



# Capítulo 2

## Antecedentes generales



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## 2.1 Manejo del agua a través de la historia

Durante el surgimiento de los primeros asentamientos humanos, cuando los pueblos pasaron de nómadas a sedentarios debido a la agricultura, estos entendían las inundaciones como otro elemento de la naturaleza, ya que la mayoría de los asentamientos se localizaron cerca de un río aprovechando su agua para consumo y riego, de esto derivó la necesidad del manejo del agua de lluvia para evitar que afectaran sus actividades. En asentamientos de civilizaciones en Oriente medio, Oriente y Mediterráneo se hallan las primeras muestras de sistemas de saneamiento y manejo de aguas de lluvia a través de calles (Delleur, 2003; Salas Salinas, 1999).

Con el tiempo, las civilizaciones fueron avanzando y las ciudades creciendo, y con ellas creció la necesidad del manejo de agua de lluvia y modernización de su infraestructura como los sistemas de drenaje pluvial. Se conoce los ejemplos de: Sicilia, con el primer drenaje de piedra en el siglo V a.C.; las ciudades del imperio Romano, donde la lluvia se recolectaba por las calles; y de la misma Roma, con la existencia de la Cloaca Máxima (Delleur, 2003).

En el siglo XIX se presentó un crecimiento considerable en varias ciudades occidentales y con éste todos sus servicios, incluido el drenaje urbano; en el año 1850 se diseñó el actual drenaje pluvial de París capaz de desalojar el agua de una tormenta con intensidad de 41 mm/h. En diferentes partes del mundo se comenzaron a incluir consideraciones de diseño para los sistemas de drenaje; pendiente mínima, diámetros, etc. (Delleur, 2003).

Los avances más importantes en cuanto a diseño de drenaje pluvial en el siglo XIX y XX se presentaron principalmente en Europa y Estados Unidos de América, donde se desarrollaron manuales con criterios de diseño y programas computacionales de modelación numérica hidráulica e hidrológica.



## 2.2 Manejo integral del agua urbana

Un avance en el manejo del agua es el cambio de pensamiento hídrico. Anteriormente las acciones de manejo de agua de lluvia y urbana se realizaban con el *enfoque de desalojo*, el cual consiste en que estas aguas sean simplemente desalojadas lo antes posible de la zona urbana, sin tomar en cuenta el volumen de desalojo o su calidad (Delleur, 2003). Sin embargo, el manejo de las aguas urbanas se hace cada vez más de manera holística, con el enfoque de *manejo integral del agua urbana*. Entendiendo la interconexión de los procesos hidrológicos y las actividades humanas dentro de la dinámica social de una ciudad, buscando generar acciones como (Campos Aranda, 2010):

- Tratamiento de aguas residuales y pluviales, para tener un menor impacto ambiental negativo en los cuerpos receptores de agua;
- Reúso de las aguas tratadas, para disminuir el agua transportada a la ciudad;
- Aprovechamiento de agua pluvial, mediante captaciones;
- Manejo integral de agua pluvial, subterránea, de abastecimiento urbano y residual para reducir costos, la demanda de nueva infraestructura hidráulica y el volumen de escurrimiento pluvial;
- Conservación del agua y manejo de la demanda;
- Uso eficiente del agua;
- Cambios en procesos industriales.

Este enfoque se basa en la creación y aplicación de un Plan Maestro de Manejo Integral de Aguas Pluviales y Urbanas, y se alinea con las llamadas “Mejores Prácticas de Manejo” (Best Management Practices [BMP]) (Delleur, 2003) o los Diseños Urbanos Sensibles al Agua (Water-Sensitive Urban Designs [WSUD]) (Ashely, et al., 2014).

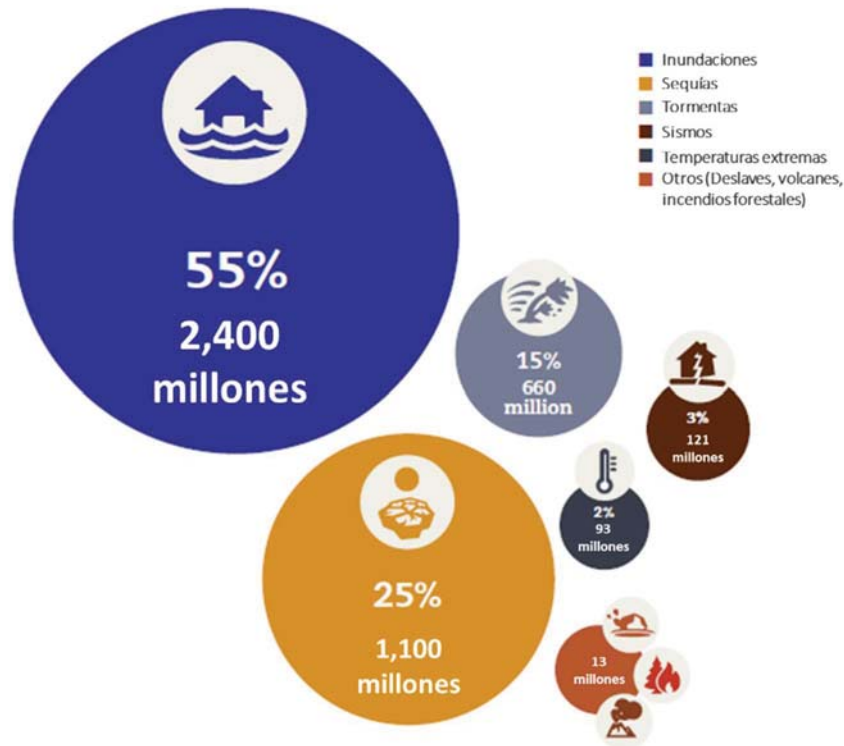
La tendencia es realizar cada vez más acciones con el enfoque de manejo integral del agua, para no solo aprovechar los recursos hídricos y protegerse ante fenómenos hidrometeorológicos, sino generar una mejor convivencia entre la sociedad y los diferentes procesos del ciclo hidrológico.



### 2.3 Afectaciones por inundaciones en un contexto global y nacional

A pesar que otros fenómenos naturales y sus afectaciones son más espectaculares, las inundaciones nos afectan en gran medida (Salas Salinas, 1999). De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el período de 1919 a 2004 ha colaborado en más ocurrencias de inundaciones que en cualquier otro tipo de asistencias (Cenapred, 2007).

En el periodo de 1994 a 2013 se reportaron a nivel mundial 6,863 desastres asociados con eventos naturales, de los cuales 2,937 (43%) se relacionan con inundaciones, con una tendencia a incrementarse. Durante el mismo periodo se reportaron 160,000 muertes asociadas con eventos de inundaciones (12%), siendo menos mortales que los sismos (55%) o tormentas (18%), sin embargo, afectaron a 2.4 billones de personas (55% de las personas afectadas por eventos asociados con un fenómeno natural), por lo que se considera a las inundaciones como los eventos más catastróficos a nivel mundial en cuanto al número de afectados (CRED, 2015), ver **Figura 7**.

