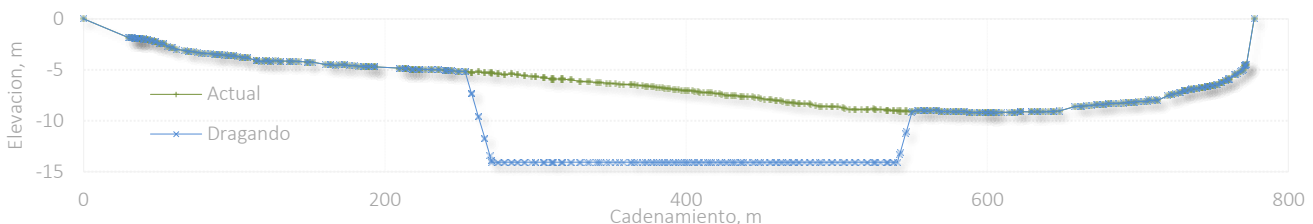


Figura 4.8 Ejemplo de una sección transversal del río Usumacinta obtenida en el levantamiento de 2012 en condiciones actuales (en color Verde) y la propuesta de dragado (en color Azul)

Así mismo, para las condiciones de dragado en San Pedro – San Pablo y Palizada, se consideran diferentes profundidades de dragado. Estas se presentan en la **Figura 4.9**, en la que se observan dos secciones transversales, tanto para el río San Pedro – San Pablo, como para el río Palizada. El primero tiene un ancho de cauce del orden de 150 m, mientras que el segundo tiene un ancho promedio de 80 m.

Así, el volumen de dragado se obtuvo por medio del cálculo del volumen de las secciones del dren, menos el volumen de la sección del dren actual, dada por para las diferentes longitudes que se dragan en cada río.

Para determinar el volumen de dragado, se multiplicó el área transversal de dragado obtenida por la longitud de dragado propuesta. Se entiende por dragado a la operación de remoción de sedimentos en ríos, lagos, canales y puertos; con la finalidad de que al aumentar la profundidad, se incremente la capacidad hidráulica. La **Tabla 4.3** presenta los resultados derivados para el área de dragado.

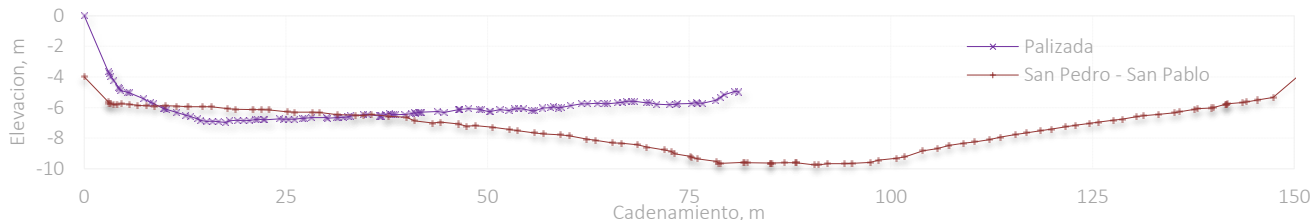


Figura 4.9 Ejemplo de Secciones del río San Pedro – San Pablo (en color Marrón) y el río Palizada (en color Púrpura), obtenidas del levantamiento de 2012.

Tabla 4.3 Volumen de dragado en metros cúbicos, para los diferentes escenarios de alivio propuestos.

ALTERNATIVA DE DRAGANDO:	LONGITUD A DRAGAR, KM	VOLUMEN A DRAGAR, M ³
1 DESEMBOCADURA (300M)	22.2	33,023,393
2 DESEMBOCADURA (600M)	22.2	86,730,687
3 SAN PEDRO-SAN PABLO (15KM)	15.0	14,063,608
4 SAN PEDRO-SAN PABLO (75KM)	74.5	49,904,378
5 PALIZADA	30.4	11,586,996
6 ALTERNATIVAS 2 y 4	96.7	136,635,065
7 ALTERNATIVAS 1 y 3	37.2	47,087,001

Para determinar el costo aproximado de la obra propuesta, se utilizó un costo de dragado por metro cúbico de \$100.00 pesos. En la **Figura 4.10** se presentan los resultados de costo aproximado para cada dren estudiado en este capítulo. Como propuesta adicional se puede usar el producto de dragado en algún otro tipo de solución de mitigación de tipo estructural como pueden ser, bordos de protección.

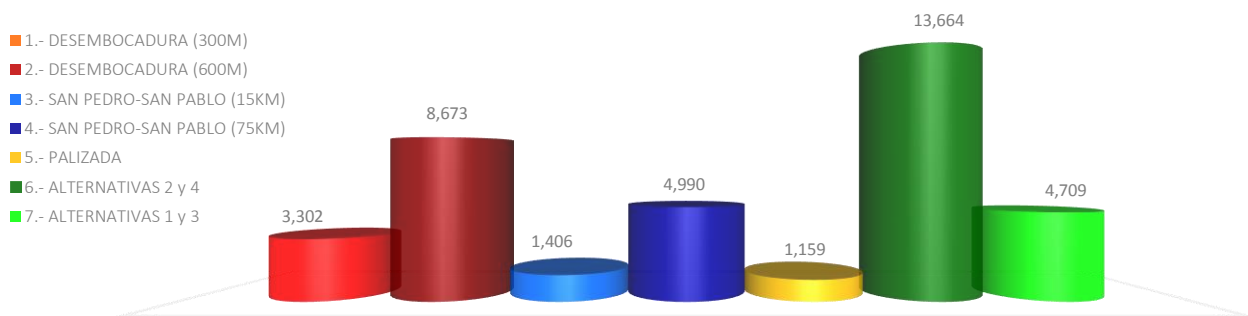


Figura 4.10 Costos de dragado para cada alternativa, en millones de pesos (MDP)

Con el objetivo de comparar cuantitativamente, el costo, niveles de inundación y volumen de dragado para cada escenario de alivio simulado, esta sección introduce comparaciones entre estas variables. Esto permitirá determinar cuál de estos escenarios representa el mejor de todos, desde un punto de vista económico y de consecuencias esperadas.

La **Figura 4.11** representa la diferencia entre los niveles de inundación máximos alcanzados durante el evento de 2011 y los calculados para cada alternativa de solución de dragado (para las siete alternativas propuestas en los ocho puntos de análisis de la zona de estudio). Como se observa en el gráfico los niveles inundación se reducen entre 10 cm y 65 cm para los puntos de análisis, al implementar la alternativa de dragar la desembocadura del río Usumacinta al golfo de México. De tal forma que para cada alternativa demuestran los diversos beneficios de mitigación, sin duda la alternativa de menor mitigación es la alternativa de dragar el río Palizada, el cual no beneficia de forma significativa la reducción de los niveles de inundación. En la **Figura 4.12** se muestran un resumen de cómo se reducen los niveles de inundación para cada alternativa propuestas en los puntos de análisis.

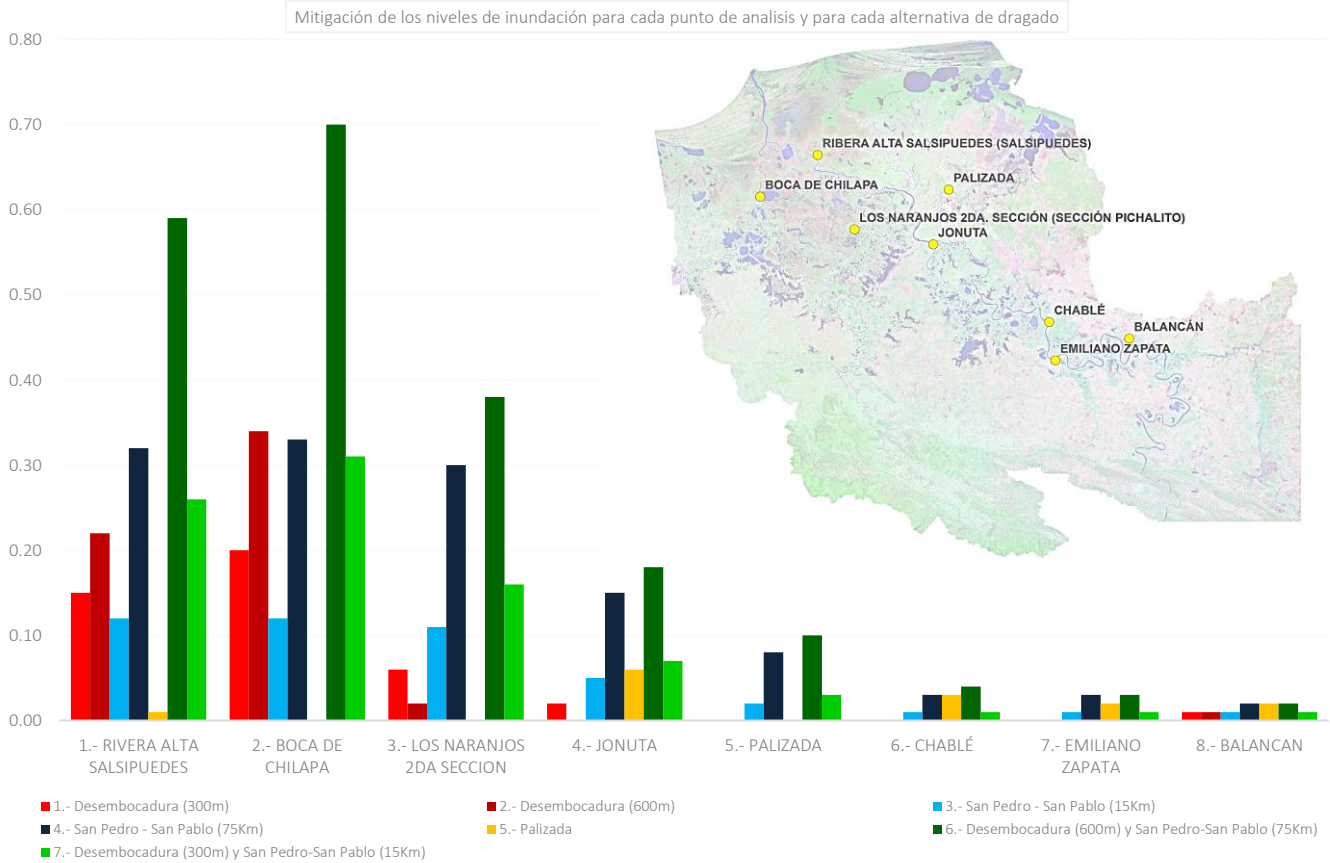


Figura 4.11 Reducción en los niveles de inundación para los ocho puntos de análisis y para las siete alternativas de mitigación propuestas. Como se observa para la localidad de Boca de Chilapa los niveles de inundación se reducen en 70 centímetros mediante la alternativa de mitigación No. 6 (propuestas de dragar las desembocaduras de los ríos Usumacinta y San Pedro – San Pablo); sin embargo existen otras localidades (p.e. Palizada) en la que los niveles de inundación no pueden ser reducidos de forma significativa mediante las alternativas de dragado, por lo que es necesario optar por otro tipo de soluciones como podría ser la construcción de bordos de protección.

