

Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas

• Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka •
Comisión Nacional del Agua, México

• José Manuel Rodríguez-Varela* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor para correspondencia

• Víctor Javier Bourguett-Ortiz •
Comisión Nacional del Agua, México

• Oscar Jesús Llaguno-Guilberto • Pedro Misael Alborno-Góngora •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Alborno-Góngora, P. M. (septiembre-octubre, 2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33-55.

En el presente artículo se expone una metodología para la generación de mapas de riesgo que articula los mapas de peligro y vulnerabilidad por inundación. Se expone el procedimiento a realizar bajo un criterio que permite ser adaptable a distintas zonas urbanas; estos mapas son utilizados para estimar los costos por daños estructurales y de menaje de las viviendas. Se revisan distintos criterios para establecer el peligro de las inundaciones usados en varios países; consideran como base para su cálculo el tirante y la velocidad del agua alcanzados por las calles, arroyos y ríos. Asimismo, se plantean dos factores que se consideran importantes: resistencia al vuelco y deslizamiento. Para el cálculo de la vulnerabilidad de las edificaciones ante un evento de inundación, se plantea una metodología que permite con base en información generada por el INEGI y contenida en las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), determinar los mapas de vulnerabilidad de toda una zona urbana. El caso de estudio es la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, donde se generaron los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación con la metodología propuesta. Se generan costos estimados para el daño estructural y menaje de las viviendas; además, se desarrollaron rutas de evacuación y se revisó la localización de los refugios.

Palabras clave: mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación, resistencia al vuelco, deslizamiento.

Abstract

Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Alborno-Góngora, P. M. (September-October, 2016). *Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(5), 33-55.

This article presents a methodology for generating flood risk maps that articulates hazard and vulnerability maps. The methodology can be adapted to different urban areas, and the maps obtained allow to estimate structural and household damage cost. Different criteria, used in several countries, to establish danger of flood based on calculating water depth and flow velocity in streets, streams and rivers are first reviewed. Two factors that are deemed important, namely resistance to overturning and sliding are integrated into the hazard maps. A methodology based on information generated by the Mexican National Institute of Statistics and Geography (INEGI) and contained in its basic geostatistical areas (AGEBs) was developed to calculate vulnerability maps of buildings in an entire urban area. The case study was the city of Tuxtla Gutiérrez, Chiapas where flood risk maps, housing vulnerability and hazard maps of the entire city were calculated. Structural and housing household damage costs were estimated, evacuation routes were identified and previously proposed shelter locations were revised.

Keywords: Hazard maps, flood risk and vulnerability, resistance to overturning, sliding.

Recibido: 15/09/2015
Aceptado: 31/01/2016

Antecedentes

Ante un evento de lluvia es importante determinar, mediante alguna herramienta de cálculo, los costos derivados de los daños causados por la inundación tanto a menaje de casa y daños estructurales a casa habitación, edificios públicos y privados como deterioro de calles y puentes, pérdidas económicas a comercios e industrias, al igual que el paro en actividades académicas de la población estudiantil y hasta pérdidas de vidas humanas ocasionadas directamente por el evento de lluvia, o enfermedades producidas por la contaminación del agua, que con frecuencia se vincula con la destrucción de la infraestructura hidráulica de distribución y saneamiento del agua de la ciudad.

En esta situación, contar con una metodología que permita determinar los costos por daños generados por las inundaciones es determinante, a fin de proponer acciones que deriven en su mitigación.

El presente trabajo muestra los principales resultados generados a partir de la aplicación de una metodología propuesta por el IMTA, mediante la cual es posible obtener mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de forma económica, y en un tiempo de cálculo accesible.

Estos tipos de mapas son una herramienta con la que es posible calcular para diferentes periodos de retorno zonas de la ciudad con potencial importante de inundación; áreas más vulnerables debido al tipo de construcción de las casas habitación; espacios en los que habita un número mayor de personas de edad avanzada, a quienes la inundación puede poner en riesgo; costos generados por daños probables de la inundación; beneficio-costos de las inversiones para mitigar los problemas de inundación; rutas de evacuación a refugios seguros para eventos de lluvia extremos; acciones estructurales y no estructurales que mitiguen los daños probables generados por una inundación.

La metodología permite que la generación de los mapas de peligro considere toda la zona urbana, con lo que se identifican colonias que presentarán problema de inundación. Para

generar el mapa de peligro se plantea en la metodología el criterio que considera tirante, velocidad, esfuerzo al vuelco y deslizamiento generado por el escurrimiento de lluvia, con lo que se obtienen mapas de peligro más apegados a la realidad.

Para los mapas de vulnerabilidad se desarrolló una metodología que considera la información contenida en los AGEB del INEGI. Esto permite reducir costos y tiempos de elaboración de los mismos.

En cuanto a los mapas de riesgo, se generan a partir del mapa de peligro, como el de vulnerabilidad, y con éste es posible cuantificar el daño probable generado por lluvias de diferentes periodos de retorno.

Metodología

Para llegar a un mapa de riesgo por inundaciones en zonas urbanas es necesario determinar los siguientes mapas:

Mapa de peligro

El peligro de inundación se puede definir con base en ciertos criterios, que pueden ser tirante y velocidad del agua alcanzada en las calles, ríos o arroyos. Al desbordamiento del cauce natural de los ríos se le conoce como inundación fluvial. Cuando se debe a un escurrimiento de lluvias dentro de una zona urbana y después de saturarse el suelo, su agua excedente dura horas o días, se le denomina inundación pluvial. Existen otros fenómenos que pueden provocar una inundación, como las mareas altas, que derivan que el nivel medio del mar sea rebasado, provocando inundaciones costeras. Otros fenómenos que pueden provocar una inundación son los tsunamis o la falla de una obra hidráulica (Cenapred, 2006).

Criterios de peligro usados en diversos países

- a) Criterio del Gobierno de Francia. Oficina Federal de la Economía de las Aguas, Office Fédéral de l'Économie des Eaux (OFEE, por sus siglas en francés)

La OFEE desarrolló un criterio para evaluar los peligros generados por las inundaciones basado en tres niveles: alto, medio y bajo (Loat & Petrascheck, 1997). Se define al nivel alto cuando la población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas; en el nivel medio, la población está en riesgo fuera de las viviendas y las edificaciones pueden sufrir daños; para el nivel bajo, las edificaciones pueden sufrir daños leves, y la inundación o el arrastre de sedimentos pueden llegar a afectar el interior de las edificaciones (ver figura 1).

- b) Criterio de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, Federal Emergency Management Agency (FEMA)

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) desarrolló un criterio para la generación de mapas de peligro (FEMA, 2009), en el que relacionan el tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua v (m/s) (ver figura 2). Con base en estas relaciones establece tres rangos de peligro: zona de nivel bajo, amenaza moderada y alto nivel de amenaza. Para la zona de alto nivel de amenaza,

la vida de las personas puede estar en peligro y las edificaciones pueden tener fallas estructurales. En la zona de precaución (moderada) se tienen daños a la integridad de las personas y afectaciones en las edificaciones; la zona de bajo peligro no representa una afectación a la población, pero las edificaciones pueden sufrir daños ligeros.

- c) Criterio del Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Government

El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia, donde se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua, como el que se muestra en la figura 3, en el que se definen tres rangos de peligro (NSW, 2005). En el nivel alto se especifica que la evacuación por vehículos es difícil; además, los adultos tienen problemas para cruzar las calles con seguridad y existe un potencial daño estructural a las construcciones; la zona de transición depende de las condiciones del lugar; en el nivel bajo se establece que, en caso necesario, los vehículos pueden evacuar a las personas y sus posesiones, y los adultos tendrían inconvenientes para cruzar las avenidas con seguridad.

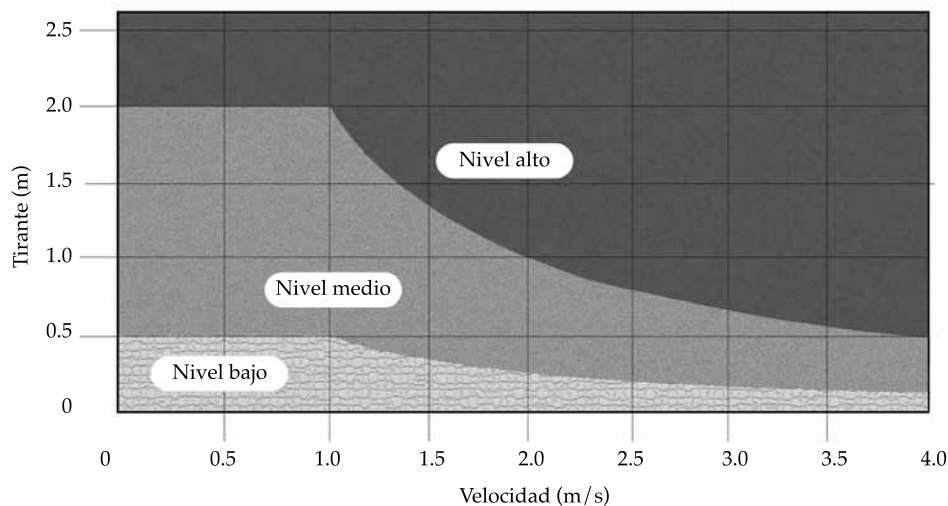


Figura 1. Nivel de peligro para inundaciones. Adaptada de Loat y Petrascheck (1997).