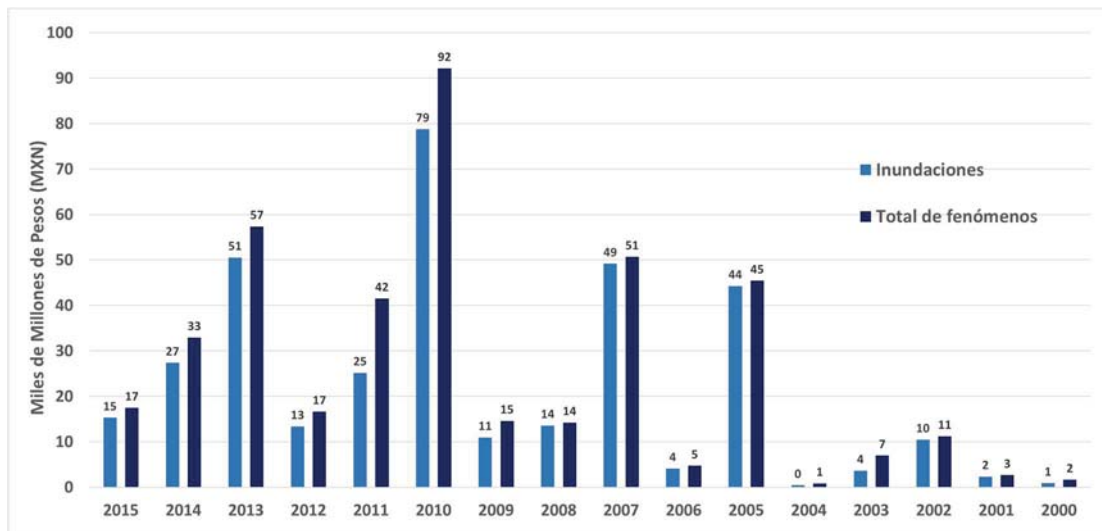


**Figura 7.-** Personas afectados por desastres de 1994-2013. Fuente: (CRED, 2015).

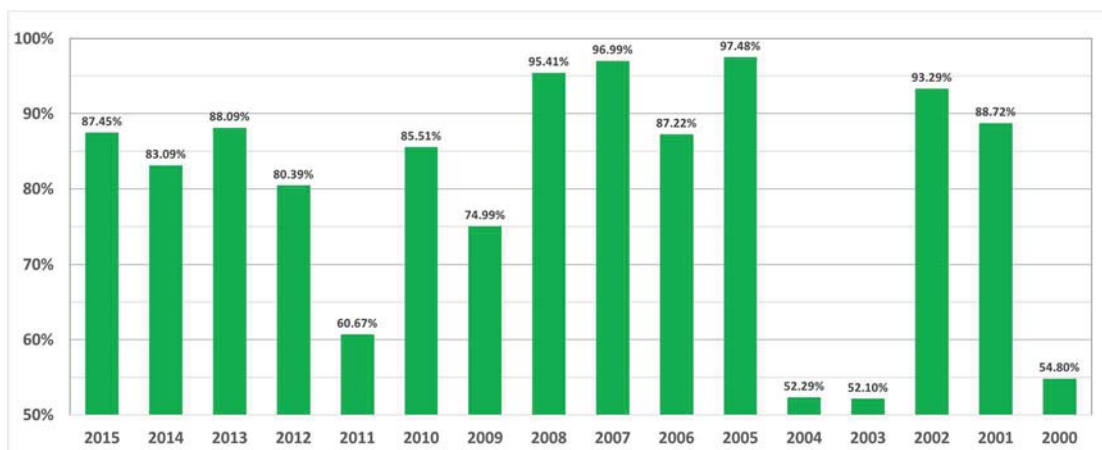


## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

Prácticamente todos los años se producen inundaciones en las planicies de los grandes ríos de México producidas por su desbordamiento. Mientras que en zonas semidesérticas las inundaciones son menos frecuentes, por lo que suelen olvidarse, pero causan serios problemas cuando se presenta. Datos de libre acceso en México (Cenapred, 2017), mostrados en la **Figura 9** y **Figura 8**, denotan que, durante el periodo 2000-2015, los montos de las afectaciones económicas anuales relacionadas con eventos de inundaciones son en promedio el 79.9% de las afectaciones por el total de fenómenos en ese periodo.



**Figura 9.-** Afectaciones económicas anuales por inundación y total de fenómenos en pesos corrientes. Fuente: elaboración propia con datos de (Cenapred, 2017)



**Figura 8.-** Porcentaje de afectaciones económicas anuales por eventos de inundación respecto al total de eventos. Fuente: elaboración propia con datos de (Cenapred, 2017)



## 2.4 Acciones de mitigación de afectaciones por inundaciones

Parte del cambio de enfoque hídrico al de manejo integral del agua es comprender que el interés respecto al agua de lluvia no es eliminar las inundaciones como tal, sino mitigar sus afectaciones. Existen diversas acciones para mitigar las afectaciones por inundaciones. Desde el punto de vista de la planeación las acciones de solución a un problema cualquiera, en este caso afectaciones por inundaciones, pueden categorizarse en preventivas, correctivas o reactivas (Vázquez Rodríguez, 2012):

- **Preventivas:** Se realizan antes de que suceda el problema, están relacionadas con la planeación;
- **Correctivas:** Se realizan una vez que se identificó un problema que aún no ha presentado afectaciones;
- **Reactivas:** Se realizan una vez que se presentó el problema y sus afectaciones para tratar de mitigarlas.

Desde el punto de vista técnico se pueden realizar dos tipos de acciones:

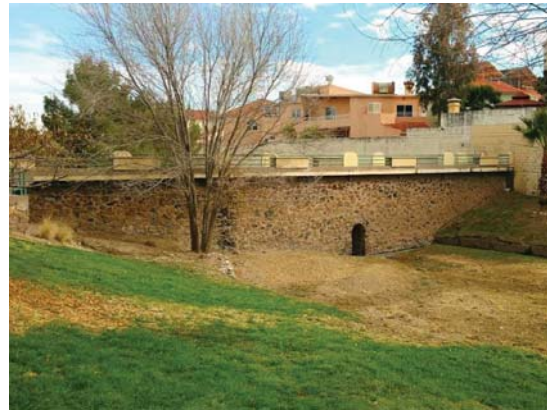
- **Estructurales:** Son acciones físicas; es decir, una obra civil. De manera general están enfocadas a modificar las características del escurrimiento: aumento del tiempo de respuesta de la cuenca y disminución del volumen de escurrimiento, tirante, gasto máximo y tiempo de permanencia (IMTA, 2015; Campos Aranda, 2010)
- **No estructurales:** Son medidas no físicas, las cuales para la mitigación de afectaciones por inundaciones pueden tener dos enfoques: modificación de las características del escurrimiento o modificar las acciones y respuesta de las personas antes, durante y después de un evento de inundación. (IMTA, 2015; Baró-Suarez, et al., 2011).

A continuación, se hace un análisis de las diferentes acciones de mitigación de afectaciones por inundaciones identificando sus características, beneficios, pros y contras, clasificándolas en estructurales y no estructurales (IMTA, 2015; Baró-Suarez, et al., 2011; Vázquez Rodríguez, 2012; Arreguín Cortés, et al., 2011; Salas Salinas, 1999):



#### 2.4.1.1 Acciones estructurales:

- **Estructuras de detención o regulación:** Detienen temporalmente el agua de lluvia en un embalse, tanque o similar, reincorporándola posteriormente al escurrimiento, regulando el hidrograma de salida de la estructura. Ejemplo de este tipo de estructuras son diques y presas rompe picos ubicados al pie de montaña, estanques de detención en zonas urbanas, embalses debajo de estacionamientos comerciales o industriales.
  - **Beneficios:** Regula la avenida e incrementa el tiempo en que se presenta el gasto máximo disminuyendo el mismo, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento aguas abajo de la misma.
  - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema.
  - **Contras:** Prácticamente no reducen el volumen de escurrimiento. Generan velocidades altas por un mayor tiempo, lo que puede producir erosión. Su construcción depende de la topografía. La gestión del recurso para su construcción es relativamente complicada. Por sí sola es difícil que reduzca en su totalidad las afectaciones por inundaciones.



**Figura 10.- Estructuras de detención en Chihuahua, Chih., México. Fuente: propia.**

- **Estructuras de retención e infiltración:** Retienen el agua en un embalse, tanque o similar, por un periodo de tiempo suficiente para que ésta se evapore o infiltre de manera natural o inducida. Si se alcanza el volumen máximo de retención el agua es





## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

desalojada por una obra de excedencias, a partir de este punto funciona hidráulicamente como una estructura de detención. Ejemplos son lagunas de infiltración y tanques de retención.

- **Beneficios:** Regula la avenida e incrementa el tiempo de respuesta de la cuenca, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento aguas abajo de la misma. Reduce el volumen total de escorrentía y el tiempo de permanencia del agua. Contribuye a la recarga de mantos acuíferos.
  - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. Genera un doble beneficio al infiltrar el agua para recarga de acuíferos.
  - **Contras:** Su construcción depende de la topografía. Al ser una acción preventiva se dificulta en ocasiones su gestión. Su capacidad de infiltración depende de las características estratigráficas del suelo. Por sí sola es difícil que reduzca en su totalidad las afectaciones por inundaciones.
- **Parques lineales hundidos:** Son espacios públicos de recreación, construidos longitudinalmente a uno o dos lados de un río o arroyo que funcionan como corredor de crecidas. Se caracterizan por tener gran cantidad de vegetación e incluyen zonas de inundación controlada y/o infiltración; es decir, parte de las zonas que se aprovechan como espacio público urbano están destinadas a inundarse temporalmente ante un evento de lluvia ciertos periodos de retorno previamente calculados.
    - **Beneficios:** Regula la avenida e incrementa el tiempo en que se presenta el gasto máximo disminuyendo el mismo, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento. Reduce el volumen de escorrentía. Aporta a la recarga de mantos acuíferos. Genera beneficios sociales. Disminuye asentamientos irregulares a la margen de las corrientes.
    - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. Se alinea a un manejo integral de manejo del agua urbana. Genera múltiples beneficios con un mismo proyecto.