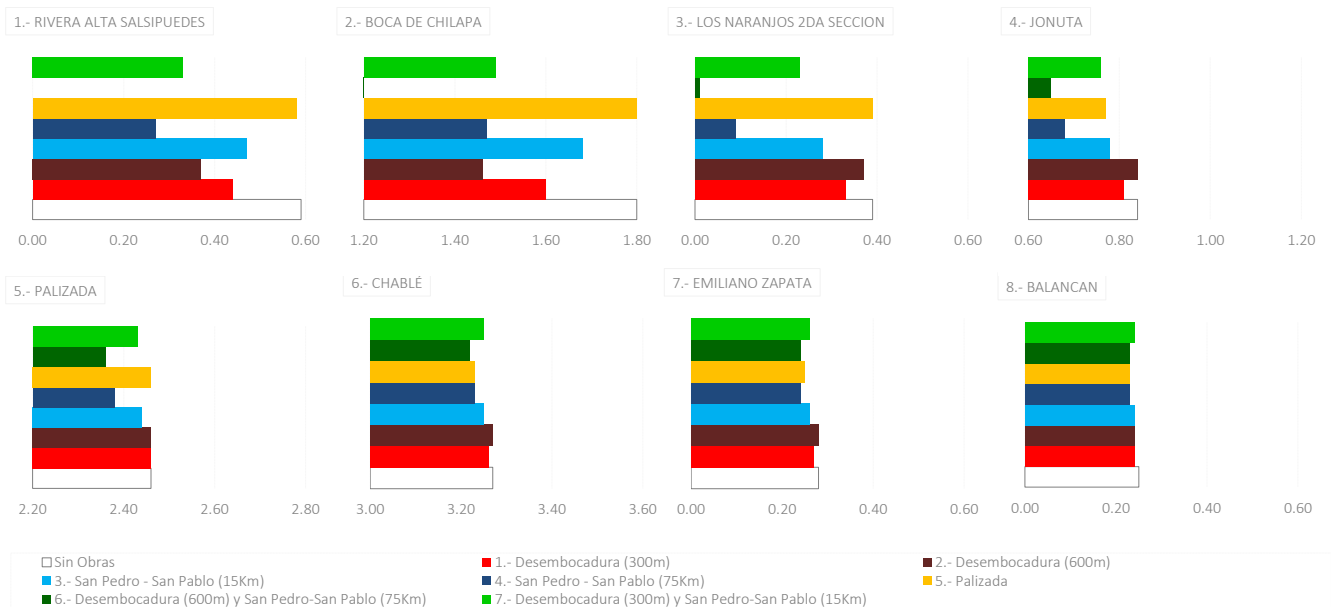


Figura 4.12 Niveles máximos de inundación (en metros) calculado en las simulaciones para cada punto de interés y para cada alternativa de dragado. Para la alternativa 7 (ver descripción en el capítulo 4.3.7) se obtuvieron los niveles de inundación más pequeños en todos los puntos de análisis. Como se puede apreciar, para todas las propuestas de dragado, se presentan las reducciones de niveles de inundación en las zonas bajas de la cuenca (puntos 1 a 4) y para las zonas altas (puntos 5 a 8) el efecto de mitigación es mínimo por lo que se necesitan otro tipo de estrategias de alivio para la cuenca alta.

4.4.3 Evaluación de las propuestas de mitigación

La **Figura 4.13** compara los niveles de inundación reducidos contra el costo para las siete alternativas propuestas en los ocho puntos de análisis en la zona de estudio. También se observa en el mismo grafico que para el punto 3 (Los Naranjos Segunda Sección), los niveles de inundación que más se reducen son los generados por las alternativas 4 y 6, sin embargo la alternativa 4 es menos costosa que la alternativa 6, y ambas tienen el mismo beneficio en cuanto a la reducción de niveles de inundación.

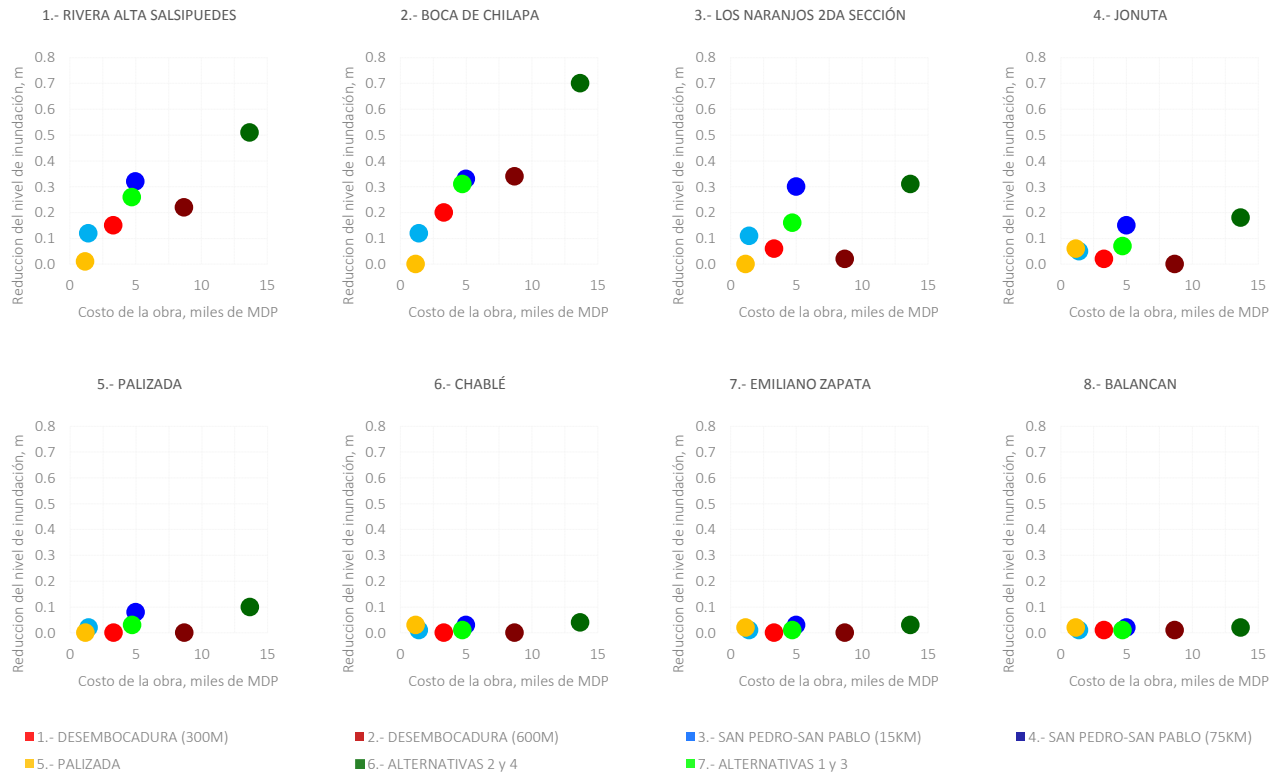


Figura 4.13 Comparación entre el costo y niveles de mitigación de inundación para cada alternativa propuesta para cada punto de análisis de la zona de estudio. Para el punto 2 localizado en la Boca de Chilapa, la mayor reducción en los niveles de inundación se logra con la alternativa 6 (ver descripción en el capítulo 4.3), donde se reducen los niveles de inundación del orden de 70 centímetros. También se puede corroborar que para todas las propuestas de dragado, se presentan las reducciones de niveles de inundación en las zonas bajas de la cuenca (puntos 1 a 4) y para las zonas altas (puntos 5 a 8) es mínimo el efecto de mitigación

Capítulo 5

RESOLUCIÓN Y ENFOQUES INTEGRABLES

5. Resolución y enfoques integrables

La modelación de inundaciones de ríos en regiones muy planas requiere una representación adecuada de los procesos fluviales, así como una mayor cantidad de datos de estaciones hidrológicas. Por lo tanto, este trabajo representa un primer esfuerzo en México, que tiene como objetivo el desarrollo de un enfoque integrado para la generación de mapas de inundación confiables dentro de un rango que es función de la probabilidad de ocurrencia (en este caso, asociada a la incertidumbre hidrológica), para un mismo evento extremo; con lo cual se pueden determinar efectos de menor y mayor impacto dentro de una banda de confianza.

La metodología, diseñada para cuantificar y limitar algunas de las incertidumbres en los resultados, está compuesta por mediciones de precipitación, un modelo hidrológico, datos LiDAR y un modelo de inundación que como se ha demostrado en este estudio el tener una óptima instrumentación de una cuenca hidrológica permitirá establecer los límites de incertidumbre de tal forma que los rangos máximos y mínimos puedan evaluar perfectamente todos los factores físicos que estén siendo simplificados en la estimación de escurrimiento a través de la lluvia.