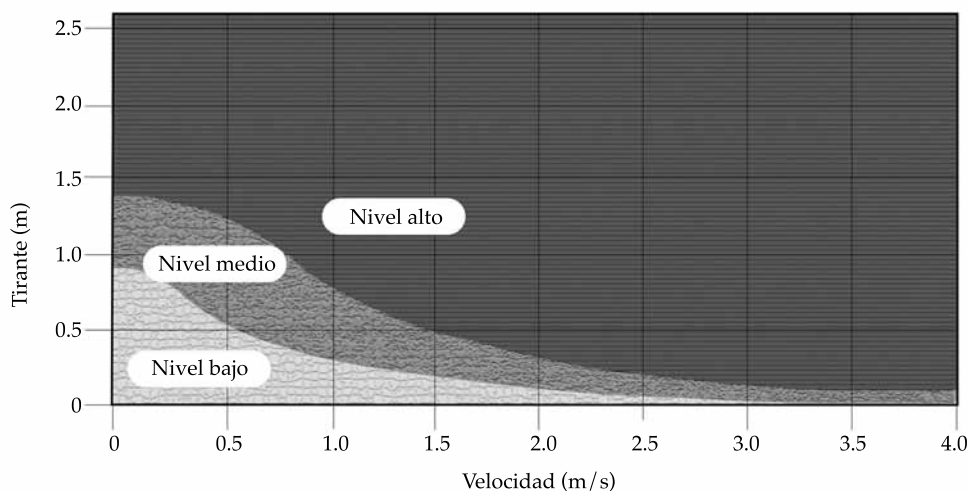


Figura 2. Niveles de peligro que relacionan tirante del agua (m) y velocidad (m/s). Adaptada de FEMA (2009).

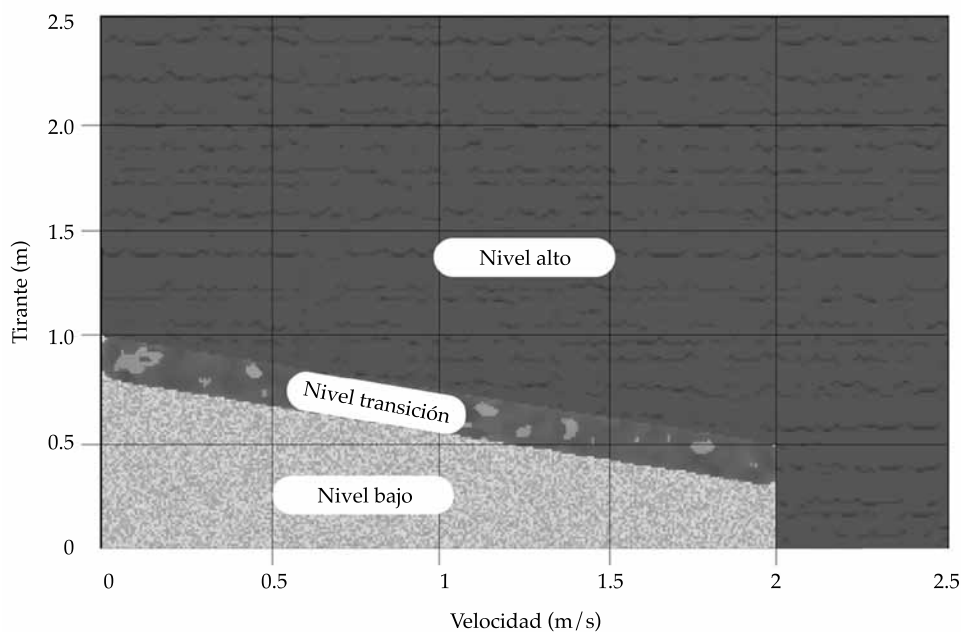


Figura 3. Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005).

d) Criterio propuesto por el IMTA (2015)

Los mapas de peligro propuestos por el IMTA están fundados en investigaciones de Alcocer-Yamanaka et al. (2012), que definen como base para el manejo del agua de las aguas pluviales cuatro componentes (ver figura 4): el primero

corresponde a la identificación de la problemática de las inundaciones, que puede derivarse de diversos factores; el segundo, a los análisis hidrológicos e hidrográficos en el que se identifican las lluvias que ocasionan inundaciones y la generación de lluvias de diseño, así como la identificación de los usos de suelo, cuencas

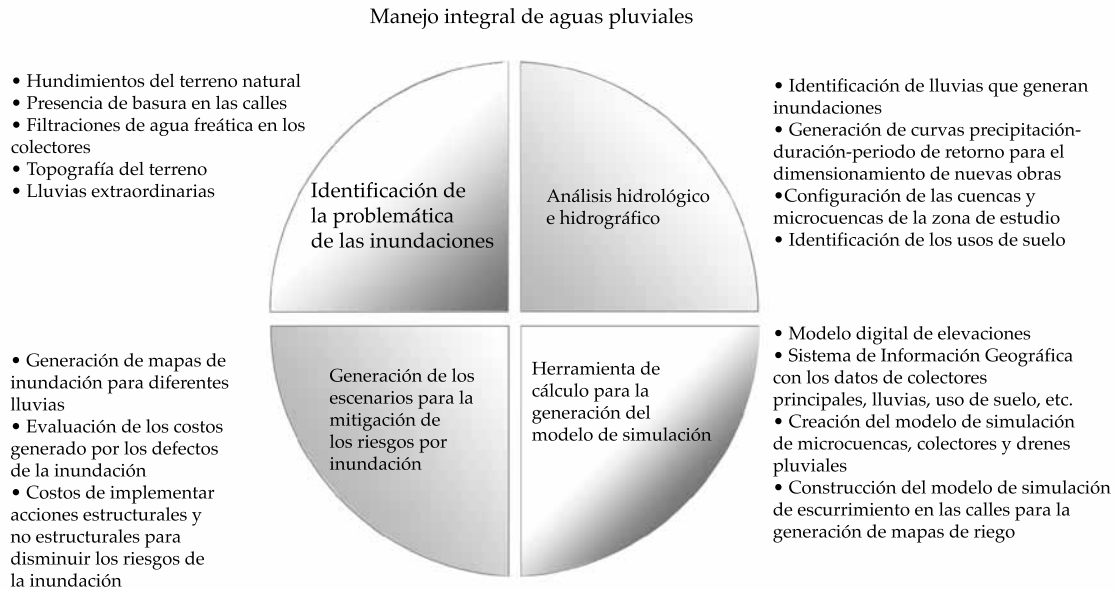


Figura 4. Componentes de un programa para el manejo integral de las aguas pluviales (Alcocer-Yamanaka et al., 2012).

y microcuencas. El tercero, a la utilización de diversas herramientas de cálculo, que permiten la construcción del modelo de simulación de microcuencas, colectores y drenes pluviales, y la construcción del modelo de escurrimiento en calles. Por último, el cuarto, a la generación de diversos escenarios con los cuales se evaluará el impacto del fenómeno hidrometeorológico.

Generalizando lo descrito por Yamanaka et al. (2012), los mapas de peligro se obtienen a través de tres aspectos principales, que brindarán la información elemental para la construcción del modelo numérico de escurrimientos superficiales. El primero se basa en analizar la precipitación, con el fin de establecer el comportamiento espacial y temporal de la lluvia (lluvia de proyecto). El segundo toma en cuenta la infraestructura urbana de la región de estudio (configuración del terreno). Por último, el tercer aspecto se refiere a la delimitación de subcuencas y microcuencas de estudios, considerando los parámetros geomorfológicos (área, perímetro, ancho, longitud del cauce principal, etc.) (figura 5).

Para fines de aplicación de la metodología, se obtienen las lluvias de proyecto, que correspon-

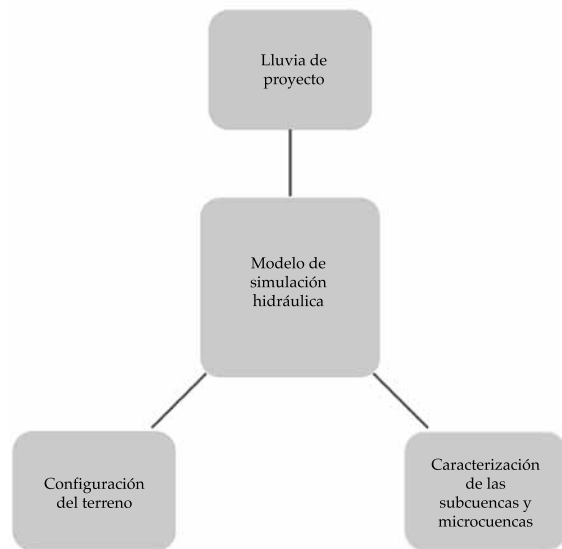


Figura 5. Variables esenciales para la simulación hidráulica en dos dimensiones.

den a 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno. En cuanto a la configuración del terreno, se determina con la planimetría de la ciudad, el levantamiento topográfico de la misma (como ejemplo, se puede utilizar la topografía

LIDAR) y los usos de suelo. Con esta información es posible caracterizar y determinar la configuración de las subcuencas y microcuencas de toda la zona urbana analizada, y se construye el modelo de simulación hidráulico. Con base en las lluvias de proyecto se determinan para cada periodo de retorno los tirantes y velocidades a nivel calle. En el análisis es posible considerar la infraestructura pluvial urbana existente, así como arroyos y ríos.

El mapa de peligro se genera para cada periodo de retorno, considerando los tirantes y velocidades calculados con el modelo numérico. Para determinar los mapas de peligro se tomaron en cuenta, además de las variables de tirante y velocidad, volcamiento y deslizamiento, mostrados en el cuadro 1.

Justificación empírica del criterio establecido para la generación del mapa de peligro por inundación propuesto en el cuadro 1

Los valores de las variables propuestas en el cuadro 1 se establecen con los criterios siguientes: el tirante de 0.3 m se considera con un nivel de peligro nulo debido a que éste no alcanza a rebasar el nivel de banquetta promedio, por lo que el agua no llegaría a entrar en los hogares. En los rangos de 0.3 a 0.5 metros, el nivel de peligro se considera bajo, es decir, el daño a la estructura de la casa, así como al menaje, no es considerable. En tirantes de 0.5 a 1.5 metros, el nivel de peligro es medio, debido a que el daño a muebles y estructura del hogar tiende a ser elevado. Cuando el nivel del agua alcanza 1.5 metros de altura, el peligro se cataloga como alto.