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- **Contras:** La gestión del recurso para su construcción es relativamente complicada. Los espacios urbanos inundables son inutilizables durante la regulación. Requieren de un mayor tiempo de planeación y estudios que otros proyectos. Su construcción depende de características topográficas, ecológicas y sociales.
- **Sistemas de captación de agua de lluvia:** Colocados en techos de viviendas, comercios o industrias, estacionamiento, explanadas públicas u otros. Recolectan y almacenan el agua de lluvia para su posterior uso.
  - **Beneficios:** Regula la avenida e incrementa el tiempo de respuesta de la cuenca, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento. Reduce el volumen de esorrentía. Permite el aprovechamiento del agua de lluvia.
  - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. Se alinea a un manejo integral del agua urbana. Genera doble beneficios con un mismo proyecto.
  - **Contras:** La gestión del recurso para su construcción es relativamente complicada. Su viabilidad técnica depende del régimen climático de la zona. Su impacto es a pequeña escala, por lo que una sola de estas acciones puede no tener impacto considerable en la mitigación de afectaciones por inundaciones.
- **Pavimentos permeables:** Construidos con materiales porosos colocados en vialidades secundarias y terciarias, y en estacionamientos. Permiten que una parte del agua que se precipita o escurre sobre ellos se infiltre.
  - **Beneficios:** Reduce significativamente el volumen de esorrentía del agua precipitada o escurrida sobre él. Contribuye a la recarga artificial de mantos acuíferos.
  - **Pros:** De manera general son eficientes en sus costos respecto a sus beneficios. Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema.
  - **Contras:** Su capacidad de infiltración depende de las características estratigráficas del suelo. La gestión del recurso para su construcción es relativamente complicada. Su impacto es a pequeña escala, por lo que una sola de



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

estas acciones puede no tener impacto considerable en la mitigación de afectaciones por inundaciones. Debido a su capacidad de carga solo es aplicable a ciertas vialidades; secundarias, terciarias y estacionamientos.

- **Canalización de cauces:** Modifica un tramo de un cauce natural alterando su sección transversal dándole una forma geométrica regular y conocida, y un recubrimiento generalmente constante con un material cuyo coeficiente de rugosidad es menor al del cauce natural.
  - **Beneficios:** Aumenta la capacidad hidráulica del cauce desalojando el agua de lluvia más rápido. Reduce el tirante. Evita que el agua llegue a zonas contiguas al cauce.
  - **Pros:** La gestión del recurso para su construcción y su diseño son relativamente más sencillos que otras acciones.
  - **Contras:** No reduce el volumen de escorrentía. Por sí sola se alinea al enfoque de desalojo y no a un manejo integral del agua urbana. Comúnmente no soluciona realmente el problema, sino que lo transfiere aguas abajo de su construcción.
  
- **Rectificación de cauces:** Modifica el trazo original de los cauces naturales evitando zonas de conflicto, reduciendo el riesgo.
  - **Beneficios:** Evita que el agua llegue a zonas expuestas a inundaciones.
  - **Pros:** Es de relativa fácil gestión respecto a otras acciones. Existe mucha información sobre la manera de realizar su diseño técnico y construcción.
  - **Contras:** No reduce el volumen de escorrentía. Por sí sola se alinea al enfoque de desalojo y no a un manejo integral del agua urbana. Comúnmente no soluciona realmente el problema, sino que lo transfiere aguas abajo de su construcción.
  
- **Bordos de protección:** Mediante la construcción de terraplenes de los márgenes del río se confina el flujo de cierto gasto de diseño.



- **Beneficios:** Contienen el agua de escorrentía dentro de los límites marginales de arroyos o ríos evitando inundaciones en zonas contiguas a los mismos.
  - **Pros:** Es de relativa fácil gestión respecto a otras acciones. Es de relativa fácil construcción.
  - **Contras:** No reduce el volumen de escorrentía. Su diseño se asocia con incertidumbres fluviales. Por sí sola se alinea al enfoque de desalojo y no a un manejo integral del agua. Comúnmente no soluciona realmente el problema, sino que lo transfiere aguas debajo de su construcción.
- **Sistemas de conducción pluvial, drenaje pluvial urbano:** Recolecta y conduce el agua precipitada sobre la zona urbana y fuera de la misma, a través de tuberías de conducción a superficie libre y en algunos casos tramos presurizados.
    - **Beneficios:** Permite controlar el escurrimiento. Reduce la cantidad de agua que escurre sobre calles. Evita el desbordamiento de arroyos y ríos.
    - **Pros:** Su construcción y diseño ha sido ampliamente estudiado por lo que se tiene mucha información sobre ellos. Su gestión es relativamente sencilla.
    - **Contras:** No reduce el volumen de escorrentía. Por sí sola se alinea al enfoque de desalojo y no a un manejo integral del agua urbana.
- **Estaciones de bombeo:** Eleva el agua de una cota inferior a otra superior, para su desalojo o conducción por gravedad.
    - **Beneficios:** Permite el desalojo de aguas de escorrentía a pesar de tener desniveles topográficos.
    - **Pros:** En ocasiones es la única o mejor solución debido a condiciones topográficas.
    - **Contras:** Requiere recursos económicos y humanos para su mantenimiento periódico y suministro de energía. No reduce el volumen de escorrentía.

#### 2.4.1.2 Acciones no estructurales:

- **Programas de planificación urbana y ordenamiento territorial:** Aplicados por dependencias gubernamentales, establecen la manera en que una urbe crecerá, delimitando diferentes usos de suelo, zonas protegidas y no habitables.



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- **Beneficios:** En ciertos usos de suelo, como áreas naturales de reserva, aumenta la fricción de la superficie de escurrimiento aumentando el tiempo de respuesta de la cuenca, asimismo, propicia más áreas permeables aumentando la infiltración, disminuyendo el volumen de escurrimiento. Todo esto propicia un menor gasto de desalojo, por ende, menores velocidades y tirantes de esorrentía. Al delimitar zonas no habitables reduce el riesgo.
  - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. Tiene beneficios similares a acciones estructurales a menor costo. No necesariamente evita la inundación, sino sus afectaciones. Puede propiciar un manejo integral de agua urbana.
  - **Contras:** Su aplicación está relacionada a complejas cuestiones administrativas gubernamentales y en ocasiones intereses políticos. Sus beneficios son intangibles, por lo que son de difícil visualización. Sus beneficios son a largo plazo, lo cual dificulta su justificación.
- **Reforestación, control y restauración de suelos:** Aumento de vegetación en la cuenca, especialmente en cuencas de aportación ubicadas aguas arriba de la zona en la que se desea mitigar afectaciones. La vegetación, preferente de la región, intercepta el agua de lluvia y da estabilidad al suelo, al mismo tiempo aumenta la infiltración y el coeficiente de fricción de la superficie.
    - **Beneficios:** Al interceptar el agua disminuye el volumen de escurrimiento, el aumento del coeficiente de escurrimiento incrementa el tiempo de concentración, estos dos factores disminuyen el gasto máximo de desalojo, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento. Reduce la cantidad de transporte de sedimentos.
    - **Pros:** Comúnmente es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. A demás de beneficios hidrológicos, tiene múltiples beneficios intangibles, como beneficios ecológicos.