Uno de los principales propósitos de este trabajo consistió en la evaluación de la incertidumbre hidrológica empleando un modelo de variación de parámetros. Para ello, se utilizaron datos medidos de precipitación durante un evento extremo. Las variaciones inducidas en el modelo hidrológico se centraron principalmente en el nivel de infiltración y la clasificación de uso del suelo dentro de la cuenca. Se observó que estos pueden causar variaciones significativas en la descarga total estimado para el río. Los hidrogramas resultantes se emplean como insumos para el modelo numérico unidimensional para caracterizar la inundación, lo que permite la generación de N-mapas de inundación para un evento extremo. Los resultados indican una sensibilidad de la región para la caracterización de lluvia-escurrimiento de los datos de precipitación reales. Las diferencias se identifican en términos del tamaño de las áreas afectadas estimadas por el modelo unidimensional.

5.1 Conclusiones

Resumiendo lo anterior, diferentes hidrogramas fueron estimados a partir de un análisis de sensibilidad de parámetros libres en el modelo hidrológico, se generaron N-hidrogramas para un evento determinado y finalmente se estimaron mapas de inundación asociados a una probabilidad de ocurrencia. Con lo anterior se pudo cuantificar la incertidumbre en la zona de estudio, se obtuvo que la cuenca del río Usumacinta presenta una mayor incertidumbre en la parte alta de la cuenca, esto es debido principalmente a que el cauce del río queda confinada a su mismo cauce, lo que le permite una mayor variabilidad en los niveles de agua, por otro lado en la parte baja de la cuenca (planicie de inundación) los niveles de agua no crecen significativamente, sin embargo las áreas inundables si crecen de manera cuantificable como se pudo observar en el capítulo de resultados.

La metodología utilizada reprodujo con éxito las condiciones observadas en la cuenca del río Usumacinta durante 2008. De esta manera, es posible afirmar que la generación de mapas de inundación más confiables es posible, lo que redundará en una mejor comunicación del riesgo de inundación a la población. Es decir, la metodología presentada hace énfasis en la prevención de este tipo de desastres para poder desarrollar planes de emergencia u otras alternativas de preventivas.

Las diferencias observadas en el tamaño de área de inundación estimada para un evento extremo, resaltan la importancia de la generación de mapas de inundación probabilísticos para un mejor manejo de este tipo de desastres. Como se pudo observar en la validación del modelo unidimensional la parte alta de la cuenca presentó una estimación de áreas inundables con un error del 5% mientras que en la zona baja de la cuenca, las áreas estimadas de inundación presentaron errores mayores al 20% de sobreestimación debido a que el cálculo hidrodinámico se realizó con un modelo unidimensional. Aunque el error es relativamente mayor a lo esperado, para fines ingenieriles es considerado como aceptable y como se ha comprobado a lo largo de este estudio, el error queda minimizado al tratarse de una zona de estudio de gran escala.

Por otra parte y aunque la metodología integral aquí utilizada, está diseñada para reducir y limitar las incertidumbres, debe notarse que hay fuentes adicionales de incertidumbres en el proceso de modelado de un evento de inundación, que también podrían ser significativos, como lo son los cambios físicos en la cuenca (p.e. deforestación y erosión). El análisis y evaluación de esta cuenca todavía está en marcha, por lo que en publicaciones posteriores se utilizarán los avances presentados para evaluar la sustentabilidad de propuestas de solución estructurales (bordos de protección, dragado de ríos, etc.) que pudieran ser aplicadas para el manejo y mitigación de inundaciones en los próximos años.

En este trabajo se ha obtenido satisfactoriamente un modelo matemático para la obtención y análisis de mapas de inundación a partir de información de alta calidad. Mediante la integración de las herramientas descritas, se han aprovechado las ventajas de modelos computacionales ampliamente utilizados.

5.2 Estudios eventuales

El método utilizado para la generación de mapas de inundación a gran escala considerando incertidumbres hidrológicas, se apega a un riguroso y detallado manejo de los datos proporcionados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Como se menciona anteriormente, este es el primer paso para un análisis integral de una de las zonas más afectadas en el estado de Tabasco, formando parte del Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT).

Se hace énfasis en la importancia de implementar este tipo de modelos ya que con estos, se puede estimar la magnitud del riesgo que se tiene, en un problema de inundación (socioeconómica y políticamente hablando). Finalmente no hay que perder de vista, que estos modelos no son la verdad absoluta, pero sin duda, son las mejores herramientas de diseño para un ingeniero, en donde pueden evaluar una gran variedad de alternativas de prevención y poder tomar las mejores decisiones.

Desde los puntos de vista académicos y de investigación, el estudio aquí reportado es un análisis a gran escala de modelación hidráulica en llanuras de inundación, que fomenta la importancia de seguir un protocolo de modelación apropiado y riguroso. Muy importante en la implementación de la metodología es evaluar las limitaciones de los modelos aquí propuestos, por lo que se recomienda mejorar las técnicas metodológicas aquí presentadas en estudios análogos y adaptarlas a las nuevas alternativas tecnológicas que puedan desarrollarse en un futuro cercano. En el mundo se están desarrollando estrategias de respuesta ante eventos adversos, por lo que se espera que en México se incorporen este tipo de medidas en los próximos años. Ejemplos de estas medidas se presentan a continuación.

5.2.1 Sistemas de Alerta Temprana SAT

El SAT está concebido como un sistema integrado de mecanismos y procedimientos orientados a la detección oportuna de fenómenos cuya ocurrencia representa un peligro, aunada a la comunicación y respuesta oportuna de los organismos, instituciones y población que asumen una actitud responsable y se movilizan para evitar daños y pérdidas de vidas y bienes.

El propósito de este SAT es contribuir a establecer un mecanismo de detección temprana de situaciones anómalas asociados a fenómenos de la variabilidad climática (Lluvias, deslizamientos, inundaciones, huracanes, etc.) que se presentan en diferentes meses del año y que constituyen peligros para las poblaciones, sus bienes y medios de vida. Representa el inicio de un proceso que termina en la movilización en torno a la aplicación de un Plan de emergencia que busca reducir los impactos de los eventos peligrosos que ocurren.

5.2.1 Atlas de riesgo

La prevención, una parte sustantiva de la Gestión Integral del Riesgos, cobra cada día una mayor relevancia estratégica en el esfuerzo para disminuir el creciente impacto social y económico que provocan las emergencias y los desastres, incidiendo en algunas regiones y países muy desfavorablemente en la sustentabilidad de su desarrollo y de sus procesos productivos. Es por ello fundamental reconocer que, para disminuir los desastres, es indispensable evaluar y luego disminuir la condición de riesgo que los provoca. Los atlas de riesgo, pueden generarse a nivel local, estatal, nacional o global y son una herramienta que nos permite identificar los diferentes riesgos, el grado de exposición y la vulnerabilidad con la que se afecta una región, ante un evento adverso, a través de estudios específicos. Generalmente tienen la finalidad de proponer y realizar acciones que mitiguen sus efectos hacia la población, la infraestructura y el entorno productivo.

De acuerdo al Sistema Nacional de Protección Civil, el riesgo está en función del producto de la vulnerabilidad, el peligro y la exposición, definiendo cada factor de la siguiente forma:

Peligro.- Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un lapso dado. El potencial de peligro se mide por su Intensidad y su periodo de retorno, presentando valores entre 0 y 1.

Exposición.- Cantidad de personas, bienes, valores, infraestructura y sistemas que son susceptibles a ser dañados o perdidos, puede ser valorado en pérdidas de vidas o en pérdidas económicas.

Vulnerabilidad.- Susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados, valuado entre 0 y 1.

Finalmente, incorporando tecnologías nuevas como las asociadas a la integración de información geoespacial, es posible gestionar el riesgo mediante atlas de riesgo dinámicos, siendo actualizados constantemente a través de bases de datos en información obtenidas de percepción remota.

5.2.2 Ordenamiento territorial y ecológico

Las estrategias en el ámbito de la gestión de inundaciones deben estar contenidas dentro de un marco político nacional. La implementación de proyectos relacionados con los recursos hidráulicos deben de estar orientados por funciones superiores bien articuladas, como asignación de áreas para usos agrícolas o nuevos asentamientos, alivio de la pobreza, ordenamiento territorial, protección de cauces fluviales, etc. Esto requiere, necesariamente que la identificación y establecimiento de objetivos, legales para orientar las actividades de planificación y gestión, deben provenir de las autoridades en los niveles superiores. De aquí deben surgir las estipulaciones fundamentales, en las que los planificadores basen el desarrollo de sus opciones de solución. A la par de esto, se posibilita un control bien encausado.

Las medidas de control de las inundaciones, en realidad, deben ser establecidas, legalmente, por una Ley General de Aguas y orientarse, reglamentariamente, de acuerdo a otras leyes; por ejemplo, la ley de protección del medio ambiente o de áreas protegidas, en México normativas de este tipo están a cargo de SEMARNAT (p.e. Ley General de Aguas Nacionales, Ley de Manejo de la Biodiversidad y Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente). De la misma manera, el establecimiento y declaración de áreas de inundación deben de orientarse según una ley de ordenamiento territorial; el establecimiento de presas y embalses según un reglamento de seguridad de presas; el establecimiento de medidas de protección de la cabecera de las cuencas, márgenes de cauces fluviales, etc. según una política forestal consecuente.

5.2.3 Gestionamiento de inundaciones

La gestión de inundaciones es una tarea compleja. Abarca la evaluación de riesgos, del grado de mitigación concebible que se pretende lograr y del equilibrio entre los requerimientos divergentes de tiempo, esfuerzo y recursos. Por naturaleza, estos factores crean un caso particular de cada situación. A través de un plan de acción sistemático y racional se pueden; sin embargo, minimizar las eventualidades. En virtud de que la gestión de inundaciones es un proceso iterativo, todos los componentes de este tipo de acción están acoplados y forman una unidad; además, sí pueden y de hecho deben reconsiderarse en cada fase del ciclo de la gestión, para reaccionar ante las nuevas circunstancias y utilizar la información nueva generada en fases anteriores del ciclo.

5.2.4 Desarrollo sustentable

México se encuentra en una fase en vías de desarrollo, en la cual tiene lugar el consumo del capital contenido en los recursos naturales; es decir que, una regeneración natural de los ecosistemas no siempre ocurre. Considerando que este capital es finito, es imprescindible que se debe cambiar estas políticas tradicionales y poner en práctica ya los instrumentos de una política de desarrollo sostenible. Según la [W.C.E.D. \(1987\)](#) se considera al “desarrollo sustentable” como un proceso, mediante el cual se satisfacen las necesidades de las generaciones actuales, sin poner en peligro las de las generaciones futuras. Este concepto implica que la capacidad de producción de los sistemas naturales no debe sobreexplotarse.