En cuanto al deslizamiento, Nanía (1999) realizó un modelo teórico experimental para la ciudad de Mendoza, Argentina, donde el estudio abarca 30 manzanas, conformado por 50 tramos de calles y 21 cruces. Analizó el riesgo asociado con el escurrimiento pluvial en calles. El estudio tomó en cuenta la estabilidad al deslizamiento de las personas ante la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre ellas cuando es necesario cruzar la calle. Obtuvo como resultado el valor de $1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$ como límite para que una persona cruce sin problemas. Para determinar este valor, se tomó en cuenta velocidad y tirante del flujo en conjunto. La estabilidad al deslizamiento de un sujeto ante la fuerza de arrastre se calcula con la ecuación (1):

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (1)$$

donde:

F = fuerza de arrastre del agua (N).

C_d = coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido (adimensional).

ρ = densidad del fluido (kg/m^3).

A = proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua, que es igual a $y(b)$, siendo éste el producto del tirante por el ancho de la persona, en este caso de las piernas (m^2).

V = velocidad del fluido (m/s).

Suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y sería igual a la ecuación (2):

Cuadro 1. Criterios establecidos para la generación del mapa de peligro por inundación (IMTA, 2015).

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

$$F_{cs} = \mu W_p \quad (2)$$

donde:

F_{cs} = fuerza de fricción del calzado sobre el suelo (kgf).

μ = coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y suelo, y del estado de ambos (adimensional).

W_p = peso de la persona (kgf).

Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1.2 (Streeter & Wylie, 1979), la densidad del agua es de 1 000 kg/m³, el ancho de las piernas $b = 0.1 \text{ m} \times 2 = 0.2 \text{ m}$; el peso de la persona de 60 kgf, y el coeficiente de fricción entre el caucho y el concreto húmedo igual a 0.50 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad está dada por la siguiente desigualdad:

$$v^2 h = \frac{2\mu P1}{C_d \rho B2} = \frac{2(0.5)(60)(9.81)}{1.2(2)(1000)(0.2)} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} = 1.23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$$

El límite de 0.30 cm de tirante de inundaciones está adaptado para que el escurrimiento superficial no pueda entrar a los edificios; además, Témez (1992) menciona en su estudio que la velocidad máxima permisible es de 1 m/s para determinar el volcamiento de objetos.

Mapa de vulnerabilidad por inundación

La vulnerabilidad es la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador (Cenapred, 2004). De dos bienes expuestos, uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad de la lluvia, éste sufre mayores daños. A diferencia del peligro, que está definido por los patrones climáticos (la naturaleza) y debido a ello es difícil modificarlo, la vulnerabilidad es una variable que el hombre tiene la posibilidad de disminuir.

El cálculo de la vulnerabilidad está limitado a los daños directos que puedan sufrir las residencias o daños inmobiliarios como las casas; en cambio, no se consideran daños indirectos, como pueden ser los psicológicos, provocados en personas afectadas por un evento de lluvia, u otros muy específicos, como en comercios o industrias, debido a que esta vulnerabilidad es muy compleja, específica o no cuantificable; también hay aspectos diversos, como pueden ser la pérdida de vidas humanas o daños al medio ambiente.

La vulnerabilidad se denomina daño potencial, y se define como la característica de una persona o grupo en relación con su capacidad de prever, combatir, resistir y recuperarse del impacto de un suceso natural. Es por esto que la vulnerabilidad presenta un comportamiento desigual según grupos sociales, actividades productivas o territorios (Ribera, 2004).

Mapas de vulnerabilidad propuesto por IMTA (2015)

Para la elaboración de los mapas se toman como punto de partida los avances en la construcción de mapas de vulnerabilidad desarrollados por el Cenapred (2007). El procedimiento propuesto es el siguiente: recopilación de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), seleccionándose las Áreas Geoestadística Base (AGEB), que son bases de datos con información georreferenciada por manzanas en cuanto a nivel socioeconómico de la población, población económicamente activa, total de viviendas y tipo de viviendas, entre otras 190 variables.

De acuerdo con la clasificación de vulnerabilidad de Cenapred (2006), ésta se hace en campo y se verifica casa por casa, lo que resulta en un trabajo oneroso; así como los tiempos de ejecución, que pueden ser semanas, en función de la extensión de la zona en estudio. En la propuesta metodológica de este artículo, la vulnerabilidad de las casas se calcula en nivel de manzana, pues así está la información contenida en los AGEB del INEGI.

En la información contenida en los AGEB se puede consultar el número de viviendas

particulares habitadas con un solo cuarto; viviendas particulares habitadas con dos cuartos; viviendas particulares habitadas con tres cuartos y más, además de la población económicamente activa. Con esta información se determinan los tipos de vivienda.

Para determinar en qué tipo de vulnerabilidad se ubican las casas en nivel manzana se usa el siguiente indicador:

$$\text{Tipo I} = \frac{\text{Viviendas de un solo cuarto}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \quad (1)$$

$$\text{Tipo II} = \frac{\text{Viviendas con dos cuartos}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \quad (2)$$

$$\text{Tipo III} = \frac{\text{Viviendas con tres cuartos o más}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \text{ y que la PEA} < 0.4 \quad (3)$$

$$\text{Tipo IV} = \frac{\text{Viviendas con tres cuartos o más}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \text{ y que la PEA} > 0.4 \quad (4)$$

En el cuadro 2 se establecen cuatro rangos de clasificación, donde se considera un costo de menaje de las viviendas, que va desde \$12 500.00 hasta \$300 000.00.

Mapa de riesgo por inundaciones

De acuerdo con Cenapred (2004), riesgo es la combinación de tres factores: valor de los bienes expuestos (C), vulnerabilidad (V) y probabilidad (P) de que se exceda la variable aleatoria que caracteriza un hecho potencialmente dañino. De manera simbólica:

$$\text{Riesgo} = C P V \quad (5)$$

La estimación del riesgo puede hacerse a nivel de vivienda, para que al sumarse con el de otras viviendas se tenga una idea del riesgo en

una localidad, que a su vez, si se acumula para un municipio, proporcionaría una estimación del riesgo de ese municipio, y así de manera sucesiva. De esta forma se pueden crear mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de acuerdo con los alcances ya expuestos.

Para decir que existe un riesgo por inundación en cualquier municipio de la república mexicana es necesario cumplir con la existencia de una probabilidad alta de que ocurran precipitaciones mayores a las de su correspondiente umbral de lluvia en las siguientes 24 horas, y haya una clasificación con vulnerabilidad alta o media, por lo que se podrían esperar efectos adversos en la comunidad o sus bienes.

Método propuesto por Ribera (2004)

Los mapas de riesgo o mapas de daños potenciales por inundación se pueden definir también como una situación susceptible de causar un daño, como consecuencia de un evento de lluvia que se presenta en un medio vulnerable, como el área de alguna colonia o zona de una ciudad. Así, el riesgo se puede formular como el producto del área afectada, por la peligrosidad del evento, y número de elementos (casas, personas, etc.) que está en juego, y su vulnerabilidad (Ribera, 2004).

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Área de afectación} * \text{peligrosidad del suceso}}{\text{número de elementos en juego} * \text{vulnerabilidad de los elementos en juego}} \quad (8)$$

Para llevar a cabo mapas de riesgo se debe disponer de cuatro mapas:

- Áreas inundables.
- Peligro.
- Exposición.
- Vulnerabilidad.

Los dos primeros sirven para localizar y caracterizar el suceso, y dan lugar al mapa final de peligrosidad. El tercero y cuarto mapa sirven para localizar y caracterizar los elementos en

Cuadro 2. Vulnerabilidad por tipo de vivienda obtenida del análisis de información contenida en el AGEB. Fuente: IMTA, 2015.

Construcción de viviendas en la manzana	Clasificación de vulnerabilidad de viviendas (Cenapred, 2007)	Clasificación de la vulnerabilidad, considerando la información contenida en el AGEB del INEGI	Vulnerabilidad	Costo del menaje
Tipo I	Este tipo de vivienda corresponde a los hogares más humildes. Por lo general consta de un solo cuarto multifuncional, construido con material de desecho. El menaje es el mínimo indispensable	Para este rubro se consideró como indicador la relación entre el número de viviendas particulares habitadas con un solo cuarto entre el total de viviendas localizadas en la manzana	Alta	\$12 500.00
Tipo II	Corresponde a hogares que pueden ser calificados como de clase baja, donde la vivienda se describiría como de autoconstrucción o construida con material de la zona, la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Las habitaciones cuentan con muebles propios El tercer tipo de vivienda también lo califica como clase baja, similar al tipo II, pero con techos más resistentes, construida la mayoría de las veces sin elementos estructurales. El menaje corresponde al necesario para las diferentes habitaciones	Para este tipo se consideró la relación de viviendas particulares habitadas con dos cuartos entre el total de viviendas	Media	\$50 000.00
Tipo III	Se identifica como típica de la clase media. Puede ser equiparada con una vivienda de interés social, construida la mayoría de las veces con elementos estructurales. El menaje corresponde al de una casa típica de una familia de profesionales que ejerce una carrera y vive sin complicaciones económicas	En este caso se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas. Si el valor es mayor que 0.5, se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser menor a 0.4. Se deberán descartar las manzanas que caen en los tipos I y II	Baja	Menaje para casa de dos pisos: \$150 500.00 Para el daño en menaje se considera la mitad de este costo, pues las casas se consideran de dos pisos
Tipo IV	Corresponde al tipo residencial, construida con acabados y elementos decorativos, que incrementan de forma sustancial su valor. El menaje está constituido por artículos de buena calidad y con muchos elementos de comodidad. La familia la integran profesionales que ejercen una carrera y viven sin complicaciones económicas	Se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas. Si el valor es mayor que 0.5, se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser mayor de 0.4. Se deberán descartar las manzanas que están en los tipos anteriores	Muy baja	Menaje para casa de dos pisos: \$300 000.00 Para el daño se considera la mitad de este costo, pues las casas se consideran de dos pisos

juego, que a la postre conducen al mapa final de vulnerabilidad.