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- **Contras:** Su aplicación está relacionada a complejas cuestiones administrativas gubernamentales. Sus beneficios son intangibles, por lo que son de difícil visualización y gestión.
- **Reubicación a zonas de bajo peligro:** Consiste en reubicar a familias o comercios de zonas de peligro a zonas de bajo o nulo peligro.
  - **Beneficios:** Elimina la vulnerabilidad de la fórmula teórica del riesgo, por lo que reduce el riesgo al mínimo.
  - **Pros:** Permite el funcionamiento hidráulico natural de llanuras de inundación de ríos y arroyos.
  - **Contras:** Su aplicación involucra complicaciones sociales. Sus beneficios se perciben exclusivamente en las zonas específicas donde se realice. Regularmente tiene altos costos de expropiación de terrenos.
- **Programas de inspección y limpieza de arroyos:** Consisten en la limpieza periódica, antes de la temporada de lluvias de los arroyos y ríos que sirven como red natural de drenaje de aguas pluviales. Son llevados a cabo por entidades gubernamentales. Aumentan o restituyen la capacidad hidráulica de los arroyos.
  - **Beneficios:** Desaloja el agua de lluvia más rápido. Reduce el tirante. Evita que el agua se desborde de los cauces y llegue a zonas de afectación.
  - **Pros:** Es una acción de tipo preventiva; se anticipa al problema. Tiene los mismos beneficios cualitativos que algunas acciones estructurales, como canalización de arroyos y ríos, a menor costo y tiempo de ejecución.
  - **Contras:** Requiere ser llevado a cabo de manera periódica. Su eficiencia depende de la correcta planeación, gestión y ejecución. No reduce el volumen de escurrimiento.
- **Sistemas de alerta temprana:** Sistema de monitoreo y seguimiento hidrológico o meteorológico que emite una alerta sobre un posible peligro en una zona específica.



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- **Beneficios:** Provee de información a tomadores de decisiones durante un evento meteorológico. Permite a las personas evacuar zonas de peligro previo a la inundación.
  - **Pros:** Permite tomar acciones de desalojo para evitar afectaciones en zonas donde sea complicado realizar otro tipo de acciones. Puede llegar a reducir por completo las afectaciones por pérdidas humanas.
  - **Contras:** No reduce el volumen de escurrimiento ni ninguna característica hidráulica adversa. Su eficiencia depende de la correcta actuación posterior a la emisión de alerta.
- **Planes de contingencias:** Creados y llevados por entidades gubernamentales, determinan la manera de actuar durante un evento de contingencia, estableciendo el qué, cómo, cuándo, dónde, quién y por qué hacer de cada acción durante la contingencia. A pesar de ser una acción de tipo reactiva es indispensable. Toma como premisa que, a pesar de contar con otro tipo de acciones, eventualmente se presentará una contingencia por lo que se debe estar preparados. En ocasiones es la única acción posible de llevarse a cabo una vez que se tiene la contingencia.
    - **Beneficios:** Permite mitigar las afectaciones a la sociedad ante un evento de lluvia a pesar de carecer de otro tipo de acciones de mitigación.
    - **Pros:** Permite reducir las afectaciones durante el evento de inundación.
    - **Contras:** No modifica ninguna característica de la inundación. Su realización depende de la correcta planeación, gestión y ejecución de la dependencia encargada de ello.
- **Programas de educación sobre cultura del agua:** Consisten en proporcionar información de fácil entendimiento sobre temas hídricos a la sociedad en general. Pueden ser aplicados en escuelas de diferentes niveles o a través de publicidad institucional, pláticas en entidades gubernamentales o en el sector privado.
    - **Beneficios:** Propician la reducción de afectaciones por exposición y alteraciones a las características del sistema hidrológico. Crea conciencia hídrica sobre los



problemas que se generan al hacer un mal manejo de aguas pluviales, deforestación desmedida, crecimiento urbano no regulado.

- **Pros:** Tienen beneficios que ninguna otra acción. Permite generar conciencia sobre problemas pluviales; de abastecimiento, saneamiento, tratamiento de aguas residuales y seguridad hídrica en general.
- **Contras:** Sus beneficios son únicamente a largo plazo e intangibles, por lo que son de difícil visualización.

Para mitigar óptimamente las afectaciones por inundaciones es necesaria la combinación de varias medidas, tanto estructurales como no estructurales. Se deben evitar en la medida de lo posible realizar acciones aisladas, especialmente de las de protección, pues al proteger una zona pueden afectar otra, únicamente trasladando el problema de un lugar a otro sin solucionarlo. A su vez, se debe buscar priorizar las medidas preventivas, posteriormente correctivas y por último reactivas (Campos Aranda, 2010).

## 2.5 Mapas de riesgo por inundaciones

Son una parte esencial del manejo de riesgo por inundaciones, permiten comprender las afectaciones por inundaciones para planear y priorizar acciones que las mitiguen (Jongman, et al., 2012; Merz, et al., 2010).

Mediante una representación idealizada muestran de manera visual, simplificada y concentrada la magnitud y distribución espacial de las inundaciones, así como su interacción con un sistema y sus componentes, como pueden ser una ciudad, su población, viviendas y/o infraestructura (Cervantes\_Jaimes, 2012), por lo que estos mapas pueden ser respecto a pérdidas económicas por interrupción de servicios, daño a vehículos o bienes en viviendas y comercios; afectaciones por daños a la salud, generación de desorden de estrés post traumático e inclusive pérdida potencial de vidas humanas (Hammond, et al., 2015). De entre otras cosas sirven para (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016):

- Trazar de rutas de evacuación a refugios seguros ante eventos de inundaciones;



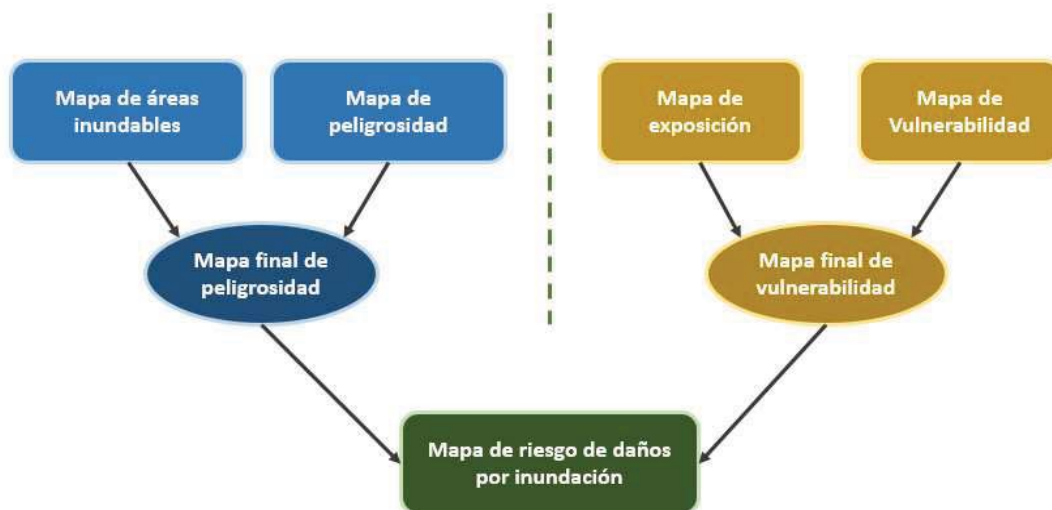


## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- Planear de acciones de mitigación de afectaciones por inundaciones;
- Ubicar de zonas con potencial de inundación;
- Determinar elementos en riesgo por inundaciones;
- Identificar de áreas más vulnerables ante un evento de inundación debido al tipo de construcción de casa habitación;
- Cuantificar costos directos tangibles generados por daños probables ante eventos de inundación;
- Estimar de beneficios directos tangibles de acciones de mitigación de afectaciones por inundaciones;

Existen varios enfoques con los que se pueden construir dependiendo del tipo de afectación que se represente en el mapa. Para el caso de afectaciones directas tangibles, (Ribera Masgrau, 2004) propuso la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones con la **Ec. 7** según el esquema de la **Figura 11**:

$$\begin{aligned} & \text{Riesgo por inundacion} && \text{Ec. 7} \\ & = (\text{Área de afectación} * \text{Peligrosidad de la inundación}) \\ & x (\text{Número de elementos expuestos} * \text{Vulnerabilidad de los elementos}) \end{aligned}$$



**Figura 11** .- Esquema teórico para la elaboración de mapas de riesgo por inundación. Fuente: elaboración propia recreación de (Ribera Masgrau, 2004).