Toda intervención (por ejemplo, medidas de control de inundaciones) en favor del desarrollo está, necesariamente, muy ligada al aprovechamiento del capital natural básico (suelo, agua, diversidad ecológica, bosques, etc.). Una condición imperativa, en este contexto, advierte que no solo las necesidades inmediatas del hombre deben de considerarse, sino también la protección del medio ambiente, que a su vez conduce al sostenimiento de la productividad de los sistemas naturales. Esto redundaría, por supuesto, en la seguridad de la base económica para las comunidades, contribuyendo, a su vez, a la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades ante inundaciones, que al final asegura el bienestar del hombre. De hecho, la reducción de desastres y el desarrollo sustentable están muy ligados. De acuerdo a [Mitchell \(1999\)](#), la ocurrencia de desastres en el mundo es uno de los indicadores más citados de un desarrollo NO sustentable. En los países en vías de desarrollo, los desastres son acentuados fuertemente por los problemas inherentes al proceso de desarrollo. Si el objetivo es disminuir esta tendencia, entonces es imprescindible poner en práctica la filosofía del desarrollo sustentable y en armonía con el medio ambiente. Esta filosofía indica que debe impulsarse un desarrollo humano y económico dentro de límites sustentables; es decir, que los sistemas naturales y socioeconómicos deben concebirse, realmente, como compañeros.

Para lograr un equilibrio, en el curso del tiempo, entre estos sistemas es necesario un sistema directriz, a nivel nacional, que oriente las relaciones implícitas de intercambio ([Markandya, 1994](#)), a saber: Una infraestructura institucional robusta. Esta comprende cuatro subsistemas: político (establecimiento de objetivos), jurídico (observancia de los objetivos), financiero (fondos para la implementación de los objetivos) e implementador (responsable de la implementación). A la par de esto, las condiciones específicas de la región que se investiga, también juegan un papel importante. El concepto de sustentabilidad puede tener diferentes significados para diferentes regiones. Lo que en un caso es importante y decisivo, puede ser un desacierto bajo otras condiciones. Fundamentalmente no existe receta alguna para un desarrollo sustentable excepto el mejor proceder y los conocimientos científicos.

Al final, en países en vías de desarrollo, el principal obstáculo para un desarrollo eficaz, sin duda es la corrupción, el abuso de poder y el nepotismo, por lo que nada de lo anterior podrá generar avances si es que estos vicios no se corrigen de fondo, principalmente cambiando actitudes y actuaciones, sobre todo de nuestros representantes políticos.

Referencias

- Abdalla, R., Tao, C. V., Wu, H. & Maqsood, I. 2006. A GIS-supported 3D approach for flood risk assessment of the Qu'Appelle River, Southern Saskatchewan. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 6, 440-455.
- Abebe, A. & Price, R. K. 2004. Information theory and neural networks for managing uncertainty in flood routing. *Journal of computing in civil engineering*, 18, 373-380.
- Ahmad, S. & Simonovic, S. P. 1999. Comparison of one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic modeling approaches for Red River Basin. *Natural Resources Institute, University of Manitoba*.
- Alaska, U. A., Engineers, U. a. C. O., District, A. & Center, U. a. E. 1999. Procedures and computer programs for telescopic mesh refinement using MODFLOW.
- Alcrudo, F. & Navarro, P. G. Computing two dimensional flood propagation with a high resolution extension of McCormack's method. *Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas*, 1994. ASCE, 3-17.
- Aronica, G., Tucciarelli, T. & Nasello, C. 1998. 2D multilevel model for flood wave propagation in flood-affected areas. *Journal of water resources planning and management*, 124, 210-217.
- Baltsavias, E. P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 83-94.
- Bao, H., Zhao, L., He, Y., Li, Z., Wetterhall, F., Cloke, H., Pappenberger, F. & Manful, D. 2011. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. *Advances in Geosciences*, 29, 61-67.
- Barillas-Cruz, M., Van Westen, C., Orozco, E., Thonon, I., Lira, E., Guarín, G. P. & Tax, P. 2003. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS NATURALES EN LA CUENCA DEL RÍO SAMALÁ Y ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO EN LA POBLACIÓN DE SAN SEBASTIÁN RETALHULEU, GUATEMALA.
- Bates, P., Anderson, M., Price, D., Hardy, R. & Smith, C. 1996. Analysis and development of hydraulic models for floodplain flows. *Floodplain processes*, 215-254.
- Bates, P. & De Roo, A. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, 236, 54-77.
- Bates, P., Horritt, M., Smith, C. & Mason, D. 1997. Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling. *Hydrological Processes*, 11, 1777-1795.
- Bates, P., Stewart, M., Siggers, G., Smith, C., Hervouet, J.-M. & Sellin, R. 1998. Internal and external validation of a two-dimensional finite element code for river flood simulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime and energy*, 130, 127-141.
- Bechteler, W., Hartmaan, S. & Otto, A. Coupling of 2D and 1D models and integration into Geographic Information Systems (GIS). *Proc 2nd Int Conf on River Flood Hydraulics*. Wiley, Chichester, UK, 1994. 155-165.
- Beck, M. 1991. Forecasting environmental change. *Journal of Forecasting*, 10, 3-19.
- Beffa, C. & Connell, R. J. 2001. Two-dimensional flood plain flow. I: Model description. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6, 397-405.
- Beven, K. 1985. Distributed models. *Hydrological Forecasting*, John Wiley and Sons, New York, New York 1985. p 405-435, 9 fig, 2 tab, 57 ref.
- Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models. *Journal of hydrology*, 105, 157-172.
- Beven, K. 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in water resources*, 16, 41-51.
- Beven, K. 2000a. On the future of distributed modelling in hydrology. *Hydrological Processes*, 14, 3183-3184.
- Beven, K. 2001a. On hypothesis testing in hydrology. *Hydrological processes*, 15, 1655-1657.
- Beven, K. 2001b. On landscape space to model space mapping. *Hydrological Processes*, 15, 323-324.
- Beven, K. 2002. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological processes*, 16, 189-206.
- Beven, K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of hydrology*, 320, 18-36.
- Beven, K. & Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6, 279-298.
- Beven, K. & O'Connell, P. 1982. On the role of physically-based distributed modelling in hydrology.
- Beven, K. J. 2000b. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 203-213.
- Beven, K. J. 2001c. Dalton Medal Lecture: How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 1-12.
- Beven, K. J. 2001d. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, Wiley Chichester.
- Binley, A., Beven, K. & Elgy, J. 1989. A physically based model of heterogeneous hillslopes: 2. Effective hydraulic conductivities. *Water Resources Research*, 25, 1227-1233.

- Borthwick, A., Cruz Leon, S. & Jozsa, J. 2001. Adaptive quadtree model of shallow-flow hydrodynamics. *Journal of hydraulic research*, 39, 413-424.
- Brady, L. M., Gray, F., Castaneda, M., Boltman, M. & Bolm, K. S. 2002. *Preliminary United States-Mexico Border Watershed Analysis, Twin Cities Area of Nogales, Arizona and Nogales, Sonora*, US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Butler, J. B., Lane, S. N. & Chandler, J. H. 2001. Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. *Journal of Hydraulic Research*, 39, 519-529.
- Cameron, D., Kneale, P. & See, L. 2002. An evaluation of a traditional and a neural net modelling approach to flood forecasting for an upland catchment. *Hydrological Processes*, 16, 1033-1046.
- Castro, L. T. & Willems, P. 2011. Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*, Vol. 2, No.1.
- Cenapred, C. N. D. P. D. D. 2012. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. *Secretaría de Gobernación. México, D. F.*, 225 pp.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. 1988. *Applied hydrology*.
- Cloke, H. & Pappenberger, F. 2009. Ensemble flood forecasting: a review. *Journal of Hydrology*, 375, 613-626.
- Cluckie, I., Xuan, Y. & Wang, Y. 2006. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, 3, 3211-3237.
- Conabio 2012. Metadatos y cartografía en línea.
- Conagua 2008-12. Comisión Nacional del Agua. *Boletín hidroclimatológico y de presas*, Dirección Local Tabasco.
- Cotler, H. 2004. El manejo Integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política Ambiental. *Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México, D.F.*, 264 pp.
- Cunge, J. 1980. Practical aspects of computational river hydraulics. *Pitman Publishing Ltd. London,(17 CUN)*, 1980, 420.
- Cunge, J. A. 1975. Two dimensional modeling of flood plains. *Unsteady flow in open channels*, 2, 705-762.
- De Jonge, T., Kok, M. & Hogeweg, M. 1996. Modelling floods and damage assessment using GIS. *IAHS PUBLICATION*, 299-306.
- Demeritt, D., Cloke, H., Pappenberger, F., Thielen, J., Bartholmes, J. & Ramos, M.-H. 2007. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, 7, 115-127.
- Dominguez, M., Esquivel, G., Baldemar, M., Mendoza, R. & Argenis, J. 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. *Serie Manuales, Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Doull, G. & Bright, J. Flood Hazard in Palmerston North City, New Zealand. *Proc. Hydroinformatics*, 1996. 33-40.
- Duan, Q., Sorooshian, S. & Gupta, V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28, 1015-1031.
- Dutta, D., Herath, S. & Musiak, K. 2003. A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of hydrology*, 277, 24-49.
- Em-Dat 2012. OFDA/CRED Base de datos Internacional de desastres (International Disaster Database), Université Catholique de Louvain, Brussel. <http://www.cred.be/emdat>.
- García-Navarro, P., Hubbard, M. & Priestley, A. 1995. Genuinely multidimensional upwinding for the 2D shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 121, 79-93.
- Gee, D. M., Anderson, M. G. & Baird, L. 1990. Large-scale floodplain modelling. *Earth surface processes and landforms*, 15, 513-523.
- Gomes Pereira, L. & Wicherson, R. 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 105-114.
- Goodrich, D. C., Lane, L. J., Shillito, R. M., Miller, S. N., Syed, K. H. & Woolhiser, D. A. 1997. Linearity of basin response as a function of scale in a semiarid watershed. *Water Resources Research*, 33, 2951-2965.
- Gourbesville, P. MIKE 11 GIS: interest of GIS technology for conception of flood protection systems. *Hydroinformatics' 98*, 1998. 1365-73.
- Guarín, G. P., Van Westen, C. & Montoya, L. 2004. Community-based flood risk assessment using GIS for the town of San Sebastian, Guatemala. *University of Twente, Faculty of Geo-information Science and Earth Observation Electronic Library*. Retrieved from.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. & Yapo, P. O. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34, 751-763.
- Hall, J. 2003. Handling uncertainty in the hydroinformatic process. *Journal of Hydroinformatics*, 5, 215-232.
- Hervouet, J. M. 2000. TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*, 14, 2209-2210.
- Hesslink, A. W., Stelling, G. S., Kwadijk, J. C. & Middelkoop, H. 2003. Inundation of a Dutch river polder, sensitivity analysis of a physically based inundation model using historic data. *Water resources research*, 39, 1234.
- Hey, R. D. 1979. Flow resistance in gravel-bed rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105, 365-379.
- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Schmidt, L., Schill, S. & Davis, B. 2003. An evaluation of LIDAR-and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment*, 84, 295-308.

- Hornberger, G. M. & Spear, R. 1981. Approach to the preliminary analysis of environmental systems. *J. Environ. Manage.:(United States)*, 12.
- Horritt, M. & Bates, P. 2001. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, 15, 825-842.
- Horritt, M. & Bates, P. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268, 87-99.
- Horritt, M. S. 2000. Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resources Research*, 36, 3279-3291.
- Icold 2012. International Commission On Large Dams. <http://www.icold-ciqb.org/GB/ICOLD/icold.asp>.
- Ine, I. N. D. E. 2003. Diagnóstico bio-físico y socioeconómico de la cuenca Lerma- Chapala. *Dirección de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas y Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. México, D. F.*, 285 pp.
- 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, México.
- Kaufman, A. & Gupta, M. 1991. Introduction to Fuzzy Arithmetic Theory and Applications Van Nostrand Publishing Co.
- Kokkonen, T. S. & Jakeman, A. J. 2001. A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implications. *Water Resources Research*, 37, 2345-2352.
- Kouwen, N. 1988. Field estimation of the biomechanical properties of grass. *Journal of Hydraulic Research*, 26, 559-568.
- Krabill, W., Collins, J., Link, L., Swift, R. & Butler, M. 1984. Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 685-694.
- Lammersen, R., Engel, H., Van De Langemheen, W. & Buiteveld, H. 2002. Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine. *Journal of Hydrology*, 267, 115-124.
- Lane, S. 2003. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 16, 937-961.
- Lang, L. 1998. *Managing natural resources with GIS*, Esri Press.
- Lees, M. 2000. Data-based mechanistic modelling and forecasting of hydrological systems. *Journal of Hydroinformatics*, 2, 15-34.
- Li, C. & Falconer, R. 1995. Depth integrated modelling of tide induced circulation in a square harbour. *Journal of Hydraulic Research*, 33, 321-332.
- Madsen, H. 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in water resources*, 26, 205-216.
- Marche, C., Lessard, G. & El Gharbi, B. 1990. Kriging technique for river flood representation. *Journal of Hydraulic Research*, 28, 629-643.
- Markandya, A. 1994. *Policies for sustainable development: four essays*, Food & Agriculture Org.
- Martín Vide, J. P., López Querol, S., Martín Moreta, P., Simarro Grande, G. & Benito Ferrández, G. 2003. Uso de modelos uni- bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina. *Ingeniería del agua*, 2003, vol. 10, núm. 1.
- Mason, D., Cobby, D., Horritt, M. & Bates, P. Two-dimensional Hydraulic Flood Modelling Using Floodplain Topographic and Vegetation Features Derived From Airborne Scanning Laser Al Timetry. EGS General Assembly Conference Abstracts, 2002. 456.
- Mason, D. C., Cobby, D. M., Horritt, M. S. & Bates, P. D. 2003. Floodplain friction parameterization in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 17, 1711-1732.
- Mccowan, A. & Collins, N. The use of Mike 21 for full two-dimensional flood impact assessment. Proc. DHI Users conference 2001, 2001.
- Mitchell, J. K. 1999. Natural disasters in the context of mega-cities. *Crucibles of hazard: mega-cities and disasters in transition. United Nations University, Tokyo*, 15-55.
- Morain, S. A. 1999. *GIS solutions in natural resource management: Balancing the technical-political equation*, OnWord Press.
- Murillo, J., Rodríguez Pallarés, M., Andrés-Urrutia, A., Brufau, P. & García-Navarro, P. A Mathematical Model for Numerical Simulation of Shallow Water Flow: Description and Practical Application of GUAD| 2D. Proceedings of the iEMSs Fourth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2008), 2008. 1431-1438.
- Néelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wilson, M., Wright, N., Bates, P., Mason, D. & Whitlow, C. Using remotely sensed data to support flood modelling. Institution of Civil Engineers. Proceedings. Water Management, 2006. 35-43.
- Nicholas, A. & Mitchell, C. 2003. Numerical simulation of overbank processes in topographically complex floodplain environments. *Hydrological Processes*, 17, 727-746.

- Pappenberger, F., Beven, K., Hunter, N., Bates, P., Gouweleeuw, B., Thielen, J. & De Roo, A. 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 Discussions*, 9, 381-393.
- Pappenberger, F. & Beven, K. J. 2006. Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42.
- Paredes-Victoria, P. N., Pedrozo-Acuña, A., Laverde-Barajas, M. Á. & Fernando-González, V. 2012a. Caracterización Hidráulica de Eventos de Inundación en el Río Usumacinta, México. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- Paredes-Victoria, P. N., Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón, J. P., Domínguez-Mora, R. & Fernando-González, V. 2012b. Estimación de Mapas de Inundación con una Probabilidad de Ocurrencia en la Cuenca del Río Usumacinta, Tabasco. XXII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Patro, S., Chatterjee, C., Singh, R. & Raghuvanshi, N. S. 2009. Hydrodynamic modelling of a large flood-prone river system in India with limited data. *Hydrological Processes*, 23, 2774-2791.
- Pedrozo-Acuña, A. 2012a. Inundaciones, en: Conviviendo con la Naturaleza: El Problema de los Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos en México. Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (CONACYT).
- Pedrozo-Acuña, A. 2012b. Inundaciones: Evaluación y manejo del riesgo. *Revista AGUA de Quintana Roo*, No. 2 Abril-Junio.
- Pedrozo-Acuña, A. 2013. Inundaciones. Entendiendo la naturaleza.
- Pedrozo-Acuña, A., Medellín Mayoral, G., Jp., R. R., Hidalgogarnica, L. E., Osegueda Escorza, A. S., Amaro Loza, A., Mariño Tapia, I., Enriquez Ortiz, C. & Sosa Hernández, A. U. E. 2009. Anexo 2 – Procesos Costeros y Sistemas Lagunares PHIT – Fase 2. *Informe final de la salida de Campo, Coordinación de Hidráulica, IIUNAM*.
- Pedrozo-Acuña, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Medellín Mayoral, G. & González Villareal, F. J. 2012a. Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea: case study in Tabasco, Mexico. *Hydrological Processes*, 26, 687-704.
- Pedrozo-Acuña, A., Ruiz De Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C. & González Villareal, F. 2012b. Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico). *Journal of Flood Risk Management*, 5, 226-244.
- Penning-Rowsell, E. & Tunstall, S. 1996. Risks and resources: defining and managing the floodplain. Chichester: John Wiley.
- Ponce, V. M. 1989. *Engineering hydrology: Principles and practices*, Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Priestnall, G., Jaafar, J. & Duncan, A. 2000. Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 65-78.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. & Bamler, R. 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241-262.
- Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.-L., Krebs, P., Mark, O., Schilling, W., Schütze, M. & Vanrolleghem, P. A. 2002. Mathematical modelling of integrated urban drainage systems. *Wat. Sci. Tech*, 45, 81-94.
- Rayner, S., Lach, D. & Ingram, H. 2005. Weather forecasts are for wimps: why water resource managers do not use climate forecasts. *Climatic Change*, 69, 197-227.
- Reeve, D. E., Horrillo-Caraballo, J. & Pedrozo-Acuña, A. 2010. 16 Handling Uncertainty in Coastal Modelling. *Flood Risk Science and Management*, 336.
- Reggiani, P., Hassanizadeh, S. M., Sivapalan, M. & Gray, W. G. 1999. A unifying framework for watershed thermodynamics: Constitutive relationships. *Advances in Water Resources*, 23, 15-39.
- Reggiani, P., Sivapalan, M. & Hassanizadeh, S. M. 2000. Conservation equations governing hillslope responses: Exploring the physical basis of water balance. *Water Resources Research*, 36, 1845-1863.
- Reggiani, P., Sivapalan, M. & Majid Hassanizadeh, S. 1998. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. *Advances in Water Resources*, 22, 367-398.
- Rodríguez-Rincón, J., Pedrozo-Acuña, A., Domínguez-Mora, R., Reeve, D. & Cluckie, I. 2012. Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach. *FloodRisk2012*, Congreso Riesgo de Inundaciones.
- Romanowicz, R. & Beven, K. 1998. Dynamic real-time prediction of flood inundation probabilities. *Hydrological sciences journal*, 43, 181-196.
- Romanowicz, R. & Beven, K. 2003. Estimation of flood inundation probabilities as conditioned on event inundation maps. *Water Resources Research*, 39, 1073.
- Rosso, R. & Rulli, M. C. 2002. An integrated simulation method for flash-flood risk assessment: 2. Effects of changes in land-use under a historical perspective. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6, 285-294.
- Sánchez, K., Jiménez, F., Velásquez, S., Piedra, M. & Romero, E. 2004. Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. *Comunicación técnica de Recursos Naturales y Ambiente*, 88-95.
- Sempere, D. 1996. Los modelos distribuidos en la modelización hidrológica de crecidas. *Métodos para el cálculo hidrológico de crecidas. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, MOPTMA*.

- Siga 2008-12.** Subjerencia de Información Geográfica del Agua. *Organismos de Cuenca*, Consulta, Golfo Centro.
- Singh, V. P. & Woolhiser, D. A. 2002.** Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7, 270-292.
- Sinnakaudan, S. K., Ab Ghani, A. & Chang, C. K. 2002.** Flood inundation analysis using HEC-6 and ArcView GIS 3.2 a.
- Sorooshian, S. & Gupta, V. 1995.** Model calibration. *Computer models of watershed hydrology*, 23-68.
- Sorooshian, S. & Gupta, V. K. 1983.** Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resour. Res.*, 19, 260-268.
- Spear, R. C., Grieb, T. M. & Shang, N. 1994.** Parameter uncertainty and interaction in complex environmental models. *Water Resources Research*, 30, 3159-3169.
- Stelling, G. & Duinmeijer, S. 2003.** A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43, 1329-1354.
- Stephenson, G. R. & Freeze, R. A. 1974.** Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho. *Water Resources Research*, 10, 284-294.
- Tate, E. C. & Maidment, D. R. 1999.** *Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS*. University of Texas at Austin.
- Todini, E. 1988.** Rainfall-runoff modeling—Past, present and future. *Journal of Hydrology*, 100, 341-352.
- Triviño Pérez, A. & Ortiz Rojas, S. 2004.** Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas*, 67-84.
- Usda-Scs 1985.** United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. *National Engineering Handbook*, Section 4. Hidrology U.S. Government.
- Van Asselt, M. B. & Rotmans, J. 2002.** Uncertainty in integrated assessment modelling. *Climatic Change*, 54, 75-105.
- Van Gelder, P. H. a. J. M. 2000.)** Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures. *PhD thesis*.
- Viney, N., Sivapalan, M. & Deeley, D. 2000.** A conceptual model of nutrient mobilisation and transport applicable at large catchment scales. *Journal of Hydrology*, 240, 23-44.
- W.C.E.D. 1987.** World Commission on Environment and Development. *From One Earth to One World, An Overview*, Oxford
- Werner, M. 2001.** Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26, 517-522.
- Westaway, R., Lane, S. & Hicks, D. 2003.** Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 795-815.
- Wheater, H., Jakeman, A. & Beven, K. 1993.** Progress and directions in rainfall-runoff modelling.
- Wijbenga, J., Lambeek, J., Mosselman, E., Nieuwkamer, R. & Passchier, R. RIVER FLOOD HYDRAULICS.** 2nd International Conference on River Flood Hydraulics, 1994. John Wiley & Sons, 275.
- Wynne, B. 1992.** Uncertainty and environmental learning. *Global environmental change*, 2, 111-127.
- Yen, B. & Ang, A.-S. 1971.** Risks analysis in design of hydraulic projects.
- Yoshida, H. & Dittrich, A. 2002.** 1D unsteady-state flow simulation of a section of the upper Rhine. *Journal of Hydrology*, 269, 79-88.
- Young, P. C., Jakeman, A. J. & Post, D. A. 1997.** Recent advances in the data-based modelling and analysis of hydrological systems. *Water science and technology*, 36, 99-116.

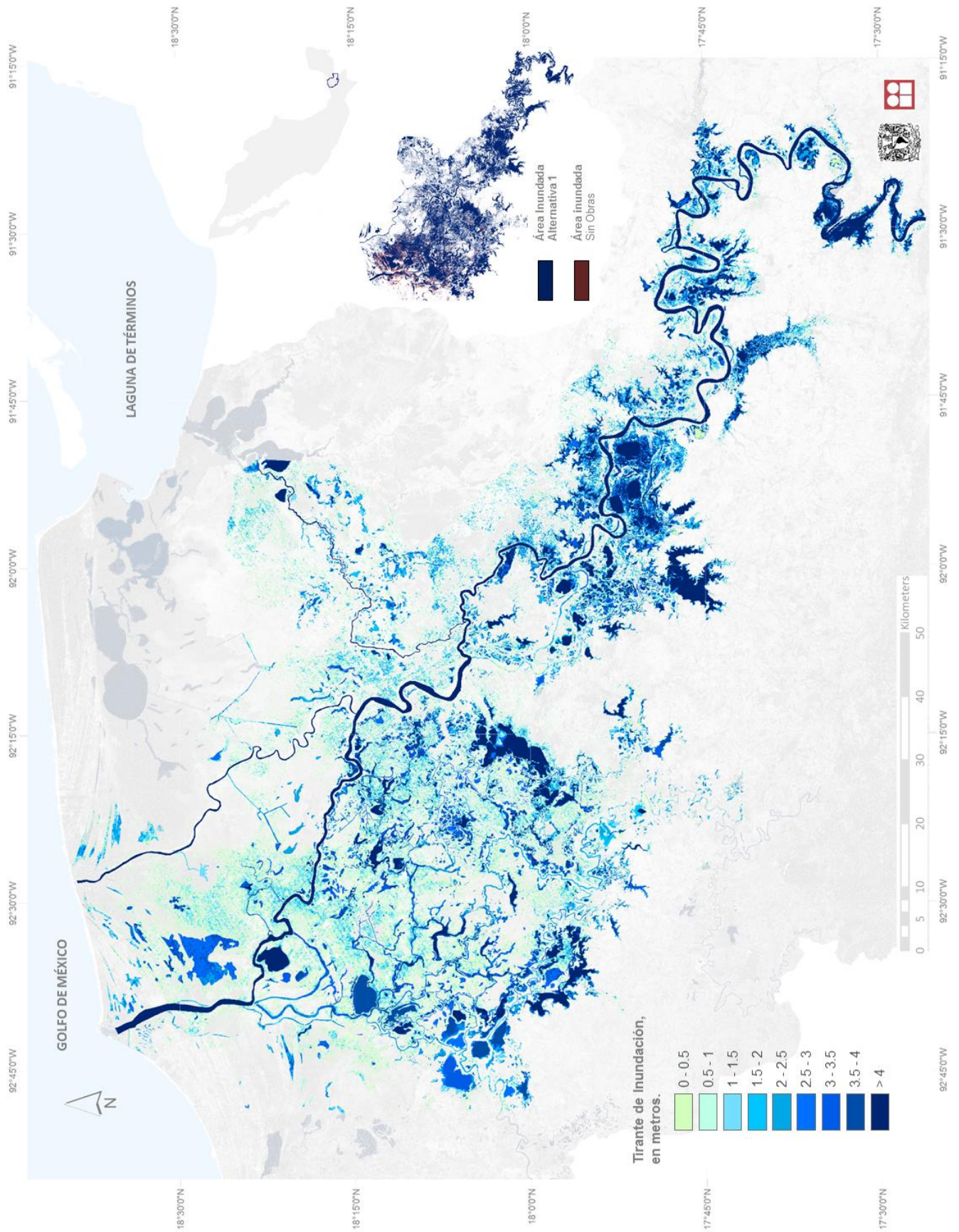


Figura A.1 Opción 1. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

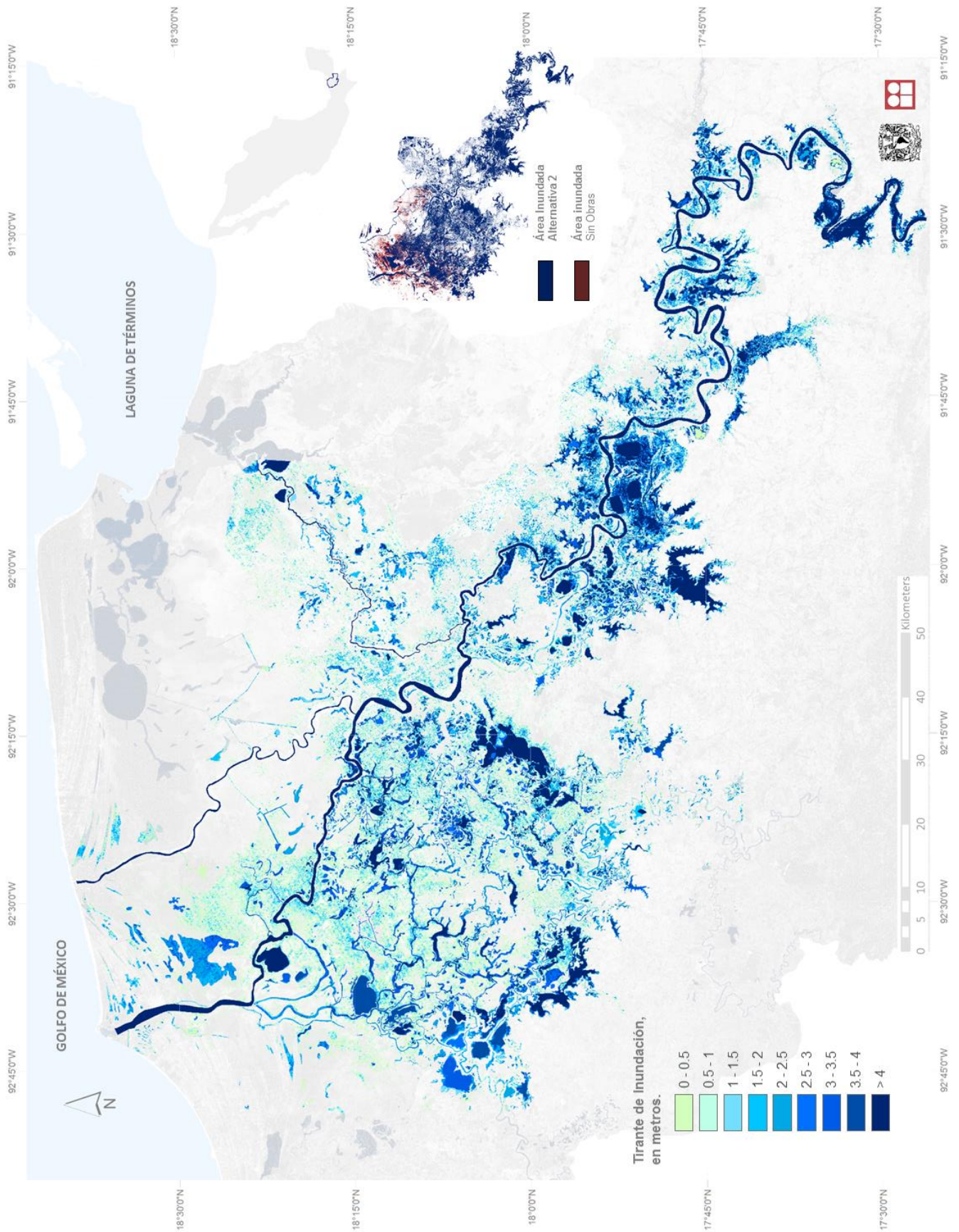


Figura A.1 Opción 2. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

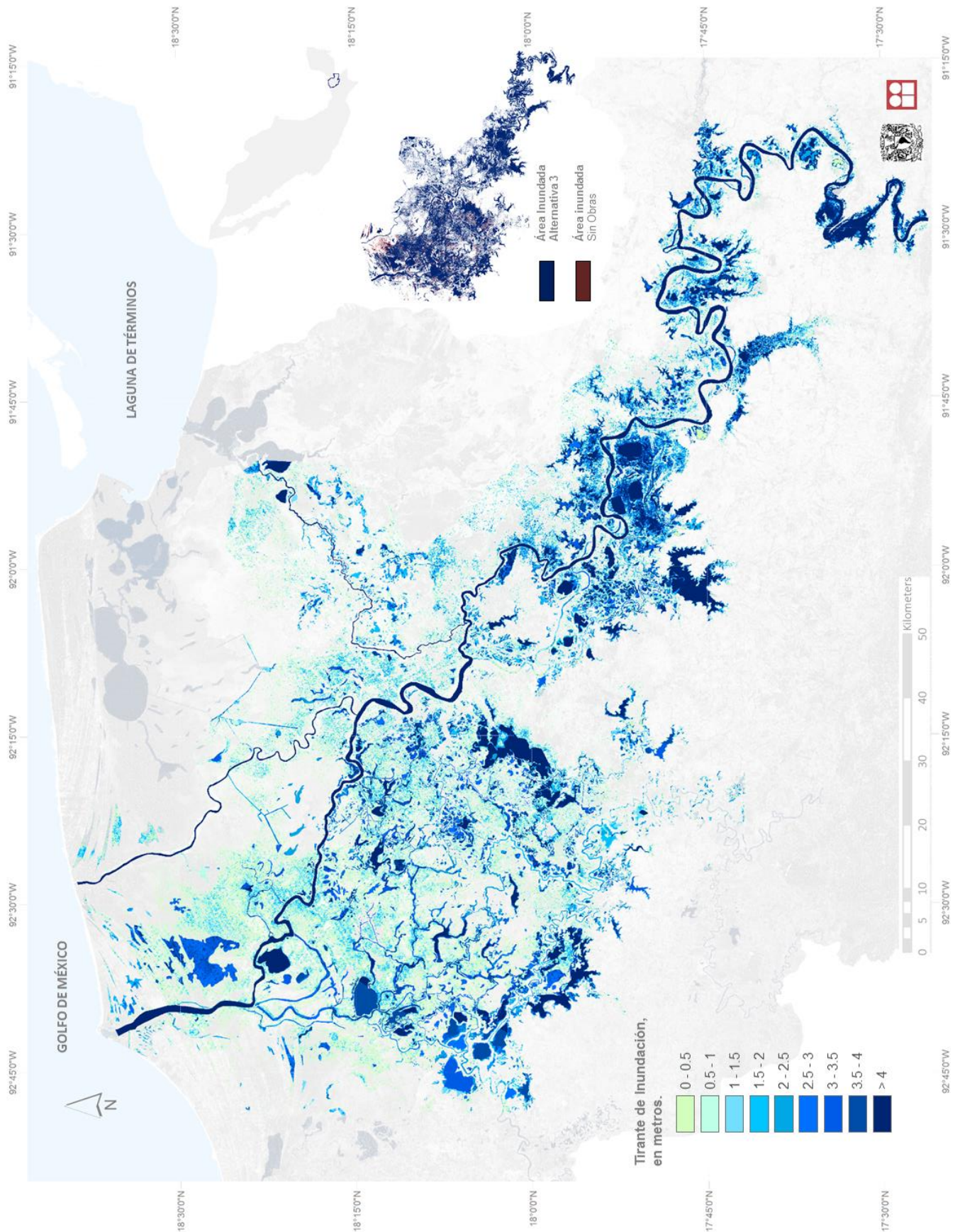


Figura A.2 Opción 3. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

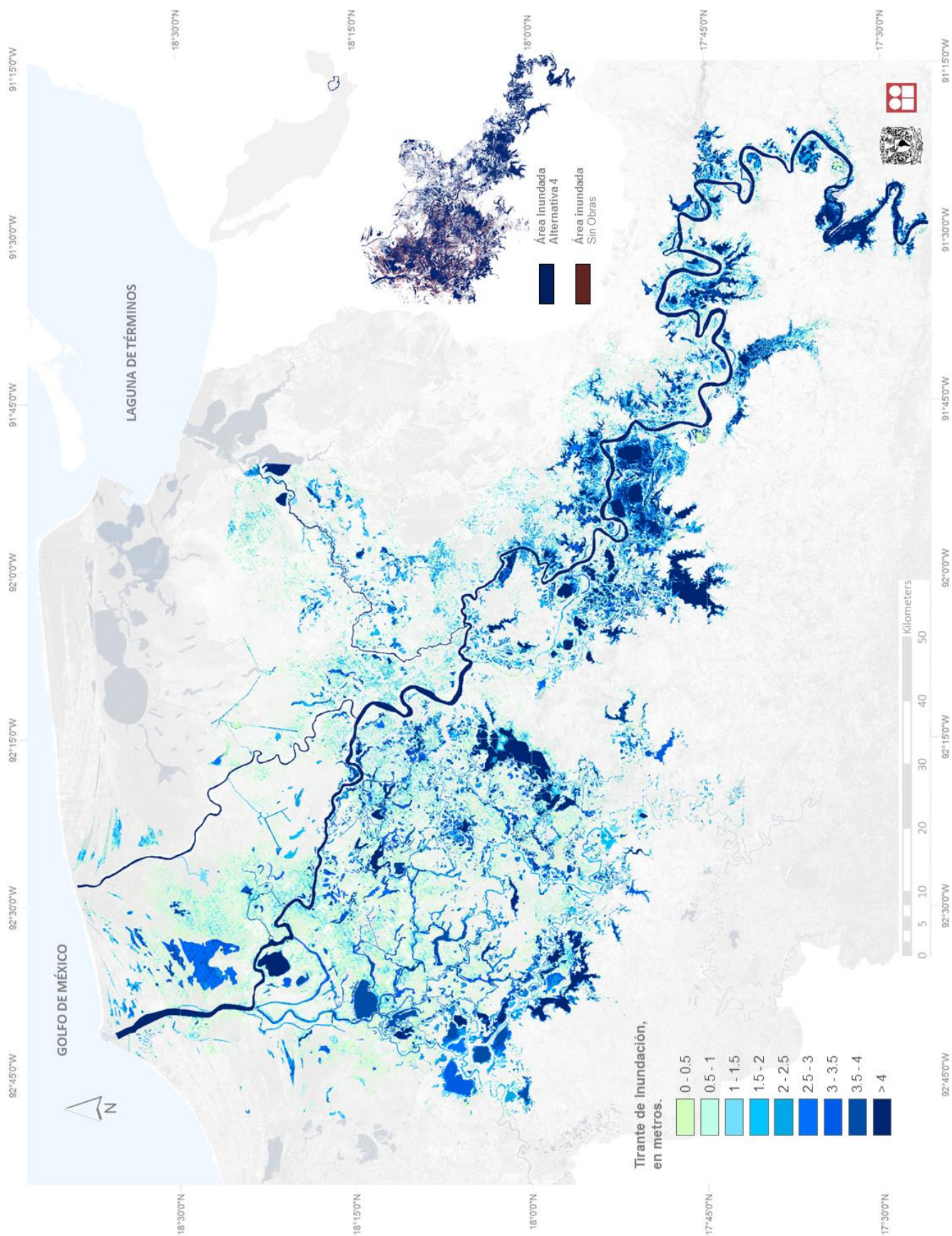


Figura A.3 Opción 4. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

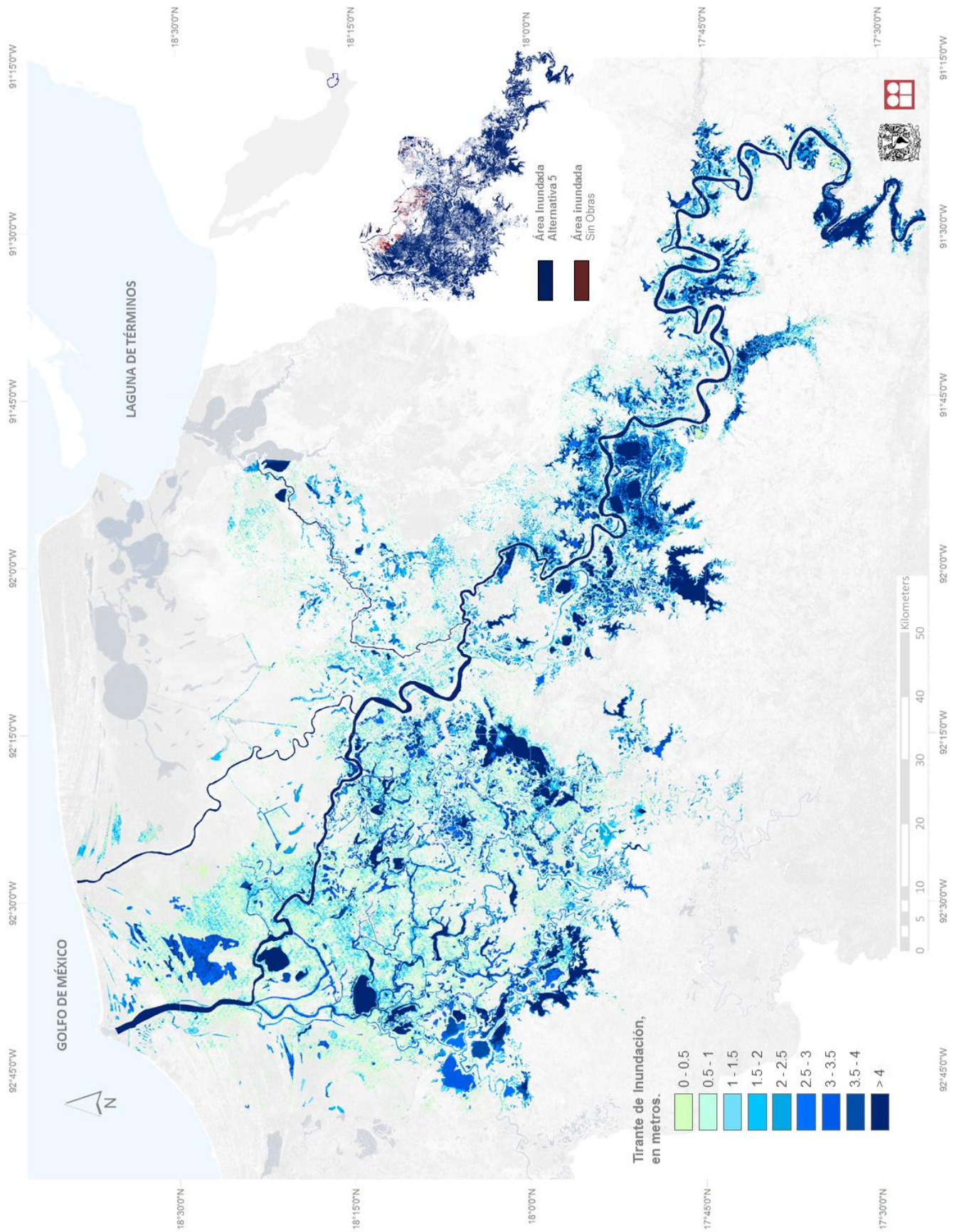


Figura A.4 Opción 5. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

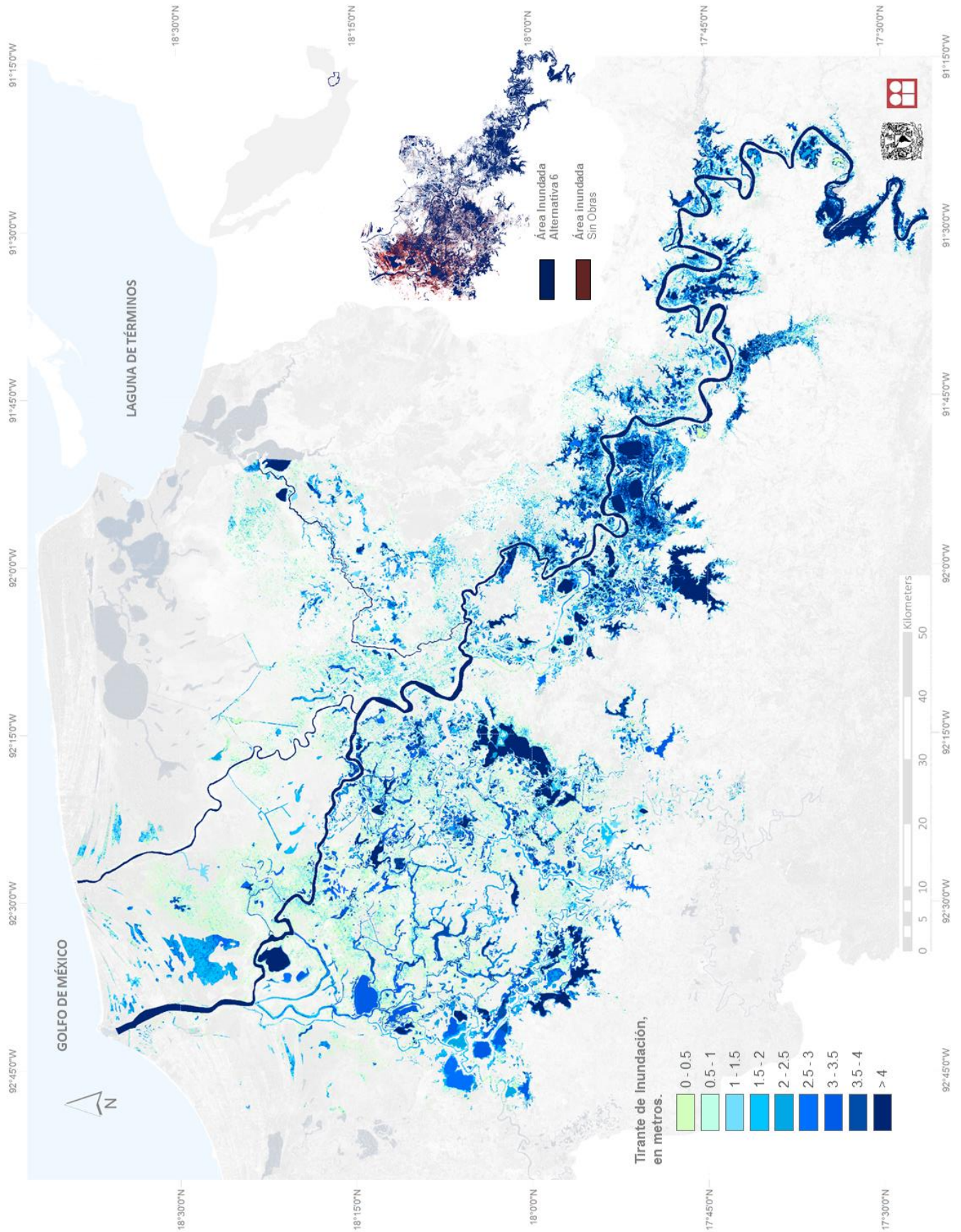


Figura A.5 Opción 6. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).

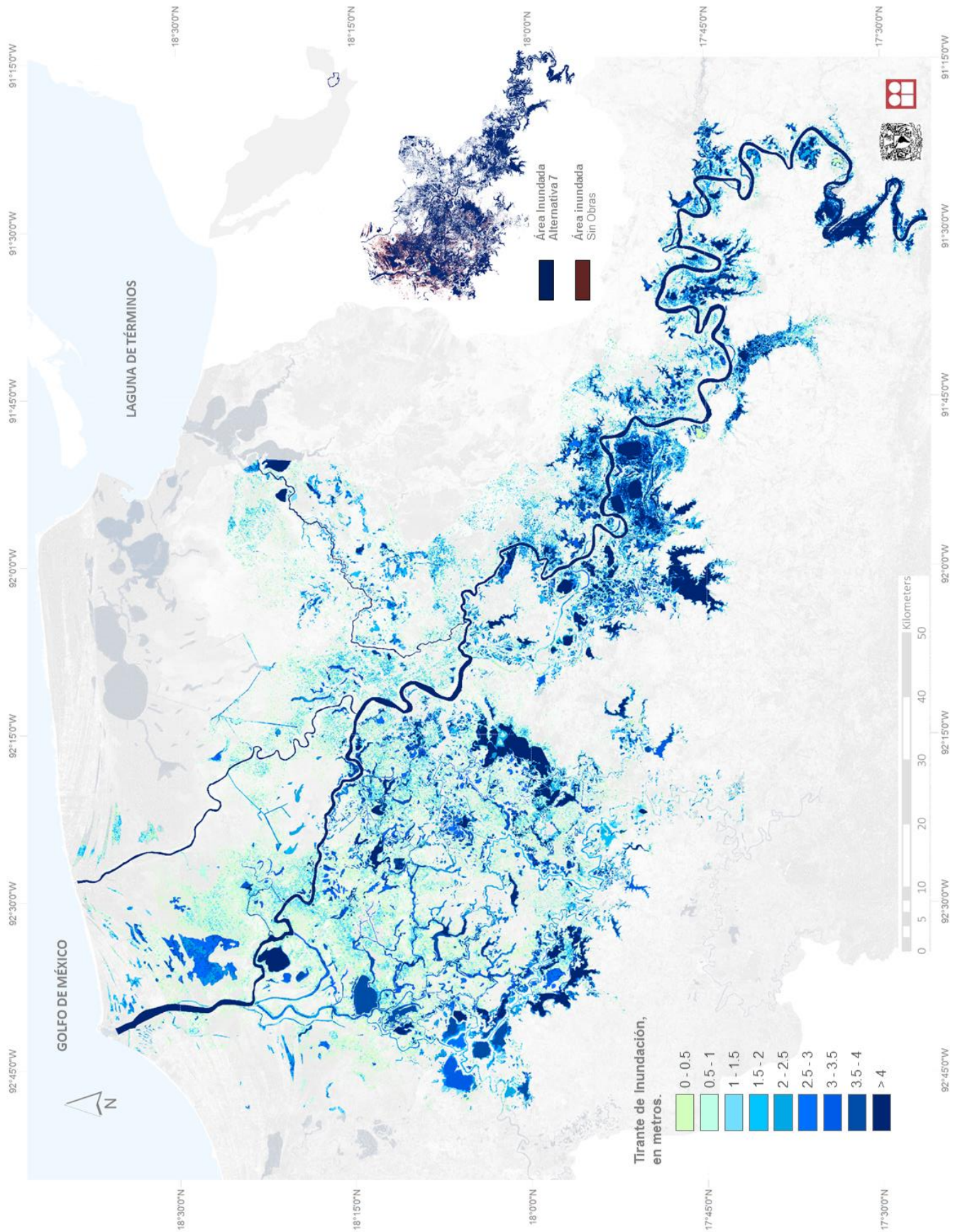


Figura A.6 Opción 7. Tirantes máximos de inundación establecidos con la implementación de la alternativa de mitigación, la figura superior derecha muestra la extensión del área inundable para la esta alternativa (en Azul) y para el caso actual (sin obras).