Generación de mapas de riesgo propuesto por IMTA (2015)

Los mapas de riesgo se generan a partir de una adaptación de la propuesta realizada por Ribera (2004). Primero se determinan los mapas de peligro a partir de un criterio definido de peligro y con base en el análisis hidráulico hecho con el modelo en dos dimensiones se calculan los tirantes y velocidades a lo largo de la ciudad; esto, para las lluvias con diferentes periodos de retorno.

Asimismo, se obtienen los mapas de vulnerabilidad de acuerdo con un criterio definido de vulnerabilidad, que puede calcularse con base en el tipo de vivienda, edad de las personas, zonas escolares, áreas industriales, etcétera.

La combinación de mapas de peligro y vulnerabilidad, a partir de un criterio de riesgo,

permite calcular los mapas de riesgo, de los cuales se obtienen los costos por daños generados por la inundación para diferentes periodos de retorno (ver figura 6).

Aplicación de la metodología propuesta. Caso de estudio: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Descripción de la zona de estudio

El municipio de Tuxtla Gutiérrez es uno de los 2 457 municipios que conforman la república mexicana. Cuenta con una extensión territorial de 412.40 km². Se encuentra entre las coordenadas 16° 38' y 16° 51' de latitud norte, 93° 02' y 94° 15' de longitud oeste, y tiene una altitud promedio de 552 msnm (ver figura 7). Para el año 2010, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez contaba con 537 102 habitantes, que representan 11% del total de la población del estado (INEGI, 2010).

El sistema terrestre de la zona donde se encuentra el municipio está caracterizado por

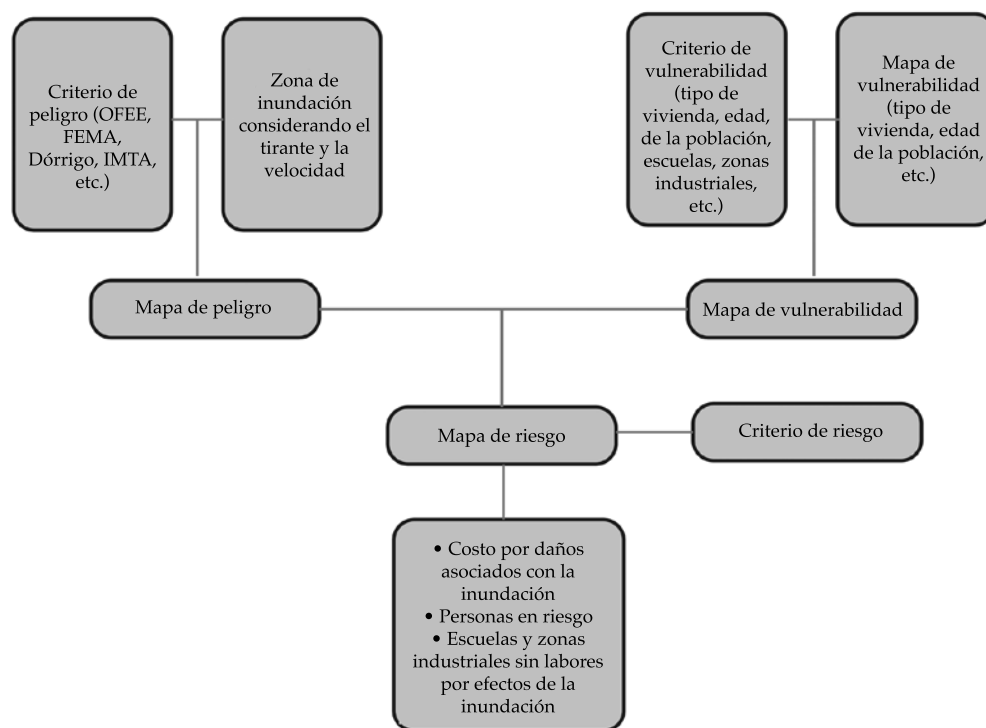


Figura 6. Metodología para definir los mapas de riesgo.

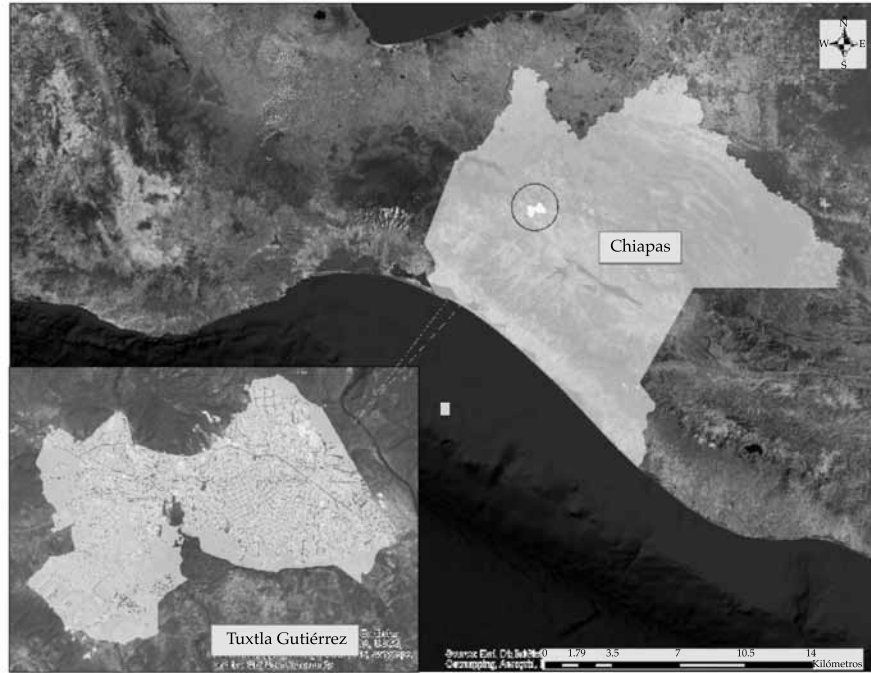


Figura 7. Localización de la zona de estudio.

valles, terrazas, montañas y pies de monte. Destaca además el paso del río Sabinal. A medida que se incrementó la población, se llevaron a cabo edificaciones sin un plan de ordenamiento territorial adecuado, cambiando el uso de suelo y estableciendo infraestructura urbana donde se tiene una mayor riesgo ante un evento hidrometeorológico extremo, por lo que se producen inundaciones y encharcamientos.

Estas acciones antropogénicas sobre la cuenca han provocado un aumento del volumen de escurrimiento, acrecentándose las magnitudes de los gastos pico de las avenidas y una reducción de los tiempos en que se presenta dicho gasto, originándose inundaciones severas y recurrentes; pérdida de suelos que incrementan el volumen de azolves; aumento del riesgo de deslaves dentro de la cuenca del río Sabinal (Instituto Estatal del Agua, s.f.); decremento de la vida útil de la infraestructura pluvial urbana existente; aumento de residuos sólidos; contaminación de las fuentes de agua; afectaciones a los bosques, etc. Todo esto ha puesto en riesgo la vida y bienes de los habitantes de zonas vulnerables.

Afectaciones causadas por inundaciones

Históricamente, la población y ciudad de Tuxtla Gutiérrez se han visto afectadas por inundaciones debidas al río Sabinal, que cruza en longitud de 6.5 km, que contiene tributarios (arroyos) que aumentan el problema. De acuerdo con el Instituto de Protección Civil (2015), se tienen documentados los daños causados por inundaciones desde 1920 hasta la fecha.

Conociendo la necesidad de contar con un estudio fehaciente que permita establecer las zonas de riesgo por inundación, se aplica la metodología propuesta a este trabajo para la generación de mapas de riesgo por inundaciones.

Construcción de mapas de riesgo por inundación

Para la generación de mapas de riesgo, en un primer término se generaron los mapas de peligro y vulnerabilidad. Al tener en conjunto estos mapas, el proceso para la construcción de los mapas de riesgo se lleva a cabo mediante

un análisis matricial, como se muestra a continuación.

Mapas de peligro por inundación

Se realizaron simulaciones hidráulicas, considerando lo planteado en la figura 4. Los mapas se calcularon y construyeron a partir del criterio presentado en el cuadro 1.

En la figura 8 se muestra el mapa de peligro generado para un periodo de retorno de 20 años. En tono claro se marcan las zonas de peligro bajo; en color medio, las zonas de peligro medio; y en tono oscuro, las zonas de peligro alto. La precipitación indicada corresponde a la precipitación máxima para una duración de 60 minutos.

Mapa de vulnerabilidad por inundación

El mapa de vulnerabilidad de las construcciones se calculó con base en el cuadro 2. En la figura 9 se presenta el mapa de vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Mapas de riesgo por inundación

El riesgo está implícito en nuestras vidas y es parte inseparable de las acciones, entendiéndose que es la proximidad a un daño, donde existe la posibilidad de tener pérdidas significativas o resultados adversos. Para su representación se utiliza una base cartográfica, en la cual mediante parámetros establecidos se localiza la manera en que impactan los sistemas afectables.

El criterio de riesgo se define a partir de lo descrito por el IMTA (2015), establecidos cuatro rangos, que se describen a continuación:

1. Riesgo nulo, este se define para las zonas en que el peligro resulta nulo o para la vulnerabilidad muy baja y peligro bajo.
2. Riesgo bajo. Son aquellas zonas de la ciudad en que se presenta un peligro bajo y vulnerabilidad baja o media, o un peligro medio y una vulnerabilidad muy baja. Para este tipo de riesgo se considera que la pérdida del menaje de la casa será de 10%.