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

(Alcocer-Yamanaka, et al., 2016) proponen una adaptación a esta conceptualización del riesgo aplicable a México mediante la siguiente simplificación:

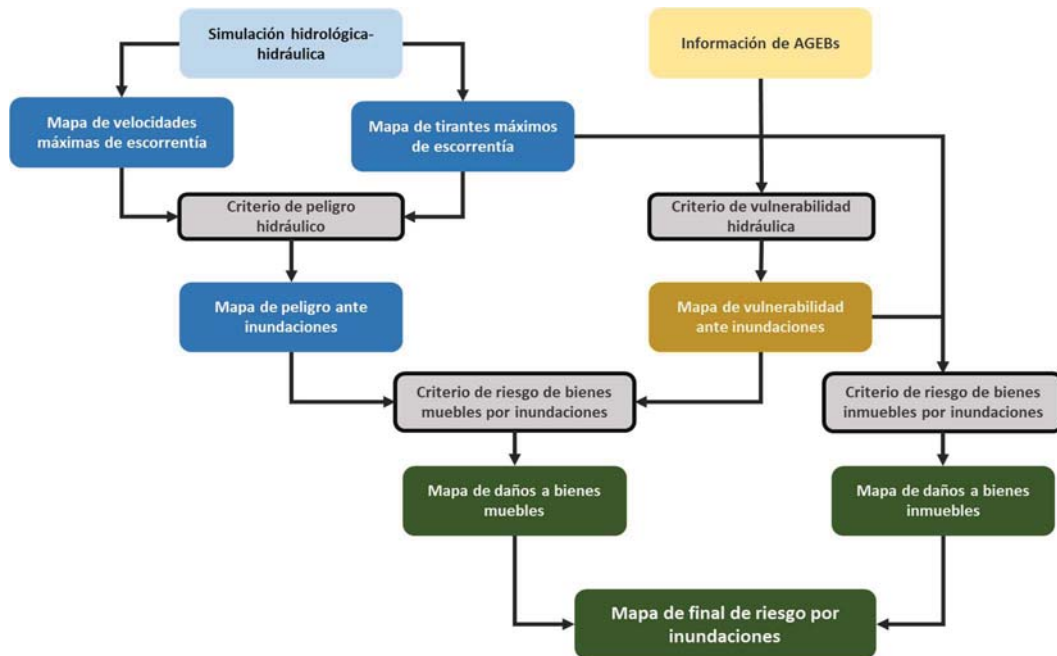
- Considera el riesgo a nivel del área más pequeña con la que se vaya a construir el mapa, para el caso de México se puede considerar a nivel de AGEB (Área Geoestadística Básica), utilizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
  - Unifica el número de elementos expuestos en dicha área asociándolos con su vulnerabilidad con la
- Ec. 8:**

$$\begin{aligned} & \text{Riesgo por inund. en la AGEB} \\ & = (\text{Peligrosidad en la AGEB}) \times (\text{Vulnerabilidad ante inund. de la AGEB}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 8}$$

La **Figura 12** muestra un diagrama de flujo de esta metodología y la **Figura 13** un mapa creado con ella por (IMTA, 2015). Dónde los valores de peligro y vulnerabilidad ante inundaciones se cruzan de manera cualitativa utilizando el criterio de la **Tabla 2**.

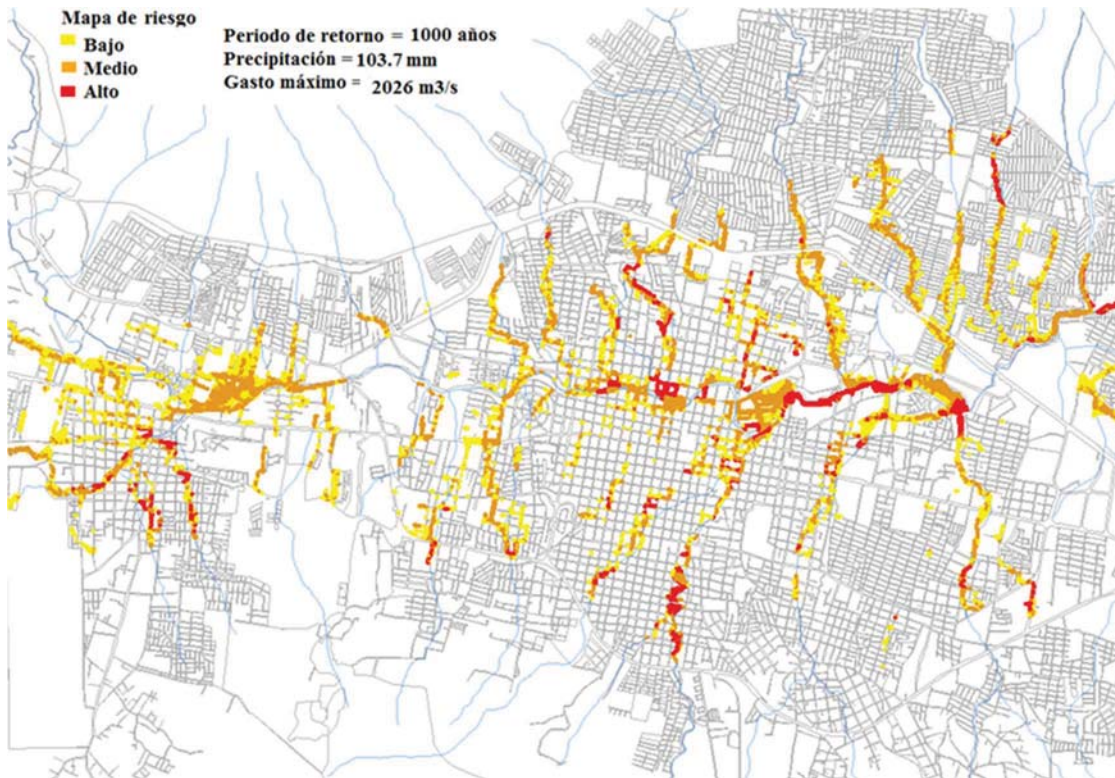


## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS



**Tabla 2.-** Criterio de riesgo ante inundaciones en función del peligro y vulnerabilidad ante inundaciones. Fuente: (IMTA, 2015).

Vulnerabilidad por tipo de vivienda	Peligro			
	Nulo	Bajo	Medio	Alto
Muy Baja (Tipo IV)	Riesgo Nulo RN (0%)	RN (0%)	Riesgo Bajo RB (10%)	Riesgo Medio RM (50%)
Baja (Tipo III)	RN (0%)	RB (10%)	RM (50%)	Riesgo alto RA (100%)
Media (Tipo II)	RN (0%)	RB (10%)	RM (50%)	RA (100%)
Alta (Tipo I)	RN (0%)	RM (50%)	RA (100%)	RA (100%)



**Figura 13.-** Mapa de riesgo por inundación para un periodo de retorno de 1,000 años Tuxtla Gutiérrez. Fuente: (IMTA, 2015).

Ya que esta simplificación se basa en mapas de peligro y vulnerabilidad ante inundaciones, a continuación, se hace una descripción a mayor detalle de los mismos.

## 2.6 Mapas de peligro ante inundaciones

Son una representación gráfica idealizada que muestra de manera visual, simplificada y concentrada la magnitud y distribución espacial del nivel de peligro causado por un evento de inundación. Debido a lo complejo de cuantificar todos los parámetros que componen el peligro ante inundaciones real, para la elaboración de estos mapas se simplifica el peligro utilizando los dos parámetros que tienen mayor influencia de afectación en zonas urbanas (IMTA, 2015):



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

1. Tirante máximo de escorrentía ( $y$ );
2. Velocidad máxima de escorrentía ( $v$ ).

Estos dos parámetros se combinan de manera cualitativa mediante un criterio de peligro. (IMTA, 2015; Llaguno Gilberto, 2014) propusieron el criterio descrito en la **Tabla 3** con adaptaciones para México, considerando el tirante máximo de escorrentía ( $h$ ) y la velocidad máxima de escorrentía ( $v$ ), esto tras un análisis de los criterios:

- Oficina Federal de la Economía del Agua de Gobierno de Francia, Office Fédéral de l'Économie des Eaux (OFEE, por sus siglas en francés);
- Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, Federal Emergency Management Agency (FEMA por sus siglas en inglés);
- Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Government (aplicado en Dorrigo, Australia);
- Programa computacional *Flo-2D* (O'Brien & Jorgensen, 2007);