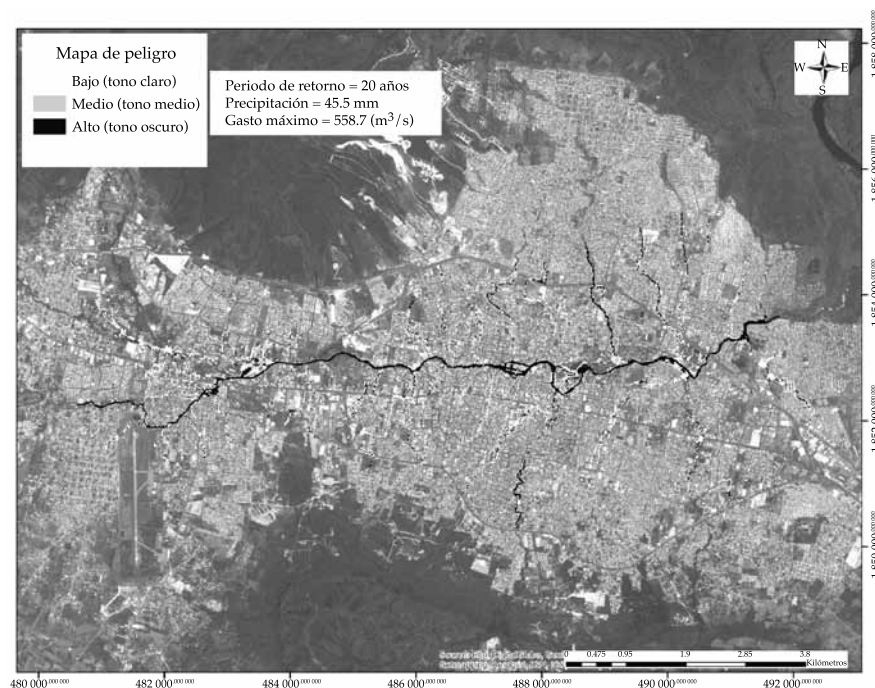


Figura 8. Mapa de peligro para un periodo de retorno de 20 años.

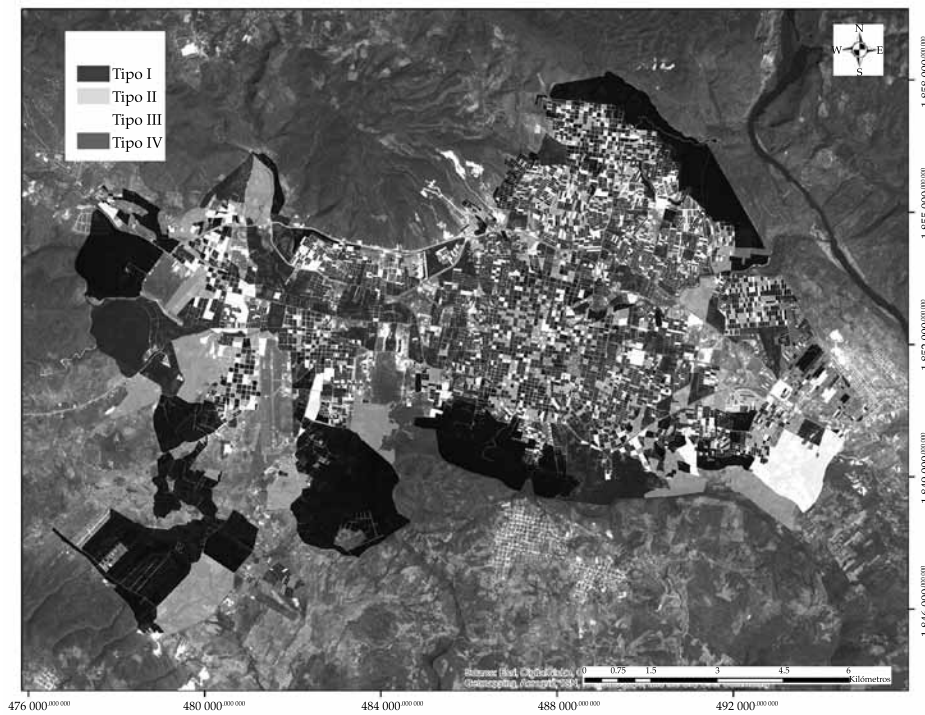


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad por tipo de vivienda, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

3. Riesgo medio. Se considera cuando el peligro es bajo y la vulnerabilidad alta; el peligro medio y las vulnerabilidades bajas o medias; el peligro alto y la vulnerabilidad muy baja. La pérdida del costo del menaje es de 50%.
4. Riesgo alto. Para cuando el peligro es medio y la vulnerabilidad alta, o el peligro alto y la vulnerabilidad es de baja a alta. La pérdida del menaje de casa resulta de 100%.

En la figura 8 se presenta uno de los mapas de riesgo por inundación generado a partir del modelo de simulación 1D-2D y de acuerdo con el criterio planteado en el cuadro 3. Como se puede observar, el mapa de riesgo con la simulación para un periodo de retorno de 20 años comienza a señalar los márgenes de los arroyos con peligro bajo a medio, y en las zonas urbanas se presenta en algunas zonas un peligro alto-medio; esto concuerda con los recorridos

de campo en los arroyos, donde se observó la invasión de construcciones en prácticamente todos los cauces.

Con los mapas antes descritos, es posible establecer un plan de contingencia ante inundaciones que se presenta a continuación.

Plan de contingencia ante inundaciones

Un resultado importante en la generación de mapas de peligro y riesgo es la generación de planes de contingencia, como rutas de evacuación seguras de personas hacia refugios ubicados en la zona urbana en estudio. Tales planes deben estar apoyados y generados con ayuda de mapas de peligro y riesgo por inundación, pues permiten identificar visualmente las zonas problemáticas de la ciudad, en donde los efectos de los escurrimientos pueden generar algún daño.

En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se cuenta con 17 zonas de refugio distribuidas en toda el área del municipio, con el objetivo

Cuadro 3. Criterio de riesgo en función del peligro y vulnerabilidad, y porcentaje de daño causado al menaje de la casa.

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%)

de proveer un lugar seguro a la población en caso de presentarse un desastre natural, como un evento de lluvia extrema, que producirá inundaciones en ciertas zonas urbanas. En la figura 10 se presenta la distribución de dichas zonas de refugio.

Para el establecimiento de la ruta de evacuación se toman en cuenta los refugios establecidos por Protección Civil del municipio. En el

análisis de las rutas de evacuación se considera el número máximo de personas que es capaz de albergar en caso de un siniestro contra los habitantes circunvecinos a dicho albergue. Después se evaluó la ruta óptima de evacuación, considerando los mapas de peligro por inundación y el desalojo de los habitantes más vulnerables (personas de la tercera edad y niños) que serían llevadas al refugio.

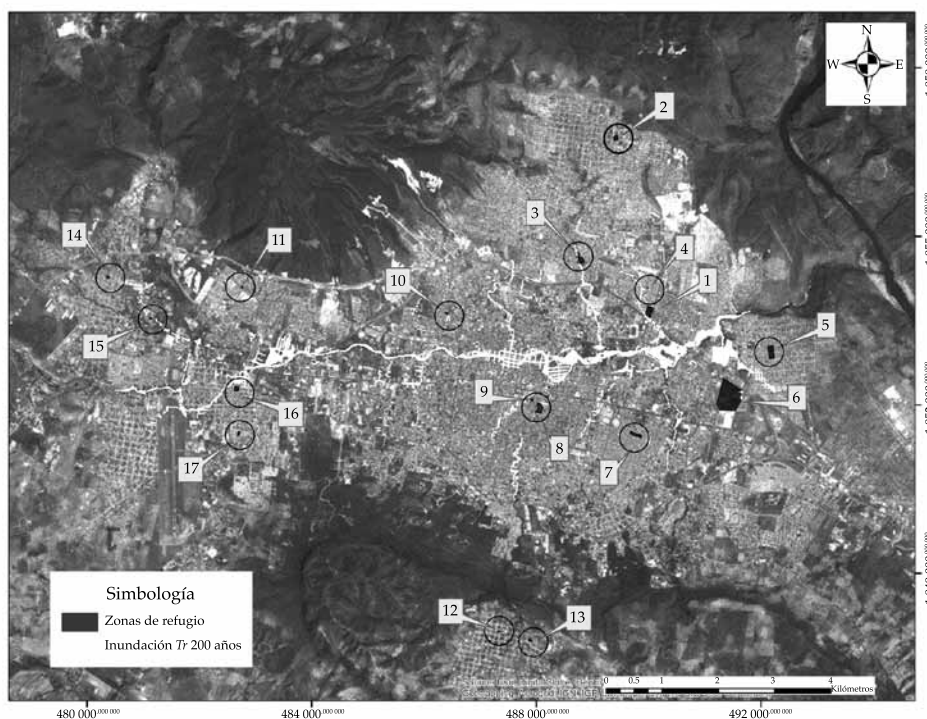


Figura 10. Zonas de refugio en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

A fin de decidir la ruta de evacuación de las personas hacia el refugio seleccionado, denominado Parroquia Santa Cruz, se determinó la vulnerabilidad de las viviendas mostradas en la figura 9, cuya zona de inundación presenta un peligro alto de acuerdo con su mapa de peligro por inundaciones. La ruta de evacuación considera ciertas restricciones de desplazamiento, como puentes que deben atravesar los peatones. Se indican aquellos que son seguros pasar a pie o los que presentan un problema. En este caso se señalan con un símbolo de rectángulos en tono oscuro los que no son viables para el cruce debido a que la inundación rebasa tal infraestructura. Asimismo, se muestran las calles con problemas de encharcamiento o inundación no viable para los peatones (las líneas en color oscuro señalan las calles por las que no se debe cruzar). De esta forma se obtiene la ruta de evacuación idónea, mostrada en la figura 11, marcada en color negro (ruta 7).

Además, se configura el nombre de las calles de la ciudad en cuestión con sus distancias entre

calles, con el fin de poder conocer las indicaciones para llegar al refugio (ver cuadro 4), donde se especifica que la distancia a recorrer es de 1.3 km y el tiempo promedio de recorrido se establece con el factor de que una persona puede caminar 4 km por hora. Por lo tanto, el tiempo de traslado se estima en 16 minutos.

Resultados

Evaluación del riesgo por inundación (daños a menaje de casa y población)

De acuerdo con el cuadro 5, se muestran los daños generados por los efectos de la inundación, expresado en costo, para diferentes periodos de retorno. Para una lluvia con periodo de retorno de dos años, el daño estimado en costo a menaje de casa se eleva a \$130.18 millones de pesos; para una lluvia con periodo de retorno de cinco años, los costos estimado por daño se calculan en \$180.73 millones de pesos, es decir, 1.8 veces más que los daños generados por la lluvia de periodo de

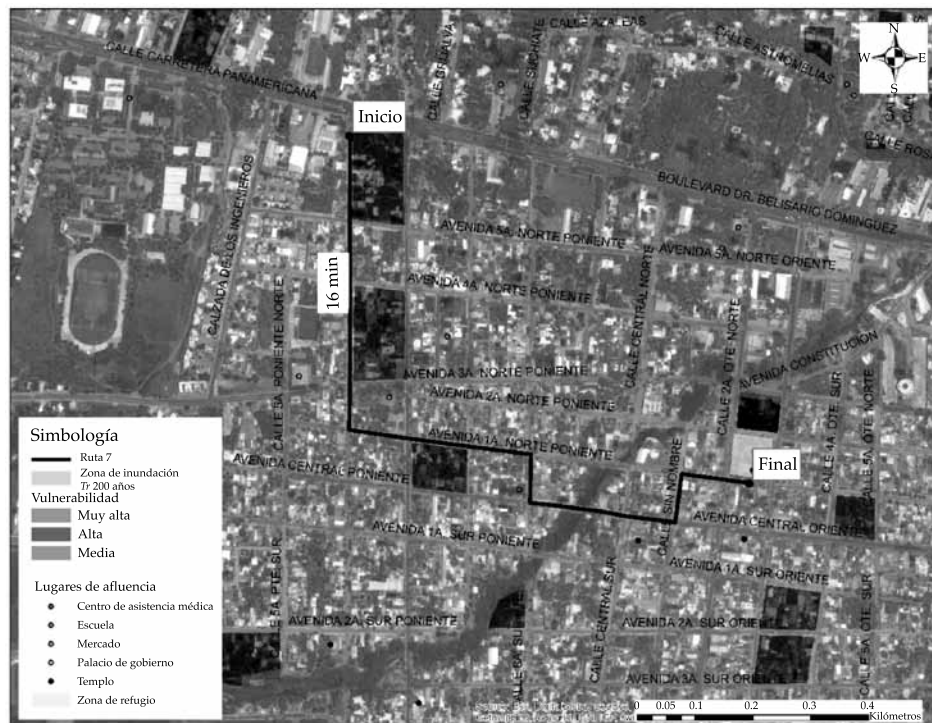


Figura 11. Ruta generada considerando vulnerabilidad de las viviendas y peligro por inundación.

Cuadro 4. Indicaciones de la ruta de la figura 11.

Ruta hacia un destino específico				
Núm.	Distancia acumulada (m)	Indicaciones	Distancia en el tramo (m)	Tiempo en el tramo (min)
1	0.0	Comience en el punto de inicio		
2	0.0	Vaya hacia el sur en la calle 4A. Poniente Norte hacia la cerrada Los Compadres	483.1	6
3	483.1	Gire a la izquierda en Avenida 1A. Poniente Norte	303.9	4
4	787.0	Gire a la derecha en la calle 1A. Poniente Norte	79.6	< 1
5	866.6	Gire a la izquierda en Avenida Central Oriente	160.8	2
6	1 027.3	Continúe en Avenida Central Oriente	81.7	< 1
7	1 109.1	Gire a la izquierda en la calle sin nombre	80.2	< 1
8	1 189.3	Gire a la derecha para continuar en la calle sin nombre	112.8	1
9	1 302.1	Finalice en el punto final, en la derecha		
Tiempo total de recorrido			16	min
Distancia total:			1 302.1	m

Cuadro 5. Costos estimados por daños al menaje de casa generado por inundaciones para diferentes periodos de retorno.

Tr	Daños por efectos de la inundación		Precipitación		Gasto	
	Costo (\$)	Incremento a los daños con respecto al periodo de retorno de dos años	(mm)	Incremento de la precipitación con respecto al periodo de retorno de dos años	(m ³ /s)	Incremento al gasto con respecto al periodo de retorno de dos años
2	103 186 717	1.0	15.2	1.00	130.5	1.0
5	180 738 281	1.8	26.3	1.73	283.7	2.2
10	240 290 948	2.3	35.7	2.35	406.7	3.1
20	320 759 221	3.1	45.5	2.99	558.7	4.3
50	420 260 048	4.1	59.0	3.88	929.5	7.1
100	498 560 851	4.8	69.2	4.55	1 052.0	8.1
200	522 752 625	5.1	79.6	5.24	1 318.5	10.1
500	642 767 432	6.2	93.3	6.14	1 705.0	13.1
1 000	697 009 619	6.8	103.7	6.82	2 026.0	15.5

retorno de dos años. Para la lluvia con periodo de retorno de diez años, el costo estimado de daños a menaje de casa asciende a \$240.29 millones de pesos, que resulta 2.3 veces el daño correspondiente a un periodo de retorno de dos años.

En el Instituto de Protección Civil (2004) se realizó, con recursos del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden) y del gobierno del estado de Chiapas, un estudio de análisis de alternativas para solucionar el

problema de inundaciones, a raíz de las lluvias en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. En el informe correspondiente se detallan los costos por daños provocados por las inundaciones para diferentes periodos de retorno. En el cuadro 6 se presenta una comparación de los costos por daños generados por las inundaciones para diferentes periodos de retorno estimados por el Instituto de Protección Civil con respecto a los costos estimados con el modelo 1D-2D.

Cuadro 6. Comparación de costos por daños generados por las inundaciones de acuerdo con el análisis hecho por el Instituto de Protección Civil y el modelo de simulación 1D-2D.

Periodo de retorno T_r en años	Costos por daños calculados por el Instituto de Protección Civil (\$en millones de pesos)	Costos por daños calculados con el modelo 1D-2D (\$millones de pesos)	Gasto en (m ³ /s) considerado en el análisis de daños por el Instituto de Protección Civil	Gasto (m ³ /s) calculado con el modelo 1D- 2D
2	-	\$103.19	-	130.5
5	187.40	\$180.74	234	283.7
10	316.10	\$240.29	358	406.7
20	405.30	\$320.76	494	558.7
50	477.80	\$420.26	689	929.5
100	524.10	\$498.56	846	1 052.0
200	-	\$522.75	-	1 318.5
500	625.20	\$642.77	1 243	1 705.0
1 000	668.30	\$697.01	1 423	2 026.0

Evaluación del riesgo por inundación (daños a la infraestructura de la vivienda)

Para la evaluación del daño, se considera el daño estructural que puede generarse en una casa de acuerdo con el análisis efectuado por el IMTA (2015), donde se especifica que a partir de una altura de 1.599 m de agua se pueden presentar daños por el efecto del cortante (vuelco) en las paredes de la vivienda (ver figura 12).



Figura 12. Falla en muro de mampostería en Cambridge, Reino Unido, diciembre de 2001. Fuente: Kelman (2002).

Esto reflejaría un costo por reparaciones, por lo que de acuerdo con Velez, Fuentes, Rubio y De Luna (2014), genera una curva de daño a la infraestructura con respecto al tirante, donde toma un valor de \$85 000 pesos. El cuadro 7 contiene los valores por el daño estructural, dependiendo del tipo de vivienda y vulnerabilidad.

Sobreponiendo el mapa de peligro con lluvia vinculada con un periodo de retorno que va desde los 10 hasta los 1 000 años, se puede establecer el costo total probable que puede generarse por daño estructural (ver cuadro 8 y figura 13).

Reubicación de las zonas de refugio

A consecuencia de estas afectaciones presentadas, se propone la reubicación de los refugios que corren peligro por inundación, a fin de evitar cualquier problema a consecuencia de la ubicación desfavorable en la que se encuentran. Se consideró que los sitios propuestos estuvieran en zonas cercanas a los anteriores, para que tenga la misma cantidad de personas a refugiarse. La figura 14 muestra la ubicación geoespacial de la reubicación de los refugios.

Es fundamental conocer la categoría de la estructura y su dirección, para que su localización sea fácil y eficiente. En el cuadro 9 se presentan los datos básicos de cada refugio.

Cuadro 7. Costo del daño estructural por tipo de vivienda.

Vulnerabilidad	Tipo de vivienda	Costo por daño estructural (\$)
Muy Alta	I	85 000
Alta	II	77 000
Media	III	69 000
Baja	IV	61 000
Muy Baja	V	53 000

Cuadro 8. Esperanza por daño estructural para los diferentes escenarios analizados.

Periodo de retorno (años)	Costo por daño estructural (\$ pesos)
1 000	119 384 730.00
500	92 353 700.00
200	72 497 465.00
100	66 737 420.00
50	60 775 110.00
20	53 353 900.00
10	39 344 400.00
5	35 343 520.00
2	24 886 410.00

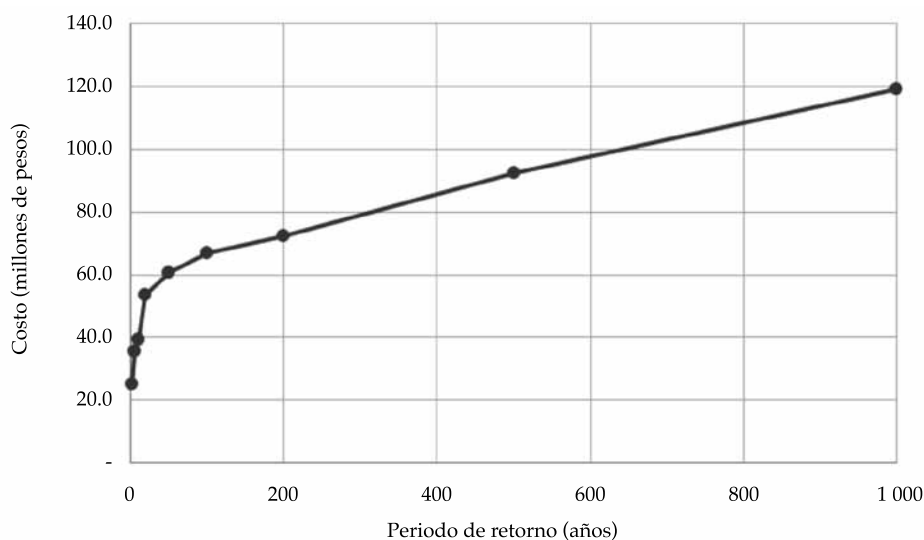


Figura 13. Curva daños estructurales-periodo de retorno.

Discusión

Análisis para la construcción de mapas de peligro por inundación

A partir de los resultados de los diferentes escenarios de lluvia realizados con el modelo

de simulación hidráulica bidimensional del caso de estudio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se hizo una comparación entre los diferentes criterios de peligro encontrados en la literatura y el propuesto en este artículo. Se compara el área de inundación que calcula cada criterio para los diferentes escenarios.

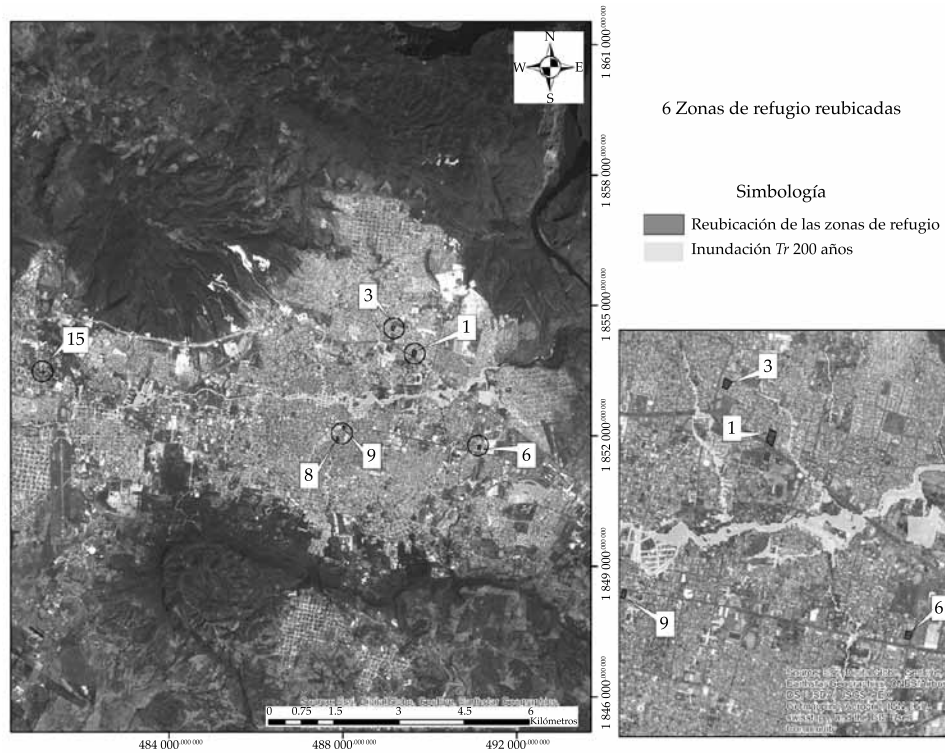


Figura 14. Reubicación de las zonas afectadas.

Cuadro 9. Zonas de refugio reubicadas.

Zonas de refugio reubicadas, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas				
Núm.	Categoría	Dirección	Hab.	Área (m ²)
1	Escuela Primaria Federal Cuauhtémoc	Libramiento Norte Oriente y calle Río Lacantum	100	11 904.01
3	Escuela primaria Juan Sabines Gutiérrez	Avenida Cardenia y calle Geranio	50	7 693.48
6	Escuela	Calzada Andrés Serra Rojas y calle Costa Rica	100	4 755.19
8	Escuela	Avenida 3A. Sur Oriente y calle 4A. Oriente Sur	200	3 979.80
9	Escuela	Avenida 1A. Sur Oriente y calle 4A. Oriente Sur	800	3 808.51
15	Templo	Avenida Chiapas y calle Guerrero	100	1 613.61
Total			1 650	

En la figura 15 se muestra el área con peligro bajo-nulo para los diferentes criterios de peligro. Destaca el criterio de peligro de FEMA para periodos de retorno menores a cien años, que abarca un área menor de peligro por inundación. En el periodo de retorno de cien años, el criterio de la OFEE es el que abarca un área mayor de peligro, seguido del criterio de Dórrigo y el propuesto por el IMTA-Conagua-Conacyt

(2015). Para periodos de retorno mayores a 200 años, los criterios de Dórrigo y OFEE presentan las áreas mayores de peligro por inundación.

En cuanto al peligro medio, las áreas de peligro se muestran en la figura 16. El criterio de la OFEE presenta un área mayor de peligro nulo, seguido del criterio de la FEMA; en tercer lugar está el criterio del IMTA-Conagua-Conacyt, y por último el de Dórrigo.

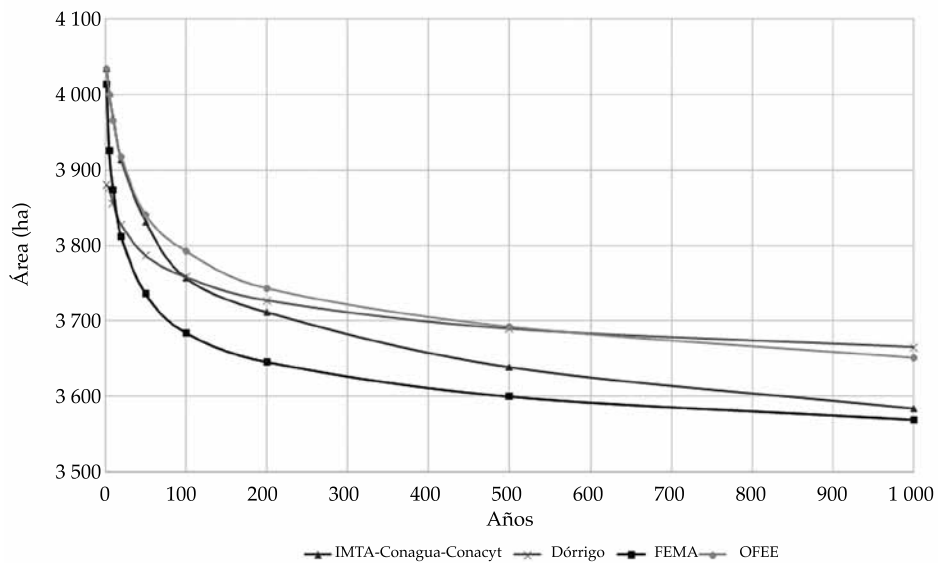


Figura 15. Nivel de peligro por inundación (bajo).

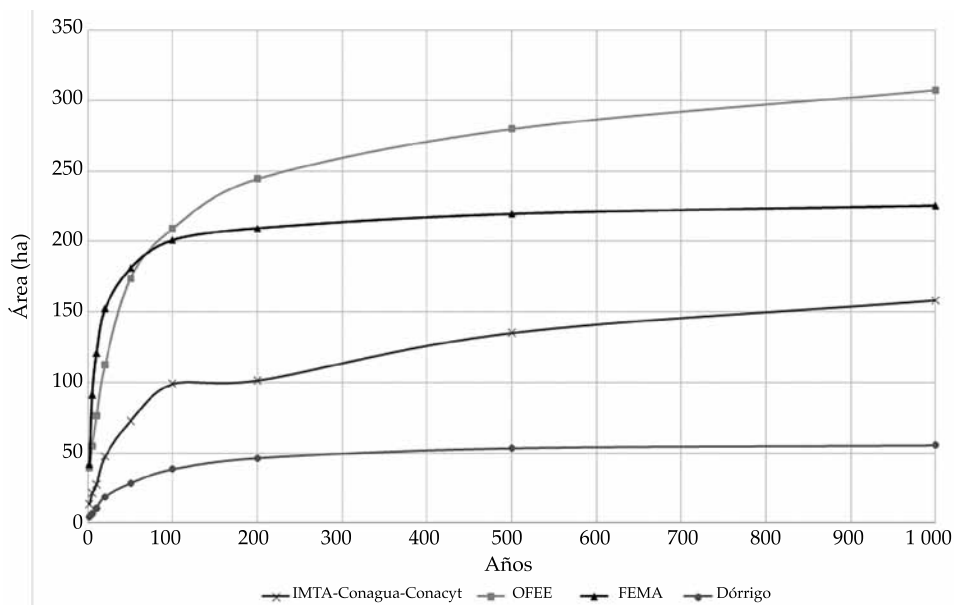


Figura 16. Nivel de peligro medio por inundación.

En cuanto a las áreas de peligro alto, mostrada en la figura 17, el criterio de Dórrigo es el que abarca la mayor área, seguido del criterio de FEMA, IMTA-Conagua-Conacyt y por último el de OFEE.