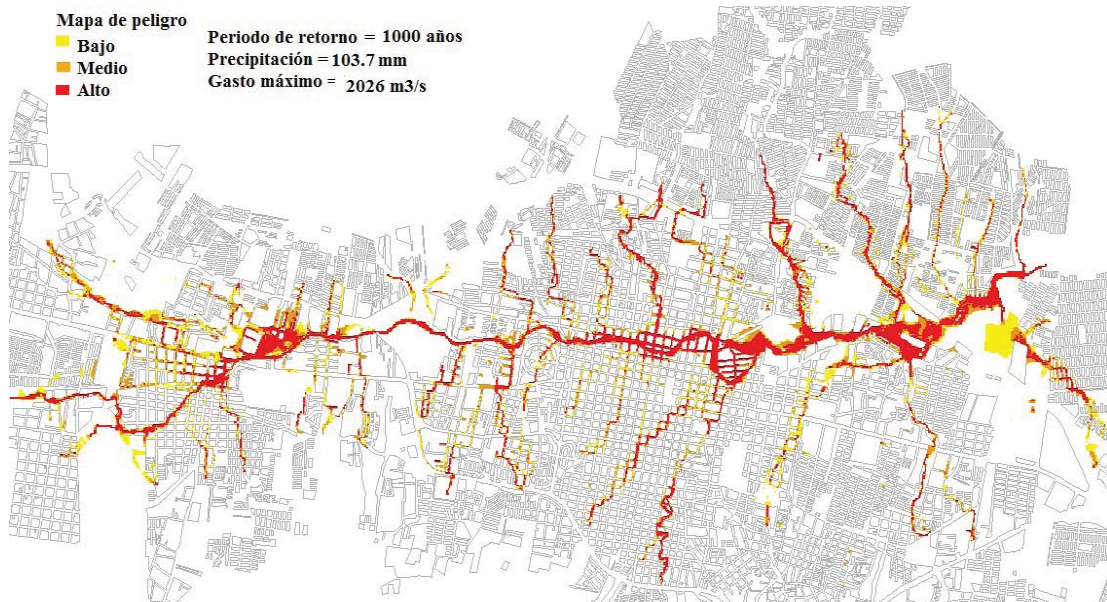
**Tabla 3.-** Parámetros para criterio de peligro hidráulico. Fuente: (IMTA, 2015).

Nivel	Altura (m)	Volcamiento (m <sup>2</sup> /s)	Deslizamiento (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.2$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.2 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h > 1.23$

La obtención de los tirantes máximo de escorrentía y velocidades máximas de escorrentía para la generación de los mapas de peligro se hace con base en los resultados de las simulaciones computacional hidrológicas-hidráulicas en 1 o 2 dimensiones con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), considerando escenarios de inundación asociados a eventos de lluvia de diferentes periodos de retorno: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000 años, para su posterior uso en el cálculo del DAE. En la **Figura 14** se muestra un mapa de peligro ante inundaciones de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, realizado con este criterio por (IMTA, 2015).



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS



**Figura 14.-** Mapa de peligro ante inundaciones de Tuxtla Gutiérrez, México para un periodo de retorno de 1,000 años. Fuente: (IMTA, 2015).

### 2.7 Mapas de vulnerabilidad ante inundaciones

Muestran de manera gráfica la distribución espacial de la magnitud de pérdida o daños posible ante un evento de inundación.

Son generados mediante un SIG con información levantada en campo o como en el caso de la metodología propuesta por (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016) para México, con base en información generada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (Inegi) a nivel de AGEB en formato .shp (*shape*).

Este método considera dos rubros principales en los que se puede tener una pérdida o daño por inundación a nivel de vivienda: costo del menaje (todos los bienes dentro de la vivienda) y costo por reparación de falla estructural.

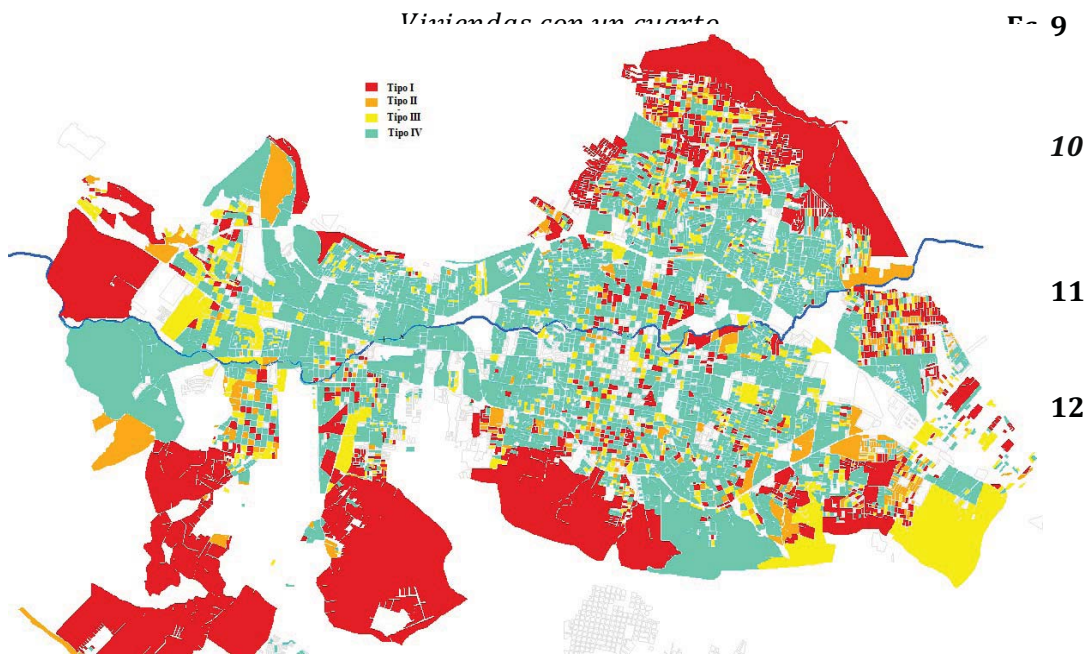
Aunque presenta ciertas limitantes, esta simplificación permite la creación de mapas de vulnerabilidad de manera relativamente sencilla a costos accesibles y tiempos



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

aceptables. En este método se basa en los avances hechos por CENAPRED en el 2006 para la clasificación de 4 niveles vulnerabilidad de las viviendas ante un evento de inundación en función de su material de construcción. Utilizando la información contenida en la AGEB se generan los mismos 4 niveles de vulnerabilidad en función de variables contenidas en la AGEB (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016) ver **Ec. 9** a la **Ec. 12**:

Donde PEA se refiere a la población económicamente activa. En la **Figura 15** se muestra un mapa de vulnerabilidad ante inundaciones construido con este método.



**Figura 15.-** Mapa de vulnerabilidad por tipo de vivienda Tuxtla Gutiérrez. Fuente: (IMTA, 2015)



## 2.8 Simulación hidrológica e hidráulica

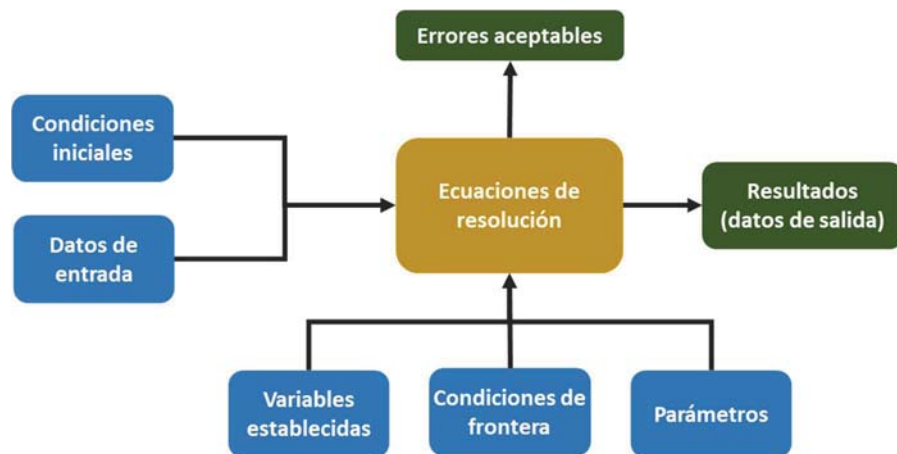
Una parte clave de la generación de mapas de peligro ante inundaciones, que a su vez sirven para la generación de mapas de riesgo por inundaciones, es la realización de un estudio hidrológico-hidráulico que, mediante el uso de un modelo de simulación, permita identificar las velocidades y tirantes máximos de esorrentía. Estos estudios se componen de dos partes: simulación hidrológica (balance de un sistema hidrológico) y simulación hidráulica (mecánica del fluido). La simulación hidráulica puede a su vez descomponerse en simulación a superficie libre y presurizada.

Un modelo de simulación infiere información desconocida a partir de información conocida, pudiendo ser de tipo físico, análogo o matemático (o numérico) (USACE, 2000).