Revisión de las zonas de refugio

La configuración espacial de las zonas de refugio en Tuxtla Gutiérrez se establecieron después de un evento hidrometeorológico

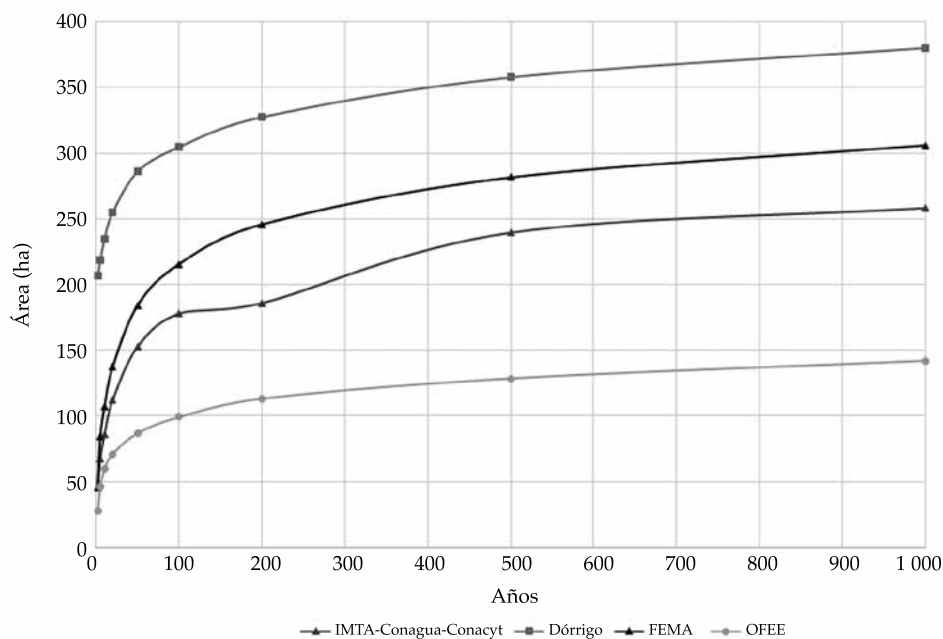


Figura 17. Nivel de peligro alto por inundación.

extremo (huracán *Stan*), que generó graves problemas en el municipio, por lo cual se dispusieron refugios en toda el área. Diez años después se requiere conocer si la zona no se encuentra en peligro por inundación, por lo que se necesita la revisión de cada uno de estos refugios.

La revisión a los refugios se efectúa con una lluvia de diseño vinculada con un periodo de

retorno de 200 años (la más desfavorable entre las analizadas). De los 17 refugios establecidos, sólo se presentan afectaciones en seis de ellos. El cuadro 10 muestra la localización de los refugios afectados.

La figura 18 señala la ubicación geoespacial de los seis refugios afectados a causa de las inundaciones vinculadas con un periodo de retorno de 200 años.

Cuadro 10. Zonas de refugio afectadas a causa de una lluvia vinculada con un T_r de 200 años.

Zonas de refugio afectadas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas				
Núm.	Nombre	Dirección	Personas	Área (m ²)
1	Casa Taller de Artes y Oficios para Niños	Libramiento Norte Oriente y Blvd. Fidel Velázquez 1a, Col. 24 de Junio	100	17 114.39
3	Casa del Abuelo	Andador Los Cocos 42, Col. Albania Baja	50	13 660.85
6	Centro de Convenciones	Calzada Andrés Serra Rojas y Libramiento Norte	100	173 801.88
8	Casa Pastoral	3a Sur y 4a Oriente, Plazuela San Roque	200	14 203.2
9	Auditorio Municipal	2a Sur entre 3a y 4a Oriente, Col. Centro	800	1 422.86
15	Plan de Ayala	Blvd. Vicente Fox Quesada, Col. Plan de Ayala	100	996.28
Total			1 650	

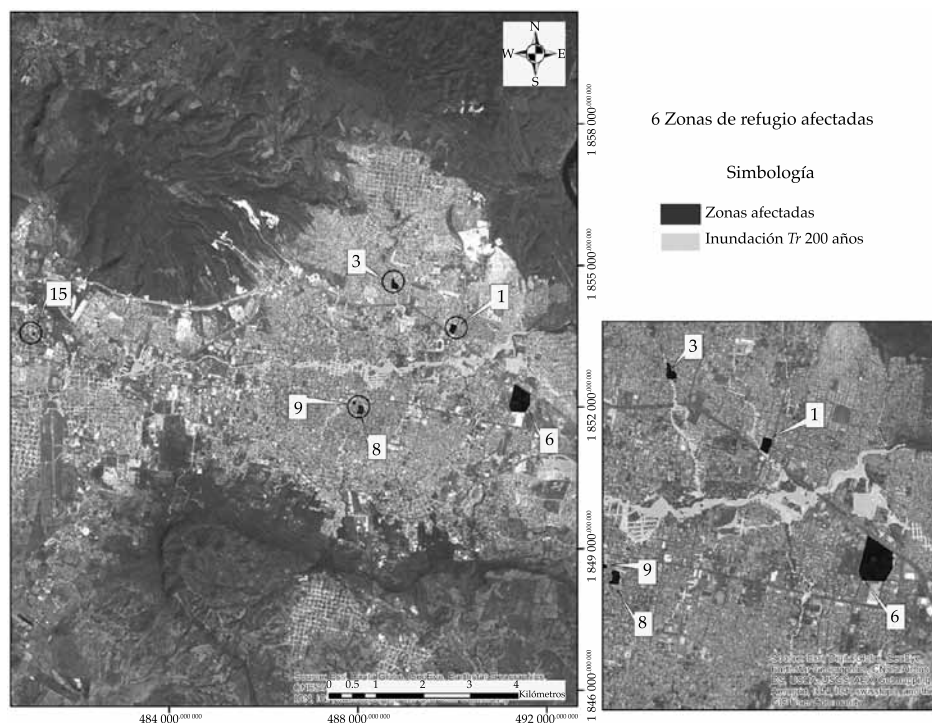


Figura 18. Zonas de refugio afectadas a causa de la lluvia para un T_r de 200 años.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para la construcción de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas, integrados por la combinación de los mapas de peligro y vulnerabilidad. La aportación de estos mapas radica fundamentalmente en la consideración para los mapas de peligro de los factores del deslizamiento y vuelco que se puede presentar por las inundaciones. En los mapas de vulnerabilidad se puede obtener un análisis de bajo costo enfocado a conocer la vulnerabilidad de la población e infraestructura. Además, esta metodología considera el establecimiento de refugios y trazo de rutas de evacuación, análisis de daños a la infraestructura y menaje de las casas.

En cuanto a los criterios de peligro, es importante considerar en la generación de mapas de peligro por inundación un peligro nulo, pues ciertos tirantes y velocidades no afectan la población e infraestructura, lo que hace más representativo el análisis de tales mapas.

Los modelos de simulación hidráulica se vuelven una herramienta importante en el análisis de inundaciones, donde es posible analizar toda una zona urbana en su conjunto y considerar de forma integral el escurrimiento en calles, infraestructura pluvial existente, arroyos y ríos.

Los mapas de riesgo por inundación permiten calcular los costos probables por daños por inundación en menaje de casa e infraestructura; asimismo, se vuelven una herramienta para determinar rutas de evacuación óptimas de la población hacia los refugios en la ciudad.

Agradecimientos

El estudio que se reporta en este artículo fue realizado en el marco del proyecto "Estudio de riesgo de inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana", financiado por el Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua Conacyt-Conagua. Los autores agradecen a Conacyt y Conagua tal financiamiento, y el apoyo brindado para alcanzar los objetivos y resultados fijados en este proyecto.

Referencias

- Alcocer-Yamanaka, V., Rodríguez, J. M., Albornoz, P. M., Maldonado, J., López, J. A., Alonso, J. A., & Quiñones, J. R. (julio-septiembre, 2012). Manejo de aguas pluviales de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Revista Agua en Quintana Roo*, 2(4), 9-14.
- Cenapred (2004). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos* (p. 386). México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cenapred (2006). *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Sistema Nacional de Protección Civil.
- Cenapred (2007). *Inundaciones* (pp. 3-32). Series de fascículos. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- FEMA (2009). Recuperado en abril de 2010 de <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3587>.
- Gieck, K. (1981). *Manual de fórmulas técnicas* (p. 105). Sección A-5. México, DF: Rep. y Servicios de Ingeniería S.A.
- IMTA (2015) *Estudio de riesgos de inundaciones en zonas urbanas de la república mexicana del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (FSIDSA) Conagua-Conacyt. Clave del proyecto: Conagua-2011-167009*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de <http://www.inegi.gob.mx>.
- Instituto de Protección Civil (2015). Recuperado de <http://www.proteccioncivil.gob.mx>.
- Instituto de Protección Civil (2004). *Estudio de aprovechamiento hidráulico integral de contro de inundaciones de la cuenca del río Sabinal*. Tuxtla Gutiérrez, México: FOPREDEN y Gobierno del Estado de Chiapas.
- Instituto Estatal del Agua (s.f.). *Instituto Estatal del Agua, Chiapas*. Recuperado de <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/cuencasabinal>.
- Kelman, I. (2002). *Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England*. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Cambridge, UK: University of Cambridge.
- Loat, R., & Petrascheck, A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans la cadre des activités de l'aménagement du territoire, Dangers Naturels*. Bienne, Switzerland: Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE), Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire (OFAT), Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage (OFEFP).
- Nanía, L. S. (1999) *Metodología Numérico Experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Polytecnica de Catalunya.
- NSW (2005) *Floodplain Development Manual, the Management of Flood Liable Land*. Queensland, Australia: News South Wales Government, Department of infrastructure, Planning and Natural Resources.
- Ribera, L. R. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tencológicas. *Doc. Anál. Geogr.* 43, 18.
- Velez, M., Fuentes, M., Rubio, G., & De Luna, C. (2014). *Mapas de peligro por inundación como herrranienta para la evaluación del riesgo de daño de viviendas*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Dirección institucional de los autores

Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka
M.I. Víctor Javier Bourguett Ortiz

Comisión Nacional del Agua
Av. Insurgentes Sur 2416, Delegación Coyoacán
04340 Ciudad de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 51744 000
yamanaka@conagua.gob.mx
vbourgue@gmail.com

M.I. José Manuel Rodríguez Varela
M.I. Oscar Jesús Llaguno Guilberto
M.I. Pedro Misael Albornoz Góngora

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550, Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensiones 516 y 366
manuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx
oscar_llaguno@tlaloc.imta.mx
ptrsmssl@gmail.com