Se mencionan los modelos de tipo matemático, al ser el tipo de modelo usado en este trabajo, para estos modelos uno de los principales avances fue la creación de modelos computacionales de simulación numérica hidrológica e hidráulica, surgidos desde la década de 1960 en Estados Unidos de América como una herramienta de apoyo, entre otras cosas, para el diseño de la infraestructura pluvial (Delleur, 2003).

Como se esquematiza en la **Figura 16**, un modelo matemático de simulación infiere la información desconocida (resultados o datos de salida) según las condiciones iniciales y datos de entrada (información conocida) con base en un código de resolución preestablecido (código matemático), el cual resuelve las ecuaciones que describen el comportamiento de lo que se desea simular mediante condiciones de frontera y parámetros conocidos. A su vez, todo modelo conlleva incertidumbre o errores inevitables, los cuáles se busca reducir hasta valores aceptables (USACE, 2000).





**Figura 16.-** Diagrama de flujo de un modelo matemático de simulación. Fuente: elaboración propia.

### 2.8.1 Simulación hidrológica

Consiste en generar un balance de aguas dentro de un sistema hidrológico (cuenca) considerando sus entradas (precipitación), el tránsito del agua dentro del sistema, pérdidas (evapotranspiración, infiltración y retención en depresiones) y la salida superficial de agua de la cuenca (Campos Aranda, 1998).

Sus datos de entrada son de precipitación, obtenidos en campo o a través de un análisis de lluvia puntual (estaciones climatológicas) o espacialmente distribuido (rada meteorológico o imágenes de satélite). Comúnmente se introducen en el modelo en forma de hietogramas (Conagua, 2015b).

Dependiendo del programa, el tránsito del agua a través del sistema puede simularse mediante las ecuaciones clásicas de la hidrología o con base en principios físicos que describan el comportamiento del escurrimiento en un plano inclinado (segunda Ley de Newton) (USACE, 2000; Edsel, et al., 2011).



Las pérdidas por infiltración pueden calcularse con diferentes métodos, de los más usados se pueden mencionar: Horton, Horton modificado, Green-Ampt y Número de Curva (Rossman, 2015).

Uno de los principales objetivos de esta modelación es la obtención de un hidrograma de salida de la cuenca (USACE, 2000). Los datos de salida de esta simulación en ocasiones se utilizan como datos de entrada para una simulación hidráulica.

### 2.8.2 Simulación hidráulica a superficie libre

Analiza el comportamiento físico mecánico del fluido (agua) al escurrir a superficie libre con base en las ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, conocidas como las ecuaciones Barré de Saint Venant, deducidas a partir de las ecuaciones generales de Navier Stokes, las cuales consideran la aplicación de la segunda ley de Newton (fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración) a un volumen de control infinitesimal de agua (IMTA, 2015). Esta simulación puede hacerse en 1, 2, cuasi 2 ó 3 dimensiones (Cervantes\_Jaimes, 2012):

- **Unidimensional (1D):** Esta simplificación se basa en el supuesto de que la dimensión longitudinal domina sobre las otras dos. Por tanto, no considera comportamiento en la componente vertical ni sobre la sección transversal. Sus resultados son satisfactorios para canales y ríos de sección transversal prismática constante con pocas variaciones en su trazo. Su tiempo de simulación es muy corto respecto a otras simulaciones;
- **Cuasi bidimensional (C2D):** Bajo ciertas consideraciones y adecuaciones permite representar el flujo en dos dimensiones mediante una malla de resolución construida en dos dimensiones con elementos unidimensionales. Es aplicable para simular inundaciones en extensiones de terreno donde la variación de la velocidad vertical es despreciable, como el caso de llanuras de inundación;



- **Bidimensional (2D):** Se basan en las ecuaciones de Barré de Saint Venant en dos dimensiones, lo que les permite considerar velocidades en las componentes  $x$  y  $y$  del plano horizontal. Al igual que los cuasi bidimensionales son útiles para simular inundaciones en extensiones de terreno donde la variación de la velocidad vertical es despreciable, como el caso de llanuras de inundación;
- **Tridimensional (3D):** Es una modelación de detalle que permite ver las variaciones de velocidad y caudal en tres direcciones. Aunque es aplicable a cualquier caso, el detalle que ofrecen sus resultados se relaciona con la cantidad de información que requiere como datos de entrada y el tiempo de resolución, por lo que son utilizados para simular detalles o aspectos particulares de obras hidráulicas.

### 2.8.3 Simulación hidráulica presurizada

Para casos como la simulación de escurrimiento pluvial urbano, donde además de escurrimiento superficial se cuenta con un sistema de alcantarillado pluvial, estaciones de bombeo y otras obras hidráulicas, se pueden complementar los modelos hidrológico e hidráulico a superficie libre, con un modelo de cálculo del flujo de agua a través de conductos presurizados (IMTA, 2015). Su resolución se basa en la resolución de las ecuaciones de Barré de Saint Venant para flujo presurizado.

### 2.8.4 Simulación complementaria e integrada

Cada una de las simulaciones: hidrológica, hidráulica a superficie libre e hidráulica presurizada, es en sí un modelo matemático de simulación aislado, sin embargo, se pueden resolver de manera aislada, complementaria o integrada.

La simulación complementaria utiliza los datos de salida de un modelo como datos de entrada de otro, como es el caso de las simulaciones que utilizan los datos de salida del modelo hidrológico como datos de entrada del modelo hidráulico a superficie libre, y a su vez, los datos de salida de este modelo como datos de entrada del modelo hidráulico presurizado.



La simulación integrada incluye ambas simulaciones en una sola resolución; es decir, el código matemático de resolución considera tanto los aspectos hidrológicos como hidráulicos.

### **2.8.5 Programas computacionales de simulación hidrológica e hidráulica y sus métodos de solución.**

Los códigos o motores de resolución para los modelos hidrológicos e hidráulicos, especialmente en dos y tres dimensiones, suelen no tener una solución analítica y/o ser de gran complejidad. Por lo que se apoyan en métodos numéricos iterativos introducidos a un código o algoritmo computacional para que una computadora realice las operaciones matemáticas necesarias para su solución (USACE, 2000). A estos modelos apoyados de una computadora y un método numérico iterativo se les conoce como programa computacional de simulación hidrológica-hidráulica.

Los métodos numéricos iterativos de solución consisten en dividir en puntos o términos discretos el dominio de una ecuación continua para solucionarla a través de iteraciones (repeticiones). Algunos de los métodos más utilizados son el Método de Elemento Finito (MEF), Método de Diferencias Finitas (MDF) y Método de Volúmenes Finitos (MVF) (Cervantes\_Jaimes, 2012).

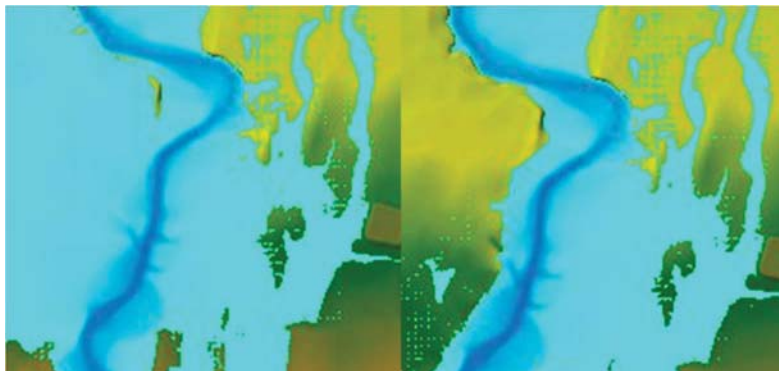
No se debe perder de vista que estos programas de simulación son una herramienta de apoyo, por lo que antes de utilizarlos, el modelador debe tener conocimiento de las ecuaciones que utiliza y la manera en las que son resueltas para poder realmente representar características deseadas del fenómeno mediante una simulación computacional idealizada del mismo. A su vez, el modelador debe tener en cuenta ciertas características de los modelos de simulación:

- A mayor precisión mayor cantidad de datos de entrada requeridos;
- A mayor precisión mayor tiempo de simulación del modelo;



Existe un vasto abanico de programas de simulación hidrológica e hidráulica; complementaria e integrada, gratuitos y de paga. Con base en lo investigado por (IHS, 2006) respecto a simulación de drenaje pluvial y a experiencias propias sobre simulación de inundaciones en zonas urbanas se hace un breve análisis general de algunos programas útiles para este fin:

- **HEC-HMS:** Se enfoca en simulación de proceso lluvia-escurrimiento de cuencas dendríticas para obtención de hidrogramas de salida. Su simulación se basa en la partición del ciclo hidrológico en elementos manejables de manera independiente dentro de fronteras que delimitan el sistema a simular, utilizando diversos modelos matemáticos de masa o energía. Cuenta con siete métodos para la obtención de lluvia en exceso, siete para transformar la lluvia en exceso en escurrimiento y cinco métodos para representas el flujo que una subcuenta aguas arriba aporta al gasto de salida de una subcuenca aguas abajo (HEC USACE, 2010).
- **HEC-RAS:** Se enfoca en la simulación hidráulica de ríos incluyendo estructuras de cruce. Su simulación se basa en cuatro módulos: Perfil de flujo permanente (cálculo en 1D de perfiles de flujo gradualmente variado incluyendo estructuras de cruce), Flujo no permanente (en 1D, 2D o combinado), ver **Figura 17**, Transporte de sedimentos con frontera móvil (Aplicable en 1D considerando variaciones del fondo debido a la erosión y depósito) y calidad del agua (analiza temperatura del agua y transporte de ciertas sustancias) (USACE, 2016).



**Figura 17.-** Ejemplos de simulación hidráulica bidimensional a superficie libre con HEC-RAS. Fuente: elaboración Propia.



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

- **Iber:** Se enfoca en la simulación bidimensional de ríos y llanuras de inundación. Es un modelo matemático para la simulación de flujo a superficie libre con base en tres módulos: hidrodinámica (ecuaciones de Barré de Saint Venant en 2 dimensiones), transporte de sedimentos (ecuaciones de transporte de fondo y carga en suspensión) y turbulencia (diversos modelos de turbulencia tipo Boussinesq) (Iber, 2018).

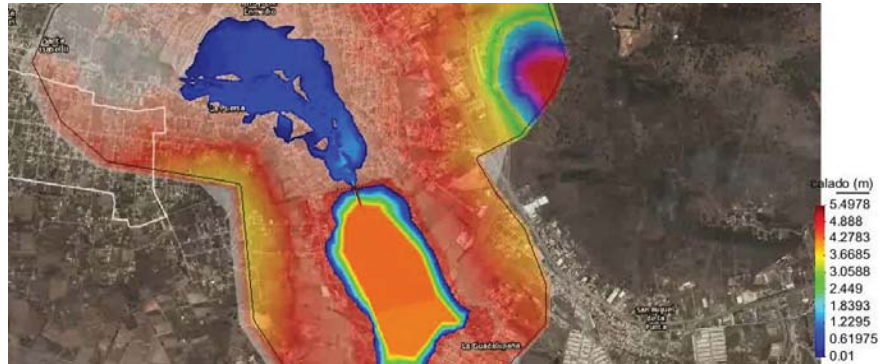


Figura 18.- Ejemplo de simulación hidráulica IBER. Fuente: elaboración propia.

- **EPA SWMM5:** Su enfoque es para diseño y revisión de sistemas de drenaje pluvial urbano y sanitario. Cuenta con una simulación complementaria con tres módulos: hidrológico (obtención de hidrogramas mediante resolución de depósitos inclinados contactados en serie de manera de cascada dendrítica considerando pérdidas por infiltración, evaporación y almacenamiento en depresión, ver **Figura 19**), hidráulico a superficie libre (resolución de un sistema de conductos lineales conectados por nodos con base en las ecuaciones de Barré de Saint Venant en 1D) e hidráulica a presión (mismo sistema de conductos y nodos



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

resolviendo las ecuaciones de Barré de Saint Venant para flujo presurizado). Cada código de resolución es independiente y se alimentan mutuamente.

- **PCSWMM®:** Simulación en 1D de cuencas y sistemas de drenaje pluvial urbano y simulación cuasi 2D de llanuras de inundación, embalses y flujo sobre superficies urbanas. Usa el código de libre acceso del EPA SWMM5 así como adecuaciones geométricas y gráficas permite la simulación hidrológica e hidráulica cuasi bidimensional para la representación gráfica de inundaciones en zonas urbanas



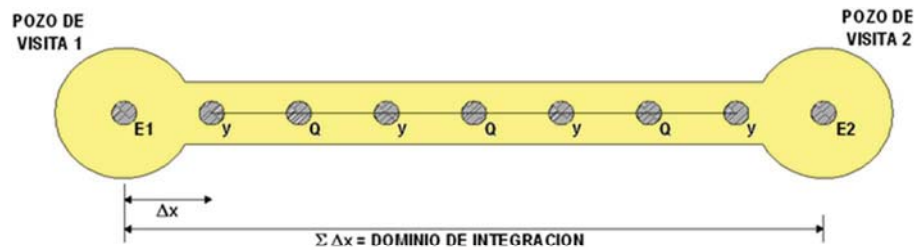
**Figura 19.-** Conceptualización de la idealización de una subcuenca de aportación en SWMM. Fuente: elaboración propia.

y creación de mapas de peligro, así como manejo de datos de información geográfica y manejo de series de tiempo (CHI Water, s.f.).

- **MIKE Urban:** Se especializa en la simulación de escurrimiento en calles y drenaje pluvial. Es en sí la combinación de ArcGIS y Mouse, estructurado en un módulo principal denominado *MIKE Urban Model Manager* que permite la administración de datos estructurales e integra de manera independiente los motores de cálculo hidráulico de SWMM5 y EPANET, a este módulo se conectan cinco módulos para representar procesos físicos: *CS-Rainfall-Runoff* para procesos hidrológicos, *CS-pipeflow* para simulación hidrodinámica de escurrimientos pluviales, ver **Figura 20**, *CS-Control* para modelar estructuras especiales, *CS-Pollution Transport* para simular transporte, dispersión y concentración de sustancias disueltas y *CS-Biological process* para describir el proceso de reacción de compuestos múltiples en el agua (IHS, 2006).



## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS



**Figura 20.-** Dominio de integración de las ecuaciones de Barré de Saint Venant a través de un esquema alternado de diferencias finitas de primer orden empleado en MIKE URBAN. Donde E: Energía, y: tirante; Q: gasto. Fuente: (IHS, 2006).

- **Urban Flood:** Se enfoca en modelación de inundaciones en zonas urbanas. Integra los módulos de MIKE Urban más otro módulo que permite la modelación bidimensional: Mike 2.1 PP/HD, mediante las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento generalizadas para dos dimensiones (IHS, 2006).
- **Infoworks CS:** Se enfoca en modelación de inundaciones en zonas urbanas. Su estructuración básica es a partir de módulos hidráulicos (resuelve las ecuaciones de Barré Saint Venant en 1D con un esquema de Preissmann), hidrológicos (a través de cinco diferentes modelos de depósitos: doble lineal Wallinford, lineal sencillo SPRINT, lineal sencillo Desbordes, No lineal sencillo SWMM y cinemático. Se incluyen pérdidas por infiltración, almacenamiento en depresión y evaporación), de calidad del agua, de control en tiempo real, etc. interconectados por interfaces gráficas que permiten administrar la información de una base de datos compartida por dichos módulos gracias a un módulo central (IHS, 2006).

Con el fin de poder decidir el programa computacional a utilizar para cada escenario o necesidad específica se muestra en la **Tabla 4** el resumen de las características de los diferentes programas mencionados.

<p><b>Limitantes</b></p> <p>o permite simulación hidrológica, para simulación de inundaciones sus resultados deben ser usados como datos de entrada para un modelo de simulación hidráulica.</p> <p>e limita a la simulación de inundaciones en zonas rurales y semiurbanas donde no exista drenaje pluvial urbano, debido a su imposibilidad de simularlo. El cálculo de erosión se puede realizar únicamente en 1D.</p> <p>e limita a la simulación de inundaciones en zonas rurales y semiurbanas donde no exista drenaje pluvial urbano, debido a su imposibilidad de simularlo.</p> <p>e limita a la simulación en 1D dentro de conductos de sección transversal conocida, no incluye erosión.</p> <p>tiene costo. No incluye simulación de erosión en cauces naturales en 1D o cuasi 1D.</p> <p>tiene costo. La información no es fácilmente exportable a otros sistemas. La construcción del modelo es tardada.</p> <p>tiene costo. Para potencializar su capacidad requiere información de detalle mayor a los de simulación 1D</p> <p>tiene costo.</p>
---





## ÍNDICE PÉRDIDA-POSESIÓN PARA GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS