



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

**“INCREMENTO DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE
LLUVIAS INTENSAS EN MÉXICO POR CAMBIO EN LA
COBERTURA DEL SUELO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA:

ÁNGEL EMMANUEL ZÚÑIGA TOVAR

TUTOR

Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda (IGg, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. Ramón Domínguez Mora (IIngen, UNAM)

Dr. David Alberto Novelo Casanova (IGeof, UNAM)

Dr. Baldemar Méndez Antonio (ITG, Sonora)

Dr. Javier Enrique Thomas Bohórquez (Univalle, Colombia)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

OFICIO PCT/ESR/1470/17

Asunto: Propuesta de jurado para examen de grado

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACION ESCOLAR
U.N.A.M.
P R E S E N T E

El Comité Académico de Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 30 de mayo de 2017, autorizó, designar a los siguientes investigadores como jurado para el examen de grado del estudiante de Doctorado en Ciencias de la Tierra **ANGEL EMMANUEL ZÚÑIGA TOVAR**, con número de cuenta 99541073, quien defenderá la tesis titulada "Incremento de la vulnerabilidad y riesgo ante lluvias intensas en México por cambio en la cobertura del suelo", misma que fue desarrollada bajo la dirección del Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda.

PRESIDENTE:	Dr. Ramón Domínguez Mora
VOCAL:	Dr. David Alberto Novelo Casanova
SECRETARIO:	Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda
SUPLENTE:	Dr. Baldemar Méndez Antonio
SUPLENTE:	Dr. Javier Enrique Thomas Bohórquez

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 3 de octubre de 2017.

COORDINADORA DEL PROGRAMA



DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

ESR'achg

Dedicatoria

A la memoria de mi madre, quien ya no está conmigo, pero me acompaña siempre.

A mi familia, que siempre está a mi lado.

A mi novia, por ser mí soporte en momentos difíciles.

A mis amigos, que estimo y quiero mucho.

Agradecimiento

Al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, por su enseñanza, apoyo, paciencia y guía durante mi formación académica.

A los Dres. Ramón Domínguez Mora, David Alberto Novelo, Casanova, Baldemar Méndez Antonio y Javier Enrique Thomas Bohórquez por su interés, por su lectura y por los comentarios que significaron mejoras y el enriquecimiento del presente trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado en Ciencias de la Tierra por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesionista.

Al CONACYT por haberme otorgado una beca que permitiera mi permanencia y culminación de estudios de Doctorado.

A mis amigos por estar a mi lado y por su cariño. Y a todos aquellos que de alguna forma han sido parte de esta etapa de mi vida.

Quando un Rey Dominador ataca un estado poderoso, coloca al enemigo en una situación en la que le resulta imposible concentrarse. Infunde respeto al enemigo e impide que sus aliados se reúnan con él (Sun Tzu 400 – 300 a. C.).

En las batallas, el orden y el desorden dependen de la organización, el valor y la cobardía, de las circunstancias; la fuerza o la debilidad, de los despliegues... (Sun Tzu 400 – 300 a. C.).

El que posee poca sabiduría debe prepararse contra el enemigo; el que dispone de sabiduría obliga al enemigo a prepararse contra de él (ZUTHA, 2016).

ÍNDICE

RESUMEN	1
----------------------	---

ABSTRACT	1
-----------------------	---

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 El problema de las inundaciones	3
1.2 Tipos de inundaciones	4
1.3 Peligro, vulnerabilidad y riesgo	5
1.4 Riesgo y desastre	12
1.5 Gestión del riesgo	13
1.6 Objetivos	14

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA Y DATOS

2.1 La dinámica de las lluvias en México	15
2.2 Datos para caracterizar el peligro	16
2.2.1 Datos del Global Climate Project (GPCP)	17
2.2.2 Esquema de asimilación de datos tipo Cressman	17
2.3 Caracterización de lluvias intensas (casos de estudio)	19
2.4 Índice de vulnerabilidad	19
2.4.1 Datos para caracterizar la vulnerabilidad	20
2.4.2 Método del número de curva (NC)	22
2.4.3 Datos de cobertura de suelo (indicador dinámico)	27
2.4.4 Datos del terreno (Indicadores estáticos)	29

CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL RIESGO ANTE LLUVIAS INTENSAS EN MÉXICO

3.1 Representación del peligro por lluvias intensas	33
3.1.1 Cambio en el peligro por lluvias intensas	36
3.2 Índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas	39
3.2.1 Cambio en el índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas	53

CAPÍTULO 4 ÍNDICE DE RIESGO Y GESTIÓN DEL RESGO ANTE LLUVIAS INTENSAS EN MÉXICO

4.1 Índice de riesgo ante lluvias intensas..... 55

4.2 Cálculo del índice de riesgo ante lluvias intensas..... 56

4.2.1 Cambio en el índice de riesgo ante lluvias intensas..... 58

4.3 Modelo de riesgo (caso de estudio)..... 59

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 68

CAPITULO 6 REFERENCIAS..... 72

ANEXO Artículo “Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change”..... 84

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura I. Promedio de informes mensuales de inundaciones en México. Región norte del país (barras en color gris oscuro) y en el centro – sur (barras de color gris claro), entre 1970 y 2013, y precipitaciones mensuales (mm) en el centro - sur (línea punteada corta) y en el norte (línea punteada larga) de México (fuentes: DesInventar, 2013; CONAGUA, 2015).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura II. Número anual de inundaciones en México entre 1998 a 2013 documentado por CENAPRED (barras en gris oscuro) y para el periodo 1970 a 2013 documentadas por DesInventar (barras en gris claro). Los puntos corresponden a estimaciones de deforestación en México (pérdida en km2) entre 1970 y 2011 (INEGI, 2011).....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.1 Estaciones climatológicas para México. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2015).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.2 Diagrama del Radio de influencia utilizado para realizar el análisis objetivo tipo Cressman, tomado de López (2012).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.3 Esquema de asimilación de datos obtenido para la Ciudad de México (ejemplo septiembre 2007).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.4 Diagrama de flujo para obtener el índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas para las cuencas de México.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.5 Modelo de escurrimiento idealizado que relaciona valores de número de curva con intensidades de lluvia para obtener la lámina de escurrimientos.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.6 Diagrama de flujo utilizado para procesar y obtener valores de número de cuerva para los suelos de México.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.7 Distribución de valores de compacidad para las cuencas de México.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.8 Distribución de valores de pendiente del terreno para México, establecidos considerando criterios morfométricos.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.1 Distribución de valores de P95 (mm / día) para México. Periodo 1980-2010.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.2 Distribución de valores de P95 (mm / día) para México para los periodos (a) 1980 – 1990 y (b) 2000 – 2010.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.3 Distribución de valores de P95 entre 1980-1990 y 2000-2010 (Factor de cambio)....</i>	<i>37</i>
<i>Figura. 3.4 Distribución del número de reportes de inundaciones por lluvias intensas para México (CENAPRED 2014 y DesInventar, 2013) para el periodo (a) 1980 y (b) 2010.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.5 Distribución de la superficie (km2) para las diferentes coberturas de suelo para México, y factor de cambio obtenido de comparar los periodos 1970 y 2010.....</i>	<i>40</i>

<i>Figura 3.6 Distribución espacial de los suelos para México. Periodos 1970 (a) y 2010 (b).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.7 Distribución espacial de los diferentes grupos hidrológicos (GH) para México. Periodo 1979 y 2010.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.8 Distribución espacial de la cobertura de suelo según su tipo hidrológico. Resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.9 Distribución de valores de escurrimiento para México de acuerdo al factor de cambio en la cobertura del suelo y capacidad de infiltración del suelo como resultado de comparar el periodo 1970 – 2010.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.10 Distribución de cuencas hidrográficas con impacto por cambio en la cobertura natural del suelo (en porcentaje) para el periodo 2010.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.11 Distribución de valores de número de curva obtenidos para México. Periodos a) 1970 y b) 2010.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.12 Distribución de la respuesta hidrológica para las diferentes coberturas de suelo, considerando diferentes intensidades de precipitación y valores de número de curva.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.13 Distribución espacial de valores de número de curva (> 60) con mayor potencia para generar escurrimientos para el periodo 2010.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.14. Modelo hidrológico idealizado que muestra la respuesta hidrológica (hidrográma) para dos cuencas (circular y alargada), considerando diferentes grados de pendiente. (Fuente: internet).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.15. Índice de Vulnerabilidad por escurrimientos ante lluvias intensas para las cuencas de México. a) 1970 y b) 2010.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.16 Distribución del índice de vulnerabilidad como resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.1. Diagrama esquemático de los componentes para la estimación del riesgo de inundación.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.2 Distribución de valores del índice de riesgo por inundaciones para las cuencas de México. a) 1970 y b) 2010.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.3 Distribución de valores de índice de riesgo como resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.4. Cambio de cobertura de la tierra en la cuenca de Papagayo y Bahía de Acapulco, a) en 1970, y b) en 2000.....</i>	<i>60</i>

Figura 4.5 Distribución de valores del índice de vulnerabilidad para la cuenca de Papagayo y Bahía de Acapulco, a) en 1970, y b) en 2000.....61

Figura 4.6 Distribución de valores del índice de riesgo de inundaciones alrededor de la Bahía de Acapulco, Guerrero, utilizando para su evaluación, el índice de vulnerabilidad y el P95. a) 1970 y b) 2010.....62

Figura. 4.7 Imagen de satélite a) para un período anterior al 15 de septiembre de 2013 y b) días después de la inundación de septiembre de 15 de septiembre de 2013 (fuente: Rapideye Image).....63

Figura. 4.8 Series cronológicas del número de eventos en que la precipitación en tres días consecutivos fue superior a 100 mm (línea discontinua larga), el índice de vulnerabilidad (líneas discontinuas cortas), la estimación del riesgo (línea continua) y el número de informes de inundaciones: A) Boca del Río, Veracruz; B) Tapachula, Chiapas; C) Monterrey, Nuevo León; y d) Acapulco Guerrero. Se anexa función de ajuste exponencial.....67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de valores de índice de vulnerabilidad.....22

RESUMEN

Los desastres causados por inundaciones causan graves daños e impactos en la sociedad e infraestructura de México. Los esfuerzos realizados para reducir la magnitud de los desastres se han enfocado a responder a la emergencia, sin considerar el contexto de vulnerabilidad previo a la ocurrencia de las lluvias intensas, en su dimensión multifactorial y dinámica. El presente estudio propone evaluar la vulnerabilidad y el riesgo ante lluvias intensas, considerado factores físicos de las cuencas y su proceso de cambio en los últimos 40 años. El desarrollo de un método para estimar un índice de vulnerabilidad y riesgo permitió establecer indicadores relacionados con las características físicas del territorio. El método relaciona cambios en la cobertura natural del suelo, la pendiente del terreno y la compactación (forma) de las cuencas como factores que pueden aumentar o reducir los escurrimientos superficiales generados por lluvias intensas. El producto del índice de vulnerabilidad y el utilizado para caracterizar el peligro (lluvias intensas) resulta en un índice de riesgo (modelo). La capacidad del modelo de riesgo de inundaciones para México se obtuvo comparando la frecuencia temporal y distribución espacial observada de las inundaciones para el periodo 1970 – 2010. El proceso de validación muestra una buena relación entre la frecuencia observada y modelada de las inundaciones, como resultado de la transformación de la cobertura de suelo natural como un factor que incrementa el número de estos desastres. Por lo tanto, la gestión del riesgo de inundaciones debe de incluir medidas estructurales y no estructurales como la restauración de cuencas y planificación del territorio.

ABSTRACT

Disasters caused by floods generate serious damage and impacts on Mexico's society and infrastructure. Efforts to reduce the magnitude of disasters have focused on responding to the emergency, without considering the context of vulnerability prior to the occurrence of intense rains, in its multifactorial and dynamic dimension. The present study proposes to evaluate the vulnerability and the risk to intense rains, considered physical factors of the basins and their process of change in the last 40 years. The development of a method to estimate an index of vulnerability and risk allowed to establish indicators related to the physical characteristics of the territory. The method relates changes in the natural cover of the soil, the slope of the terrain and the compactness (model) of the basins as factors that can increase or reduce superficial

runoff caused by heavy rains. The product of the vulnerability index and that used to characterize the hazard (heavy rains) results in a risk index (model). The capacity of the flood risk model for Mexico is obtained by comparing the temporal frequency and observed spatial distribution for floods for the period 1970 - 2010. The validation process shows a good relationship between observed and modeled flood frequency, as a result of transformation of the cover of natural soil cover as a factor that increases the number of these disasters. Therefore, flood risk management should include structural and non-structural measures such as watershed restoration and land planning.

INTRODUCCIÓN

1.1 El problema de las inundaciones

En décadas recientes, los desastres por inundaciones han representado un grave problema social, económico y ambiental (ISDR, 2005) debido a su recurrencia (Istominia *et al.*, 2005; Messner y Meyer, 2006; Munich RE, 2012; UNISDR, 2012). Este tipo de desastres, parece no estar asociado únicamente con un ciclo hidrológico más intenso relacionado con un mayor número de eventos de lluvia intensa, sino también con cambios en la dinámica de los ecosistemas que proveen un servicio de regulación hidrológica que se modifica (reduce) como resultado de las actividades humanas (asentamientos humanos, agricultura, deforestación, etc.) (Pérez, 2002). En particular, el proceso de deforestación se ha observado que disminuye la capacidad de los suelos para regular los escurrimientos generados por lluvias intensas, debido a que dichos cambios en la cobertura del suelo disminuyen su capacidad de infiltración (Solín y Nováček, 2011; Gholami, 2013; Gholami, 2013). Por otro lado, el transporte de más sedimentos por erosión hídrica hacia la parte baja de los ríos, reducen su capacidad para transportar los escurrimientos y con ello, se genera un mayor riesgo de inundaciones que representan impacto directos en las poblaciones e infraestructura expuesta en áreas inundables o próximas a cauces de ríos y valles (Walling, 1999; Clark, 2000; Singh *et al.*, 2011).

Comúnmente, la tendencia positiva en el número de desastres relacionados con el clima en todo el mundo, se ha asociado con el cambio climático y a una mayor frecuencia de precipitaciones extremas (Huhne y Slingo, 2011; Hirabayashi *et al.*, 2013), bajo un enfoque naturalista del problema (Cannon, 1994). Sin embargo, la incertidumbre en las proyecciones del ciclo hidrológico y sus impactos, como resultado de cambios en la dinámica del territorio y del clima requiere ser analizada con mayor detalle (Field, 2012). Se ha observado que la vulnerabilidad ante lluvias intensas en regiones montañosas y costeras se ha incrementado como consecuencia de la pérdida de la cobertura vegetal de los suelos naturales, convirtiendo áreas forestales en agrícolas, ganaderas y de asentamientos humanos (Armenta Montero *et al.*, 2012), posibilitando aumento de escurrimientos y mayor posibilidad de inundaciones.

Como resultado del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (UNDRO) entre 1990 y 1999, se reconoció que el paradigma tradicional de “protección contra

las inundaciones” (respuesta al desastre solamente) que se había usado hasta entonces era inapropiado (UNDRO, 1991; Plate, 2002). Por ello, se planteó emplear un enfoque de gestión de riesgo que permitiera reducir los daños causados por las inundaciones. De esta forma, en años recientes, el estudio de los desastres considerados como naturales ha cambiado, de una perspectiva naturalista a aquella en donde se aborda el estudio del riesgo desde un contexto de vulnerabilidad donde el proceso de las actividades humanas posibilita un aumento del riesgo de desastres (Cannon, 1994).

1.2 Tipos de inundación

Se considera como inundación, un evento en el que un área normalmente seca es ocupada por una lámina de agua, como resultado de los escurrimientos que sobrepasan la capacidad de los cauces para su conducción, produciéndose su desbordamiento. Las avenidas que pueden generar inundaciones, debido a su temporalidad se pueden considerar como: súbitas (flash flood) con periodos de minutos a horas, o lentas con duración de horas a días. Ambos tipos de inundación pueden generar daños y pérdidas en la población e infraestructura (WMO, 1974; 2012; NOAA, 2015).

De acuerdo a sus características y origen, las inundaciones pueden ser clasificadas en:

- i) Inundaciones pluviales, son originadas por lluvias con duración de horas o días que pueden exceder la capacidad de infiltración de los suelos acumulándose el agua de lluvia en zonas de planicie o zonas bajas de cuencas. Estas inundaciones son resultado de la presencia de ciclones tropicales o sistemas convectivos de mesoescala y ondas del este que generan lluvias intensas durante el verano (Magaña, 2004), y por los llamados “Nortes” (Schultz, 2005; Pérez *et al.*, 2014) o sistemas convectivos de latitud media que ocurren durante el invierno.
- ii) Inundaciones fluviales, corresponden a un proceso natural que se presenta cuando el nivel del agua que es conducido por un río sobrepasa su capacidad de conducción, desbordando e inundando las áreas cercanas al cauce (Tockner *et al.*, 2010). Este proceso resulta de lluvias intensas que generan escurrimientos que sobrepasan la capacidad de infiltración de los suelos y su conducción por el cauce de los ríos.

- iii) Otro tipo de inundaciones son resultado de un aumento del nivel del mar (marea de tormenta) causado por vientos fuertes como resultado principalmente de la ocurrencia de ciclones tropicales. Se caracterizan por inundar áreas cercanas a la línea de costa.
- iv) Generadas por Tsunamis. Inundaciones que abarcan grandes extensiones de costa como resultado de un evento sísmico o volcánico que genera grandes olas.
- v) Causadas por Fallas en Infraestructura hidráulica. Se caracterizan por la combinación de eventos de lluvia intensa y fallas hidráulicas en obras de protección y presas (Aparicio, 2009; Rivera-Trejo, 2010).

En este trabajo, se abordan las inundaciones resultado de lluvias intensas que producen escurrimientos que se acumulan en zonas bajas, y que se relacionan con sistemas convectivos intensos o duraderos. Por ejemplo, relacionados con la ocurrencia de ciclones tropicales durante el verano. Si bien los eventos de lluvia intensa presentan una tendencia positiva en gran parte del país, estos ocurren dentro un contexto cada vez más vulnerable, relacionado principalmente con el proceso de cambio de uso de suelo natural, como la deforestación, lo que se expresa en un mayor número de impactos negativos en la población e infraestructura en México.

1.3 Peligro, vulnerabilidad y riesgo

El estudio de los riesgos por fenómenos naturales ha sido ampliamente discutido dentro de los diferentes campos del conocimiento científico de las ciencias naturales y sociales que buscan describir los procesos generadores del riesgo (UNISDR, 1999; Maskrey, 1997; Cardona, 2003). En consecuencia, los diversos enfoques han resultado en diferentes formas de expresión e interpretación del riesgo y de las variables que lo integran (peligro y vulnerabilidad). Diversos estudios han sugerido la necesidad de abordar el análisis de los riesgos de forma multidisciplinaria, con el propósito de mejorar el entendimiento de los procesos que lo originan y no simplemente abordar el riesgo como un resultado (Zúñiga, 2009).

Por ello, este trabajo analiza el riesgo de inundaciones para México como resultado de evaluar y estimar los componentes que lo integran (peligro y vulnerabilidad) a partir de una perspectiva

multifactorial y dinámica que permita establecer en qué medida el riesgo responde mayormente al peligro por lluvias intensas o a un incremento de la vulnerabilidad.

a) **Peligro**

El concepto peligro se utiliza para expresar la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con una cierta intensidad capaz de afectar un sistema expuesto. Sin embargo, este concepto ha sido objeto de debate entre los estudiosos del tema, debido a que es común utilizarlo como sinónimo del concepto de amenaza, el cual se emplea para definir la materialización del peligro. Es decir, cuando el peligro deja de ser una probabilidad para manifestarse en tiempo y espacio en una región, produciendo daños y pérdidas en una sociedad vulnerable (Lavell, 2004; Cardona, 2003).

Por ello, el estudio del peligro como indicador probabilístico y la amenaza como un indicador determinista pueden ser utilizados para establecer indicadores de riesgo. El uso de estos indicadores, permite establecer unidades de análisis: *i)* la magnitud que determina el potencial destructivo del fenómeno, y *ii)* la intensidad que establece la fuerza en que el fenómeno se puede presentar en un sitio determinado (Zúñiga, 2009). Finalmente, el peligro como indicador del riesgo puede ser utilizado para definir sitios donde una sola magnitud puede expresar diferentes grados de intensidad.

b) **Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad como componente de la ecuación del riesgo, representa un indicador que puede ser modificado, y con ello, el riesgo de una región. La vulnerabilidad tiene su mayor campo de aplicación dentro del estudio de los riesgos en la evaluación y caracterización socioeconómica de la población e infraestructura, permitiendo evaluar su fragilidad y grado de exposición ante un fenómeno de carácter natural (Cardona, 2003; Wilches-Chaux, 1998).

En términos generales, la vulnerabilidad se puede entender como la condición interna de un sistema o unidad de análisis, resultado del modelo de desarrollo económico predominante dentro de una sociedad, con impacto directo en la población, economía, infraestructura, medio

ambiente, etc., (Zúñiga, 2009). Estas condiciones comúnmente están representadas por las siguientes consideraciones:

- Grado de exposición (tiempo): corresponde a la probabilidad de ser afectado un sistema.
- Predisposición (espacio): define espacialmente el grupo con mayor posibilidad de ser afectado.
- Carácter selectivo (status): define el grupo con mayor capacidad de recuperación (resiliencia).

Para el presente estudio, la vulnerabilidad se centró en la degradación de las cuencas hidrográficas como resultado de la presión derivada de los diferentes modelos de desarrollo económico de las ciudades, que se expresa como la transformación del territorio y la modificación de su dinámica natural como consecuencia del cambio en la cobertura del suelo. Estas modificaciones representan un aumento de la susceptibilidad (fragilidad) de las cuencas ante el impacto de un peligro de tipo natural (lluvias intensas), aumentando la posibilidad de inundaciones. Este enfoque de tipo ambiental ha permitido incorporar dentro del análisis de la vulnerabilidad indicadores que no eran considerados para su estudio. La vulnerabilidad ambiental (Gaspari, 2011) y socioambiental (Romero, 2010) dentro de un contexto de análisis del riesgo de inundaciones tiene por objetivo establecer en qué medida la presión ejercida por los procesos antrópicos en el medio ambiente resultan en un incremento de la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas.

c) **Riesgo**

Dentro del campo de los riesgos, no es posible establecer un origen preciso para este concepto (Luhmann, 1996), por ello, se considera que su utilidad, adaptación y modificación es resultado de su aplicación e interpretación dentro del campo de las ciencias naturales y sociales (Zúñiga, 2009). Como parte de un proceso teórico-conceptual, este concepto, ha buscado cambiar la forma de analizar y entender la dinámica de los riesgos por fenómenos naturales, tratando de dejar atrás el paradigma naturalista de los llamados “desastres naturales” como materialización de un riesgo resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural.

Una primera visión holística de los riesgos (Olcinas y Ayala, 2002) se tuvo dentro del campo de la geografía, en la llamada geografía de los riesgos durante la década de los sesenta en Estados Unidos. Derivado de esta visión, se inician los primeros estudios que integran y reaccionan el territorio geográfico y los peligros de origen natural (Burton y Kantes, 1964). Posterior, al decenio internacional para la reducción de los desastres (UNISDR, 1999), diversos esfuerzos encaminado a reducir los riesgos, incluyen dentro de sus estudios las características socioeconómicas de la población e infraestructura como elemento de análisis dentro de los riesgos. Como resultado, se establece la llamada “visión alternativa” de los riesgos (Lavell, 2000). Este enfoque, permitió observar una relación entre los modelos de desarrollo económico que conforman las sociedades con el incremento en los niveles de riesgo. Dando paso a una nueva visión teórica, que actualmente se conoce como “construcción social del riesgo” (Cardona, 2003).

En términos generales, el riesgo como resultado de un proceso multifactorial y dinámico expresado como la integración de las variables de peligro y vulnerabilidad, puede ser entendido como la probabilidad de pérdidas y daños directos e indirectos estimados para una región geográfica expuesta, con diferentes niveles de vulnerabilidad, y que es afectada por la ocurrencia de un fenómeno natural con una determinada magnitud. Por ello, este trabajo aborda el riesgo de inundaciones para México como un proceso que caracteriza y estima la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas y el peligro por lluvias intensas.

Dentro de un contexto social, los desastres causados por inundaciones son cada vez más frecuentes y severos, no sólo por lluvias más intensas, sino también por cambios en la cobertura de suelo (Pérez, 2002). De acuerdo con las variables que integran el riesgo de inundaciones, el peligro está representado por las intensas lluvias que se generan en verano, son resultado de la presencia de ondas del este, ciclones tropicales o sistemas convectivos de mesoescala (Magaña, 2004), que pueden desencadenar inundaciones principalmente en regiones costeras (Tejeda-Martínez y Welsh-Rodríguez, 2006; Aparicio *et al.*, 2009) y en zonas de planicie. Este tipo de lluvias generalmente pueden acumular más de 100 mm en uno o dos días (Pedroza *et al.*, 2015). Temporalmente, la ocurrencia de mayores desastres por inundaciones también tienen presencia durante los meses de invierno, como resultado de sistemas frontales de latitudes media que en ocasiones se propagan meridionalmente hasta

los trópicos, dando lugar a los llamados “Nortes” (Schultz, 2005; Pérez *et al.*, 2014) que pueden generar lluvias con duración de varias horas, impactando principalmente las llanuras de inundación del país (Aparicio, 2009; Gama *et al.*, 2010). El contexto social y ambiental en el que se producen las lluvias intensas es crucial para la ocurrencia de inundaciones (Viglione y Rogger en Paron y Baldassarre, 2015), así como otros desastres como los deslizamientos de tierra (Alcantara, 2004; Coutu y Vega, 2007).

Diversos estudios indican que la dinámica temporal de las lluvias intensas que resultan en un mayor número de escurrimientos e inundaciones, se asocian a efectos orográficos y a los niveles de humedad del suelo (El Kateb, 2013). Durante el invierno en México (noviembre a mayo) las lluvias suelen ser escasas y sólo ocasionalmente generan inundaciones. En esta época, la condición de humedad de los suelos suele ser baja. Por el contrario, durante los meses de junio a septiembre (verano) correspondientes a la estación lluviosa en la mayor parte de México, la humedad del suelo es mayor, al ser intensa la precipitación, generando un aumento en el volumen de escurrimientos y mayor posibilidad de inundaciones. Esta condición de humedad en los suelos, incrementa la vulnerabilidad en ciertas regiones, lo que se refleja en un mayor número de inundaciones (Fig. I), principalmente en la región centro - sur del país.

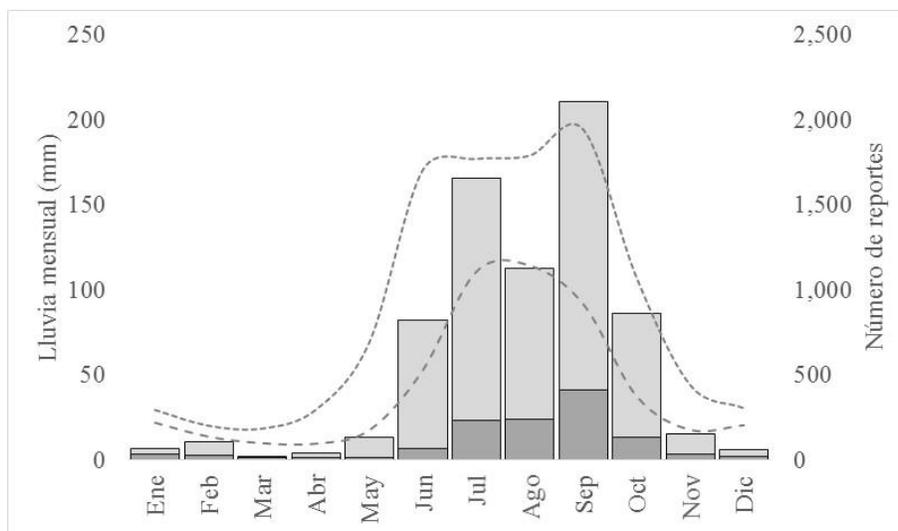


Figura I. Promedio de informes mensuales de inundaciones en México. Región norte del país (barras en color gris oscuro) y región centro – sur (barras de color gris claro). Periodo 1970 – 2013. Registro de precipitación mensual (mm). Región norte de México (línea punteada corta) y región centro - sur (línea punteada larga). (Fuentes: DesInventar, 2013; CONAGUA, 2015).

Los desastres causados por inundaciones en México han tenido un rápido incremento en décadas recientes (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Este incremento en el número de desastres puede ser resultado de más eventos de lluvia intensa, o cambios sustanciales en la vulnerabilidad como resultado del deterioro de las cuencas y un aumento en los niveles de exposición de la población e infraestructura. Por otro parte, la disminución de cobertura natural del suelo es de aproximadamente 400,000 km² en los últimos 40 años (Fig. II). Esto muestra una relación aparente con el incremento en el número de desastres, lo cual puede ser resultado de la pérdida de superficie permeable en México. Esta transformación de la cobertura del suelo tuvo su mayor auge a partir de la década de los 80 con la expansión de la superficie agrícola (McMahon *et al.*, 2011). Aunque esta tendencia en la pérdida de cobertura natural del suelo muestra una aparente estabilidad a partir del año 2000, el aumento en el número de inundaciones se mantiene, como resultado de una mayor actividad de lluvias intensas (Fig. II). Sin embargo, hay regiones en México donde los eventos de lluvia presentan una disminución, pero continúa en aumento el número de inundaciones (Bahía de Acapulco, Guerrero) (Fig.3.2). De acuerdo con Romero (2010), en casos como la Ciudad de México, los cambios de clima en un contexto de vulnerabilidad socioambiental creciente permiten explicar la mayor frecuencia de desastres como las inundaciones.

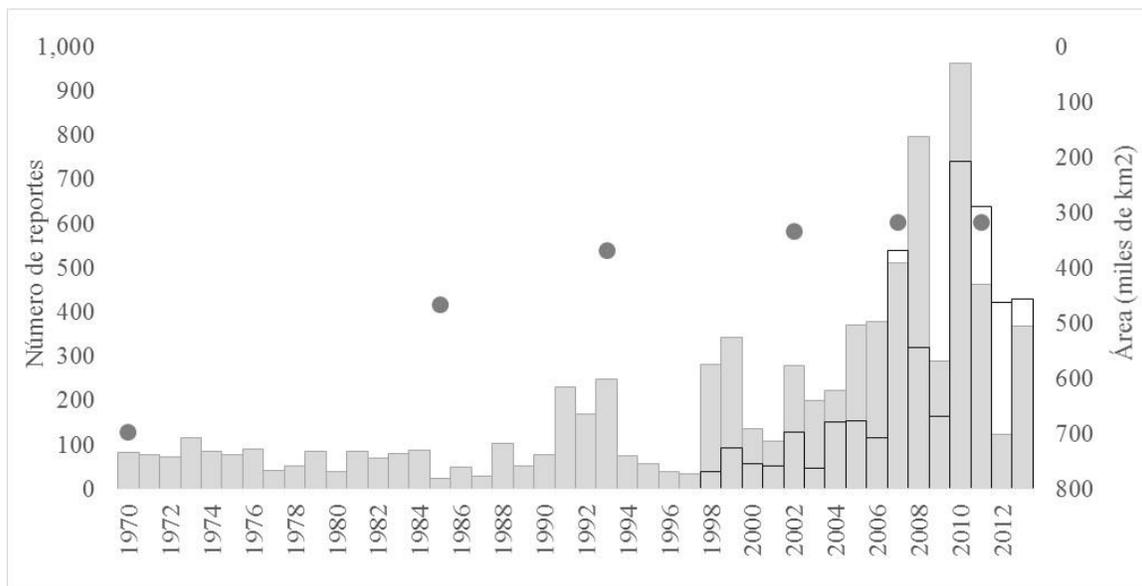


Figura II. Número anual de inundaciones en México entre 1998 a 2013 documentado por CENAPRED (barras con línea negra) y para el periodo 1970 a 2013 documentadas por DesInventar (barras en gris claro). Los puntos son estimaciones de deforestación en México (pérdida en km²) entre 1970 y 2011 con datos de INEGI (1985 - 2011).

De acuerdo, con registros históricos de desastres para México, los desastres originados por inundaciones representan aproximadamente el 50% del total de los desastres ocurridos durante un periodo de 40 años (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Según estimaciones dentro de un contexto de riesgo de inundaciones, aproximadamente el 25% de la población en México puede ser afectada por este tipo de eventos, debido a su nivel de exposición (Saavedra, 2010), el cual, se asocia con la disminución de su nivel de desarrollo humano, y el incremento de niveles de pobreza en la población (Rodríguez-Oreggia *et al.*, 2013). Sin embargo, a pesar de la evidencia de que los impactos en la población se relacionan con la vulnerabilidad (Tollan, 2002; CENAPRED, 2014), el objeto de la mayor parte de los estudios de riesgo de inundación se enfoca en analizar la dinámica del peligro asociado con el cambio climático (Milly *et al.*, 2002; Kundzewicz *et al.*, 2014).

Por ello, desde el punto de vista del riesgo, la vulnerabilidad ante eventos de lluvia intensa representa el factor que modula el componente de baja frecuencia del riesgo, representado por cambios de baja temporalidad, y por tanto, de la ocurrencia de inundaciones. Por consiguiente, debe considerarse como el factor que explica la actividad creciente de desastres por inundaciones (Neri y Magaña, 2016). Pero para llegar a esta conclusión se requiere cuantificar no sólo el peligro, sino también la vulnerabilidad. En este sentido, no hay un enfoque universalmente aceptado que permita estimar la vulnerabilidad (Gain *et al.*, 2012) y consecuentemente, se han desarrollado diversos métodos para su cuantificación (Balica *et al.*, 2015). Actualmente, existen diversas metodologías que han sido desarrolladas para caracterizar la vulnerabilidad y el riesgo de inundaciones con el fin de llevar a cabo acciones de prevención. Por ejemplo, dentro del campo de la hidrología, diversas metodologías son utilizadas para estimar cómo el incremento de escurrimientos es resultado de modificaciones en la cobertura del suelo natural (Moglen & Beighley, 2002; Hundedcha & Bárdossy, 2004; Tang *et al.*, 2005; Burns *et al.*, 2005; Bari *et al.*, 2005; Melesse, 2002; Gandini, 2004). En México, se han desarrollado diversos trabajos como el Atlas Nacional de Riesgos de México para establecer índices de peligro y vulnerabilidad que permitan caracterizar las zonas que requieren de acciones ante inundaciones. Sin embargo, muchos de estos diagnósticos carecen de un análisis cuantitativo de los diversos factores de vulnerabilidad, que permitan explicar los diferentes aspectos de las inundaciones en las diferentes regiones del país. Por ello, es necesario considerar la dinámica del peligro y vulnerabilidad utilizando un nivel de dominio

adecuado que permita explicar la actividad o intensidad de los desastres (Neri y Magaña, 2016).

1.4 Riesgo y desastre

Dentro del campo de los riesgos por fenómenos naturales, es importante analizar y entender los procesos que generan tanto el peligro como la vulnerabilidad. De esta forma se puede iniciar un proceso de transformación que aborde el estudio de los riesgos de desastres a partir del análisis por componentes (peligro y vulnerabilidad) de acuerdo a su distribución espacial y temporal dentro de un contexto dinámico y multifactorial. Este proceso presentó su principal avance posterior al Decenio Internacional para la reducción de los Desastres Naturales, en donde se abandona la visión predominante de los desastres desde un paradigma naturalista (UNISDR, 1999; Plate, 2002), pues ésta visión no resultó ser adecuada para reducir los impactos negativos de los fenómenos naturales. De esta forma, el enfoque obtenido a partir de analizar la vulnerabilidad como elemento de la ecuación del riesgo ha permitido entender su importancia dentro de la dinámica de los riesgos.

A pesar de que actualmente no existe una metodología universalmente aceptada para evaluar el riesgo (Wilches, 1998; O'Brien *et al*, 2008) se han realizado diversos esfuerzos para analizarlo de forma multifactorial y dinámica (Neri y Magaña, 2016; Zúñiga y Magaña, 2017). Recientemente, Neri y Magaña (2016) analizaron el riesgos de desastre incorporando dentro de su análisis diversos criterios para definir la dinámica espacial y temporal del peligro y la vulnerabilidad con el objetivo de entender las causas y procesos que dan origen a los riesgos de desastres dentro de un espacio geográfico determinado. Otras versiones integran el territorio como elementos para evaluar el nivel de riesgo de una región (Olcinas y Ayala, 2002; Wilches, 1993).

Si bien, se acepta desde hace décadas que el riesgo es una probabilidad que combina un peligro natural con la vulnerabilidad de una región, el objetivo final de su evaluación es reducir su impacto a través de estrategias de gestión. Los desastres asociados a inundaciones, como un proceso que materializa el riesgo, representa la combinación de un peligro natural con la vulnerabilidad de una región determinada, caracterizando la generación de un nivel de impacto no controlado (O' Keefe, 1976; Wilches-Chaux, 1998; Cardona, 2003). Por ello, se considera

que cualquier estudio que pretenda reducir el riesgo de inundaciones debe ser realizado de forma individual para cada región de análisis (Gomáriz, 1999), de tal forma que se pueda establecer en qué medida el riesgo de inundaciones está mayormente relacionado con el aumento del peligro por lluvias intensas o por un incremento de la vulnerabilidad en la región.

1.5 Gestión del riesgo

La gestión del riesgo se ha definido como un proceso que permite identificar, analizar y cuantificar la probabilidad de pérdidas que resultan de la combinación de un peligro natural y la vulnerabilidad de una región, así como de las acciones generadas para su prevención y mitigación (Lavell, 1998; UNISDR, 2009). De esta forma, la gestión de riesgo, ha sido establecida en términos del ex - ante (gestión correctiva) y el ex – post (gestión prospectiva) de un evento desastroso, estableciéndose tres niveles de actuación: *i)* reducir el riesgo ambiental *ii)* reducir la vulnerabilidad de las ciudades y *iii)* mejorar los sistemas de respuesta (Lavell, 1999).

De forma particular, dentro de un contexto de gestión del riesgo, el impacto que generan las inundaciones, supone un riesgo constante para la seguridad de la población y de la infraestructura en muchas regiones del mundo. Por ello, el gran reto ha sido establecer y definir un procedimiento que integre un sistema para gestionar el riesgo ante inundaciones. Este procedimiento se ha discutido ampliamente por especialistas en el tema (Plate, 1996). Por ello, se han realizado recientemente diversos esfuerzos para reducir los riesgos de desastre a nivel mundial. En foros como el marco de Hyogo (2005 – 2015) y Sendai (2015 – 2030) se adoptaron y reafirmaron acciones enfocadas a reducir la pérdida de vidas humanas, impactos económicos y ambientales resultado de riesgos de desastres de pequeña y gran escala, estableciéndose cuatro líneas de acción encaminadas a gestionar el riesgo de desastres:

- Comprender el riesgo de desastres.
- Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionarlo.
- Invertir en la reducción del riesgo de desastres e incremento de la resiliencia.
- Aumentar la preparación para casos de desastres a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

1.6 Objetivos

a) General

Este trabajo tiene por objetivo analizar las causas de la tendencia reciente del aumento en el número de inundaciones en relación con el incremento de la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas por cambio en la cobertura del suelo natural. En particular, este análisis se centra en como la degradación de las cuencas conduce a mayores escurrimientos, y a un mayor riesgo de inundaciones ante lluvias intensas.

b) Particulares

- 1) Evaluar las condiciones de vulnerabilidad y riesgo ante lluvias intensa para cada cuenca de México.
- 2) Establecer un índice de vulnerabilidad y riesgo desarrollando una metodología para construir modelos de riesgo que permitan explicar la tendencia de las inundaciones actuales.

Este trabajo está dividido en cuatro capítulos. El primero, hace referencia a una breve descripción teórico – conceptual de los componentes del riesgo y la gestión del riesgo. En el segundo capítulo, se describen los datos y metodología utilizados para caracterizar el peligro por lluvias intensas y la vulnerabilidad de las cuencas, así como el proceso seguido para obtener valores de índice de vulnerabilidad. El tercer capítulo describe el comportamiento del riesgo ante lluvias intensas, a partir del análisis de sus componentes (peligro y vulnerabilidad); y se determina la distribución espacial del riesgo de inundaciones y su variación temporal para México y la Bahía de Acapulco comparando los periodos 1970 y 2010. Se complementa este apartado con el desarrollo de un modelo de riesgo dinámico desarrollado para cuatro ciudades del país: Acapulco, Boca del Río, Monterrey y Tapachula. Finalmente, en el cuarto capítulo se establece una discusión de los resultados obtenidos del incremento del riesgo de inundaciones como resultado de analizar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas por cambio en la cobertura del suelo natural. Se presentan diversas conclusiones y recomendaciones como herramienta de gestión de riesgo de inundación.

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA Y DATOS

2.1 La dinámica de las lluvias en México

El peligro por lluvia intensa como elemento dinámico del riesgo, se puede definir como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de origen natural que puede afectar con cierta magnitud un área o región vulnerable, de acuerdo a la distribución espacial y temporal de su intensidad. Debido a estos cambios en su dinámica, establecer un único umbral (valor) de intensidad de lluvias intensas que permita evaluar el riesgo sería un error porque se estaría subestimando o sobreestimando su impacto en diversas regiones del país, ya que este depende en gran medida de: i) temporada del año (verano o invierno); ii) dinámica atmosférica (origen de las lluvias); iii) duración de la lluvia; y iv) volumen del agua precipitable, así como de las condiciones de vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas, que en conjunto se traducirían en un peligro hidrológico (León 1996) y riesgo, causado por lluvias intensas que sobrepasan la capacidad de infiltración de los suelos, generando escurrimientos que no pueden ser conducidos por los cauces de los ríos de forma natural, desbordando e inundando áreas bajas de un territorio.

Por ello, un peligro natural por lluvias intensas es una parte fundamental para el análisis y evaluación del riesgo de inundación. Sin embargo, debido a la complejidad para determinar la ocurrencia de eventos de precipitación intensa, su distribución espacial y temporal dentro del territorio, que está relacionado entre otras cosas a un insuficiente número de estaciones que registren datos de lluvia con resolución espacial y temporal como el que tienen las tormentas (por ejemplo: nubes cúmulus). En gran medida, la información climatológica existente representa un reto si se pretende estimar hidrológicamente que volumen de agua precipitable puede generar un peligro hidrológico para las cuencas hidrográficas de acuerdo a su nivel de vulnerabilidad.

En este trabajo para caracterizar el peligro por lluvias intensas como elemento para evaluar el riesgo de inundaciones para México se realizaron los siguientes procedimientos: El primero consistió en el análisis de información de estaciones meteorológicas, así como de un proceso de asimilación de datos tipo Cressman (1959), que permitió combinar la información de estaciones climatológicas (SMN 1979 – 2010) con información de estimaciones de lluvia por satélite (Global Precipitation Climate Project GPCP, 2010). Este procedimiento, resultó en una

mallá con valores de lluvia diaria con resolución espacial de 10km * 10km de la que se obtuvo información de lluvia en magnitud de percentil 95 (P95). Un segundo procedimiento realizado para determinar un umbral de peligro crítico de lluvias intensas que permitiera ser utilizado para evaluar la dinámica del riesgo a nivel local consistió en la selección de registros de desastres por inundación para diversos puntos del país (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Posteriormente, se analizaron registros de lluvia diaria de las estaciones climatológicas para el área de estudio.

La información espacial y temporal de lluvia diaria utilizada como insumo para obtener valores de peligro por lluvias intensas (P95) para México, se obtuvo de López (2012). El análisis y procesamiento de esta información climática e información de estaciones climatológicas se describe a continuación.

2.2 Datos para caracterizar el peligro

Como primer paso, se analizaron los registros climáticos de lluvia diaria de más de mil estaciones climatológicas (Fig. 2.1) que están bajo la operación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Este tipo de datos ha mostrado en diferentes trabajos ser de mucha utilidad para construir información climática de lluvia (ej. Blanco, 2014). Un proceso de evaluación de los registros de lluvia diaria permitió identificar inconsistencias, errores sistemáticos (datos repetidos, valores anómalos, etc.), y estaciones con 70% de datos validos en sus registros.

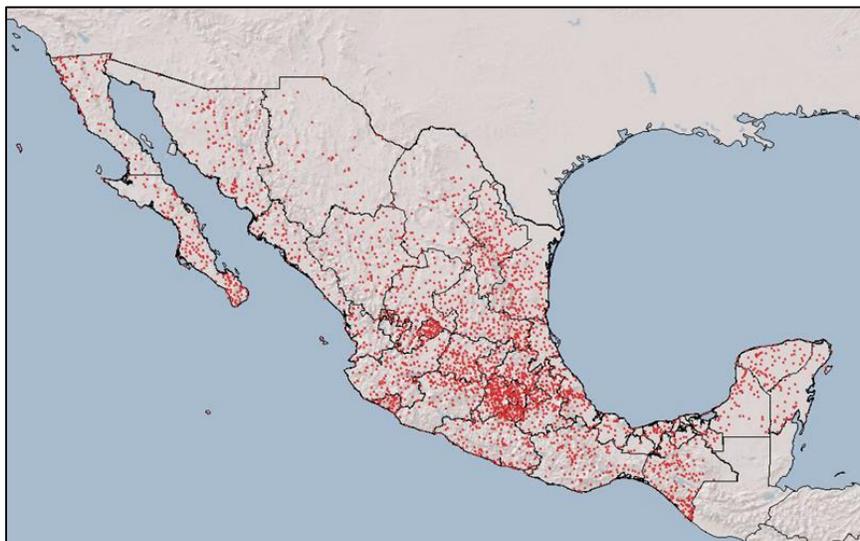


Figura 2.1 Estaciones climatológicas para México. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2015)

2.2.1 Datos del Global Precipitation Climatology Project (GPCP)

Un segundo paso consistió en la búsqueda de información de datos de lluvia diaria que permitiera complementar la información proporcionada por las estaciones climatológicas. En este caso, se estableció como alternativa el uso de información de satélite (estimaciones). Dentro del campo de la meteorología e hidrología, este tipo de estimaciones de lluvia ha mostrado ser una herramienta útil para adquirir valores con resolución temporal y espacial alta para regiones donde la existencia de estaciones es escasa o nula (Huffman, 1997; Voisin, 2008).

Por ello, y debido a su utilidad para mejorar y generar nueva información de valores de lluvia, las estimaciones realizadas dentro del proyecto de clima global de precipitación (GPCP) (Adler *et al.*, 2003) fueron utilizadas como complemento de los registros de las estaciones climatológicas de México. Las estimaciones obtenidas del GPCP como insumo de datos climáticos han mostrado ser una herramienta útil en la combinación de campos de precipitación con estimaciones satelitales obteniendo nuevos valores de campos de lluvia (Adler *et al.*, 2003; Huffman *et al.* 2009).

2.2.2 Esquema de asimilación de datos tipo Cressman

Como tercer paso fue necesario convertir información de estaciones meteorológicas a un arreglo de malla mediante un sistema de asimilación de datos que permitiera relacionar espacial y temporalmente información de datos observados (puntuales) con estimaciones preliminares en mallas. El proceso utilizado se conoce como “análisis objetivo”, el cual interpola y suaviza los valores de lluvia con el método matemático desarrollado por Cressman (1959). Este método permitió interpolar valores puntuales de más de mil estaciones climatológicas (1979 - 2010) con estimaciones satelitales del GPCP (1979 – 2010). Los valores de lluvia diaria se modificaron de forma iterativa bajo un esquema polinomial de mínimos cuadrados utilizando radios de influencia para su corrección (Fig. 2.2). A partir de un campo preliminar de lluvia, el procedimiento busca alcanzar una diferencia mínima entre los valores de las estaciones climatológicas con las estimaciones satelitales (Daley, 1993; Magaña *et al.*, 2013). El resultado fue una malla regular de valores de lluvia diaria con resolución de 10 km * 10km.

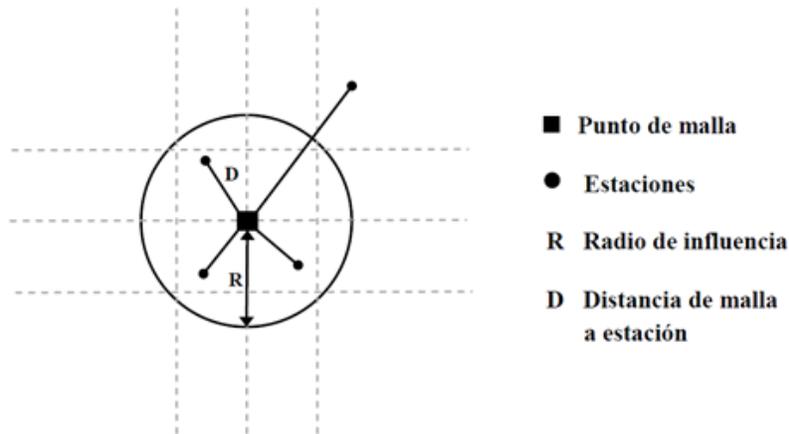


Figura 2.2 Diagrama del Radio de influencia utilizado para realizar el análisis objetivo tipo Cressman, tomado de López (2012).

La técnica de análisis objetivo tipo Cressman aplicada a un campo preliminar de lluvia diaria construida a partir de registros de estaciones climatológicas para México (datos puntuales), y a una malla de valores de lluvia diaria obtenida de estimaciones satelitales (GCPC) resulta en campos espaciales de lluvia asimilados estadísticamente (Figura 2.3). La asimilación de datos de lluvia resulta en un arreglo en formato de malla regular con nuevos valores de lluvia diaria con un mejor arreglo espacial de los campos de lluvia. Este procedimiento, representa una herramienta útil para combinar y generar nueva información (diaria, mensual, anual, climatología, etc.) minimizando inconsistencias resultado de la ausencia de información observada.

Un proceso de asimilación de datos tipo Cressman (Figura 2.3) permite mejorar los campos de distribución espacial de lluvia para una región. El proceso de combinación de información de estaciones climatológicas con datos de estimaciones de satélite para un evento de lluvia intensa ocurrida el 12 de septiembre de 2007 al poniente del Distrito Federal (Figura 2.3 a) muestran campos de lluvia con valores mejorados espacialmente (Figura 2.3 b).

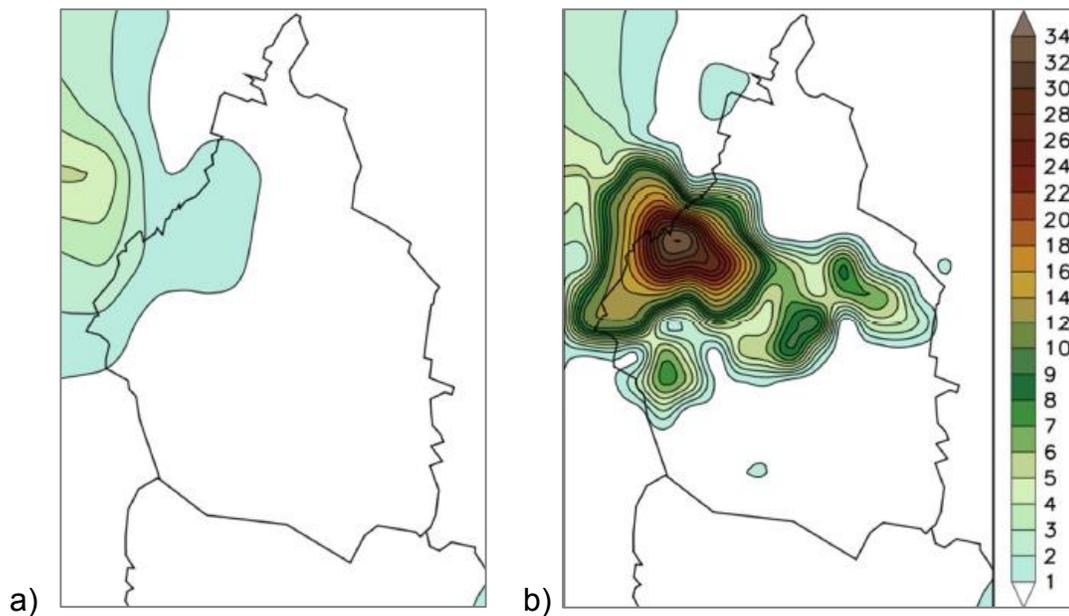


Figura 2.3 Esquema de asimilación de datos tipo Cressman obtenido para la Ciudad de México (ejemplo 17:00 hrs. 12 de septiembre 2007). (a) Datos observados y (b) Datos asimilados (mm/hr) (López, 2012).

2.3 Caracterización local de lluvias intensas (casos de estudio)

Para determinar un umbral crítico de peligro que permitiera establecer la magnitud de las lluvias intensas registradas previó a la ocurrencia de desastres por inundaciones para las ciudades de: Acapulco, Boca del Río, Monterrey y Tapachula se identificaron diversos desastres ocurridos en las ciudades (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Posteriormente, se analizó la información de lluvia diaria de las estaciones climatológicas contenidas dentro del área de estudio (ciudades), así como las estaciones circundantes en un radio de influencia de 20 km con la finalidad de establecer un nivel crítico en la intensidad de lluvia captada por la cuenca, donde se materializó el desastre. Las ciudades seleccionadas se utilizaron como referente espacial para determinar la cuenca de aportación y la estaciones climatológicas analizadas.

2.4 Índice de vulnerabilidad

La vulnerabilidad como elemento dinámico del riesgo de baja frecuencia se utilizó para evaluar la sensibilidad de las cuencas hidrográficas para México, estimando un índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas. Este índice desde un enfoque de vulnerabilidad ambiental (Gaspari, 2011) permite establecer variaciones en el nivel de riesgo de inundaciones como resultado de

un escenario crítico (morfométrico – hidrológico) donde las condiciones del terreno (cuencas, pendiente, etc.) y permeabilidad pueden presentar diferentes grados de vulnerabilidad ante lluvias intensas (Melesse y Shih, 2002 y Gandini, *et al.*, 2004).

Se propone un índice para medir la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas para México ante lluvias intensas considerando tres indicadores (número de curva, pendiente del terreno y compacidad de las cuencas). Estos indicadores se utilizaron para evaluar la condición de vulnerabilidad para los periodos 1970 y 2010. Se consideraron cambios en la distribución espacial y temporal de la cobertura natural del suelo. El objetivo es mostrar como la vulnerabilidad como elemento dinámico del riesgo ha contribuido al aumento de las inundaciones como resultado del cambio en la cobertura del suelo para 987 cuencas evaluadas para México.

2.4.1 Datos para caracterizar la vulnerabilidad

El primero de los indicadores, resulta de aplicar un método hidrológico conocido como número de curva considerando las características físicas de los suelos y sus cambios. Se emplean también, dos indicadores de vulnerabilidad considerados de muy baja frecuencia de cambio: *i)* pendiente del terreno y *ii)* compacidad de las cuencas. Los cuales, se consideran estáticos debido a que las actividades humanas muestran poco impacto (cambio) en ellos. Estos indicadores se utilizaron para normalizar los escurrimientos. En conjunto, el producto de los tres indicadores permitió evaluar la capacidad (sensibilidad) de las cuencas para generar escurrimientos ante lluvias intensas (percentil 95). En el siguiente capítulo se describe el concepto del percentil 95.

El índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas para México, resulta de una secuencia de pasos lógicos (Figura 2.4) que permiten combinar los indicadores de vulnerabilidad. El resultado de combinar los indicadores de vulnerabilidad se normalizó en un rango de valores que va de 0 a 1. El valor 0 indica “muy baja” o nula capacidad para generar escurrimientos, mientras que valores cercanos a 1 representan una vulnerabilidad “muy alta” para generar escurrimientos ante lluvias intensas.

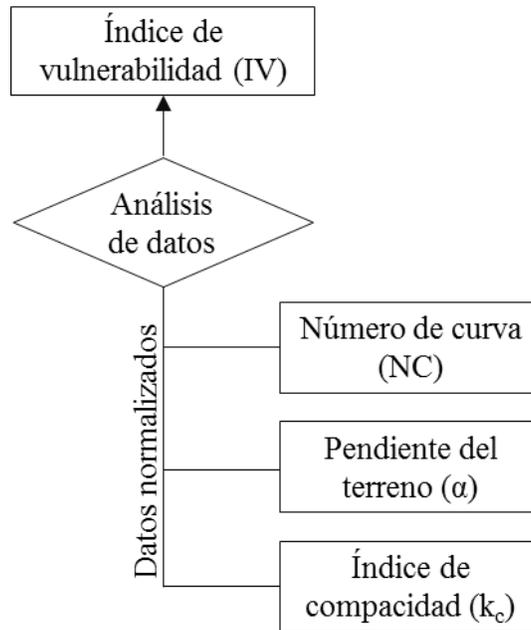


Figura 2.4 Diagrama de flujo para obtener el índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas para las cuencas de México

Se utilizó el método de normalización tipo “Scaling” (Ecu. 2.1) para normalizar los valores obtenidos para el índice de vulnerabilidad:

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2.1)$$

Donde:

X' = representa el indicador estandarizado

X = representa el valor que será estandarizado

X_{\min} y X_{\max} representan los valores extremos de la serie de datos

El resultado permitió ubicar los valores de la muestra en un rango de [0, 1], es decir se realizó una normalización basada en la unidad. El resultado se agrupó en cinco clases (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Clasificación de valores de índice de vulnerabilidad.

Nivel	Índice de vulnerabilidad	Nivel de vulnerabilidad
1	0.0 – 0.2	Muy baja
2	0.2 – 0.4	Baja
3	0.4 – 0.6	Moderada
4	0.6 – 0.8	Alta
5	0.8 – 1.0	Muy alta

Los valores indican un nivel de vulnerabilidad cualitativo que representa la condición o sensibilidad de las cuencas hidrográficas ante lluvias intensas para México. Su representación resulta de utilidad para su interpretación visual, mientras que los valores numéricos del índice de vulnerabilidad con los valores de peligro natural se utilizarán para evaluar el riesgo ante lluvias intensas para México.

2.4.2 Método del número de curva (NC)

Dentro del campo de la hidrología, se evalúa la condición de las cuencas para generar escurrimientos. Este procedimiento, resulta complicado debido a la necesidad de información con alta resolución espacial y temporal. Este proceso incrementa el costo y tiempo para procesar datos y estimar escurrimientos. Para medir y cuantificar esta variable hidrológica se han desarrollado diversos métodos analíticos para su estimación en cuencas no instrumentadas y con escasa información hidrológica. Algunos de los métodos utilizados para predecir escurrimientos en cuencas hidrográficas son:

- Modelo de simulación de cuencas UBC watershed model (UBCWMM) creado por la universidad de Columbia Británica. Este modelo permite estimar el volumen de los escurrimientos generados por las cuencas y crear simulaciones considerando escenarios de cambio en la cobertura del suelo, obteniendo resultados espaciales y estadísticos. Este modelo se encuentra incorporado en la plataforma MapInfo GIS con el nombre Watershed Mapper (WM) permitiendo mayor flexibilidad en el manejo, despliegue y visualización de datos (Dimitris *et. al.*, 2014).
- Modelo de redes neuronales artificiales (ANN). Este modelo ha representado un gran avance en la predicción de escurrimientos, debido a que realiza un análisis en conjunto de las variables hidrológicas y climáticas, que le permiten mediante un proceso de aprendizaje del

comportamiento de los parámetros incorporados al modelo, realizar un escenarios de predicción de escurrimientos a partir de las relaciones entre las diferentes variables utilizadas (Jayawardena *et al.*, 2001 y Veintimilla, 2015).

- Método del Número de Curva (NC). Este método desarrollado por el SCS (Soil Conservation Service del U.S Department of Agriculture) ahora el NRCS (Natural Resources Conservation Service) durante los años 40's, plantea una forma práctica para evaluar la relación del proceso lluvia - escurrimiento directo en las cuencas hidrográficas. Debido a su aceptación, el método es ampliamente utilizado a partir de la década de los 70's (USDA - NRCS, 2004; 2007) en diferentes países del mundo con principal campo de acción dentro de la agricultura.

Muchos de estos métodos analíticos han representado grandes avances para la estimación de escurrimientos. Recientemente, diversos modelos de cálculo hidrológico se han incorporado como herramientas de análisis dentro de los sistemas de información geográfica (SIG) facilitando el manejo e interpretación de datos para obtener escenarios hidrológicos, reduciendo el costo y tiempo de procesamiento de datos.

En el caso particular de México, aproximadamente 25% de las cuencas hidrográficas no cuentan con estaciones de monitoreo pluviométrico, lo que dificulta evaluar la sensibilidad de las cuencas hidrográficas para generar escurrimientos. Por ello, en este trabajo se consideró utilizar un método que permitiera analizar el proceso de lluvia – escurrimiento de forma dinámica y simplificada a partir de las características físicas de los suelos (capacidad de infiltración) e información climática (lluvia acumulada) para predecir la lámina de escurrimiento generada por las cuencas hidrográficas en México. De esta forma, debido a su utilidad y aceptación dentro del campo de la hidrología para la estimación de escurrimientos, el método de número de curva (NC) se utilizó como herramienta para la construcción de un indicador de vulnerabilidad ante lluvias intensas para México.

Aunque este método, es utilizado ampliamente para predecir escurrimientos a partir de un solo parámetro (número de curva), su desarrollo puede constituir una simplificación del proceso de lluvia - escurrimiento, debido a que integra de forma simple el proceso de abstracción (intercepción, evapotranspiración, almacenamiento e infiltración) y retención del suelo (uso de suelo y pendiente). Debido a esta sencillez en la integración de datos, el método de NC es una

herramienta útil para la evaluación de escurrimientos principalmente en cuencas no instrumentadas (Svobdova, 1991; Ferrer, 1995; USDA, 1999; Xiaoyong, 2004; Huang *et al.*, 2006; Geetha, 2007; Elhakeem, 2009; Ebrahimian *et al.*, 2009; Sundar, 2010; Ebrahimian *et al.*, 2012; Nayak, 2012; Askar, 2013; Mishra, 2013).

Sin embargo, a pesar de la utilidad del método de número de curva dentro del campo de la hidrología, el método ha sido cuestionado de diversas maneras, señalando inconsistencias en su representación del proceso hidrológico de lluvia - escurrimiento. Exponiendo que durante la primera fase del modelo, no se cumple la linealidad planteada ($Q = P$). Durante esta fase, se establece que el escurrimiento será igual a la precipitación total, debido a la saturación del suelo. Sin embargo, el modelo muestra una primera fase no lineal (Paz – Pellat, 2009) donde los escurrimientos presentan niveles muy bajos, presentando mayor estabilidad con lluvias intensas, cumpliéndose la relación *escurrimiento directo* ($Q = Precipitación (P)$). Finalmente, el método como cualquier otro modelo, representa una idealización y simplificación de la realidad hidrológica de las cuencas.

A continuación se describe el desarrollo matemático del método de número de curva en el cual se establece la relación empírica entre las variables: escurrimiento directo (Q) y precipitación (P), considerando la siguiente ecuación (USDA, 1986):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (2.2)$$

Donde:

Q = escurrimiento (pulgadas)

P = lluvia total (pulgadas)

S = Potencial máximo de retención (pulgadas)

I_a = Abstracción inicial (pulgadas)

La variable representada por la abstracción inicial (I_a) esta constituida por las pérdidas antes de los escurrimientos, donde se incluye el agua retenida en depresiones del terreno, el agua

interceptada por la vegetación, la evaporación y la infiltración. Esta variable se considera dinámica debido a su alta correlación con los parámetros de cobertura de suelo. La variable (I_a) resulta de la siguiente ecuación empírica (2.3).

$$I_a = 0.2S \quad (2.3)$$

I_a como variable independiente (SCS, 1972; USDA - NRCS, 2004), permite el uso de S y P para generar escurrimientos. Los valores de escurrimiento se obtienen al sustituirse la ecuación 2.3 dentro de la ecuación 2.4:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (2.4)$$

La variable S se relaciona con las condiciones del suelo a través del NC, el cual presenta un rango de valores que van del 0 al 100 (adimensionales) (Ecuación 2.5), que están en función de la humedad antecedente del suelo, la pendiente del terreno, el tipo y uso de suelo. En valores de NC = 0 el escurrimiento sería nulo, mientras que para valores de NC = 100 se tienen valores de escurrimientos máximos, considerando que las áreas son impermeables (Gaspari, 2007).

$$S = \frac{1000}{NC} - 10 \quad (2.5)$$

La ecuación (2.4) del método de número de curva modificada por Aparicio (2008) para cambio de unidades pulgadas - milímetros (ecu. 2.6) se utilizó para evaluar la capacidad de los suelos para generar escurrimientos durante el periodo 1970 y 2010:

$$Pe = \frac{(P - \frac{508}{NC} + 5.08)^2}{P + \frac{2032}{NC} - 20.32} \quad (2.6)$$

Donde:

P_e = lluvia en exceso (lámina de escurrimiento en mm)

P = lluvia total (mm)

NC = valor de número de curva (adimensional)

Otros valores mostrados en la ecuación 2.6 son parámetros utilizados para cambio de unidades.

El comportamiento de los escurrimientos que resulta de aplicar la ecuación (2.6) se observa en la figura (2.5). Las variaciones observadas están directamente relacionadas con la intensidad de la lluvia total (mm) y los diferentes valores de número de curva. Es decir, escurrimientos cercanos al valor de la lluvia total serán resultado de valores de número de curva cercanos a 100, lo que significa, menor capacidad de los suelos para infiltrar el agua de lluvia.

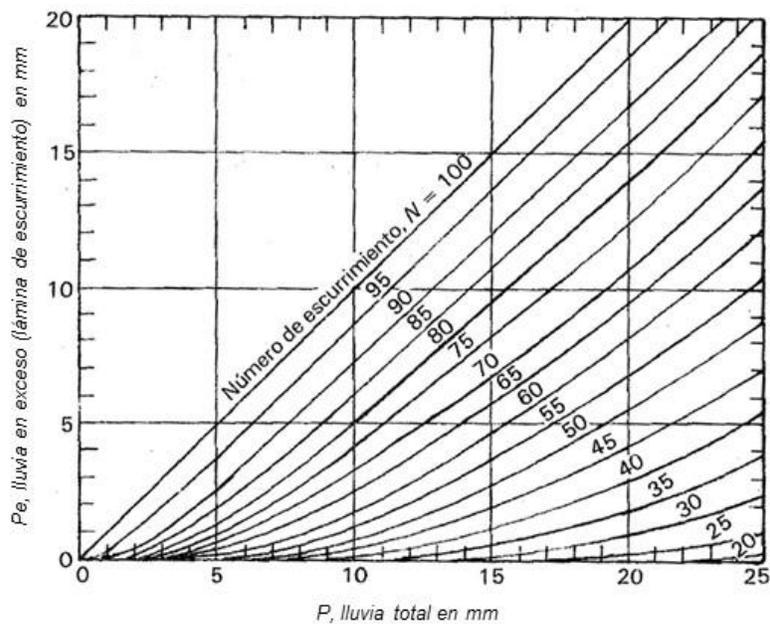


Figura 2.5 Modelo de escurrimiento idealizado que relaciona valores de número de curva con intensidades de lluvia para obtener la lámina de escurrimientos.

2.4.3 Datos de cobertura de suelo (indicador dinámico)

Como primer paso, se evaluó la información de uso de suelo y edafología aplicando una corrección topológica en una plataforma SIG para evitar inconsistencias geométricas y errores en la obtención de los valores de número de curva. Se analizó información para los periodos 1970, 1985, 1992, 2002, 2007, 2010 y 2011 e información edafológica de 1980 y 2011 desarrollada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO). Se homologó la información edafológica y de uso de suelo considerando el manual para la interpretación de la carta de uso de suelo y vegetación de INEGI correspondiente a la serie I (1985). Este manual establece diversos criterios de clasificación para las diferentes coberturas de suelo para México. Para poder comparar la información entre el periodo 1970 y 2010 la información vectorial se ajustó a las especificaciones establecidas dentro del manual de INEGI, tomando como referencia el número de coberturas establecidas para el periodo 1970.

Un segundo paso, consistió en agrupar la información vectorial de uso de suelo y vegetación en ocho diferentes clases de cobertura de suelo, utilizando técnicas de geoprocésamiento espacial dentro de una plataforma SIG. De acuerdo con criterios de INEGI, se definieron las siguientes clases de cobertura de suelo: agrícola, asentamiento humano (AH), bosque, matorral, pastizal, selva, sin vegetación aparente (SVA) y otro tipo de vegetación (OV). Esta última comprende vegetación hidrófila, halófila, inducida, popal y tular. La agrupación de coberturas redujo el procesamiento de información para los periodos 1970 y 2010. Otros periodos analizados (series: I “1985”, II “1992”, III “2002”, IV “2007” y V “2011” y años 1970 y 2010) se utilizaron para generar un modelo de riesgo ante inundaciones para diferentes casos de estudio para México. Este modelo se explica más adelante.

El procesamiento de información de tipo edafológico, se organizó y agrupo de acuerdo con sus características físicas (textura, edafología y permeabilidad), definiéndose los grupos hidrológico: A, B, C y D que establecen su potencial de infiltración (Neilsen, 1998; USDA - NRCS, 2009):

- Tipo A. Suelos que se caracterizan por una rápida capacidad de infiltración bajo condiciones de suelos saturados. Físicamente su textura es gruesa (arenas o arenosos – limosos) con profundidades mayores que los del tipo B, C y D. Estos suelos presentan condiciones de permeabilidad muy alta.
- Tipo B. Suelos que se caracterizan por capacidad de infiltración moderada bajo condiciones de suelos saturados. Físicamente su textura es franco – arenosa, franco – arcillosa o franco – limosa con profundidades medias.
- Tipo C. Suelos que se caracterizan por capacidad de infiltración baja (lenta) bajo condiciones de suelos saturados. Físicamente, su textura es franco – arcillosa, franco – limosa o franco – arenosa con profundidades bajas donde predominan un alto contenido de arcilla.
- Tipo D. Suelos que se caracterizan por capacidad de infiltración muy lenta bajo condiciones de suelos saturados. Físicamente, su textura es arcillosa, son suelos muy impermeables.

El procedimiento realizado para obtener el mapa de NC consideró una serie de pasos y procesos (Figura 2.6) que combinan la información de cobertura de suelo y grupo hidrológico. Para asignar los valores de número de curva para las clases obtenidas, se utilizó información establecida para México en el Manual del Modelo para Pronóstico de Esguerrimiento (Domínguez, *et al.*, 2008). Como complemento se usaron las tablas estandarizadas desarrolladas por el USDA – NRCS contenidas en la metodología Urban Hydrology for Small Watershed del Technical Release *TR - 55, USDA – NRCS* (1986). Se definieron los valores de número de curva considerando una condición de humedad antecedente (CHA) de los suelos de tipo normal. Esta CHA establece tres tipos de humedad: *i)* suelos secos *ii)* suelos en condiciones de humedad normal o promedio y *iii)* suelos húmedos. Debido a la complejidad orográfica, climática y edáfica existente en México, los valores de NC fueron asignados considerando una CHA de tipo normal o promedio con el objetivo de no sobreestimar o subestimar valores de esguerrimiento. La información espacial obtenida se utilizó como indicador de vulnerabilidad para calcular el índice de riesgo ante inundaciones. La información gráfica de NC se desarrolló en un SIG.

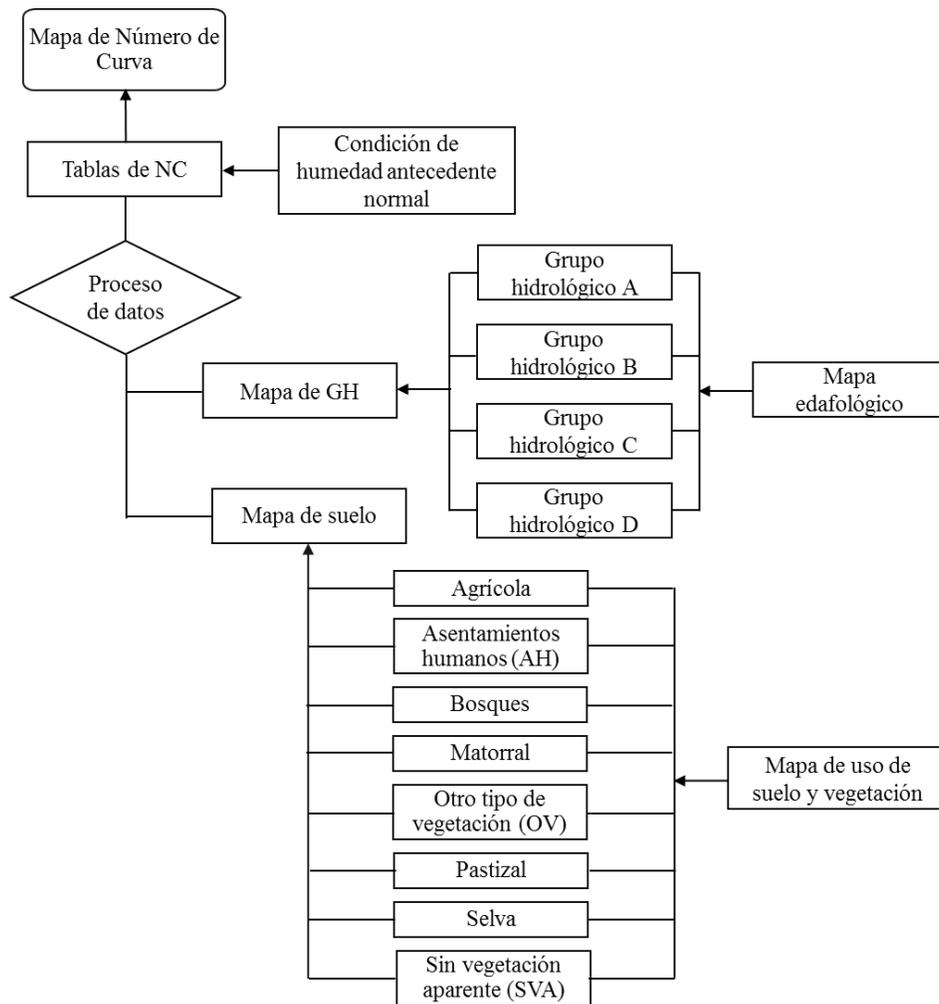


Figura 2.6 Diagrama de flujo utilizado para procesar y obtener valores de número de curva para los suelos de México.

2.4.4 Datos del terreno (Indicadores estáticos)

a) Índice de compacidad

El índice de compacidad o coeficiente de compacidad (K_c) se utiliza dentro del campo de la hidrología para definir la geometría de las cuencas, y con ello, su potencial de aportación de escurrimientos. En este trabajo, se utiliza como indicador de vulnerabilidad clasificando las cuencas de acuerdo con su geometría. Este parámetro, establece la relación entre el perímetro y área de una cuenca (ecuación 2.7). El resultado determina la forma dominante de la cuenca, y en consecuencia, el agua de lluvia probable de ser captada y escurrida considerando los elementos de abstracción dentro del proceso lluvia – escurrimiento (permeabilidad de suelos)

(Campos, 1987). Se establecieron dos formas geométricas. La primera representa las cuencas circulares ($k_c = \sim 1$). Esta forma establece mayor área de captación y mayor probabilidad para generar escurrimientos con tiempo de concentración bajo. Otro tipo, está representado por cuencas de forma alargada ($K_c = > 1$), que significa valores contrarios a las forma circular.

$$K_c = P/2\pi = 0.28 (P / (A_c)^{1/2})$$

2.7

Donde:

K_c = índice de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (longitud del perímetro del parteaguas en km)

A_c = Área de la cuenca (km^2)

Este indicador adimensional se utilizó para definir la geometría circular o alargada de 987 cuencas definidas para México (CONAGUA, 2015). Se utilizó un sistema de información geográfica (SIG) para generar el mapa de índice de compacidad de las cuencas. Los valores de compacidad (Figura 2.7) permitieron definir espacialmente la distribución de cuencas circulares (38 %) y cuencas alargadas (62 %) para México.

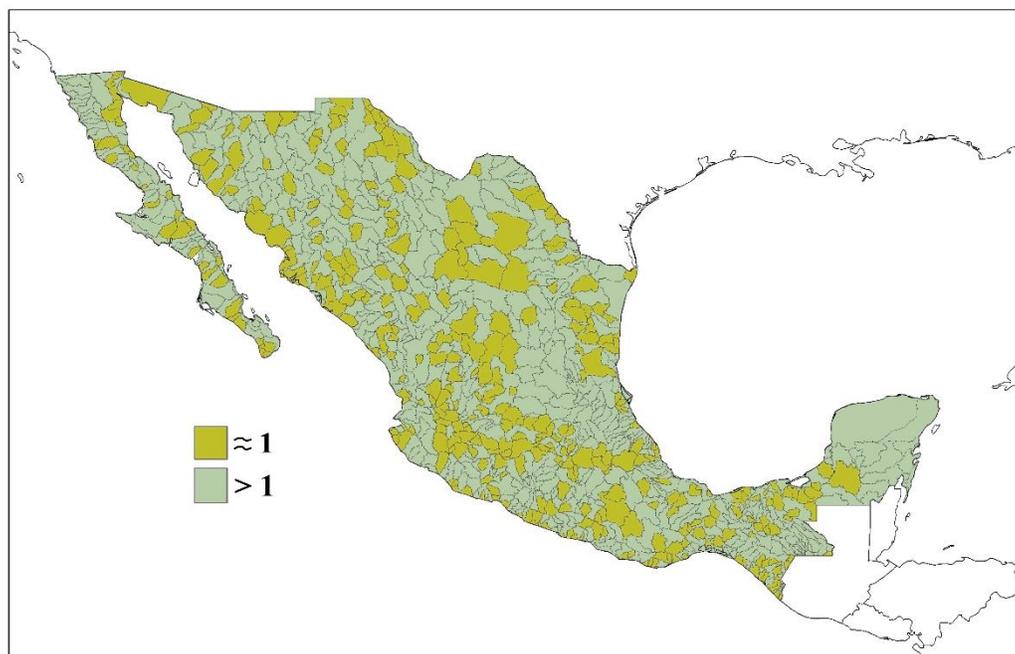


Figura 2.7 Distribución de valores de compacidad para las cuencas de México.

b) Pendiente del terreno

Se incorporó la orografía del terreno (α) como parámetro físico para determinar de forma simplificada el potencial de las cuencas para generar mayor número de escurrimientos. Se establecen valores de pendiente del terreno como resultado de procesar información de un modelo digital de terreno (MDE) con resolución de 30 metros. El procesamiento se realizó en un sistema de información geográfica utilizando criterios geomorfológicos (Pedraza, 1996; Sprenger, 1978). Se establecieron dos clasificaciones geomorfológicas (figura 2.8) de acuerdo con los siguientes criterios: *i)* áreas de aportación y *ii)* áreas de acumulación o con potencial de inundación.

- i) Clase I > 1% zonas onduladas o áreas de aportación de las cuencas para generar escurrimientos.
- ii) Clase II < 1% zonas planas o áreas de acumulación de escurrimientos (zonas inundables).

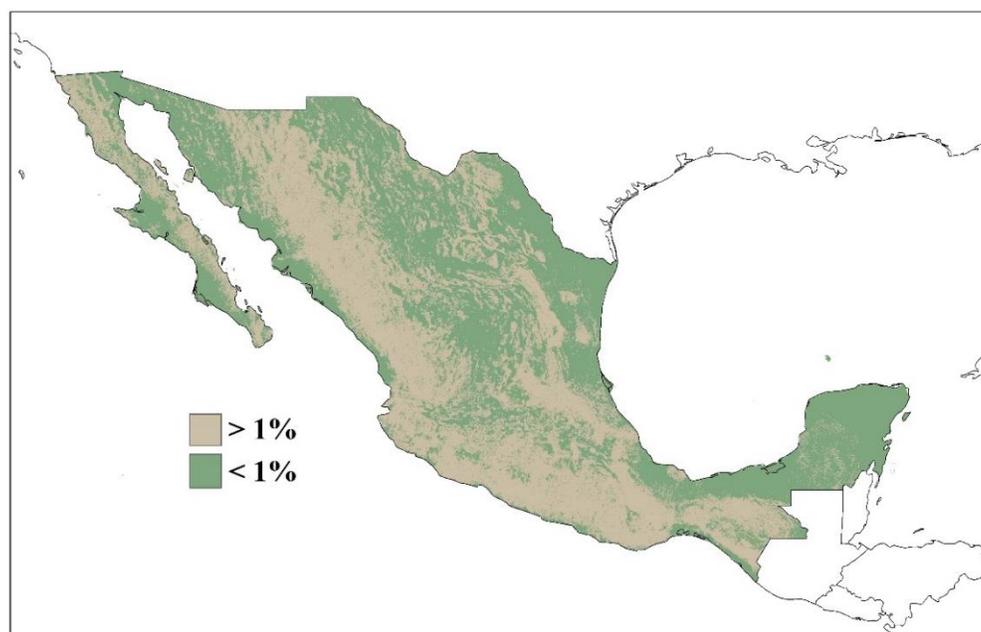


Figura 2.8 Distribución de valores de pendiente del terreno para México, establecidos considerando criterios morfométricos.

La combinación de los indicadores estáticos y la cobertura de suelo (indicador dinámico) resultaron en un índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas para México permitirá evaluar las cuencas hidrográficas considerando dos fases.

- a) Aporte de escurrimientos, que resulta del volumen captado de agua de lluvia y su transporte por orografía. Se utiliza la geometría del terreno para su evaluación (pendiente del terreno y compacidad de las cuencas)

- b) Abstracción y regulación del volumen de agua resultado de la capacidad de infiltración de los suelos.

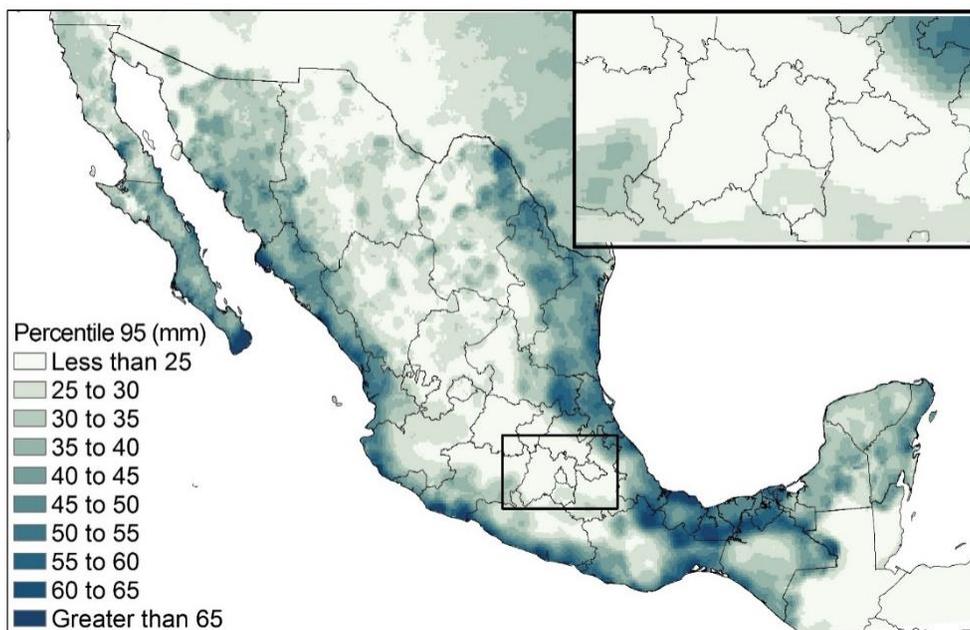
CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL RIESGO ANTE LLUVIAS INTENSAS PARA MÉXICO

3.1 Representación del peligro por lluvias intensas

Para establecer valores de peligro natural por lluvias intensas, se identificaron históricamente intensidades de lluvia observadas en desastres por inundaciones. Se analizaron los datos de lluvia diaria reportada por las estaciones climatológicas que se encuentran bajo resguardo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010). La información reveló que los episodios de lluvia registrados antes de un desastre, mostraban por lo general una intensidad ≥ 100 mm acumulados para tres días consecutivos. Este valor se consideró como umbral de lluvia intensa para caracterizar el peligro natural necesario para generar inundaciones en algunas regiones del país (por ejemplo algunos municipios de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Guerrero). Otras regiones de país mostraron umbrales con menor intensidad como el establecido para la Ciudad de México (20 mm a 30 mm/día). Debido a esta diferencia de umbrales de lluvia intensa observada, fue necesario establecer de forma adecuada una representación del peligro natural que no sobreestimara o subestimara los valores de lluvia intensa establecidos como peligro, considerando la distribución espacial y temporal de las lluvias para México.

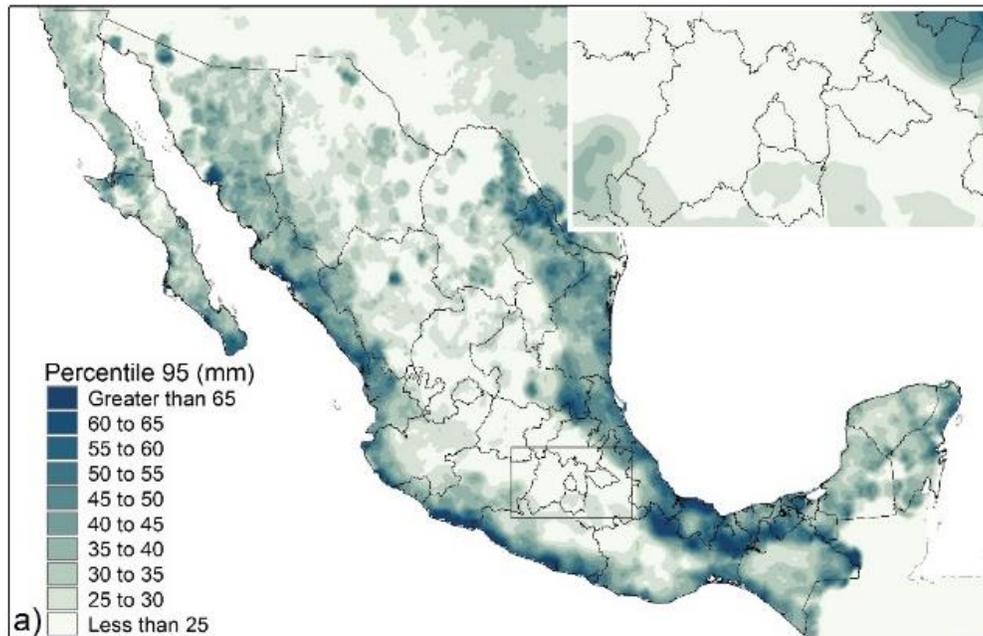
De lo anterior, se estableció como mejor forma para representar la distribución espacial de valores de lluvia diaria intensa, el uso del percentil 95% (P95). Como unidad de magnitud el P95 ha sido ampliamente utilizado para mostrar la variabilidad espacial de los patrones de lluvia para México (Robledo, 2008; CONAGUA, 2012). Este procedimiento estadístico hace referencia al 5% (0.05) de los valores de lluvia intensa que pueden ser generados durante el verano por la ocurrencia de ciclones tropicales en la mayor parte del territorio. El umbral de lluvias intensas identificado como peligro natural a partir del análisis de los datos de estaciones climatológicas se encontró contenido dentro de los valores de percentil 95 (P95) obtenidos. Esta unidad de medida se utilizó para estimar el riesgo de inundaciones por lluvias intensas para México. Como complemento, se analizó la dinámica del peligro natural, evaluando la información de P95 del periodo 1980 y 2010 con el objetivo de mostrar como la tendencia en el número de días con precipitación mayor al P95 no es constante espacial y temporalmente. Una aproximación de esta dinámica de lluvias intensas para México fue realizada por Aguilar *et al* (2005) considerando la región de Centroamérica y norte de Sudamérica.

La distribución espacial de valores de lluvia intensa (P95) se graficó en una malla regular con resolución espacial de 9 km * 9 km resultado de la técnica de asimilación de datos tipo Cressman, la cual mostró diferencias en los patrones espaciales de lluvia intensa para México (Figura 3.1). Esta distribución de valores espaciales se observa frecuentemente durante la segunda mitad del verano (septiembre - octubre) en casi todo el país. Los datos mostraron en costas del Golfo de México valores de precipitación muy altos (> 65 mm/día) en contraste con regiones áridas y semiáridas del altiplano mexicano dónde los valores máximos del P95 son < 30 mm/día. En otras regiones como la Bahía de Acapulco en el estado de Guerrero, se observa la presencia de lluvias intensas (> 65 mm/día) que pueden ser resultado de la ocurrencia de ciclones tropicales y los flujos de humedad que son forzados orográficamente. Pedrozo – Acuña (2014; 2015) señala que para el evento ocurrido en septiembre de 2013 las lluvias registradas en la región fueron mayores a 100 mm/día. En el sureste de la península de Baja California y noreste del país (Tamaulipas) el P95 mostró la presencia de lluvias muy intensas, incluso cuando su precipitación acumulada es baja (CONAGUA, 2015). Esto se debe principalmente al paso de ciclones tropicales (Aiyyer, 2008; Maloney, 2000). En el caso particular de la Ciudad de México, se observó un P95 con valores de 25 a 30 mm/día. Estos valores se consideran un umbral de lluvias intensas para la ciudad (Magaña *et al.*, 2003) a partir del cual, es mayor la posibilidad de encharcamientos e inundaciones (Domínguez, 2000; 1997).



*Figura 3.1 Distribución de valores de P95 (mm / día) para México.
Periodo 1980-2010*

Parte del análisis del peligro natural, consideró evaluar la dinámica de las lluvias intensas para México, con el objetivo de identificar cambios significativos en su distribución espacial, y con ello, mayor riesgo de inundaciones. El resultado de comparar la distribución de valores de P95 entre los periodos 1980 – 1990 y 2000 – 2010 (Figura 3.2) mostró cambios importantes en su distribución espacial siendo mayores en las regiones del noreste y sureste de la península de Baja California, observándose incrementos en intensidad y magnitud. Aunque espacialmente, la distribución de valores de intensidad de lluvia se observó similar para ambos periodos, la mayor parte de los cambios se presentaron cuando se realizó un análisis detallado, como el observado para la Ciudad de México (recuadro) donde la distribución de valores de lluvia mostró mayor incremento hacia el sur, mientras que hacia el suroeste del Estado de México los valores mostraron menor intensidad. Esto permite establecer que el peligro por lluvias intensas obtenido (P95) a partir del análisis objetivo Cressman resultó en una herramienta de análisis de datos climáticos útil para observar modificaciones en el patrón de las lluvias intensas a escala local (recuadro).



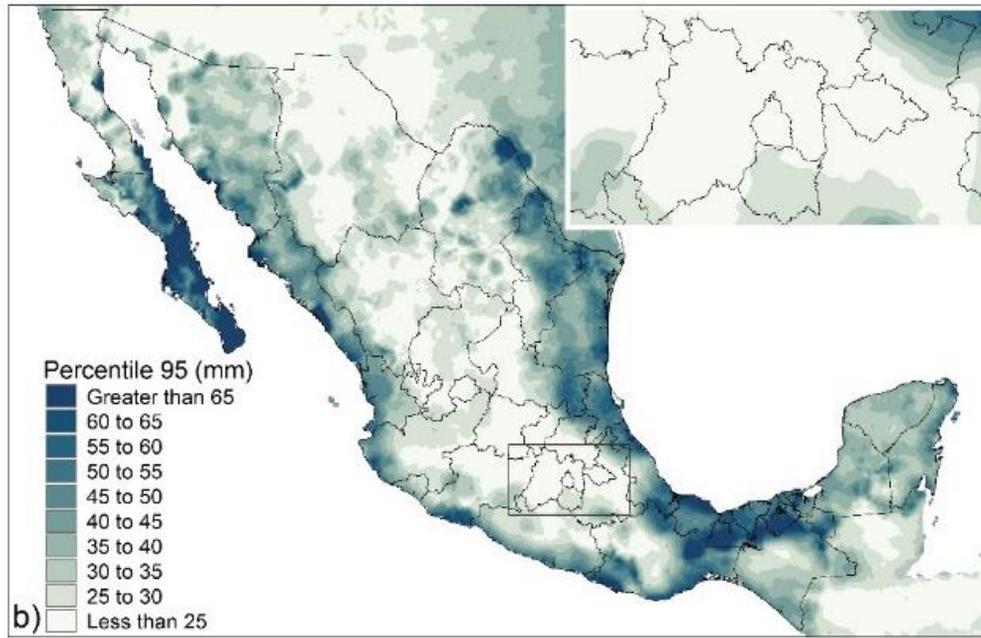


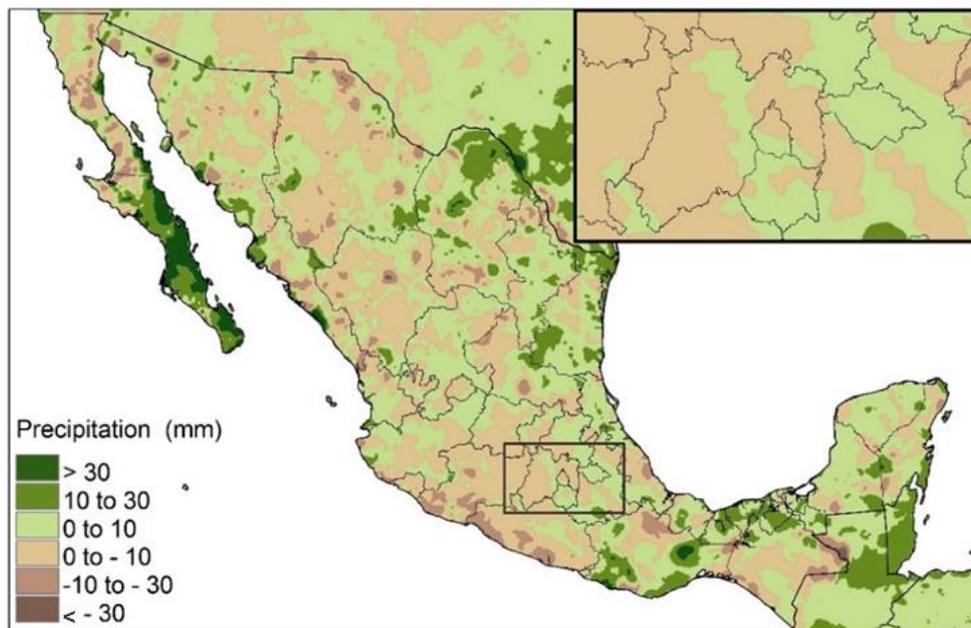
Figura 3.2 Distribución de valores de P95 (mm / día) para México para los periodos (a) 1980 – 1990 y (b) 2000 – 2010.

3.1.1 Cambio en el peligro por lluvias intensas

La dinámica espacial del peligro calculada con la magnitud P95 para los periodos 1980 – 1990 y 2000 - 2010, se utilizó para evaluar el factor de cambios en la distribución de las lluvias intensas del país (figura 3.3), con la finalidad de identificar cambios sensibles que representen un incremento del peligro y riesgo de inundaciones para México. Diversos estudios han mostrado que algunas regiones de México presentan una tendencia positiva a un incremento de las lluvias intensas en la última década (Aguilar *et al.*, 2005; Méndez *et al.*, 2008; INECC, 2012), lo cual podría explicar el aumento parcial de mayor número de inundaciones.

El factor de cambio obtenido de comparar la magnitud de lluvias intensas para México, mostró variaciones espaciales significativas en valores de lluvia intensas en diversas regiones del país. En regiones como Veracruz, adyacente al Golfo de México, se observaron valores negativos en cuanto a precipitación intensa (disminución de lluvia). Sin embargo, esta región ha reportado un incremento en el número y magnitud de inundaciones (Tejeda - Martínez, 2006). En regiones del noreste del país y la Península de Baja California, donde el P95 mostró valores positivos en su tendencia se puede establecer como resultado de una mayor ocurrencia de ciclones tropicales (NHC, 2015). Este incremento en la actividad de ciclones ha

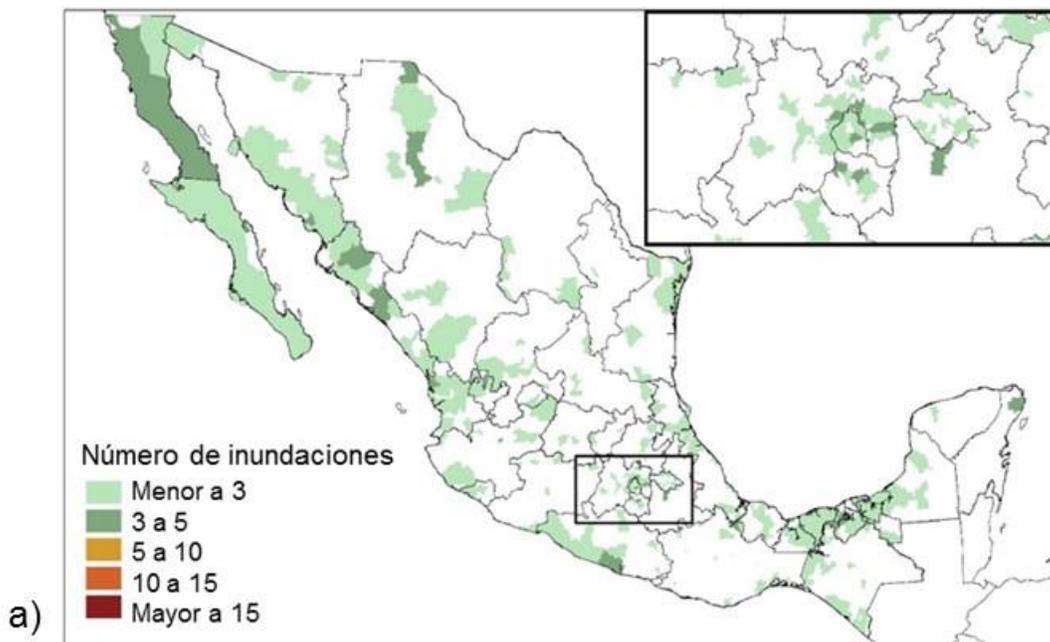
dado lugar un aumento del número de inundaciones. Particularmente, en la parte sur de la península de Baja California, se ha observado este incremento, al pasar de 7 ciclones tropicales durante 1970 a 24 durante la década del 2000. Algo similar se observa en el Valle de México, donde los eventos de P95 son más intensos y con mayor frecuencia que hace dos décadas. Aparentemente, el efecto de la Isla de Calor Urbano generado por la ciudad es la causa principal de mayores lluvias intensas (Jáuregui y Romales, 1996) en zonas del sur y sureste de la ciudad, donde la rápida transformación del territorio ha modificado la dinámica natural de las cuencas hidrográficas, y en consecuencia, existe un aumento considerable de los escurrimientos y la ocurrencia de inundaciones urbanas (Breña 2010; Domínguez 2000, 1997). En regiones centrales del pacífico mexicano como: la Bahía de Acapulco en el estado de Guerrero, se observaron valores negativos de lluvia intensa, sin embargo, esta zona ha mostrado un incremento en el número de desastres por inundaciones en los últimos 10 años (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013)



*Figura 3.3 Distribución de valores de P95 entre 1980-1990 y 2000-2010
(Factor de cambio)*

El resultado de evaluar la distribución de valores de P95 mostró que en diversas regiones del territorio no se observa una tendencia positiva en las lluvias intensas. Sin embargo, estas regiones, con frecuencia han experimentado un aumento en el número de inundaciones durante los últimos años. De acuerdo con registros de desastres (CENAPRED, 2014;

DesInventar, 2013), las regiones que sufren mayor ocurrencia de desastres, se localizan principalmente a lo largo de las regiones costeras, donde la magnitud del P95 muestra mayor nivel de intensidad de las lluvias con valores $\geq 50\text{mm/día}$ (Figura 3.4). Esta distribución espacial de los desastres ocasionados por inundaciones en México depende no sólo del peligro, sino también del contexto de la vulnerabilidad, en el que las lluvias intensas se presenten. Por ello, en la distribución de los desastres se observaron regiones dónde la intensidad de lluvia no presenta valores muy altos (ejemplo: Guerrero, Oaxaca y Chiapas). Sin embargo, existe la ocurrencia de desastres como resultado de los escurrimientos generados en la parte alta de las cuencas.



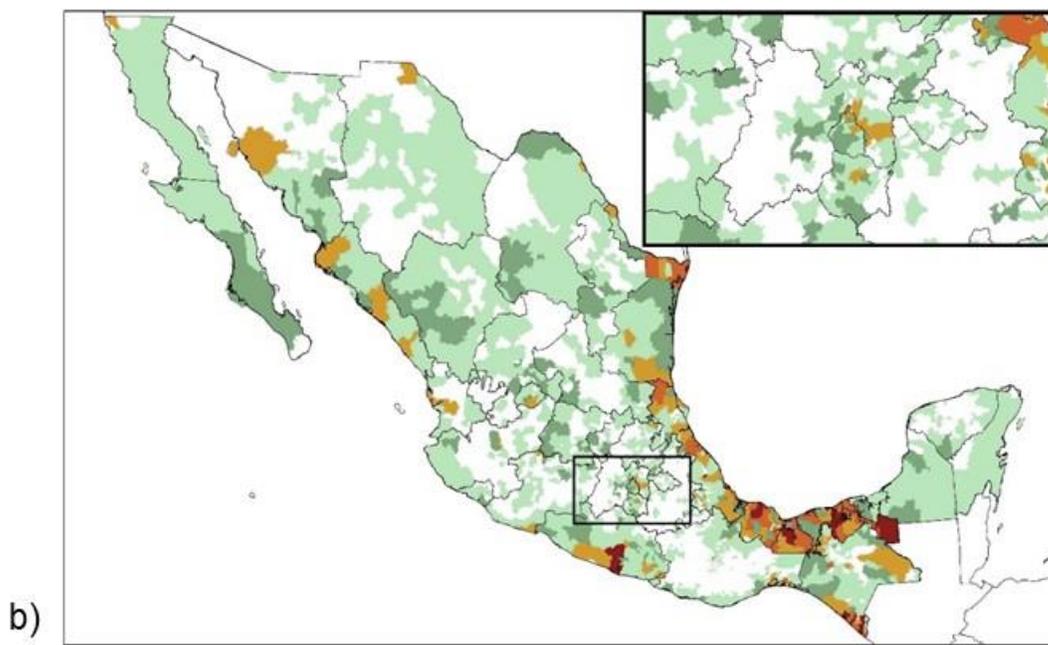


Figura. 3.4 Distribución del número de reportes de inundaciones por lluvias intensas para México (CENAPRED 2014; DesInventar, 2013) para el periodo (a) 1980 y (b) 2010.

En resumen, el aumento del número de inundaciones en las últimas décadas es más evidente en los estados cercanos a las costas del Golfo de México, en el Altiplano central (sobre el Área Metropolitana de la Ciudad de México), la costa sur del Pacífico mexicano y partes del norte de México. Sólo en algunos lugares las inundaciones tienden a disminuir, como en el estado de Baja California o el centro de Chihuahua. De esta forma, un enfoque naturalista simple puede dar una idea falsa en la que el cambio en el ciclo hidrológico por lluvias intensas es causa de una mayor frecuencia en el número de inundaciones. Sin embargo, desde una perspectiva multifactorial y dinámica del riesgo se deben considerar los cambios producidos por el peligro natural así como por el contexto de vulnerabilidad en el que este se presentan, y con ello, una mayor posibilidad de riesgo e inundaciones.

3.2 Índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas

a) Distribución de valores de cobertura de suelo

El resultado de comparar la superficie para las diferentes coberturas de suelo para el periodo 1970 y 2010, mostró una superficie modificada de aproximadamente de 460,000 km² (Figura 3.5). De acuerdo con los datos, se observó mayor incremento en las coberturas: agrícola y otro tipo de vegetación (OV) con 15% y 25% respectivamente. Estos porcentajes

corresponden al 30% de la superficie de suelo en México. En coberturas como los matorrales y los pastizales se observaron pérdidas de 5% y 20% de superficie que representan aproximadamente 30% del suelo en México. En coberturas como los bosques y selvas, se estimaron pérdidas de aproximadamente 6%, que corresponde a una superficie de $\approx 35\%$ del suelo en México. El factor de cambio observado de comparar de forma directa la información del periodo 1970 y 2010, mostró variaciones significativas con mayor impacto en coberturas naturales del suelo como son: bosques, matorrales, pastizales y selvas, mientras que en coberturas con influencia humana (agrícola, asentamientos humanos “AH”, otro tipo de vegetación “OV” y sin vegetación aparente “SVA”) se observaron incrementos significativos en áreas donde la cubierta natural de los suelos (bosques y selvas) presentó mayores pérdidas.

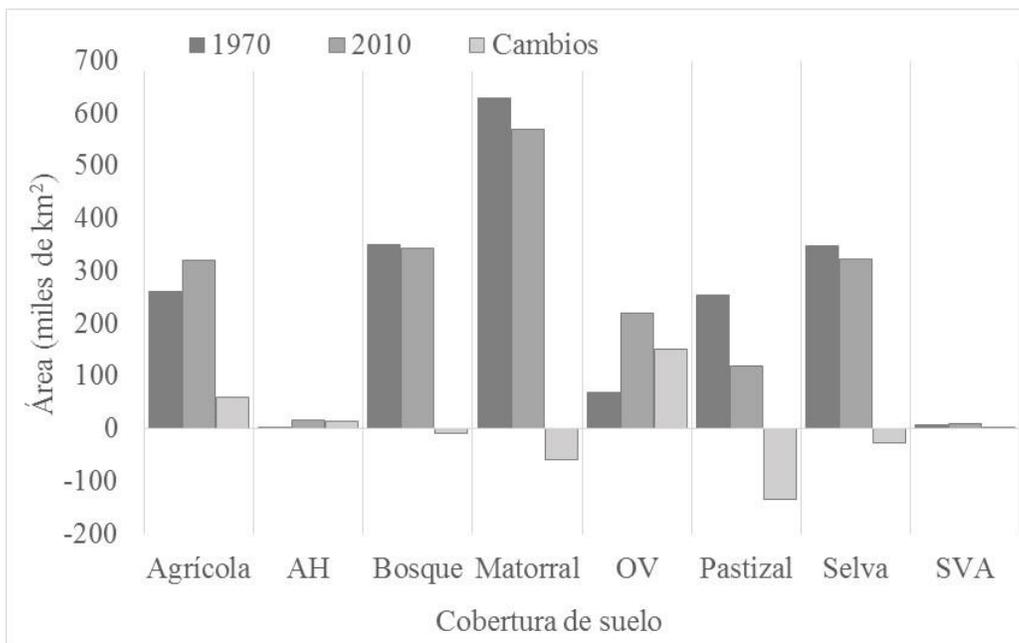


Figura 3.5 Distribución de la superficie (km²) para las diferentes coberturas de suelo para México, y factor de cambio obtenido de comparar los periodos 1970 y 2010.

Espacialmente, se observaron los mayores cambios de cobertura de suelo en zonas costeras de México, principalmente en regiones del Golfo de México como: Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas, así como en el estado de Nuevo León donde la transformación del suelo (pastizal y selva) se reemplazó (aproximadamente en 70%) por suelos agrícolas, vegetación inducida (OV) y asentamientos humanos. Similares cambios se

observaron en la costa del Pacífico mexicano (Guerrero, Oaxaca y Chiapas), dónde las selvas y bosques fueron sustituidos por suelos agrícolas y asentamientos humanos principalmente (Figura 3.6).

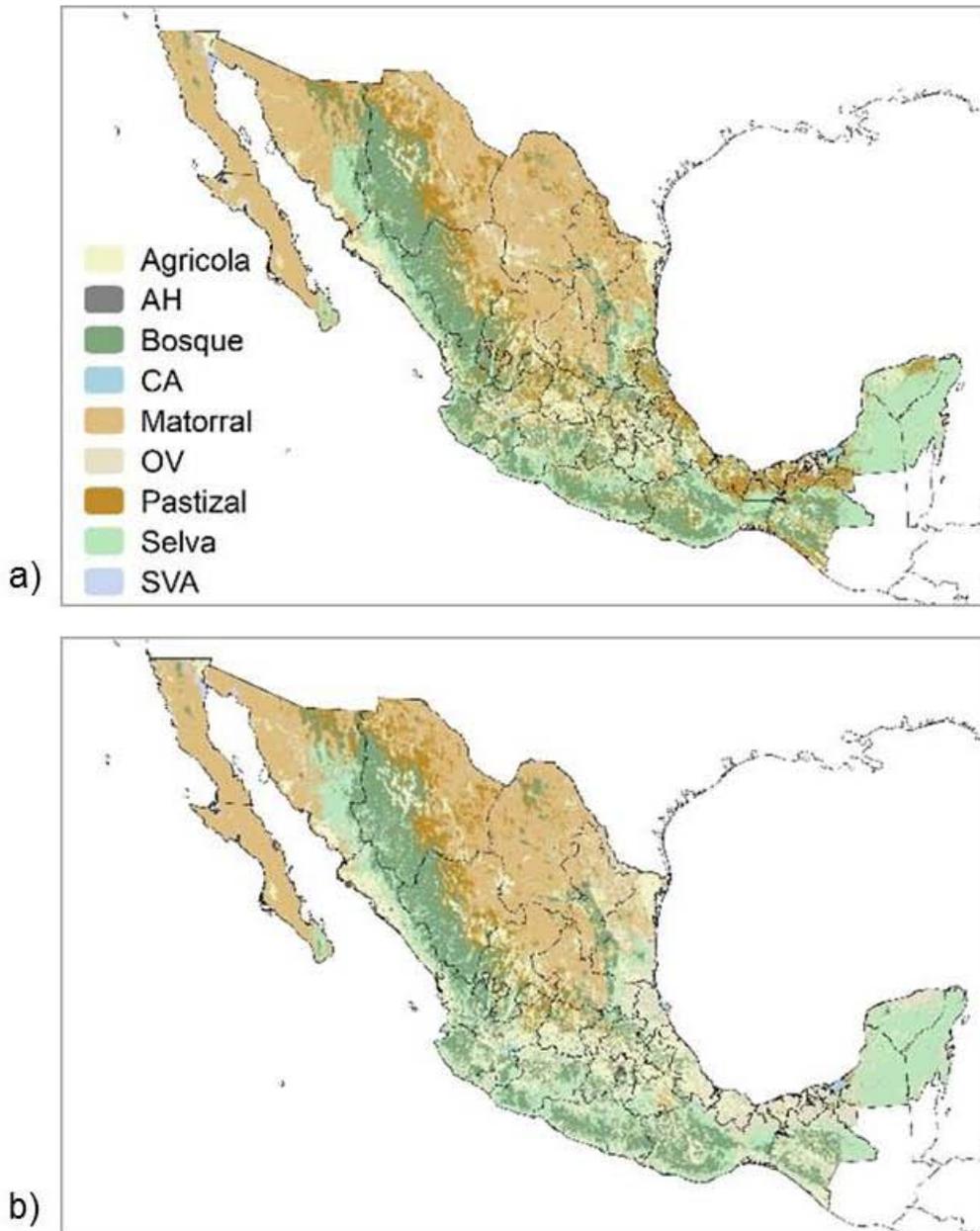


Figura 3.6 Distribución espacial de los suelos para México. Periodos 1970 (a) y 2010 (b).

b) Distribución de valores de grupo hidrológico (GH)

Como parámetro para evaluar el indicador de vulnerabilidad ante lluvias intensas, se clasificaron los suelos de acuerdo a su capacidad de infiltración y grupo hidrológico (GH). Las características físicas (textura y permeabilidad) con información edafológica utilizadas permitieron definir diferentes grupos hidrológicos para México. El resultado permitió obtener espacialmente diferentes niveles de infiltración del suelo para los periodos 1970 y 2010.

La distribución de valores de grupo hidrológico para México (Figura 3.7 a y b) se cuantificó para identificar su superficie en el país. El resultado mostró mayor distribución para los grupos hidrológicos tipo B con 63% y del tipo D con 23% de la superficie ocupada del territorio. En conjunto, estos grupos representan aproximadamente el 86% de la superficie del país. Espacialmente, se obtuvo que los suelos con GH tipo B (escurrimiento moderado) tienen mayor presencia en zonas de pendiente media ($> 1\%$) y menor pendiente ($< 1\%$) donde se ha desarrollado en mayor medida la agricultura. Los suelos caracterizados por el GH tipo D (máximo escurrimiento) se ubicaron principalmente en la llanura costera del Golfo de México y Pacífico. En esta zona existe un predominio de las actividades agrícola y ganadera (ejemplo: en laderas de montañas). Finalmente, la distribución para el GH tipo A y C (con menor extensión) se determinó principalmente para zonas montañosas (mayor pendiente: $> 1\%$) del centro del país y de las sierras oriental y occidental.

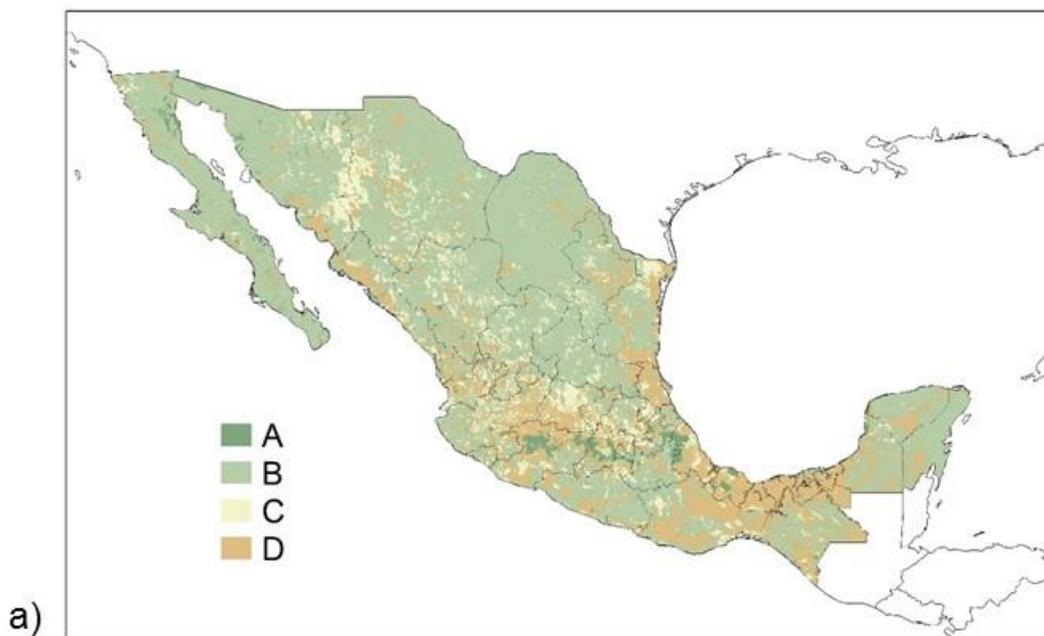




Figura 3.7 Distribución espacial de los diferentes grupos hidrológicos (GH) para México. Periodo 1979 (a) y 2010 (b).

El resultado de asignar valores de grupo hidrológico a las diferentes coberturas de suelo para México para los periodos 1970 y 2010 resulto en información individual que se comparó para obtener variaciones en la capacidad de infiltración de los suelos considerando los diferentes grupos hidrológicos. Cada polígono fue procesado en una plataforma SIG para obtener la superficie de suelo modificada para México (Figura 3.8). De acuerdo con los datos obtenidos de comparar el periodo 1970 y 2010, entre cobertura de suelo natural y los suelos modificados por acciones humanas se obtuvo una diferencia de aproximadamente 15% (300,000 km²) del total de la superficie del país. Especialmente, la distribución de suelos no naturales (agrícola, asentamientos humanos y otro tipo de vegetación "OV") corresponde al 49% (224,000 km²) de la superficie modificada en México (460,000 km²), y representan 80% de superficie de suelos con grupo hidrológico tipo B y D los cuales generan escurrimientos moderados a muy altos (escurrimientos máximos). En coberturas de suelo natural, como: bosques, matorrales, pastizales y selvas con dominio de los grupos hidrológicos tipo B y D se presentaron pérdidas del 50% (230,000 km²) de superficie del país. Estas coberturas tienen capacidad de infiltración moderada y moderada - alta.

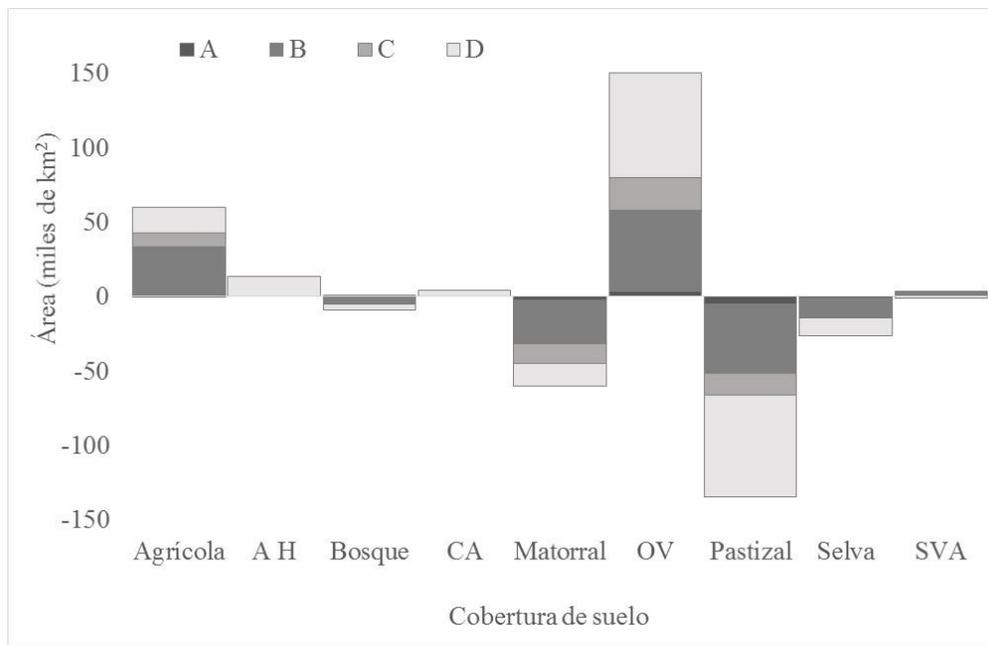


Figura 3.8 Distribución espacial de la cobertura de suelo según su tipo hidrológico. Resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.

Los valores de grupo hidrológico se compararon para obtener variaciones espaciales en su distribución y respuesta hidrológica (Figura 3.9). El resultado mostró mayor cambio en regiones costeras del Golfo de México y pacífico sur, y las regiones sureste y centro del país. Estas regiones presentaron mayor dominio de valores de grupo hidrológico tipo B y D. La distribución mostrada resultó del factor de cambio entre los periodos 1970 y 2010. El resultado se clasificó y gráfico considerando su GH en: *i)* GH tipo A “bajo”, *ii)* GH tipo B “moderado”, *iii)* GH tipo C “alto” y *iv)* GH tipo D “muy alto”. Estos valores representa la capacidad de infiltración de los suelos. Este proceso se realizó comparando la información para los diferentes GH de forma directa en una plataforma SIG.

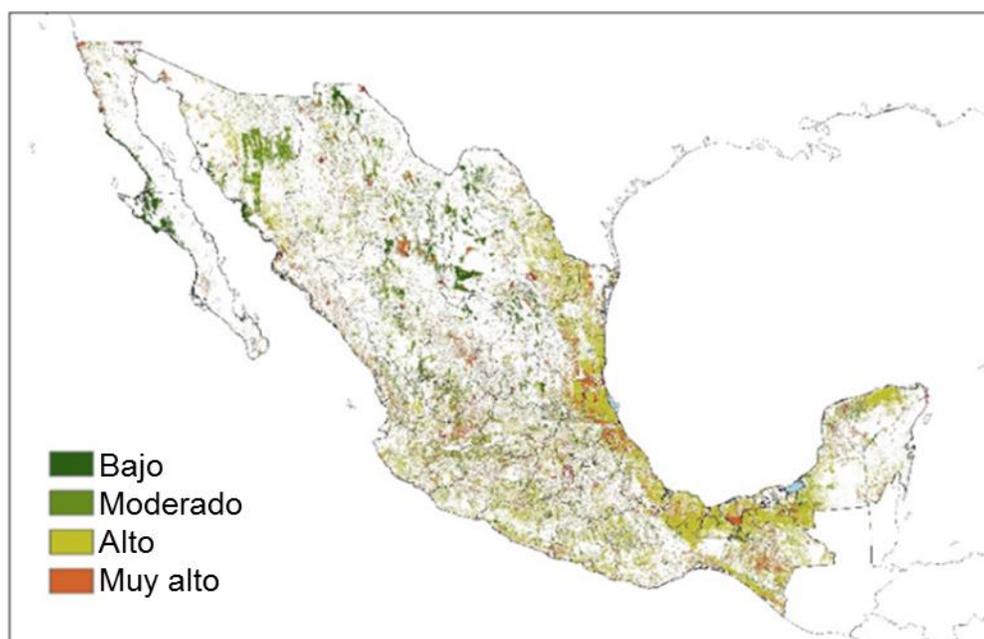


Figura 3.9 Distribución de valores de escurrimiento para México de acuerdo al factor de cambio en la cobertura del suelo y capacidad de infiltración del suelo como resultado de comparar el periodo 1970 – 2010.

Adicionalmente, se estableció el porcentaje de degradación de las cuencas para México, utilizando información de suelo no natural y suelo con vegetación inducida (incluida en la cobertura “otro tipo de vegetación”) para el periodo 2010, como elemento para establecer el porcentaje modificado de la cobertura natural del suelo para cada cuenca (987) (Figura 3.10). El resultado mostró como resultado modificaciones en los suelos naturales, principalmente en las regiones costeras del Golfo de México y la costa del pacífico, así como en las sierras del noroeste, centro y sureste donde el mayor porcentaje de suelo modificado se estimó en aproximadamente 514,000 km² (26% de la superficie del país). Esta superficie mostró porcentajes de degradación de 25% a 50%. Regiones circundantes a esta primera región (25% a 50%) presentaron porcentajes de degradación mayores a 50% con una extensión de aproximadamente 173,000 km² (9% de la superficie del país). La mayor extensión en superficie, se obtuvo para los valores de degradación menores a 25%. Estas cuencas cubren una extensión de 1,275,000 km² (64% de la superficie del país). Espacialmente, su distribución abarca gran parte del territorio, concentrándose principalmente en el altiplano mexicano, centro – sur del país, así como en la Península de Baja California y península de Yucatán.

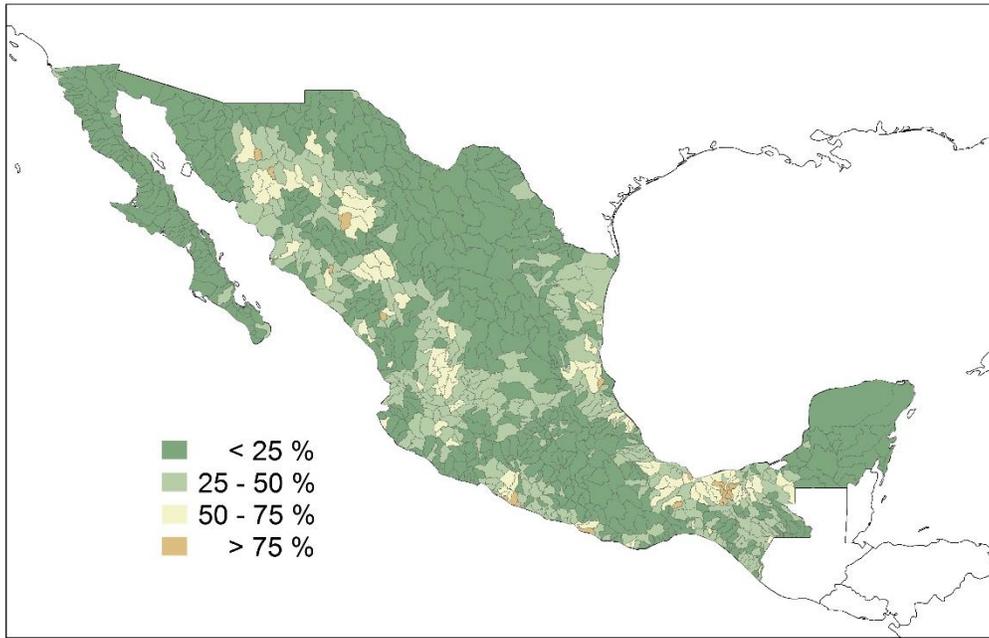


Figura 3.10 Distribución de cuencas hidrográficas con impacto por cambio en la cobertura natural del suelo (en porcentaje) para el periodo 2010.

c) Distribución de valores de número de curva

Como resultado de procesar y combinar las características de cobertura de suelo y los diferentes grupos hidrológicos, se obtuvo la información necesaria para diseñar el mapa de número de curva para México correspondiente a los periodos 1970 y 2010 (Figura 3.11). Los valores de número de curva que fueron asignados son resultado de combinar información cualitativa (atributos espaciales) de las variables de uso de suelo y edafología. Los valores de número de curva obtenidos resultaron en una escala de valores que va de 20 a 100 (adimensionales). Donde los valores de NC cercanos a 100 representan los máximos escurrimientos, mientras que los escurrimientos mínimos serán los cercanos a un NC = 20.

De acuerdo con la distribución de valores de número de curva y la sensibilidad que mostraron las diferentes coberturas de suelo considerando su capacidad de infiltración (Figura 3.12), se observó que los valores de NC (>60) con mayor potencial para generar escurrimientos se distribuyen principalmente en costas de Golfo de México y pacífico mexicano, así como en las regiones montañosas del centro y sureste del país. Estas zonas durante 1970 representaban el 45% de la superficie del país (884,504.24 km²), mientras que en 2010 se incrementaron en

aproximadamente 3,000 km². El incremento mostrado por los valores de NC > 60 para México, resultó del incremento de las coberturas no naturales del suelo (agrícolas, asentamientos humanos y pastizales inducidos en la cobertura: otro tipo de vegetación) con mayor potencial para generar escurrimientos.

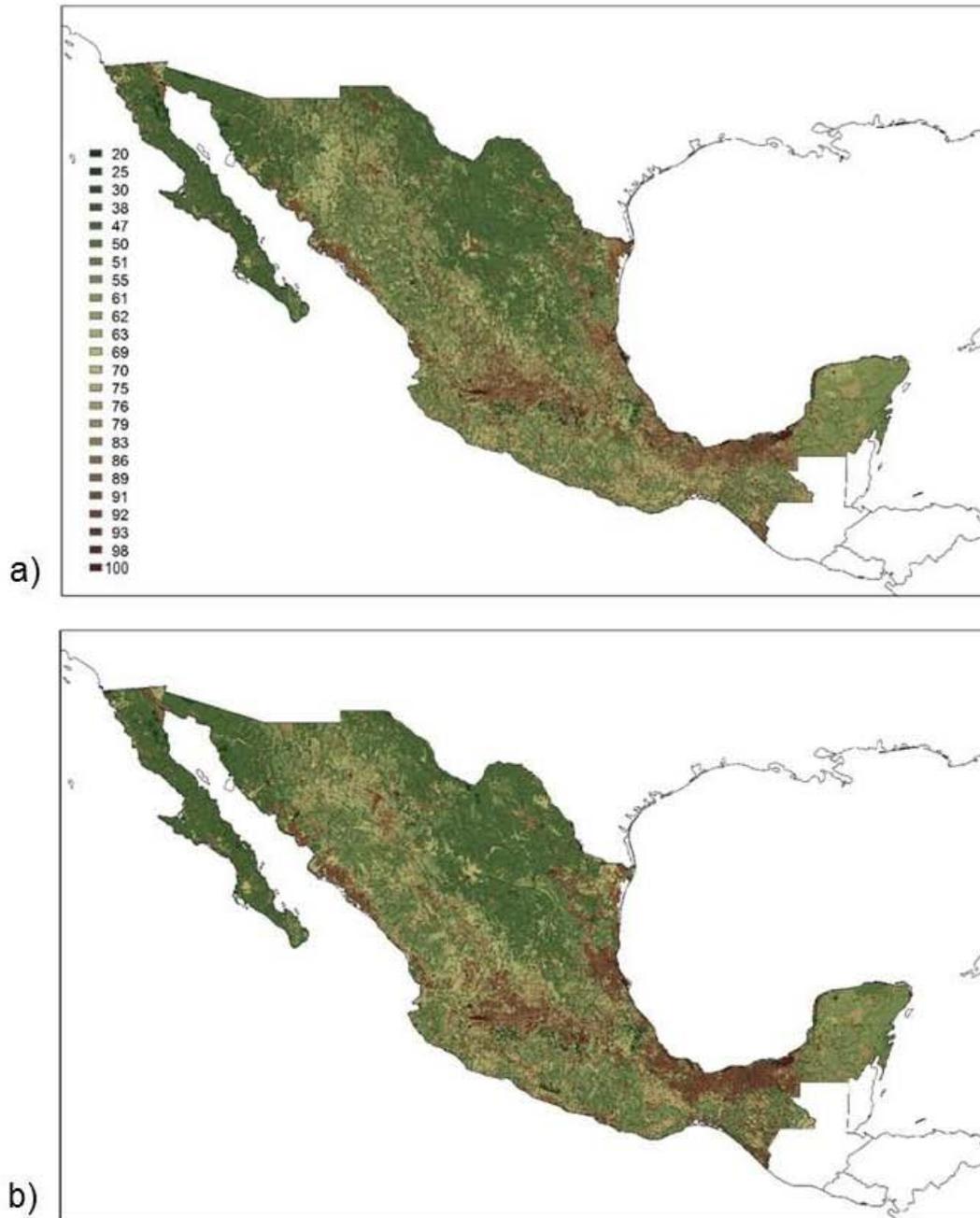


Figura 3.11 Distribución de valores de número de curva obtenidos para México. Periodos a) 1970 y b) 2010.

Para evaluar la respuesta hidrológica (sensibilidad) de los suelos para generar escurrimientos (Figura 3.12, líneas) se utilizaron diferentes intensidades de lámina de lluvia (10, 20, 30, 40, 50, 70 y 100 mm). El resultado mostró una mayor capacidad para generar escurrimientos en coberturas de suelo no natural con un porcentaje aproximado mayor al 50% del total de agua de lluvia captada convertida en escurrimiento. Estas coberturas están representadas por valores de NC > 60. Este tipo de respuesta hidrológica se presentó para los grupos hidrológicos A, B, C y D (de suelos no naturales). Por otro lado, en suelos naturales, el escurrimiento generado se relacionó principalmente con su grupo hidrológico. Para el GH tipo A y B la generación de escurrimientos mostró valores de escurrimientos < 50% del total de lluvia captada por los suelos. En coberturas naturales con GH tipo C y D se estimaron escurrimientos > 50% cuando se utilizó intensidades de lluvia mayor a 60 mm.

A partir de los valores de NC (Figura 3.12, barras) asignados para las diferentes coberturas de suelo y GH se estableció la sensibilidad que poseen los suelos para generar escurrimientos. Considerando la escala máxima utilizada para valores de NC [0 – 100] se observó que en coberturas de suelo de tipo no natural (agrícolas, asentamientos humanos y sin vegetación aparente) los valores de NC > 50 generaron escurrimientos mayores al 50% del total de agua de lluvia captada por los suelos. Este valor de número de curva (50) se observó únicamente para la cobertura natural: otro tipo de vegetación “OV” en combinación con el GH tipo “D” (máximo potencial para generar escurrimientos). Otros resultados mostraron que en coberturas de tipo natural, como: bosques, matorrales y selvas con GH tipo “D” los valores máximos de escurrimiento generados se encuentran entre 50% y 80% del total de la lluvia captada por los suelos.

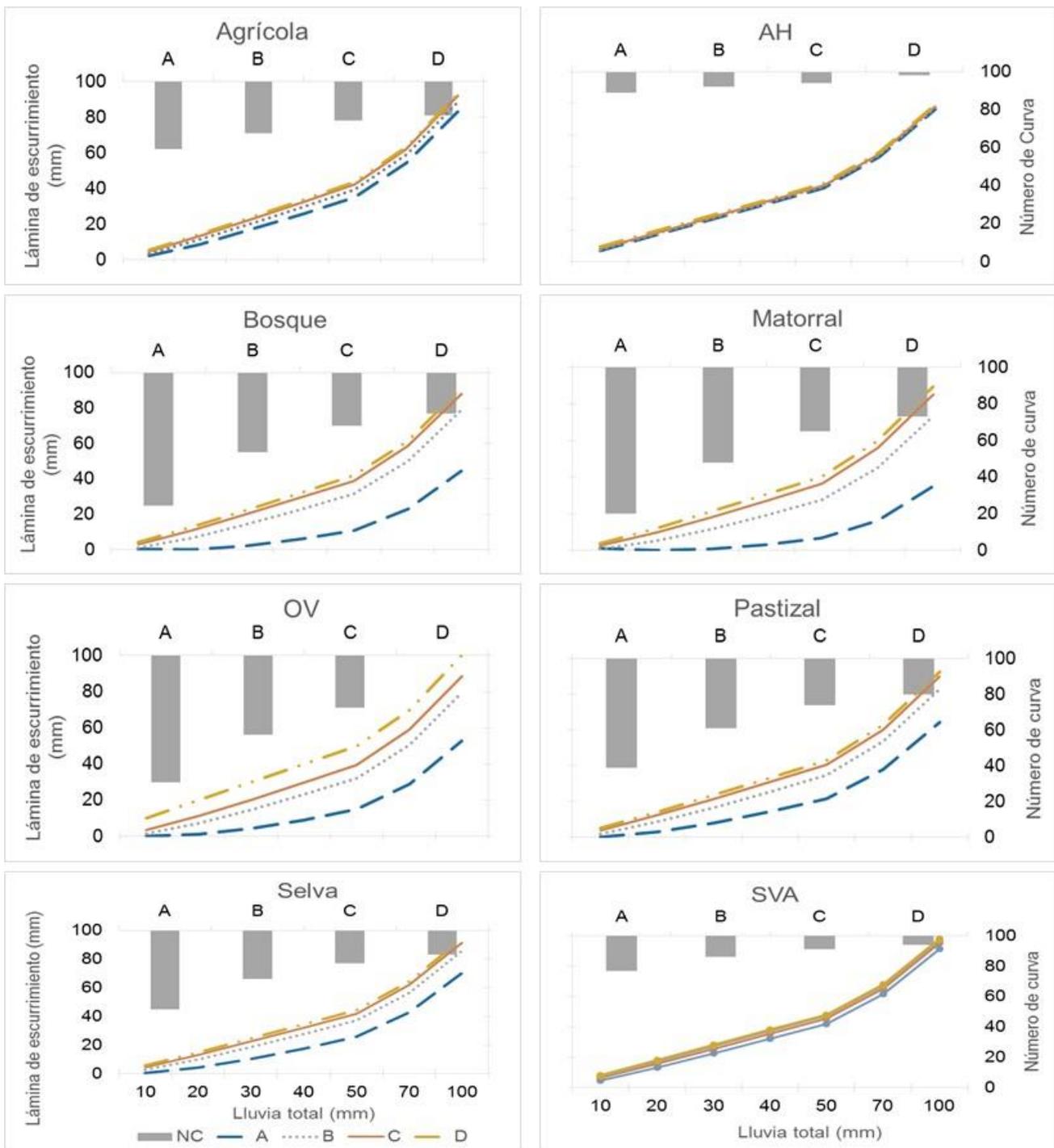


Figura 3.12 Distribución de la respuesta hidrológica para las diferentes coberturas de suelo (líneas), considerando diferentes intensidades de precipitación y valores de número de curva (barras).

De acuerdo con el análisis de sensibilidad que se obtuvo para diferentes valores de número de curva utilizando diferentes intensidades de precipitación, la distribución espacial de suelos con mayor capacidad para generar escurrimientos se observó para valores de NC > 60. Este valor representa aproximadamente el 45% (1,964,000 km²) de la superficie total del país con esta condición hidrológica (Figura 3.13). Esta respuesta hidrológica se observó principalmente en costas del Golfo de México y Pacífico dónde existe un mayor incremento de áreas agrícolas y ganaderas de acuerdo a los cambios observados en la cobertura del suelo natural entre 1970 y 2010. Este patrón se observó también en regiones montañosas del noreste y sureste del país, así como en regiones del centro del país dónde se tiene el mayor crecimiento de áreas urbanas.

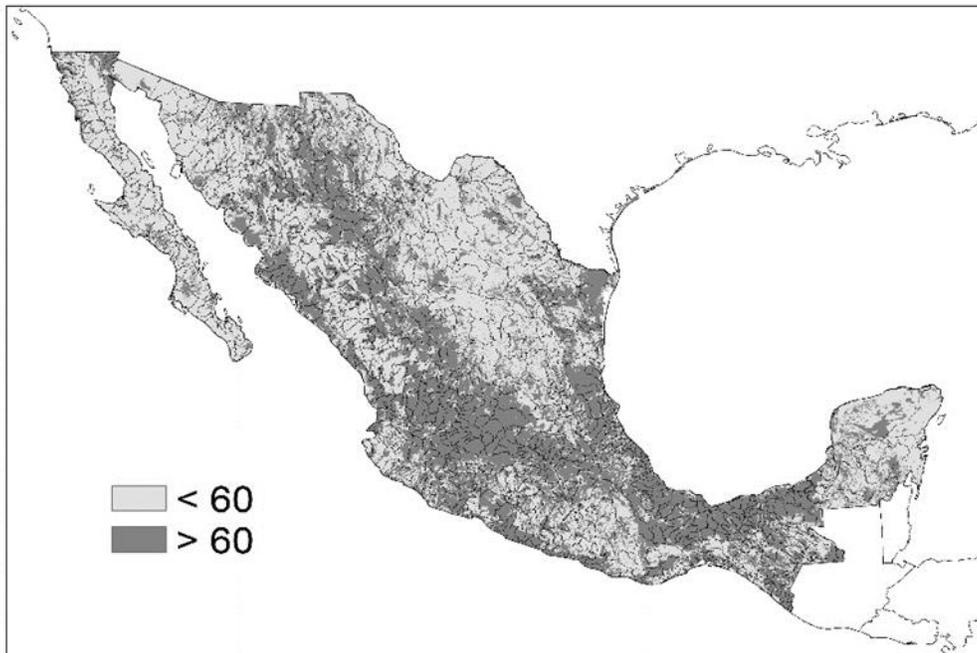


Figura 3.13 Distribución espacial de valores de número de curva (> 60) con mayor potencia para generar escurrimientos para el periodo 2010.

d) Distribución de valores de índice de vulnerabilidad

La vulnerabilidad como elemento dinámico del riesgo se evaluó para el periodo de análisis 1970 y 2010, a partir del producto de un indicador de vulnerabilidad dinámico número de curva (NC), y dos indicadores estáticos: compacidad de las cuencas (K_c) y pendiente del terreno (α) dentro de una plataforma SIG. El uso de indicadores estáticos se utilizó para definir la

capacidad de las cuencas para generar escurrimientos. La distribución espacial de valores obtenidos a partir de los indicadores estáticos mostró los siguientes resultados:

- 1) La compacidad de las cuencas (K_c) permitió definir espacialmente que 38% (375) de las cuencas del país tienen características geométricas de tipo circular (mayor aportación de escurrimientos), y que 62% (612) fueron definidas con características geométricas alargadas (menor aportación de escurrimientos).
- 2) La orografía del terreno caracterizada a partir de su pendiente, permitió definir áreas con mayor potencial para generar escurrimientos de forma natural. Se ubicaron como principales zonas de aportación: la vertiente del Golfo de México, noreste del país y Península de Yucatán, así como en las llanuras centrales de México, donde se observó mayor extensión de suelos modificados (agrícolas, pastizales inducidos y asentamientos humano). El incremento de zonas de aportación se observó como resultado de la pérdida de cobertura forestal (bosques y selvas) de acuerdo a la evaluación comparativa que se realizó en este trabajo.

Como primer paso para determinar el índice de vulnerabilidad para México, los indicadores estáticos utilizados para normalizar los valores de NC se combinaron para obtener diferentes respuestas hidrológicas para cada cuenca. Como parte de los resultado, se establecieron valores altos para geometrías circulares ($k_c \sim 1$) con pendientes del terreno $< 1\%$ (zonas plana), o bien, valores bajos al combinar geometrías alargadas ($k_c < 1$) con pendientes del terreno $> 1\%$ (zonas de aportación) (Figura 2.9).

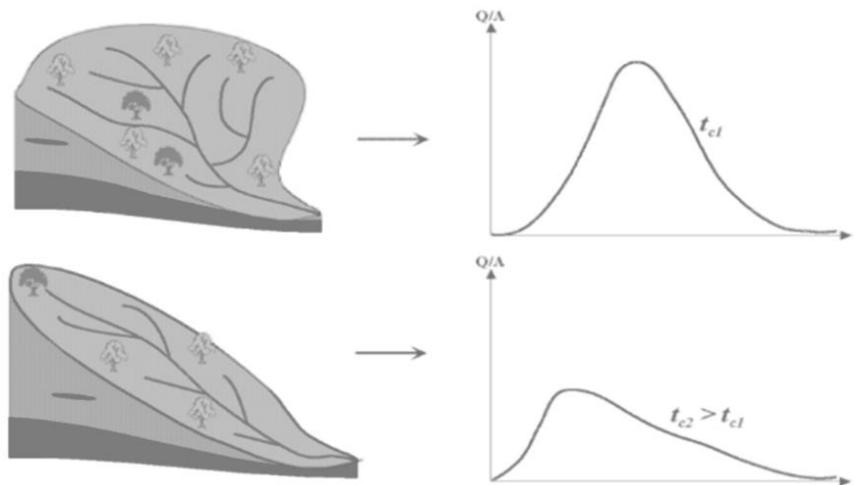


Figura 2.9. Modelo hidrológico idealizado que muestra la respuesta hidrológica (hidrográma) para dos tipos de cuenca (circular y alargada), considerando diferentes grados de pendiente. (Fuente: tomada de internet).

Un segundo paso consistió en obtener el producto de los tres indicadores de vulnerabilidad. El resultado permitió obtener un archivo en formato de malla (raster) con resolución espacial de 250 m^2 , como resultado de promediar para cada punto en el espacio (pixel) los indicadores de vulnerabilidad, obteniéndose valores independientes de índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas para cada cuenca de México (Figura 3.14). Los valores de índice de vulnerabilidad se normalizaron (ecuación 2.1) para posteriormente agruparse en cinco clases con rangos de 0.2 permitiendo un manejo de la información espacial sencillo y ágil. Esta información se utilizó posteriormente para establecer en conjunto con la información de peligro áreas con mayor riesgo de inundaciones para México.

Espacialmente, se observó que las regiones con mayor nivel de sensibilidad para generar escurrimientos corresponden a valores de vulnerabilidad que se encuentran entre 0.40 y 1.0. Estos valores se encuentran distribuidos principalmente hacia el noreste de México, en el estado de Sinaloa y en la vertiente del Golfo de México dónde se ubican los estados de Veracruz, Tabasco y Tamaulipas. También se ubicaron estos valores en valles centrales del eje neo volcánico transversal, y en costas del sureste del país (Chiapas), y la desembocadura del río Colorado al noroeste del país (entre los estados de baja California y Sonora), y en los estados de Durango y Chihuahua. Los valores de índice de vulnerabilidad menores a 0.4 se distribuyen en gran parte del territorio mexicano.

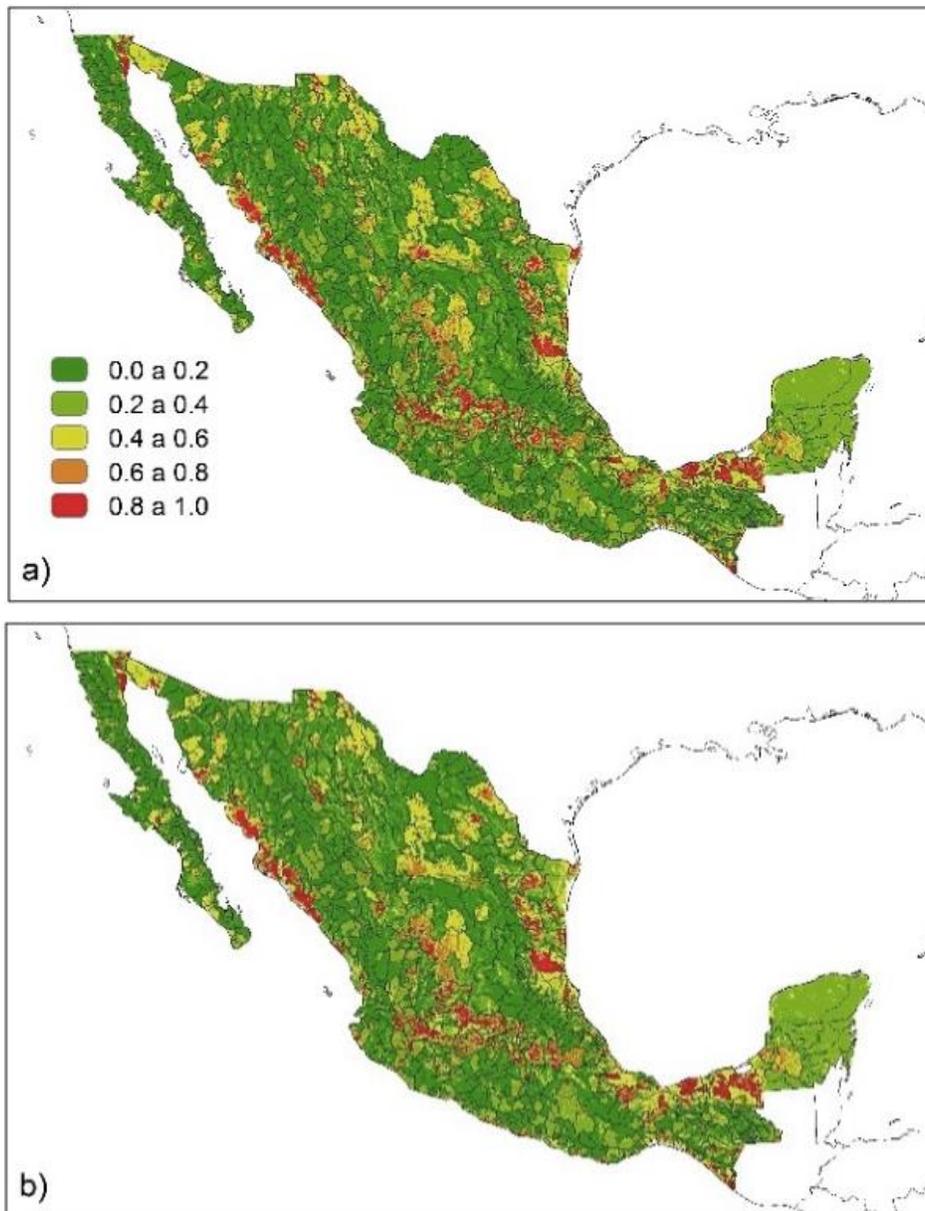


Figura 3.14. Índice de Vulnerabilidad por escurrimientos ante lluvias intensas para las cuencas de México. a) 1970 y b) 2010.

3.2.1 Cambio en el índice de vulnerabilidad ante lluvias intensas

El factor de cambio se obtuvo de comparar el índice de vulnerabilidad para 1970 y 2010. El resultado mostró aproximadamente 42,337 km² de superficie modificada (Figura 3.15). El cambio más significativo se observó en niveles de vulnerabilidad “muy bajo” con pérdidas de 14,104 km² (33%) y vulnerabilidad “moderada” con incremento de 16,357 km² (39%). Para niveles “bajo” y “alto” la superficie se redujo 6,552 km² (15.4) y 292 km² (0.6), mientras el nivel “muy alto” aumento 5,032 km² (12%). Espacialmente, se observan mayores cambios en

regiones montañosas y costeras del país donde el porcentaje de degradación es significativo (> 25%) con índices de vulnerabilidad con valores entre moderado y alto. Por otro lado, también se observó disminución de vulnerabilidad en zonas donde se incrementó la cobertura forestal.

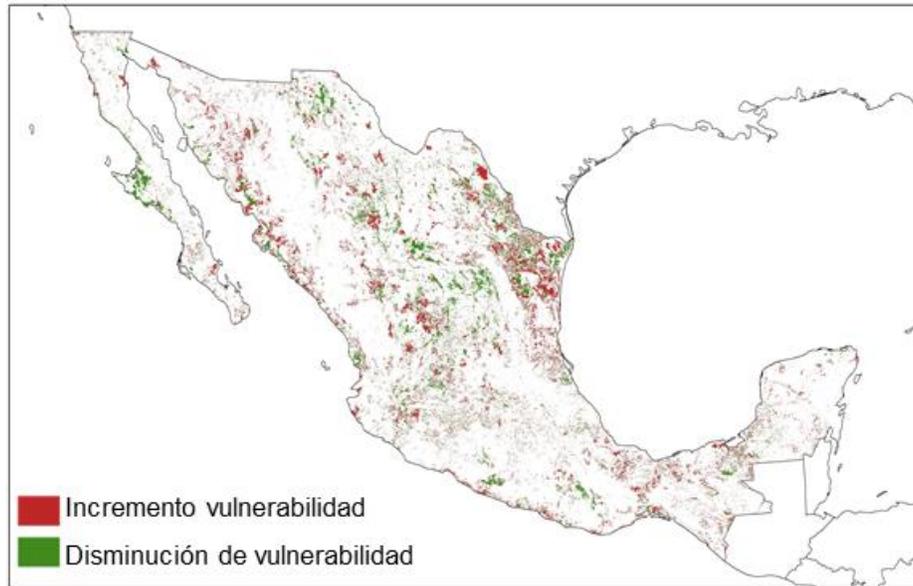


Figura 3.15 Distribución del índice de vulnerabilidad como resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.

La distribución espacial del factor de cambio del índice de vulnerabilidad, mostró un aumento de regiones con mayor sensibilidad a lluvias intensas, que corresponden a cuencas con porcentajes de degradación de 25% a 50%. Estas áreas presentan el mayor número de desastres causados por inundaciones con registro en los últimos años (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Esta condición permite definir espacialmente regiones prioritarias dentro de un contexto de gestión del riesgo ante inundaciones para México.

CAPÍTULO 4 ÍNDICE DE RIESGO Y GESTIÓN DE RIESGO ANTE LLUVIAS INTENSAS PARA MÉXICO

4.1 Índice de riesgo ante lluvias intensas

Cuando se combina la evaluación del peligro y la vulnerabilidad, es posible obtener una estimación del riesgo, con el objetivo principal de reducir o prevenir desastres a partir de la dinámica identificada en cada elemento del riesgo. Como parte del análisis de los riesgos, el peligro natural, por lo general, es calculado en términos de probabilidad, mientras que la vulnerabilidad es evaluada a partir de índices, que por lo regular se normalizan en términos de probabilidad para un manejo de la información en forma estandarizada. De esta forma, el valor de riesgo obtenido será representado en esta misma unidad estadística. Por otro lado, cuando el peligro está representado por valores medidos para eventos reales en el tiempo (casos de estudio), los cuales están dados por una medida específica de nivel de intensidad, el valor del riesgo que se obtenga tendrá entonces un valor cercano a la realidad para cada episodio de riesgo evaluado. Estos escenarios, podrán entonces ser comparados con información real (medida) del desastre analizado. De esta forma, el principal desafío que se enfrenta cualquier estudio de riesgos actualmente, es determinar adecuadamente la relación que existió entre el nivel de vulnerabilidad y la intensidad del peligro natural, de tal forma, que se pueda representar de forma espacial y temporal la magnitud del desastre evaluado. Por ello, y dado que actualmente no existe una metodología que sea universalmente aceptada en la evaluación del riesgo, cualquier metodología utilizada para analizarlo deberá ser probada para determinar si los parámetros utilizados de peligro natural e índice de vulnerabilidad son apropiados para la implementación de prácticas adecuadas en la gestión y prevención del riesgo. De esta forma, Neri y Magaña (2016), consideran que la evaluación del riesgo puede ser expresada como una función de probabilidad que se obtiene a partir de la combinación del peligro natural y la vulnerabilidad (ecuación 4.1).

$$Riesgo = (Peligro * Vulnerabilidad) \quad (4.1)$$

En este trabajo, se analizó el riesgo de inundaciones a partir de la dinámica del peligro por lluvias intensas y la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas. Sin embargo, se enfocó principalmente en la vulnerabilidad como elemento modulador de baja frecuencia de la

dinámica del riesgo. Es decir, en la medida en que la variación espacial y temporal de la vulnerabilidad ante lluvias intensas se incrementa, se espera aumente el nivel del riesgo.

De esta forma, el aumento en el nivel del riesgo, se describe como resultado del proceso de transformación del territorio (vulnerabilidad), por cambios en la cobertura del suelo. Este proceso de transformación exponencial de la cobertura del suelo para México, se utilizó para evaluar las condiciones de vulnerabilidad y riesgo para los periodos 1970 y 2010. Este análisis se aplicó para dos escalas de análisis: *i)* la primera se desarrolló considerando una escala nacional y *ii)* se consideró una escala local para determinar los efectos de la transformación del territorio para la Bahía de Acapulco de Juárez. Con los valores de riesgo calculados, se obtuvo el factor de cambio en la distribución espacial del riesgo, a partir de comparar los periodos de análisis. Por otro lado, la información de cobertura de suelo y vegetación para diferentes periodos (1970, 1985, 2002, 2007, 2009 y 2010) se utilizó para establecer un índice de vulnerabilidad que fue usado para desarrollar un modelo de riesgo dinámico para cuatro ciudades de México. Este modelo permitió observar la dinámica del riesgo como resultado de la relación entre las variables de peligro y vulnerabilidad.

4.2 Cálculo del Índice de riesgo ante lluvias intensas

El índice de riesgo por inundaciones como una función de probabilidad se obtuvo de relacionar las variables normalizadas (ecuación 2.1) de peligro natural y vulnerabilidad (figura 4.1) de forma directa (ecuación 4.1). Este procedimiento permitió asignar y establecer valores de riesgo de forma independiente para cada unidad de la malla (pixel) obtenida. A partir del resultado, se establecieron cinco niveles de riesgo con intervalos de 0.2: *i)* 0.0 – 0.2 (muy bajo); *ii)* 0.2 – 0.4 (bajo); *iii)* 0.4 – 0.6 (moderado); *iv)* 0.6 – 0.8 (alto); y *v)* 0.8 – 1.0 (muy alto). Esta clasificación, tiene por objetivo mostrar un resultado más accesible para su interpretación espacial.

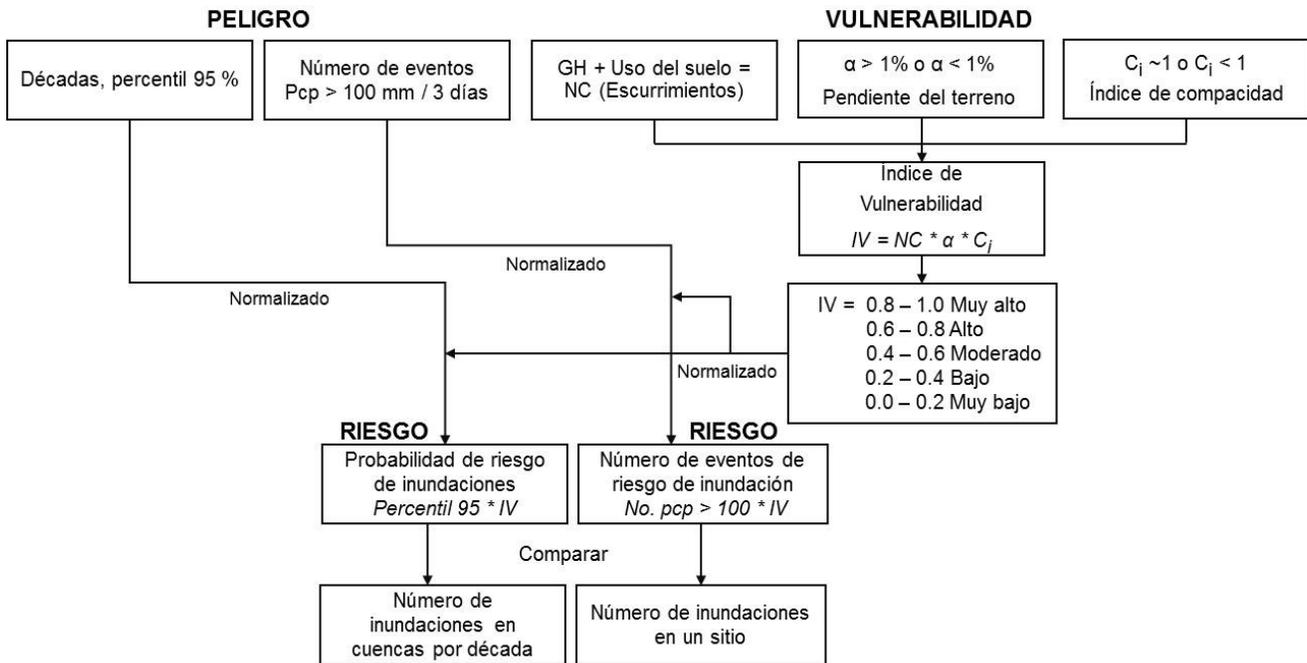


Figure 4.1. Diagrama esquemático de los componentes para estimar el riesgo de inundaciones para México.

Como resultado del producto del peligro natural y el índice de vulnerabilidad, la distribución de niveles de riesgo para el periodo 1970 y 2010 (Figura 4.2) mostró que en las regiones costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche) y los valles centrales del país, así como la costa del sureste (Guerrero, Oaxaca y Chiapas) y noreste del pacífico los niveles de riesgo son de moderado a nivel muy alto. Estas zonas, contabilizan de acuerdo a registros de CENAPRED (2014) y DesInventar (2013) aproximadamente el 35% de los desastres por inundaciones. Espacialmente, el valor de riesgo obtenido de comparar de forma directa los datos entre 1970 y 2010 mostró una superficie modificadas de aproximadamente $12,042 \text{ km}^2$. Aunque espacialmente (nivel nacional), estos cambios no son fáciles de observar, debido a la escala de visualización mostrada, más adelante se analizan los niveles de riesgo de forma local para la Bahía de Acapulco. Este ejemplo, permitió observar los valores de riesgo y su dinámica con mayor resolución espacial.

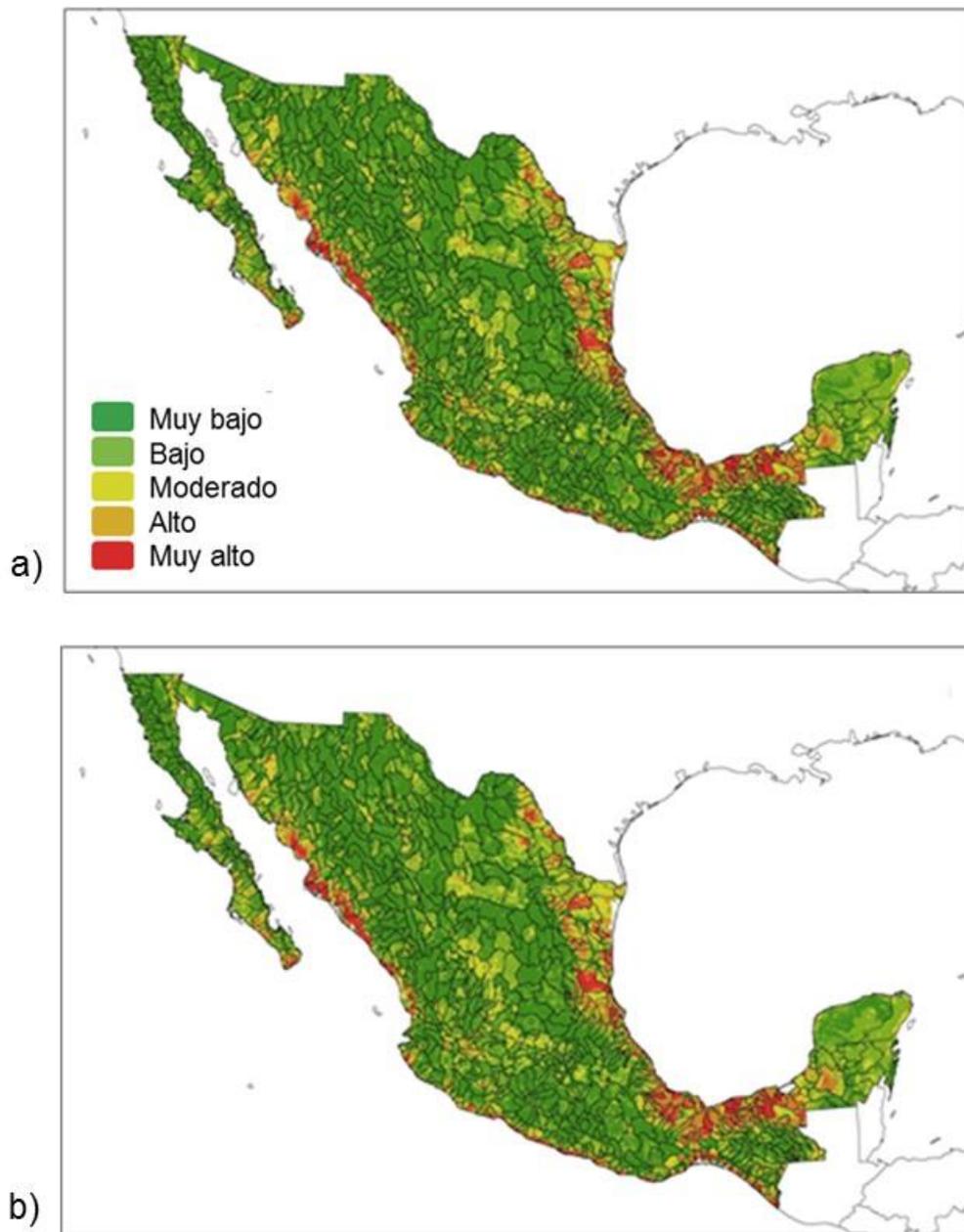


Figura 4.2 Distribución de valores del índice de riesgo por inundaciones para las cuencas de México. a) 1970 y b) 2010

4.2.1 Cambio en el Índice de riesgo ante lluvias intensas

Para obtener el factor de cambio para el índice de riesgo, se comparó de forma directa los valores obtenidos para el periodo 1970 y 2010 (Figura 4.3). El resultado mostró una mayor distribución de áreas modificadas hacia las regiones costeras del pacifico sur y noreste del país, así como en el altiplano mexicano, y en la vertiente del Golfo de México (Tamaulipas y

Veracruz). Esta variación espacial observada en el riesgo supone una modificación de aproximadamente 12,042 km². Las diferencias más sensibles, se obtuvieron para los niveles de riesgo muy bajo con una disminución de 5,456 km² (45%), y en los niveles de riesgo alto y muy alto con un incremento de 2,013 km² (16.7%) y 4,223 km² (35%), respectivamente. Este patrón de cambio observado para el índice de riesgo, mostró gran similitud con los valores obtenidos para el factor de cambio del índice de vulnerabilidad. Particularmente, esta relación se observó en la región del pacífico, el altiplano y el noreste del Golfo de México. Estas zonas mostraron una disminución en la magnitud de las lluvias intensas, de acuerdo al factor de cambio calculado para la magnitud del P95.

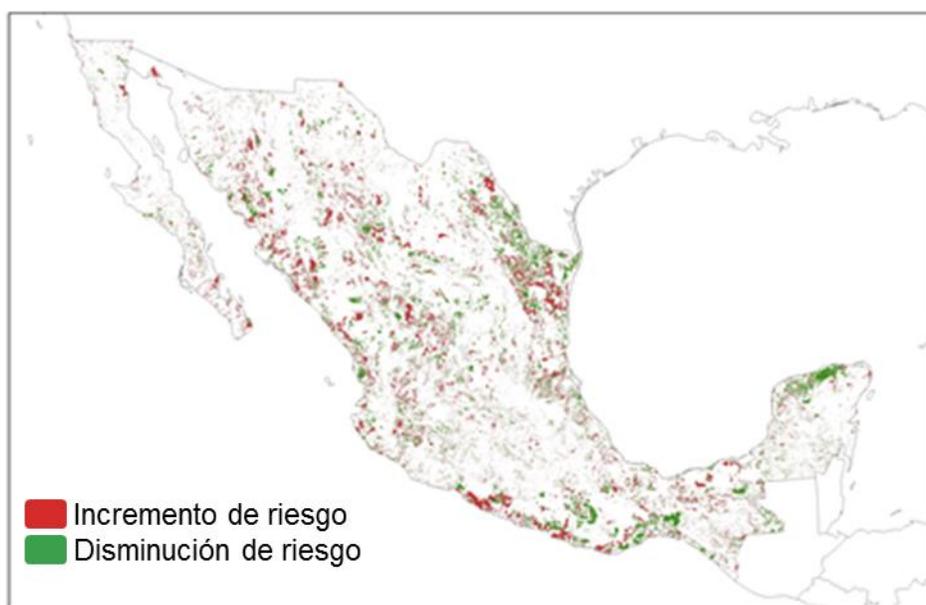


Figura 4.3 Distribución de valores de índice de riesgo como resultado de comparar el periodo 1970 y 2010.

4.3 Modelo de riesgo (caso de estudio)

a) *Inundaciones en Acapulco*

Como efecto directo que pueden tener los escurrimientos en la población, resultado del proceso de transformación (degradación) de las cuencas hidrográficas, debido a cambios en la cobertura del suelo. El desastres ocurrido en la Bahía de Acapulco (15 – 16 de septiembre de 2013), como ejemplo de un estudio de riesgo, se considera relevante, desde el punto de

vista de un riesgo climático que resulta de la combinación de un peligro natural capaz de generar lluvias muy intensas como las generadas en 1997 por el huracán Paulina (Ramírez, 1998) y la tormenta tropical Manuel en 2013, y un nivel de vulnerabilidad que incremente la condición de riesgo en una región, posibilitando un mayor número de pérdidas en vidas humanas y en impacto económico.

Como resultado de analizar el proceso de transformación para la Bahía de Acapulco (Figura 4.4), se observó que durante 1970 la cubierta de suelo natural estaba constituida principalmente por selvas (58%), mientras que la cubierta modificada por actividades socioeconómicas (ej. Agricultura, asentamientos humanos, etc.) ocupaba el 35% del total de la superficie de la Bahía. Durante el periodo 2010, se observó una disminución de la superficie (40%) de la cubierta de suelo natural, donde las actividades económicas como el turismo y la agricultura crecieron hacia la zona costera, mientras que los asentamientos humanos aumentaron hacia las zonas con mayor pendiente. Este proceso de cambio incremento la superficie modificada en 30% en un periodo de 40 años.

El proceso de transformación (desordenado) experimentado en la Bahía de Acapulco para el periodo 1970 y 2010, es un claro ejemplo del incremento de la vulnerabilidad, debido al aumento de superficies con menor capacidad de infiltración y mayor capacidad para generar escurrimientos. En resumen, se estimó que entre 1970 y 2010, en la bahía de Acapulco, la superficie modificada de vegetación natural fue de aproximadamente de 110 km².

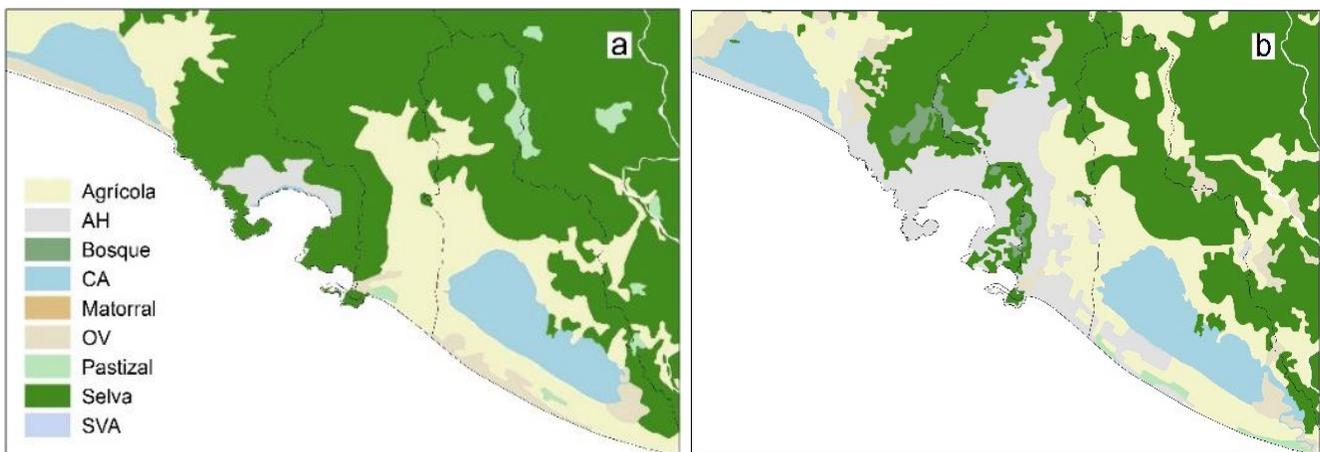


Figura 4.4. Cambio de cobertura de la tierra en la cuenca de Papagayo y Bahía de Acapulco; a) en 1970; y b) en 2000.

El cambio observado en los niveles de vulnerabilidad entre 1970 y 2010 fue resultado esencialmente de modificaciones en la cobertura del suelo (Figura 4.5). Donde el índice de vulnerabilidad estimado para 1970 presentó cambios significativos (aumento) en los valores de 0.2 a 0.4 para el año 2010 con aproximadamente 60% de superficie modificada. Durante el 2010 se observaron los principales cambios en la zona montañosa de la sierra del Pacífico sur que rodea la bahía y zona turística. En áreas bajas de la cuenca, cercanas a la Laguna de Tres Palos, el índice de vulnerabilidad mostró un dominio de valores de índice de vulnerabilidad “moderado” a “muy altos”. Estas zonas corresponden principalmente a asentamientos humanos a áreas agrícolas. El análisis de esta región toma gran importancia cuando procesos como el aumento de suelos con menor capacidad de infiltración incrementan el nivel de vulnerabilidad ante lluvias intensas de un área que puede afectar de forma remota a la población, tal como lo ocurrido el 13 - 16 de septiembre de 2013 debido a la generación de grandes volúmenes de escurrimientos (Pedrozo – Acuña 2014; 2015) y la pérdida de vidas humanas (Magaña, 2015).

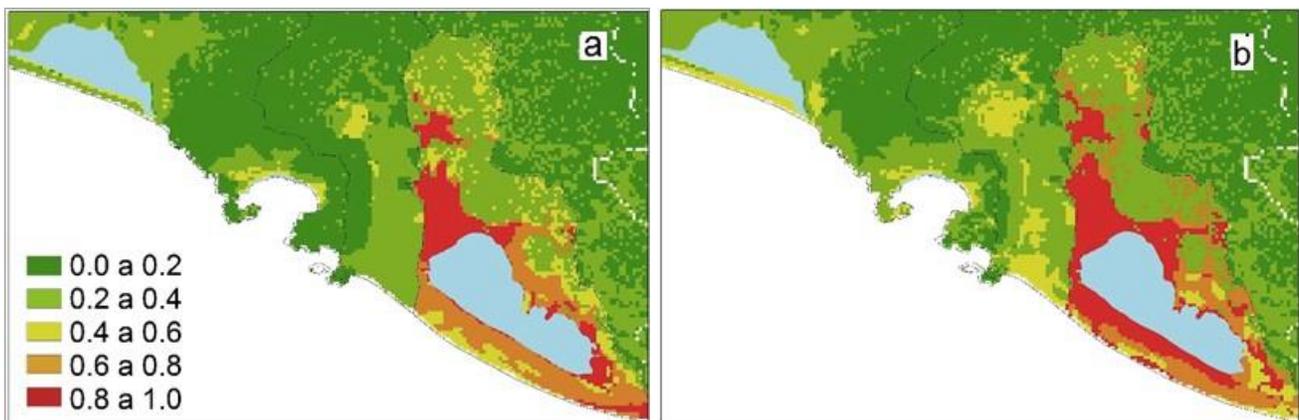


Figura 4.5 Distribución de valores del índice de vulnerabilidad para la cuenca de Papagayo y Bahía de Acapulco, a) en 1970, y b) en 2000.

El resultado de evaluar el riesgo de inundaciones para la Bahía de Acapulco (Figura 4.6), mostró que la presencia de un peligro natural considerado como eventos extremos (≥ 100 mm/3 días) pudo significar para 1970 niveles de riesgo “bajos” a “muy altos”, mientras que para 2010 los niveles de riesgos se observaron de “altos” a “muy alto”. Estos cambios mostraron la mayor pérdida de superficie (30%) para el nivel de riesgo bajo para 1970, dando lugar a niveles de riesgo “alto” y “muy alto” con 40% de la superficie ocupada durante 2010. Estas zonas se ubican en áreas que rodean la Laguna de Tres Palos, al este de la Bahía de Acapulco y

alrededor de Laguna de Coyuca, al oeste, y las zonas agrícolas del oriente y zonas montañosas.

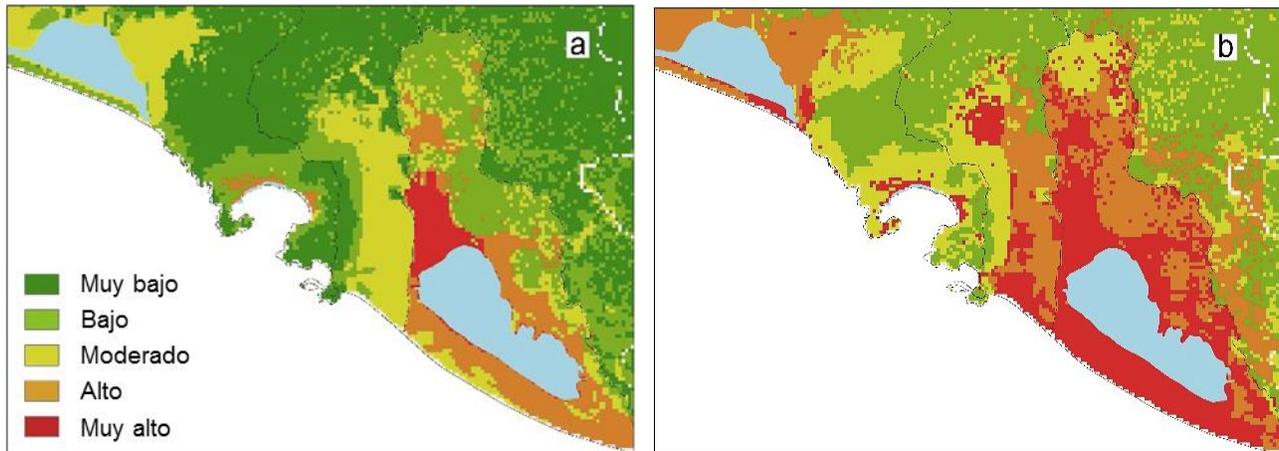


Figura 4.6 Distribución de valores del índice de riesgo de inundaciones alrededor de la Bahía de Acapulco, Guerrero, utilizando para su evaluación, el índice de vulnerabilidad y el P95. a) 1970 y b) 2010.

Cuando se presentan eventos de lluvia intensa en las costas del estado de Guerrero, por la ocurrencia de un ciclón tropical, el riesgo para la zona puede considerarse crítico, generado desastres con gran impacto en la sociedad. Muchos de estos grandes eventos de inundación han sido registrados en la región este de la Bahía de Acapulco. Esta área es conocida como Punta Diamante, donde las áreas urbanas y zonas agrícolas en zonas altas de las montañas han mostrado un incremento desde 1970. Recientemente (septiembre 2013), la región de Acapulco (Figura 4.7-a), experimentó un desastre por inundación (Figura 4.7-b) de gran magnitud con mayor impacto en áreas cercanas a Punta Diamante, el aeropuerto y las zonas agrícolas ubicada al poniente y noroeste de la Laguna de Tres Palos, como resultado de lluvias intensas producidas por el ciclón tropical Manuel (Pedrozo-Acuña, 2014; 2015) alcanzando lluvia de más de 100 mm en un día y más de 500 en tres días, en la cuenca del Papagayo.

El área afectada por las inundaciones (Figura 4.7-b) para septiembre de 2013 sirvió de elemento de comparación con el resultado obtenido del índice de riesgo (Figura 4.6- b) para 2010. En ambas figuras, es notable la presencia de mayores niveles de riesgo – desastres en los alrededores de la Laguna de Tres Palos, el aeropuerto y las áreas donde se observan suelos sobresaturados de humedad, correspondientes a las zonas agrícolas. Este comparativo entre el índice de riesgo con la fotografía del impacto permiten ubicar el índice de vulnerabilidad

propuesto como un insumo para la evaluación de zonas potenciales de riesgo y como herramienta en la gestión y prevención de inundaciones.



Figura. 4.7 Imagen de satélite a) para un período anterior al 15 de septiembre de 2013 y b) días después de la inundación de septiembre de 15 de septiembre de 2013 (fuente: Rapideye Image)

En las últimas décadas, las inundaciones en el estado de Guerrero se han duplicado en número, de acuerdo con datos de CENAPRED (2013) y DesInventar (2013). Los municipios con mayores registros de afectación corresponden a Chilpancingo y Acapulco, donde vive gran parte de la población del estado de Guerrero.

b) Ciudades en riesgo: Boca del río, Tapachula, Monterrey y Acapulco

El desarrollo de un modelo de riesgo de inundaciones ante lluvias intensas, tuvo por objetivo mostrar la dinámica del riesgo a partir de cambios en la vulnerabilidad entre 1980 y 2010 como resultado de la transformación en la cobertura del suelo natural. Para este análisis se consideraron cuatro ciudades (Figura 4.8): a) Boca del Río, Veracruz; b) Tapachula, Chiapas; c) Monterrey, Nuevo León; y d) Acapulco, Guerrero, donde el número de inundaciones ha aumentado significativamente en los últimos años, de acuerdo con datos de impactos por desastres para México (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013). Estos registros se utilizaron para evaluar la dinámica del riesgo a partir del resultado del modelo obtenido.

El índice de vulnerabilidad utilizado como elemento para evaluar la dinámica del riesgo permitió establecer su importancia como modulador de baja frecuencia para establecer diferentes niveles de riesgo. De esta forma, el índice de vulnerabilidad dentro del riesgo calculado mostró cambios espaciales y temporales menores que los observados al analizar el peligro natural (lluvias intensas), el cual mostró una mayor frecuencia. Sin embargo, estos cambios presentaron un menor impacto en el nivel de riesgo observado que los mostrados por el índice de vulnerabilidad.

En los sitios seleccionados, la presencia de lluvias intensas se relaciona con una mayor presencia de ciclones tropicales, ondas frías, sistemas convectivos de mesoescala (ondas del este). De esta forma, la actividad del peligro observada puede variar en escalas de tiempo interanuales, observándose eventos más intensos en años más húmedos, los cuales, se relacionan con años la Niña, por ejemplo. Estos fenómenos atmosféricos pueden presentar frecuentemente una temporalidad de tres días. De esta forma, relacionando la ocurrencia de diversos eventos de inundación (con mayor impacto) para las ciudades seleccionadas, el umbral de peligro establecido de 100 mm acumulados para tres días consecutivos que representó la intensidad de lluvia registrada previa a la ocurrencia de los desastres por inundaciones.

Por otro lado, el número de reportes de desastres registrados para las ciudades analizadas (CENAPRED 2014 y DesInventar 2013) muestran claramente un incremento sustancial en los últimos años. Este incremento se pudo observar como resultado del aumento en el índice de vulnerabilidad y no debido específicamente a un mayor número de eventos de lluvia intensa (≥ 100 mm/3 días). De esta forma, para explicar el aumento en la actividad de las inundaciones, fue necesario analizar e incorporar el efecto producido por la modulación de la vulnerabilidad dentro de la ecuación del riesgo. En casos como Tapachula o Acapulco, se puede explicar debido a la existencia combinada de una mayor tendencia en el número de eventos de lluvia intensa y el aumento en el índice de vulnerabilidad, lo que contribuye a un incremento sustancial del nivel de riesgo observado en el modelo de riesgo para los últimos años.

En resumen, el incremento en el número de desastres registrados, es producto del efecto de una mayor tendencia de lluvias intensas, que se asocia a la ocurrencia de mayor número de

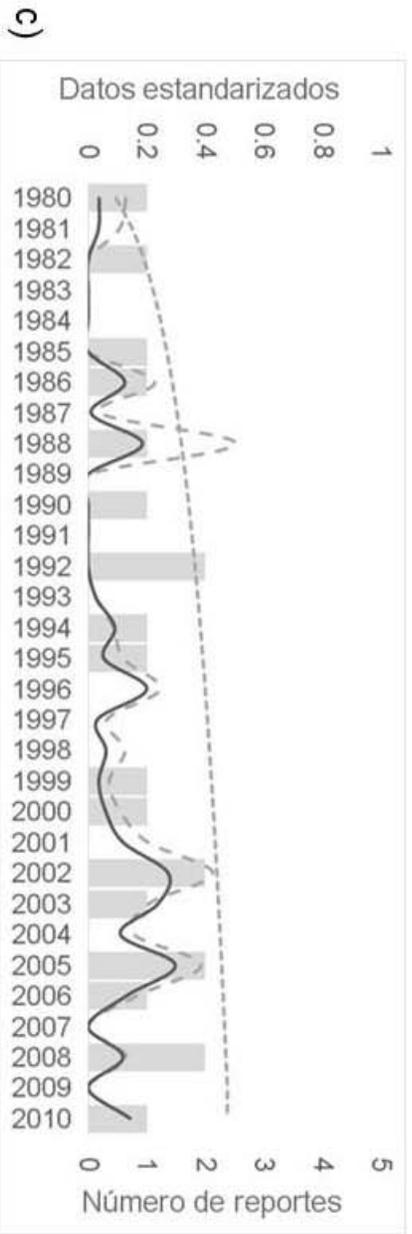
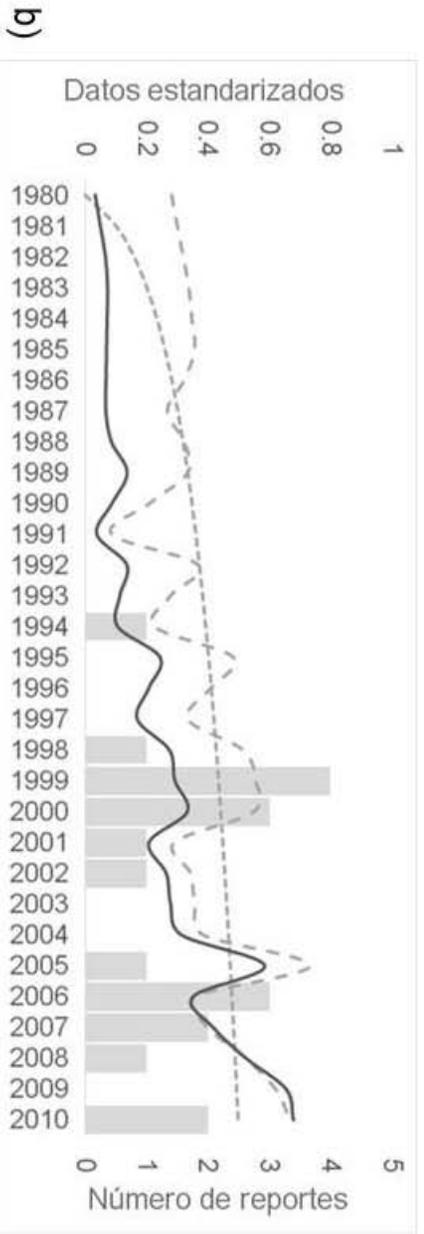
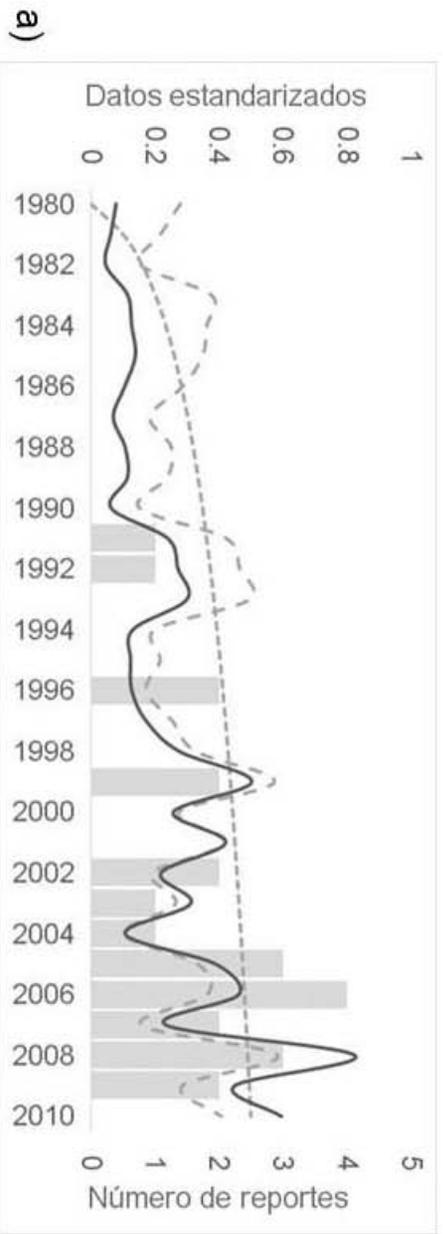
ciclones tropicales en el Pacífico mexicano en las últimas décadas (INECC; 2012), y por otro lado, al incremento en el índice de vulnerabilidad, como resultado del grado de transformación de las cuencas por actividad antrópica. De esta forma, el establecimiento de criterios adecuados que permitan definir en qué medida el aumento en el nivel del riesgo es resultado de mayores niveles de peligro o vulnerabilidad será fundamental para reducirlo.

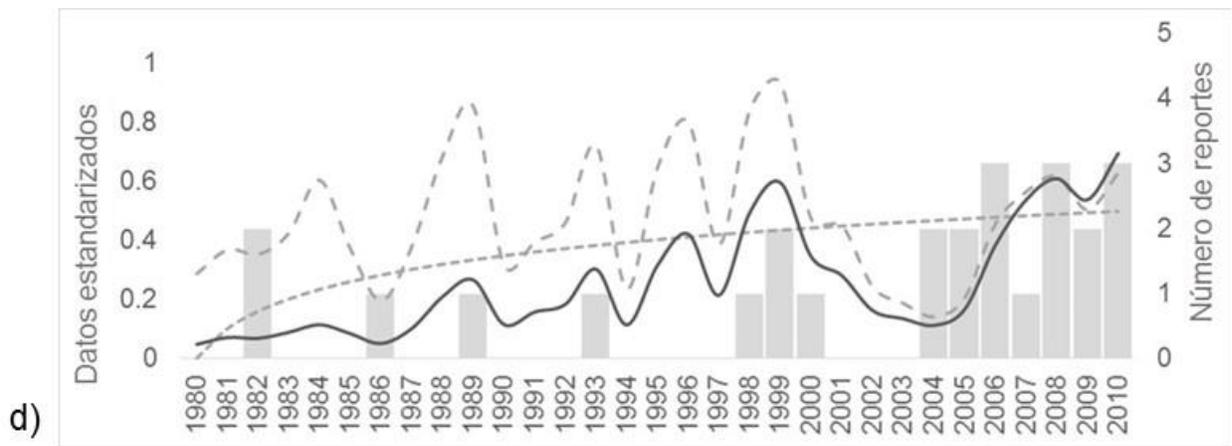
Por ello, el modelo de riesgo desarrollado tiene como finalidad ser utilizado para establecer un valor crítico de riesgo que puede ser “aceptable”. Consecuentemente, el límite deberá ser establecido a partir de la ocurrencia de los desastres registrados. De esta forma, el nivel de riesgo crítico, podrá ser utilizado para establecer objetivos claros que permitan reducir el nivel de vulnerabilidad considerando escenarios de cambio climático (peligro natural), por ejemplo. Así mismo, como herramienta podrá ser utilizado para establecer un sistema de alertamiento temprano considerando diversas intensidades de lluvia evaluadas previamente para cada área de estudio. Por lo tanto, el desarrollo de modelos de riesgo servirá para evaluar y cuantificar su dinámica, de tal forma, que las acciones de gestión sean eficientes en la prevención de desastres.

El resultado del modelo permitió considerar diferentes valores críticos de riesgo con posibilidades altas de ocurrencia de inundaciones para las ciudades analizadas. Este nivel crítico se estableció alrededor del nivel de riesgo de 0.3 que corresponde al valor con mayor frecuencia observado en el modelo. Esta condición de riesgo puede establecer un valor crítico que permita diseñar un Sistema de Alertamiento Temprano ante Inundaciones (SATI). También como herramienta para diseñar y establecer acciones de reducción de vulnerabilidad bajo condiciones de cambio climático para prevenir desastres.

De acuerdo con el modelo de riesgo, el número de desastres por inundaciones ha crecido, con mayor frecuencia para Veracruz y Acapulco, donde las cuencas han sido afectadas principalmente por cambios en la cobertura del suelo. Los resultados muestran que la probabilidad de inundaciones para estas ciudades tiene una tendencia positiva (aumento) a medida que aumenta el riesgo, como resultado de mayor número de lluvias intensas e incremento en la vulnerabilidad. Por otro lado, en Monterrey la actividad del peligro no mostró un incremento significativo en las últimas décadas, pero el riesgo presenta un aumento que

puede ser resultado de una mayor vulnerabilidad. Un efecto claro del efecto modulador en el riesgo, se observa en Veracruz, donde la actividad del peligro se observó casi constante, mientras que el efecto modulador de la vulnerabilidad se incrementa, y con ello, el valor del riesgo de inundaciones, al igual que la actividad de las inundaciones.





d) *Figura. 4.8 Series cronológicas del número de eventos en que la precipitación en tres días consecutivos fue superior a 100 mm (línea discontinua larga), el índice de vulnerabilidad (líneas discontinuas cortas), la estimación del riesgo (línea continua) y el número de informes de inundaciones: A) Boca del Río, Veracruz; B) Tapachula, Chiapas; C) Monterrey, Nuevo León; y d) Acapulco Guerrero.*

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En México, el deterioro ambiental causado por la rápida transformación del territorio durante el siglo XX ha mostrado pérdidas significativas en las coberturas de suelo natural y la vegetación, principalmente por procesos antrópicos, donde las tasas de deforestación en bosques templados y tropicales se estimaron en 0.25% y 0.75% por año para los periodos 1976 y 2000 (Mas *et al.*, 2004). Este impacto al medio natural junto con el número de desastres causados por inundaciones (CENAPRED, 2014; DesInventar, 2013) han mostrado una tendencia positiva en los últimos años. En casos como Veracruz, donde la tasa de deforestación se ha incrementado significativamente entre 1973 (21%) y 1993 (43%) se observó un aumento en el volumen de los escurrimientos y una mayor recurrencia y magnitud de las inundaciones (Pérez, 2002). En este sentido, la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas para generar escurrimientos por lluvias intensas ha aumentado el riesgo de inundaciones en México debido a la pérdida de suelos naturales que puedan infiltrar mayor volumen de agua precipitada. Por este motivo, en el presente trabajo, se desarrolló un modelo de riesgo que permitiera cuantificar y evaluar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas por cambios en su cobertura del suelo natural y la vegetación con el objetivo de explicar espacial y temporalmente la dinámica del riesgo de inundaciones por lluvias intensas de las últimas décadas.

Como herramienta de evaluación hidrológica para las cuencas ante lluvias intensas, el criterio del NC permito estimar la vulnerabilidad como elemento dinámico del riesgo para el periodo 1970 y 2010. Sin embargo el resultado no reflejó la información hidrológica necesaria para calcular el riesgo de inundaciones para México, por lo que se incorporó información morfológica del terreno (capacidad de las cuencas y pendiente del terreno) que permitiera relacionar la capacidad de infiltración del suelo con las áreas de captación y acumulación de escurrimientos, para poder evaluar la vulnerabilidad ante lluvias intensas de forma individual.

Con el desarrollo de casos de estudio, se pudo observar que si bien la determinación de las lluvias intensas con magnitud P95 de precipitación diaria, mostró una frecuencia mayor de estos eventos que en décadas pasadas en gran parte del territorio de México, en su mayoría por la presencia de ciclones tropicales, su representación espacial quedó supeditada a la densidad de estaciones de registro de precipitación (distancias de 10 a 20 km entre

estaciones). Por otro lado, el análisis de la vulnerabilidad realizado permitió obtener el detalle espacial necesario para establecer las zonas que potencialmente pueden experimentar desastre. También se observó que, mientras que la temporalidad de las lluvias intensas puede considerarse un proceso de alta frecuencia (una tormenta intensa en diferentes lapsos de tiempo), la vulnerabilidad puede representarse como un elemento dinámico que evoluciona lentamente en el tiempo, por lo que puede considerarse la componente de baja frecuencia del riesgo. De esta forma, el modelo de riesgo de inundaciones propuesto para México permitió generar información detallada que puede ser utilizada para diseñar escenarios dinámicos de riesgo de inundación y, ser utilizado como herramienta de prevención, al definir espacialmente áreas con mayor potencial de inundación, a partir del establecimiento de indicadores que incrementan la vulnerabilidad de las cuencas de acuerdo con sus características hidrológicas y físicas.

Como resultado del proceso de evaluación de la vulnerabilidad ante lluvias intensas, se observó un incremento en el nivel del riesgo de inundaciones para México, al reducirse la capacidad de infiltración de los suelos en algunas regiones del país. Estos cambios reflejaron un incremento sustancial del riesgo de inundaciones para los periodos analizados (1970 y 2010) con mayores impactos para la región costera del Golfo de México y la costa del Pacífico, así como en zonas del centro y sur del país. En gran medida estos cambios reflejaron un incremento de los escurrimientos, y con ello, un mayor riesgo de inundaciones, que en los últimos años ha significado un aumento en el número de desastres.

En términos de riesgo, el índice de vulnerabilidad desarrollado para las cuencas considerando la capacidad que tienen los suelos para infiltrar el agua de lluvia, permitió evaluar la sensibilidad de las cuencas para generar escurrimientos y así, poder determinar el nivel de riesgo existente. El resultado mostró, una mayor tendencia de suelo con grupo hidrológico tipo B (escurrimiento moderado) y D (máximo escurrimiento) en prácticamente todo el territorio, ocupando una superficie del 63% y 23% respectivamente. Por otro lado, los suelos con grupo hidrológico A (escurrimiento muy bajo) y C (escurrimiento alto) presentaron una disminución sustancial, cubriendo en la actualidad únicamente del 14% de la superficie del país. Esta información sirvió para identificar que 80% de las cuencas hidrográficas que se ubican en el altiplano mexicano y en regiones con mayor pendiente presentaron < 50% de degradación, mientras que el 20%

de las cuencas restantes con ubicación en las regiones costeras del Golfo de México, Pacífico y regiones centrales del país presentaron un porcentaje de transformación mayor al 50%.

Por otro lado, como resultado de evaluar los escurrimientos generados a partir de los valores de número de curva, aplicando la ecuación (2.6) para diferentes intensidades de lluvia (10, 20, 30, 40, 50, 70 y 100 mm), se estableció como umbral para la generación de mayores escurrimientos el $NC > 60$. Este valor mostró que aproximadamente 50% de la lluvia captada por los suelos se transformará en escurrimientos. Otros resultados mostraron que suelos con GH tipo "A" y "B" con valores de $NC < 60$ presentan capacidad de infiltración buena, mientras que suelos con GH tipo "C" y "D" mostraron niveles de escurrimiento significativos. Por otro lado, también se observó que en suelos de tipo no natural (agrícola, SVA y AH) los escurrimientos generados son mayores para todos los GH ("A", "B", "C" y "D"). Finalmente, la distribución de valores de NC para México (2010) significó que 55% (1,077,987 km²) de superficie del país está ocupada por valores de $NC < 60$. Esta superficie está representada (97%) por el GH tipo "B" (escurrimientos moderados). Por otro lado, se observó que para valores de $NC > 60$ (45% de la superficie del país) la mayor distribución se tuvo para regiones montañosas y costeras de país donde predominan los suelos con características hidrológicas tipo "D", "C" y "B" para 2010.

Finalmente, es claro, que cualquier modelo utilizado para evaluar el riesgo de inundaciones puede ser modificado, incluso incorporando elementos adicionales al análisis de vulnerabilidad establecido. Por ejemplo, la condición hidráulica de los cauces de los ríos por acumulación de sedimentos o las condiciones reales de la humedad del suelo antes de la inundación, la invasión de los cauces y zonas de inundación, pueden ser elementos muy importantes para cuantificar la vulnerabilidad de una cuenca. Esto requiere la búsqueda de formas creativas para su evaluación, principalmente, cuando los datos son insuficientes o con una limitación espacial o temporal. Aún más, para definir mejor las regiones que contribuyen a aumentar la vulnerabilidad ante lluvias intensas, el análisis de riesgos requiere actualizaciones constantes en el tiempo (resolución temporal), con una frecuencia tan alta como los factores de vulnerabilidad evolucionan (resolución espacial).

Como complemento, la cuantificación del riesgo e identificación de diferentes niveles de riesgo crítico o intolerable se puede utilizar para orientar algunas de las opciones de gestión de riesgo para reducir la ocurrencia y los costos de las inundaciones. Con el propósito de alcanzar tales metas se requieren:

- I) Dejar el enfoque naturalista para explicar los desastres,
- II) utilizar una metodología de análisis de riesgos para comprender la dinámica de los desastres,
- III) Promover la prevención mediante medidas estructurales y no estructurales después de identificar los factores de vulnerabilidad.

Las medidas estructurales de reducción de la vulnerabilidad resultarían en beneficios para varias regiones y comunidades, no sólo en la reducción de los desastres, sino también en los objetivos de desarrollo sostenible.

CAPÍTULO 6 REFERENCIAS

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin, & E. Nelkin. (2003), "The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)", *Journal Hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167.
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M.,...& Valle, V. E. (2005), "Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23).
- Aiyyer, A. R., & J. Molinari, (2008), "MJO and tropical cyclogenesis in the Gulf of Mexico and Eastern Pacific: Case study and idealized numerical modeling". *J. Atmos. Sci.*, 65, 2691–2704.
- Alcantara, I (2004), "Hazard assessment of rainfall - induced landsliding in Mexico", *Geomorphology*, 61, 19-40.
- Aparicio F (2008). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, Mexico, 304 pp.
- Aparicio, J., Martínez-Austria, P. F., Güitrón, A., & Ramírez, A. I. (2009), "Floods in Tabasco, Mexico: a diagnosis and proposal for courses of action", *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 132-138.
- Armenta-Montero, S., López Acosta, J. C., Rodríguez Luna, E., Ellis, E., Amo, R. S. del., Gómez Pompa, A., MacSwiney González, C. M., Niembro Rocas, A., Sánchez Sánchez, O., Vázquez Torres, M. y Velázquez Rosas, N. (2012), "La restauración ecológica como estrategia para la reducción del riesgo de desastre ante inundaciones: estudio de caso la cuenca del Río Coatzacoalcos". En: Adalberto Tejeda Martínez y Liliana Betancourt Trevedhan (coords). *Las Inundaciones de 2010 en Veracruz. Memoria social y medio físico*. COVECYT y Universidad Veracruzana. Pp. 216-270.
- Askar, M. K. (2013), "Rainfall-runoff model using the SCS-CN method and geographic information systems: a case study of Gomal River watershed", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 178, 159-170.
- Balica, S., Dinh, Q., & Popescu, I. (2015), "Vulnerability and Exposure in Developed and Developing Countries: Large-Scale Assessments", *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*, 125-162.

- Bari, M. A., Smettem, K. R. J., & Sivapalan, M. (2005), "Understanding changes in annual runoff following land use changes: a systematic data-based approach". *Hydrological Processes*, 19(13), 2463-2479.
- Breña, A. (2010). Hidrología urbana. Colección CBI. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Burns, D., Vitvar, T., McDonnell, J., Hassett, J., Duncan, J., & Kendall, C. (2005), "Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA". *Journal of Hydrology*, 311(1), 266-281.
- Burton, I., & Kates, R. W. (1964), "The perception of natural hazards in resource management". *Natural resources journal*, 3(3), 412-441.
- Campos, D (1987). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mexico.
- Cannon, T. (1994), "Vulnerability analysis and the explanation of 'natural' disasters", *Disasters, development and environment*, 13-30.
- Cardona, O. (2003). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: Una crítica y una revisión necesaria para la gestión: Centro de estudios sobre desastres y riesgo CEDERI. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 18 p.
- Clark, J. J., & Wilcock, P. R. (2000), "Effects of land-use change on channel morphology in northeastern Puerto Rico", *Geological Society of America Bulletin*, 112(12), 1763-1777.
- CENAPRED (2014). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana 1998 - 2013. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, No. 1 a 15, Secretaria de Gobernación.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2010). Uso de Suelo y Vegetación. MAYO 20, 2015, consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Atlas del agua en México 2015. Junio 15, 2015, consultado en <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- (2000). Principales cuencas de México. Mayo 20, 2015, Consultado en <http://siga.cna.gob.mx/>.

- (2011). Historia de ciclones tropicales en México: Base de datos de ciclones tropicales que impactaron a México de 1970 a 2011. Mayo 15, 2015. Consultado en <http://200.4.8.21/ciclones/historia/ciclones1970-2011.pdf>
- (2012). Percentiles de precipitación en 24h en la temporada de Lluvias en la República Mexicana. Mayo 05, 2015, consultado en http://smn1.conagua.gob.mx/climatologia/foros/foroXXVI/XXVI_FORO/F260206_POSTERS/F26020609_PERCENTILESPPC.PDF
- Coutu, G.W. & C. Vega (2007), "Impacts of land use changes on runoff generation in the east branch of the brandy wine creek watershed using a gis-based hydrologic model", *Middle States Geographer*, 40:142-149.
- Cressman G. P. (1959), "An operational objective analysis system", *Monthly Weather Review*, 87 (10), 367-374.
- Daley, R. (1993). *Atmospheric data analysis (No. 2)*. Cambridge university press.
- DesInventar (2013). Sistema de Inventario de Desastres para México. Junio 15, 2015, Consultado en <https://online.desinventar.org/>.
- Domínguez, M. R., (1997), "Sistema para el Control y Drenaje de las Avenidas en el Área Metropolitana del Valle de México". No. 593 [Serie Azul del Instituto de Ingeniería].
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008), *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 89 pp.
- Domínguez, M. R., (2000), "Las Inundaciones en la Ciudad de México, Problemática y Alternativas de Solución". *Revista Digital Universitaria, UNAM*, 1(2), disponible en www.revista.unam.mx.
- Ebrahimian, M., See, L. F., Ismail, M. H., & Malek, I. A. (2009), "Application of natural resources conservation service–curve number method for runoff estimation with GIS in the Kardeh watershed, Iran". *European Journal of scientific research*, 34(4), 575-590.
- Ebrahimian, M., Nuruddin, A. A. B., Soom, M. A. B. M., Sood, A. M., & Neng, L. J. (2012), "Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Methods". *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(5).

- Elhakeem, M., and Coauthors (2009), "Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements in the state of Iowa, USA". *Water Resources Management*, 23(12), 2455-2473.
- El Kateb, H., Zhang, H., Zhang, P., & Mosandl, R. (2013), "Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China", *Catena*, 105, 1-10.
- Ferrer, M., and Coauthors (1995) "Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica". *Ingeniería del Agua*, 2 (4), 43-5.
- Field, C. B. (Ed.). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Gain, A. K., Giupponi, C., & Renaud, F. G. (2012), "Climate change adaptation and vulnerability assessment of water resources systems in developing countries: a generalized framework and a feasibility study in Bangladesh", *Water*, 4(2), 345-366.
- Gama, L., Ordonez, E. M., Villanueva-Garcia, C., Ortiz-Pérez, M. A., Lopez, H. D., Torres, R. C., & Valadez, M. E. M. (2010), "Floods in Tabasco Mexico history and perspectives", *Flood Recovery, Innovation and Response II*, 133, 1125.
- Gandini M., and Coauthors (2004, "SCS Curve Number estimation using remote sensing NDVI in a GIS environment". *Environ Hydrol.*12, 1-9.
- Gaspari F (2007), "Relación precipitación – escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo. Cuenca model del Sistema serrano de La Venta Argentina", *Facultad de Agricultura y Ciencias Forestales. Universidad Nacional de la Plata. Vol. XXXIX. No.1: 21-28.*
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Delgado, M. I., Senisterra, G. E., & Denegri, G. A. (2011), "Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG". *Multequina*, 20(1), 03-13.
- Geetha K., and Coauthors (2007), "Modification to SCS-CN Method for Long –Term Hydrologic Simulation". *JJ. Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), 475-486.

- Gholami, V. (2013), "The influence of deforestation on runoff generation and soil erosion (Case study: Kasilian Watershed)". *J For Sci*, 59(7), 272-278.
- Gomáriz, E. (1999). Género y desastre – introducción conceptual y criterios operativos. La crisis del huracán Mitch en Centroamérica. Fundación género y sociedad (GESO) – Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 250 p.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S. ... & Kanae, S. (2013), "Global flood risk under climate change", *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z., & Goulet, M. (2006), "A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China". *Hydrological processes*, 20(3), 579-589.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., ... & Schneider, U. (1997), "The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1), 5-20.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Gu, G. (2009), "Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1". *Geophysical Research Letters*, 36(17).
- Hundecha Y., and Coauthors (2004), "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model". *Journal of Hydrology* 299: 107-135
- Huhne. C., & Slingo, J. (2011). Climate observations, projections and impacts. *Report of Met Office, published online in MetOffice.*
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2011). Uso del suelo y vegetación Series 1 a 5. Junio 15, 2015, Consultado en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2013). Modelo Digital de Elevaciones - Continuo de elevaciones mexicana 3.0. Junio 30, 2015, Consultado en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2012). Adaptación al cambio climático en México: visión. Elementos y criterios para la toma de decisiones, pp. 38 - 45.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.
- Istomina, M. N., Kocharyan, A. G., & Lebedeva, I. P. (2005), "Floods: genesis, socioeconomic and environmental impacts", *Water resources*, 32(4), 349-358.
- International Strategy Disaster Reduction ISDR. (2005). Marco de acción de Hyogo para 2005 – 2015: Aumento de la resiliencia para las naciones y las comunidades ante desastres.
- Jáuregui E. & E. Romales (1996), "Urban effects on convective precipitation in México City", *Atmospheric Environmental*. 30, 3383–3389.
- Jayawardena, A., & Coauthors (2001), "River flow prediction: an artificial neural network approach". IAHS PUBLICATION, 239-246.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P. ... & Muir-Wood, R. (2014), "Flood risk and climate change: global and regional perspectives", *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
- Lavell, A. (1998). Decision making and risk management. Paper presented at the conference on "furthering cooperation in science and technology for Caribbean development, Port of Spain, Trinidad, 23 – 25 september, 1998.
- (1999). Gestión de riesgos ambientales y urbanos. La Red de estudios sociales en prevención de desastres, La RED, 12 p.
- (2000), An approach to concept and definition in risk management terminology and practice, ERD – UNDP, Geneva, 32 p.
- (2004), Conceptos y nociones relevantes para la gestión del riesgo. La Red de estudios sociales en prevención de desastres, La RED, 10 p.
- León, P. (1996). Natural Disasters. San Diego State University. pp 293 - 320
- López, C. (2012). Evaluación de la calidad del pronóstico numérico en la Ciudad de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luhmann, N. (1996). Modern society shocked by its risks.

- Magaña, V., Pérez, J., & Méndez, M. (2003), "Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin", *Geofísica Internacional - México*, 42(2), 247-260.
- , J. M. Méndez, R. Morales y C. Millán (2004), "Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México", en Martínez, J. y A. Fernández (comps.), *Cambio climático: una visión desde México, INE-SEMARNAT, México*, pp. 203-213.
- , López, L. C., & Vázquez, G. (2013), "El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México". *TIP*, 16(1), 18-25.
- Maloney, E. D., & D. L. Hartmann, (2000^a), "Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden–Julian oscillation". *J. Climate*, 13, 1451–1460
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... & Pérez-Vega, A. (2004), "Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.
- Maskrey, A (1997). National and local capacities for early warning. IDNDR working group. No. 5.
- McMahon, M., Valdés, A., Cahill, C., & Jankowska, A. (2011). Análisis del extensionismo Agrícola en México. *París: Organismo para la Cooperación y el Desarrollo*, 1-73.
- , M. A., & Valdés, A. (2011). Análisis del Extensionismo Agrícola en México en 50 mejores políticas para una vida mejor de la OCDE, asesoría técnica del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), OCDE, París. 590 pp.
- Melesse, A. M., & Shih, S. F. (2002), "Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS", *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1), 173-183.
- Méndez González, Jorge, Návar Cháidez, José de Jesús, & González Ontiveros, Vladimir. (2008), "Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México". *Investigaciones geográficas*, (65), 38-55.
- Messner, F., & Meyer, V. (2006), "Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research". *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, 149-167.

- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002), "Increasing risk of great floods in a changing climate", *Nature*, 415(6871), 514-517.
- Mishra, S. K., & Singh, V. (2013), Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. (Vol. 42). Springer Science & Business Media. 516 pp. DOI: 10.1007/978-94-017-0147-1
- Moglen, G., & Coauthors (2002) Spatially Explicit Hydrologic Modelling of Land Use Change 1, 241-252.
- Munich RE (2012). Natural Catastrophes worldwide 1980 – 2011. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE, Munich, Germany.
- Nayak, T. (2012), "SCS curve number method in Narmada basin", *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 3(1).
- National Oceanic and Atmospheric Administration's NOAA. Junio 20, 2015. Consultado en <http://www.nws.noaa.gov/glossary/index.php?letter=f>
- National Hurricane Center (2015), Tropical Cyclone Climatology, Mayo 09, 2015, consultado en <http://www.nhc.noaa.gov/>
- Neilsen, R. D., and Hjelmfelt, A. T. (1998), "Hydrologic soil group assignment." Proc., Int. Water Resources Engineering Conf., S. R. Abt, J. Young-Pezeshk, and C. C. Watson, eds., ASCE, Reston, VA, 1995.
- Neri, C., & Magaña, V. (2016), "Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico", *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.
- Olcinas y Ayala. (2002), Riesgos Naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. Ed. Ariel, Barcelona, España, 1502 p.
- O'Brien, K. (2008). Disaster risk reduction, Climate change adaptation and human security: A commissioned report for the Norwegian Ministry of Foreign Affairs, Rep. 2008: 3, 76 pp.
- O'Keefe, P. (1976). Disaster prevention for sustainable development: taking the naturalness out of natural disaster, en Cardona, O. 2003. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: una crítica y una revisión necesaria para la

gestión: centro de estudios sobre desastres y riesgos CEDERI. Universidad de los Andes, Colombia, 108 p.

Organization Nations United (ONU) (2015). Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015 – 2030.

Paz-Pellat, F. (2009), “Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS”. *Agrociencia*, 43(5), 521-528.

Pedraza J (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial, Madrid, 414 pp.

Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Domínguez-Mora, R. (2014), “The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico” *Weather*, 69(11), 295-302

Pedrozo-Acuña, A. (2015), “Lecciones aprendidas de la inundación en Acapulco Diamante”, *H2O Gestión del Agua*, vol. 5, enero – marzo, pp. 34-38.

Pérez Vega, A., & Ortiz Pérez, M. A. (2002), "Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz", *Investigaciones geográficas*, (48), 90-105.

Pérez, E. P., Magaña, V., Caetano, E., & Kusunoki, S. (2014), “Cold surge activity over the Gulf of Mexico in a warmer climate”, *Frontiers in Earth Science* 2:19. DOI: 10.3389/feart.2014.000019.

Plate, E. J. (2002), “Flood risk and flood management”, *Journal of Hydrology*, 267(1), 2-11.

Plate, E. J. (1996). Dams and safety management at downstream valleys. In *Proceedings International NATO Workshop Dams Safety Manage Downstream Valley* (pp. 27-43).

Ramírez, M., & Guadalupe, L. (1998). “Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero”. *Investigaciones geográficas*, (37), 7-19.

Re, M. (2011). *Great Natural Catastrophes Worldwide 1950–2010*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE, Munich, Germany.

- Rivera-Trejo, F., Soto-Cortés, G., & Méndez-Antonio, B. (2010), "The 2007 flood in Tabasco, Mexico: an integral analysis of a devastating phenomenon". *International Journal of River Basin Management*, 8(3-4), 255-267.
- Robledo FA, Penalba OC. (2008), "Análisis estacional de la frecuencia diaria y la intensidad de extremos de sobre el sudeste de Sudamérica precipitación". *Meteorológica* 32: 31–40.
- Rodriguez-Oreggia, E., De La Fuente, A., De La Torre, R., & Moreno, H. A. (2013), "Natural disasters, human development and poverty at the municipal level in Mexico", *The Journal of Development Studies*, 49(3), 442-455.
- Romero L., (2010), "Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?", *Environment and Urbanization*, 22(1), 157-178.
- Saavedra, F. (2010). Vulnerabilidad de la Población Frente a Inundaciones e Inestabilidad de Laderas. En: SEMARNAT – INECC: Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización, Ciudad de México. 132-137.
- Schultz, D. M. (2005), "A review of cold fronts with prefrontal troughs and wind shifts", *Monthly weather review*, 133(8), 2449-2472.
- Singh, R. B., & Singh, S. (2011), "Rapid urbanization and induced flood risk in Noida, India", *Asian Geographer*, 28(2), 147-169.
- Solín, L., Feranec, J., & Nováček, J. (2011), "Land cover changes in small catchments in Slovakia during 1990–2006 and their effects on frequency of flood events", *Natural hazards*, 56(1), 195-214.
- Sundar P (2010), "Analysis of the runoff for watershed using SCS – CN method and geographic information system". *International Journal of Engineering Science and Tenchnology*, 2(8), 3947-3654.
- Svoboda A (1991), "Changes in flood regime by use of the modified curve number method", *Journal of Hydrological Sciences*, 36(5), 461-470.
- Tang, Z., Engel, B. A., Lim, K. J., Pijanowski, B. C., & Harbor, J. (2005), "Minimizing the impact of urbanization on long term runoff". *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1347-1359.

- Tejeda-Martínez, A., & Welsh-Rodríguez, C. (2006). Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz. Universidad Veracruzana, México.
- Tockner, K., Lorang, M. S., & Stanford, J. A. (2010), "River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts". *River research and applications*, 26(1), 76-86.
- Tollan, A. (2002), "Land-use change and floods: what do we need most, research or management?". *Water Science and Technology*, 45(8), 183-190.
- United Nations Disasters Relief Coordinator (UNDRO) (1991), *Disasters and development: Trainer's guide for the UNDP/UNDRO Disasters Management Training Program*. R.S. Stephensonm ed. Madison, Wisc.: University of Wisconsin, Disasters Management Center.
- UNISDR (1999). 1990-1999: The International Decade for Natural Disaster Reduction
- UNISDR (2009). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 30 pp.
- UNISDR (2011). *Revealing Risk, Redefining Development*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 178 pp.
- UNISDR (2012). *Making Cities Resilient Report 2012*. Number of Climate – related Disasters Around the World (1980 – 2011), 106 p.
- UNISDR (2015). *El GAR de bolsillo 2015. Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres*. Ginebra, Suiza: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR).
- USDA (1979), *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. SCS-TP-149. Washington, U. S. Govt. Print.
- USDA – NRCS (1986), *Urban Hydrology for Small Watershed*, U. S. Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, Engineering Division. Technical Release 55, 210-VI-TR-55, cap. 2, 2da edición, 1-6.
- (2004), *Part 630 Hydrology*. National Engineering Handbook. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall. National Resources Conservation Service. United State Department of Agriculture. (210-VI-NEH, Jul 2004).

- (2009), Hydrologic Soil Group Chapter 7 part 630 Hydrology National Engineering Handbook
- Veintimilla, J., & Coauthors (2015), "Predicción de Caudales Basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para Períodos de Tiempos Sub Diarios". *Revista Politécnica*, 35(2).
- Viglione A, Rogger M. (2015), "Flood processes and hazards". In: Paron P, Di Baldassarre G, Shroder JF Jr, eds. *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier; 2015.
- Voisin, N., Wood, A. W., & Lettenmaier, D. P. (2008), "Evaluation of precipitation products for global hydrological prediction". *Journal of Hydrometeorology*, 9(3), 388-407.
- Walling, D. E. (1999), "Linking land use, erosion and sediment yields in river basins", *Hydrobiologia* 410: 223-240. DOI: 10.1023/A: 1003825813091
- Wilches, C. (1993). Y qué es eso del desarrollo sostenible?. CORPES de la amazonia, presidencia de la república, 111 p.
- (1998). La vulnerabilidad global. La red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina. La RED, pp. 11 – 44.
- World Meteorological Organization WMO, U. (1974). *Glosario Hidrológico Internacional*. WMO/UNESCO/BMO, No. 385, Secretaria de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.
- (2012). *International Glossary of Hydrology*. Ženeva, Švajčiarsko.
- Xiaoyong, Z. (2004), "ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps". *Environmental Modelling & Software* 19, 875-879.
- Zúñiga, E. (2009), *Análisis del riesgo por inundaciones como consecuencia del desbordamiento del Río Yautepec, Morelos, México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- E., y Magaña, V., (2017), "Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change". *Investigaciones geográficas*, doi: 10.14350/rig59465.



Ciudad Universitaria, México, 3 de octubre de 2017

Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar
Posgrado en Ciencias de la Tierra,
Universidad Nacional Autónoma de México

PRESENTE

Por este conducto le informo con respecto al artículo "Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change", en coautoría con Víctor Orlando Magaña Rueda, sometido a la revista *Investigaciones Geográficas* del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, que ha sido aceptado y será publicado en breve en su versión *e-print*, con doi: 10.14350/ig.59465.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un saludo cordial.

Atentamente

Dr. José Luis Palacio Prieto
Editor Académico

Investigaciones Geográficas, es una publicación arbitrada incluida en: Scopus, SciELO Citation Index, SciELO México, DOAJ y Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología.

<http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/>

ISSN: 0188-4611

ISSN Digital: 2448-7279

Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico:

The effect of land use cover change

Emmanuel Zúñiga¹ and Víctor Magaña²

¹Graduate Program in Earth Sciences
National Autonomous University of Mexico,
Mexico City 04510

²Institute of Geography,
National Autonomous University of Mexico,
Mexico City 04510

Abstract

Natural disasters should be examined within a risk-perspective framework where both natural hazards and vulnerability are considered. The trend toward more frequent floods in Mexico in recent decades is not only the result of more intense rainfall, but also a consequence of increased vulnerability. As a multifactorial element, vulnerability is a low-frequency modulating factor of the risk dynamics to intense rainfall. It can be described in terms of physical, social and economical factors. For instance, deforested or urbanized areas are the physical and social factors that lead to the deterioration of watersheds and an increased vulnerability to intense rains. Increased watershed vulnerability due to land-cover changes is the primary factor leading to more floods, particularly over south-central Mexico. Only in some parts of the country, such as Baja California Sur, the increased frequency of intense rainfall (i.e., natural hazard) associated with high-intensity tropical cyclones is the leading cause of more frequent floods.

We have developed a methodology to estimate flood risk associated with heavy rainfall considering changes in land cover and use, terrain slope and basin compactness are key vulnerability factors. The capability of the flood-risk model for Mexico was tested by comparing the observed and modeled

frequency of floods for the 1970-2010 period. It was found that over most of the Mexican territory, more frequent floods are the result of a rapid deforestation process. Consequently, flood-risk management should include structural measures, such as watershed restoration and land cover – use planning.

Key words: Hazard, Vulnerability, Flood, Risk, Rainfall, Land cover, southern Mexico.

1 INTRODUCTION

The description of the so-called natural disasters has changed in recent decades, from a naturalistic perspective (Bullock, 1993; Schutt, 2010; Fuchs, 2012), to one that takes into account the vulnerability component (e.g., Cannon, 1994). Consequently, disasters are not inevitable since they are frequently associated with lack of planning and prevention measures. Floods are probably the type of natural disasters with greater social, economic and environmental costs (Istomina, *et al.*, 2005; Messner and Meyer, 2006; Re, M. 2011; Worldwide, 2012). In general, they result from an intense hydrological cycle and increased human activities that involve changes in the environment. Floods related to intense rains are becoming more frequent due to climate change (e.g., Trenberth, K. 2011; Hirabayashi *et al.*, 2013). However, changes in the landscape make some regions more prone to this type of disaster (Romero, L. 2010). Therefore, the traditional paradigm of “flood protection” (response to disasters only) is currently considered inappropriate (UNDRO, 1991; Plate, 2002). A risk-management approach should be followed—including landscape planning—for regions that are highly vulnerable to intense rainfall.

Human activities such as agriculture, urbanization, cattle ranching or logging compact soils and reduce rainfall infiltration (Solín and Nováček, 2011), hence resulting in heavier runoff in mountainous regions that may lead to flooding when intense rainfall occur. Deforestation also result in increased erosion and transport of soil that is deposited in river beds, hence reducing river transport capacity. Therefore, floods are fostered when changes in soil cover reduce the infiltration capacity of soil (Walling, 1999).

In coastal regions, as well as in lowlands of deforested watersheds, intense summer rainfall, sometimes related to landfalling tropical cyclones, trigger floods (Tejeda-Martinez and Welsh-Rodríguez, 2006;

Aparicio *et al.*, 2009); some floods may also occur during the winter, after persistent rainfall episodes overflow water channels, dams and reservoirs (Álvarez, 2016). These illustrate that water management or issues related to hydraulic infrastructure may be flood-risk factors. Therefore, the social and environmental context where heavy rainfall occur largely determines the occurrence of floods (Viglione and Rogger, 2015).

In Mexico, the number of floods is increasing (DesInventar, 2013) (Fig. 1); these currently make up more than 50% of all natural disasters in the country (CENAPRED, 2014). As in many other parts of the world, the increased deterioration (deforestation) of basins, along with changes in the hydrological cycle, is making them more prone to floods and landslides (Alcantara, 2004; Coutu and Vega, 2007). Approximately 25% of the Mexican population is at risk of being affected by floods (Saavedra, 2010). Therefore, a diagnosis of the major causes of this type of disaster should be determined, and a risk management strategy should be implemented if the social, economic and environmental costs of floods are to be reduced.

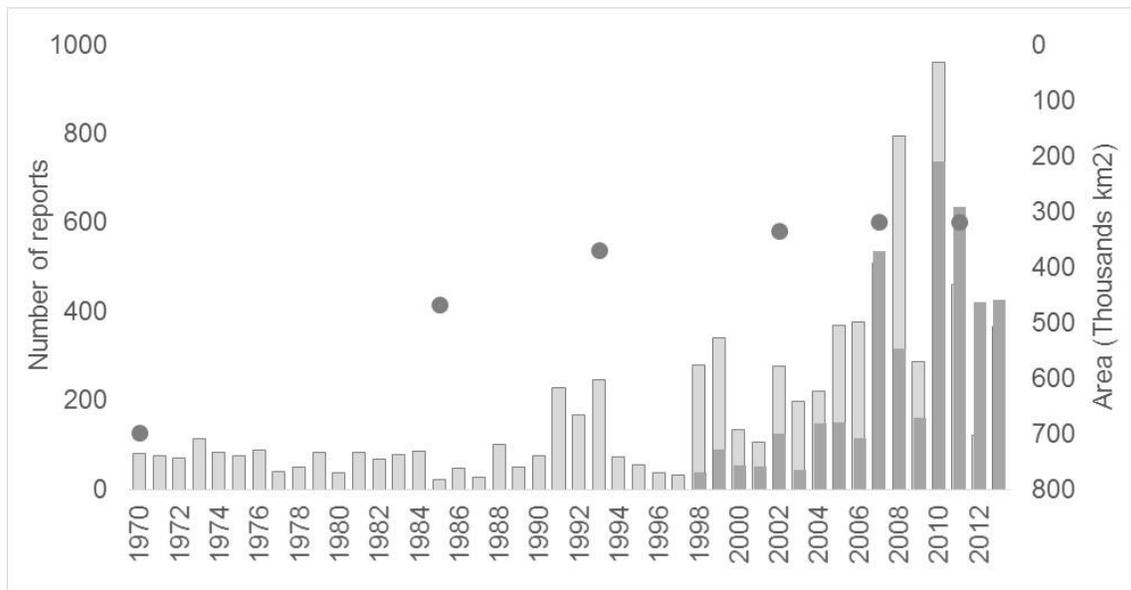


Fig 1. Yearly number of flood reports in Mexico for the 1970-2013 period according to DesInventar (2013) (light-gray bars) and to CENAPRED (dark-gray bars) for the 1998-2013 period. Dots correspond to estimates of accumulated deforested areas in Mexico (km²) between 1970 and 2012 (source: INEGI).

Therefore, the objective of this work is to analyze the positive trends in flood events and the increased vulnerability of deteriorated watersheds in Mexico in relation to the hazard of intense rainfall. In particular, the present analysis focuses on how the degradation of basins due to deforestation increases the risk of flooding when heavy rainfall occur. Section 2 describes the data and methodology used in the study. Part 3 details the methodology for flood-risk analysis. In the section 4, a discussion on the results is provided. Conclusions and recommendations on flood-risk management are drawn in the final part of this article.

2. DATA AND METHODOLOGY

i) Data

This study quantifies natural hazard by means of daily extreme rainfall figures that are equal or larger than the 95th percentile of daily precipitation (P95) from gridded fields within a rainfall grid with a 10-km spatial resolution. Precipitation gridded were elaborated using a Cressman (1959) objective analysis scheme with data from more than a thousand climatological stations in Mexico for 1979-2014 period. The stations selected account for over 70% of data for the period of analysis. Under such a scheme, station data iteratively modify a preliminary (first-guess) daily field until a minimum difference between station data and gridded fields is reached (Daley, 1981; Magaña *et al.*, 2013). The first-guess precipitation field was estimated from Global Precipitation Climate Project (GPCP) daily data (Adler *et al.*, 2003). Episodes of more than 100 mm accumulated precipitation during three consecutive days were also used to characterize natural hazards that may result in floods.

On the other hand, the vulnerability to heavy rainfall depends on the physical conditions of the basins. Significant changes in land cover took place since 1970, as evidenced by data from the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI, 2011), and from the National Commission on Biodiversity (CONABIO, 2010), for years 1970, 1985, 1992, 2002, 2007, and 2011. Land-use cover data

were used to determine the characteristics of hydrological soil groups. A Digital Elevation Model (DEM) with a 10-m vertical resolution was used to determine the physical structure of watersheds (INEGI, 2013). Data on the number of floods were obtained from two sources: i) the DesInventar V6 (2013) project, which accounts for disaster activity based on newspaper reports between 1970 and 2013, and ii) data from CENAPRED for 1998-2013. DesInventar does not provide an actual account of the physical characteristics of floods, but serves as a flood-activity indicator. CENAPRED is the official source of disaster information and was compared to DesInventar as a means to have more robust data on floods and impacts. There are additional sources for particular flood events; one such source is the Dartmouth observatory, but it only makes reference to case studies and not to actual trends in the number of floods. Floods are more frequent during the summer rainy season, as precipitation extremes are more common during this season of the year when the soil is wet, which makes it less permeable to rainfall. There are more flood reports for central and southern Mexico than for northern Mexico, not only because intense rainfall is more frequent, but also because deforestation is more severe in the former. Monthly precipitation and flood reports appear to be consistent for central-southern Mexico and show signals of the Mid-Summer Drought (Magaña *et al.*, 1999), with a relative minimum in August (Fig. 2). Over the northern part of Mexico, floods tend to be more frequent during September, once the soil is saturated.

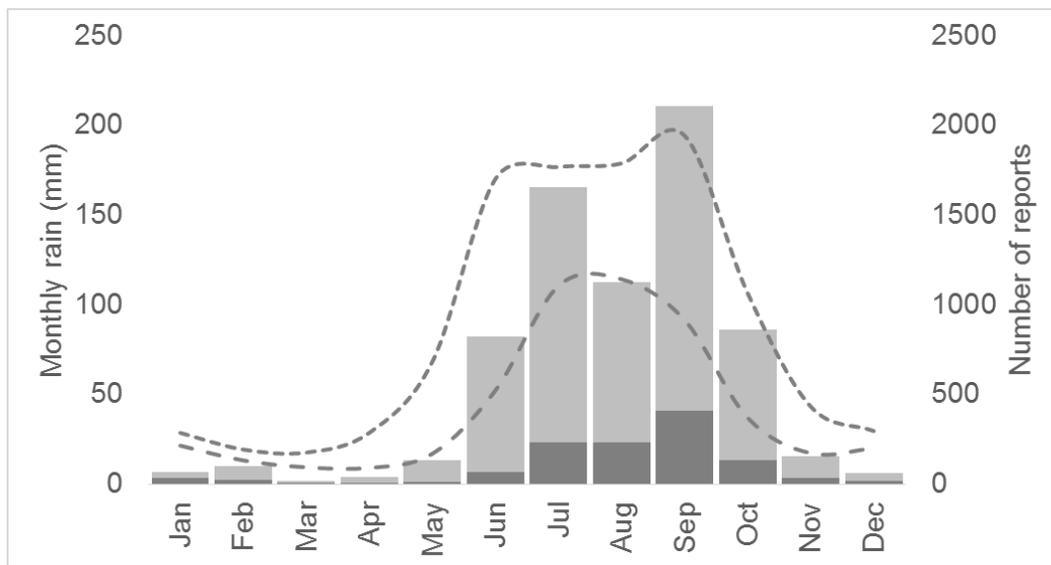


Fig. 2. Average number of monthly flood reports in northern (dark-gray bars) and central-southern (light-gray bars) Mexico, between 1970 and 2013. Average monthly precipitation (mm) in central-southern (short-dashed line) and in northern (long-dashed line) Mexico (sources: *DesInventar*, 2015 and *CONAGUA*, 2015).

ii) Methodology

There is no universally accepted approach to estimate vulnerability (*Gain et al.*, 2012) and, consequently, several methods have been proposed to quantify it (e.g., *Balica et al.*, 2015). The use of indicators that describe the vulnerability factor is common practice (e.g., *Neri and Magaña*, 2016). A proper identification of vulnerability is crucial if risk-reduction strategies aimed at diminishing disaster activity are the goal. The indicators may be combined into a single vulnerability index for a region or sector, and may be compared from one region or sector to another.

In this study, vulnerability is derived from three main factors:

- 1) Runoff, estimated by CN and HG (dynamic factor)
- 2) Terrain slope, α (static factor)
- 3) Compactness index, C_i , in relation to watershed shape (static factor)

The hazard may be characterized as condition of extreme weather in a period of time, for instance by means of the 95th percentil of daily precipitation, which indicates where extreme events have a certain

intensity. When this information is combined with a vulnerability estimate, those regions with a large probability of experiencing a flood are identified (Fig. 3). The hazard may also be determined annually by considering the number of times a certain meteorological condition occurs, for instance, number of days with precipitation > 100 mm for three days. When this information is combined with the vulnerability index, the flood-risk estimate obtained may be compared with the actual number of floods that occurred in a given location.

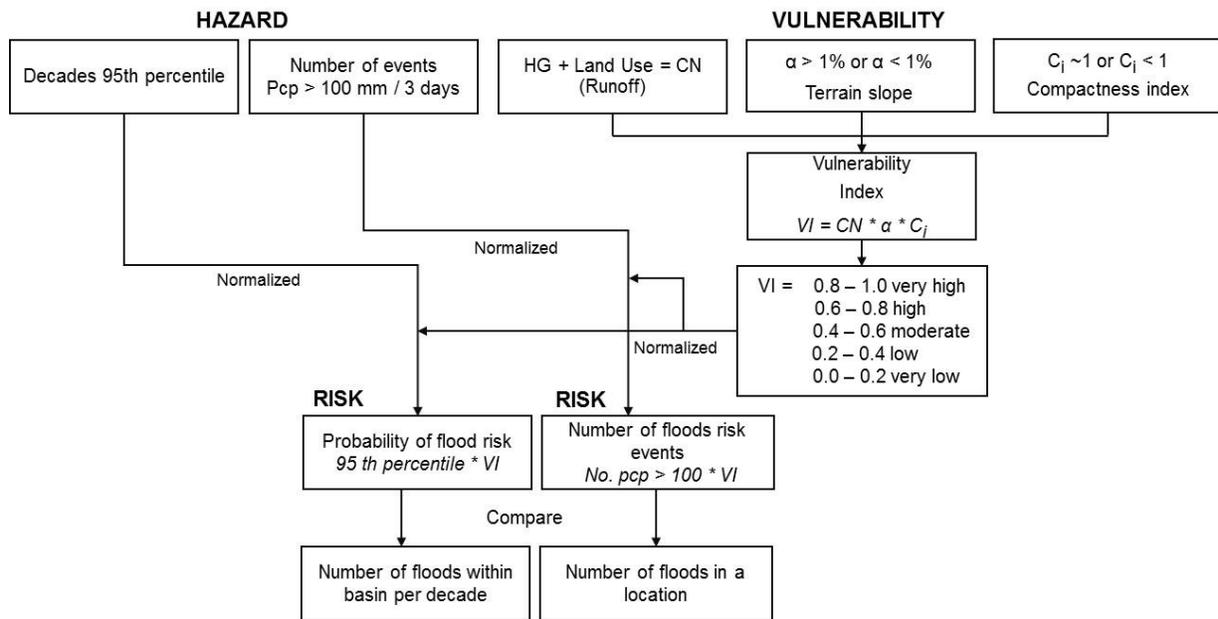


Figure 3. Flowchart of the components used for estimating flood-risk.

Direct runoff resulting from intense rainfall is obtained for each Hydrologic Soil Group (HSG) by means of the Curve Number method (Wood, 1984; Hernández, 2000; Melese, 2002). Hydrologic groups are: agriculture, forest, human settlements, scrubland, jungle, other vegetation types, pasture land, and without apparent vegetation. According to the soil type, HSG may be defined as either A, B, C or D (USDA - NRCS, 1986), which refers to its infiltration capacity:

- Group A: low runoff potential;
- Group B: moderate runoff potential;
- Group C: high runoff potential, and
- Group D: very high runoff potential.

The curve number (CN) method of the Natural Resources Conservation Service (USDA, 1979; USDA-NRCS, 2004; Mishra and Singh, 2013) is a structured semi-empirical scheme that takes into account soil moisture from accumulated precipitation in a region to estimate runoff using standard values from tables of the USDA-NRCS (USDA – NRCS, 1986; Dominguez, 2008) for each HG. CN values range from 0 to 100, with CN = 0 corresponding to a region that has no runoff and CN = 100 describing a virtually impervious area (Gaspari, 2007). Direct runoff, Q , as a function of CN was calculated in the present study for rainfall values larger than P95. The relationship between P (mm) > P95 and direct runoff, Q , was obtained following Aparicio (2008) by means of:

$$Q = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (1)$$

Forests are 35% to 45% more permeable than land for agriculture, or 50% more permeable than human settlements. As landscapes change from forests to agriculture and cattle-ranching land, or to urban settlements, they become less permeable and thus more vulnerable to intense rainfall since water does not infiltrate and accumulates at the surface, hence causing floods (Singh, 2011). Estimating runoff based on the CN method is common practice in hydrology (Svobdova, 1991; Nayak, 2012; Askar, 2013). A rapid increase in runoff occurs for most soil types when $P > 100$ mm/day, particularly in the case of pasture land or human settlements (Fig, 4).

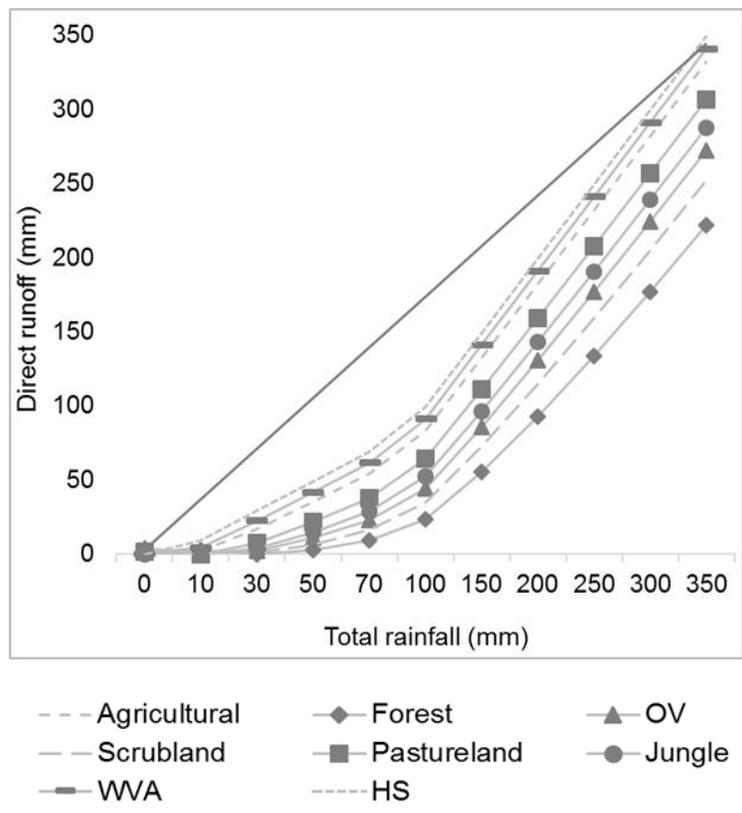


Fig. 3. Direct runoff for various soil types: Agriculture, Forest, OV (Other Vegetation types), Scrubland, Pasture land, Jungle, WVA (Without Apparent Vegetation) and HS (Human Settlements). The straight line is a reference when Q is equal to P (e.g. Paz-Pellat, 2009).

Changes in land cover alter the HSG–NC characteristics and the regional vulnerability to intense rainfall by increasing runoff. However, vulnerability to rainfall should also include factors such as the edaphic characteristics of soil, antecedent soil moisture condition (AMC), terrain slope, and watershed compactness, since these also affect flood intensity. For instance, it is generally towards the end of the rainy season in Mexico when soil moisture reaches a peak and the increased runoff may cause floods. The slope of the terrain influences the amount of runoff and flood-prone areas. It can be divided into:

- Class I, called flat areas, with a slope, α , of less than 1%
- Class II, called wavy zones or contributing areas, with $\alpha > 1\%$

Class I is more likely to experience floods than Class II, since the physical parameter α determines the potential for runoff in watersheds. It was calculated according to the morphological characteristics of the terrain (Pedraza, 1996; Weiss, 2001) using a digital elevation model (INEGI, 2013).

Finally, the compactness index C_i was calculated to describe the shape of the basin (round or elongated) in order to estimate the amount of rainfall captured in each basin (Campos, 1987). The compactness index C_i is calculated through the empirical relationship:

$$C_i = P/2\pi r = 0.28 (P/(A_c)^{1/2}) \quad (2)$$

where P is basin perimeter (km), and A_c is basin area (km²). In circular basins ($C_i \approx 1$), the basin area, runoff volumes and concentration time are all higher vs. elongated basins ($C_i < 1$). For the present analysis, a basin with $C_i = 1$ and $\alpha < 1\%$ is more vulnerable than one with $C_i = 0$ and $\alpha > 1\%$, since the former is more prone to large rainfall uptake and runoff accumulation than the later. Slopes and compactness are also vulnerability factors but these can be considered as static.

The combination of these factors (indicators) results in a vulnerability index that shows those areas most likely to be affected (flood) by intense rainfall. It would also be adequate to include the effect of sediments on riverbeds as a vulnerability factor, since it results in a lower streamflow capacity. However, there are no adequate data to quantify it, and thus it is not considered in this work (Clark *et al*, 2000). Once the hazard and the vulnerability are obtained, an estimate of risk under intense rainfall can be determined and compared with disaster events. The risk of flood is calculated as the product of the normalized values of the natural hazard (P95) by the vulnerability index. In general, climatic

vulnerability varies at time scales longer than the hazard and, consequently, it is considered to be the low-frequency modulator of risk and disaster activity (Neri and Magaña, 2016).

Finally, the adequacy of the vulnerability and flood-risk estimates was obtained by comparing the spatial distribution of flood risk vs. actual flood reports for a given period of time. Furthermore, the dynamic character of risk may be related to disaster activity. For instance, the trend in the number of floods should be recorded by the estimates of risk for recent decades. In this way, it is through the spatial and temporal comparison of risk and flood frequency that the adequacy of vulnerability can be evaluated, since there are no historical records of the magnitude of floods for a more quantitative assessment.

3. Results

a) Vulnerability, risk and flooding activity

During the second half of the summer, daily rainfall above P95 is more frequent across the Mexican territory, which determines that most floods occur during September and October. There are significant spatial contrasts in the magnitude of P95 (Fig. 5), with lowest values in some arid and semiarid regions where $P95 < 30$ mm/day, and highest values in and southern areas of Mexico, where tropical cyclones and orographically forced moisture fluxes produce intense rainfall (e.g., more than 100 mm/day as recorded in climatological stations across this region).

In some arid regions of northern Mexico, including the southern Baja California peninsula and northeastern Mexico, P95 is large due to the passage of tropical cyclones even when the annual cumulative rainfall is low. In the Mexico City Metropolitan Area, extreme precipitation events ($P95 > 25$ mm/day) occur mainly in the western part of the Valley of Mexico (Magaña *et al.*, 2003).

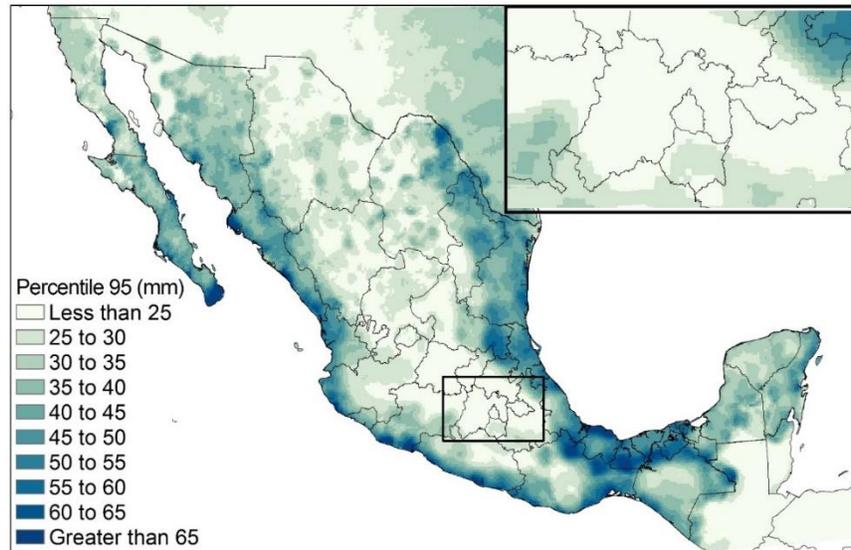


Figure 5. Distribution of P95 (mm/day) in Mexico for 1980-2009.

Regions that experience floods are located mainly along the coasts, where P95 frequently exceeds 50 mm/day. However, the spatial distribution of floods in Mexico depends not only on the hazard, but also on the vulnerability context within which intense rainfall occurs. An increase in the number of floods in recent decades is more evident in the states close to the Gulf of Mexico, in the central Highlands (including the Mexico City Metropolitan Area), the southern coast of the Mexican Pacific and parts of northern Mexico (Fig. 6). Only in a few places floods tend to decrease, as in the state of Baja California or in central Chihuahua. Under a simple naturalistic focus, one may think that the change in the hydrological cycle (climate change) has led to the increased frequency in the number of floods observed, but from a risk perspective one should consider changes in the natural hazard as well as in the vulnerability context in which more frequent intense rainfall is now occurring.

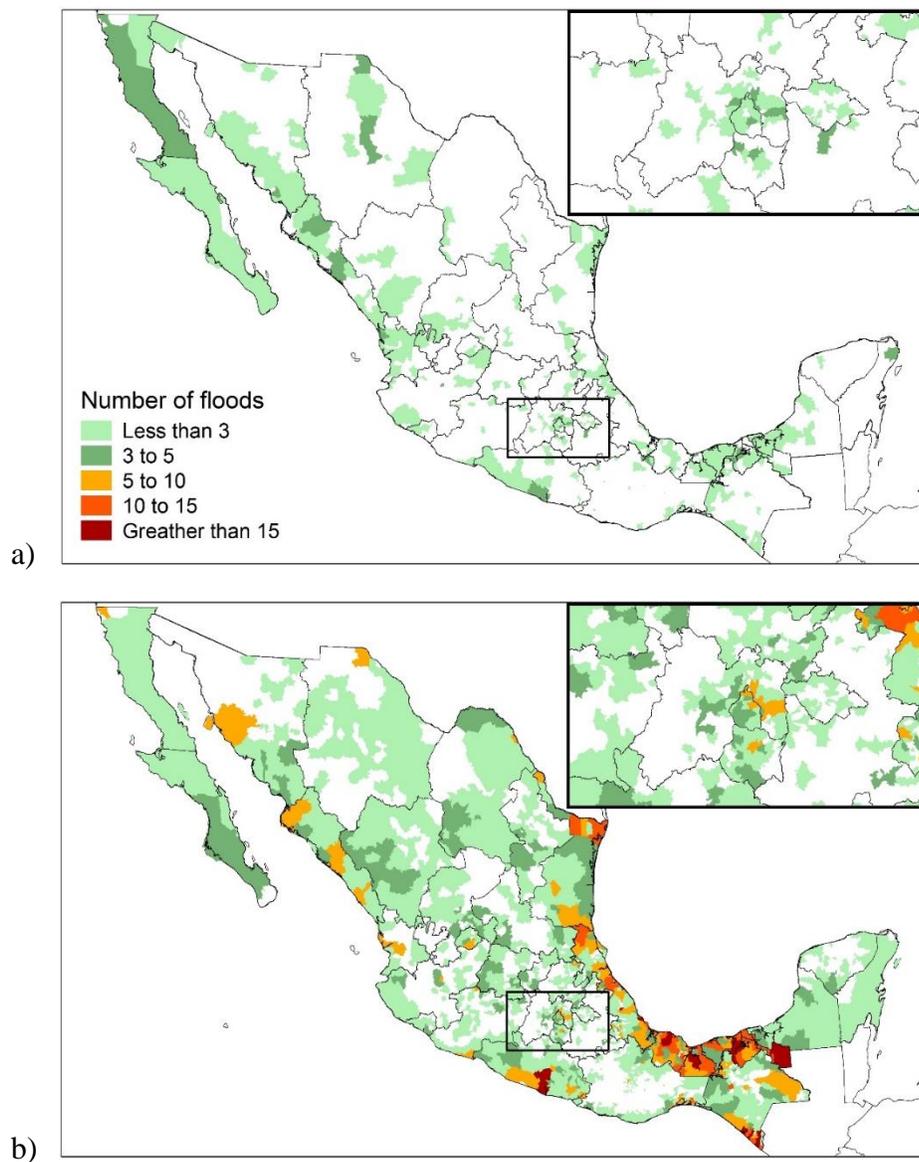


Fig.6 Number of floods reported by Desinventar for the 1980-2010 period

a) 1980-1990, b) 2000-2010.

The trend in the number of days with precipitation above P95 shows that more frequent intense rainstorms are occurring over a large area of the Mexican territory (Aguilar *et al.*, 2005). This could partially explain the rise in the number of floods. For instance, in the Baja California peninsula and northeastern Mexico, P95 is currently larger than two decades ago (Fig. 7). More landfalling tropical cyclones in this region have led to more frequent floods. During the 1960s, approximately 10 tropical cyclones affected Baja California Sur, 7 in the 1970s, 18 in the 1980s, 24 during the 2000s, and approximately 10 during the

present decade. Consequently, in this region the higher incidence of floods is primarily due to the increase in hazard activity. In the Valley of Mexico, P95 events are more intense and occur more frequently now than in the past, just a couple of decades ago. The urban heat island effect associated with Mexico City is the leading cause of more intense rainfall (Jáuregui and Romales, 1996), but changes in land cover, particularly in the mountains surrounding the Valley of Mexico, have significantly increased the volume of runoff and the frequency of urban flood events.

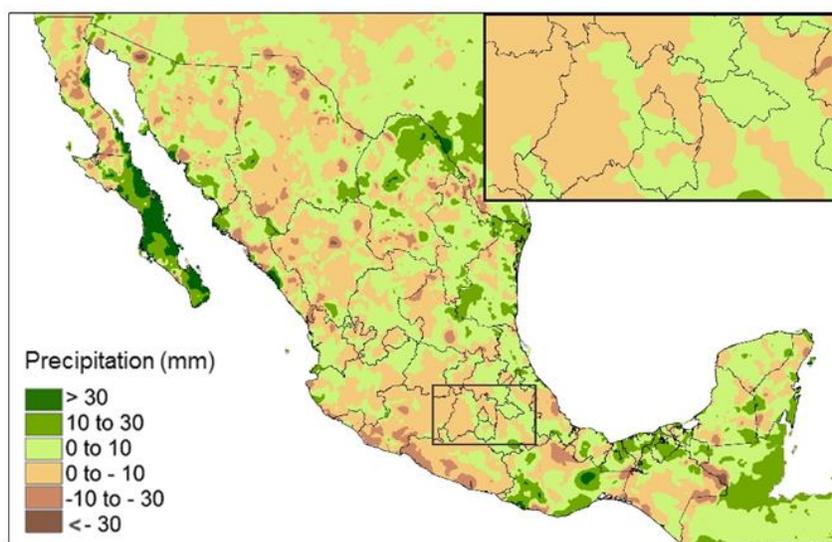


Fig. 7 Change in the magnitude of P95 between 1980-1990 and 2000-2010.

The dynamics of vulnerability is an important element in risk analysis. Changes in land cover are one of the most important drivers of water infiltration, runoff and sediment buildup in rivers, lakes and dams. Deforestation for agriculture, cattle ranching and urban expansion has increased in Mexico in recent decades. It is estimated that forest cover has undergone a 30% decrease between 1970 and 2010. Such changes occurred mainly between 1970 and 2000 to expand agriculture and cattle ranching (Mas *et al* 2004), resulting in an increased area covered by impervious soil in some basins. Infiltration capacity in scrubland and forests is higher than in grasslands, agricultural land or regions without vegetation. Therefore, the changes in land cover in Mexico, mainly associated with deforestation, have led to increased runoff and reduced infiltration capacity, creating favorable conditions for flooding. Land cover

transformations are more important in regions near the Gulf of Mexico, where the increase in agricultural land has grown approximately 60% in around forty years (INEGI, 1985 and 2011) and appear to be the main cause of more frequent floods (Pérez, 2002; Seingier, 2009).

The vulnerability index to heavy rainfall was defined for 987 catchment areas (Fig. 8) using the product of two static indicators, terrain slope and compactness index, and a dynamic indicator, soil cover, related to runoff based on the CN. A normalized vulnerability between 0 and 1 has been categorized into five vulnerability levels: 0.0 to 0.2 (very low), 0.2 to 0.4 (low), 0.4 to 0.6 (moderate), 0.6 to 0.8) and 0.8 to 1.0 (very high). The regions most vulnerable to heavy rainfall are located in northwestern Mexico (state of Sinaloa), the regions adjacent to the Gulf of Mexico (Tabasco, Veracruz and Tamaulipas), the valleys of the central part of the Mexican Highlands, the Trans-Mexican Volcanic Belt, along the coast of Chiapas, and the Colorado river delta. Vulnerability to intense rainfall is also high in some parts of central northern Mexico and Chihuahua.

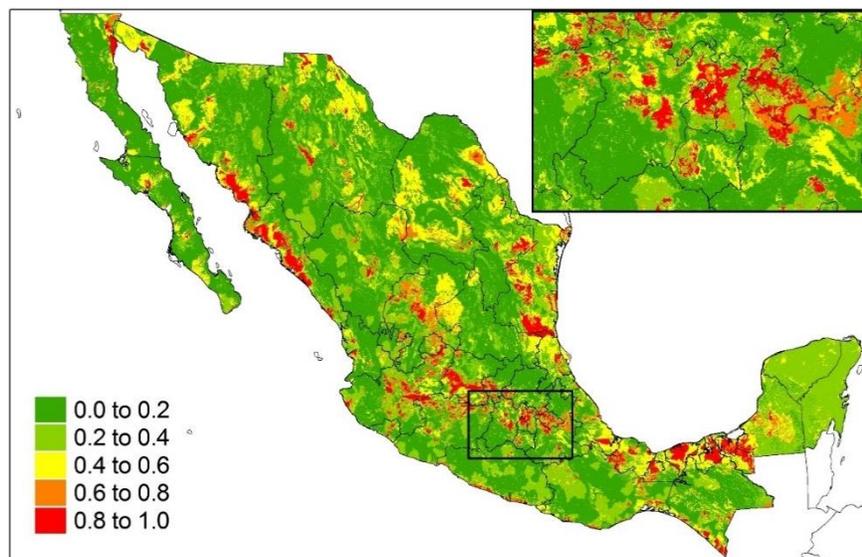


Fig. 8 Vulnerability index to intense precipitation in 2010 (see text for details)

The vulnerability index increased in most regions between 1970 and 2010, although it decreased in some areas (Fig. 9). The regions that show the largest increase in flood occurrence (Fig. 6) roughly correspond

to the regions where vulnerability rose, such as the coastal regions of the Gulf of Mexico and northwestern Mexico (Sinaloa and Sonora), or the coast of southern Mexico, where some of the largest changes took place.

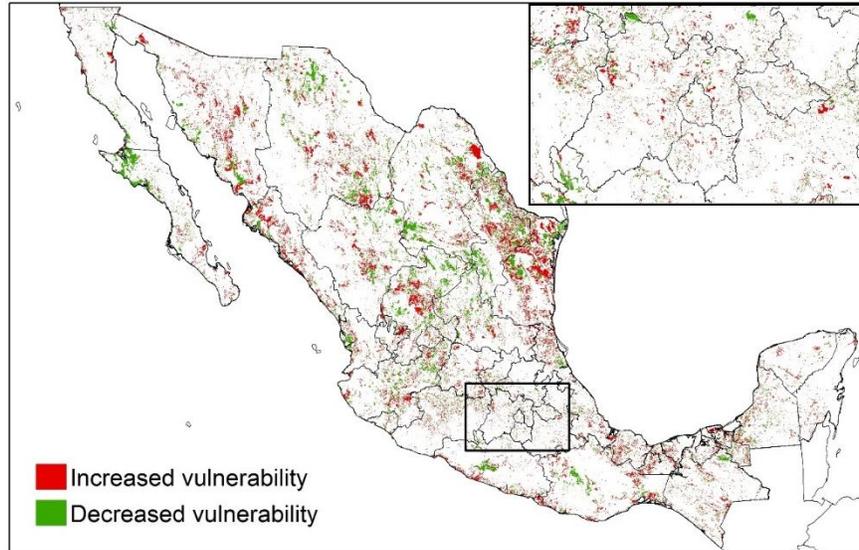


Fig. 9 Changes in the index of vulnerability to intense rainfall between 1970 and 2010.

The increased risk of floods due to deforestation for specific regions of Mexico where the hazard of intense rainfall associated with various phenomena has emerged, is illustrated below.

b) Flood risk: case studies

A risk estimate is the main goal in order to analyze or prevent disasters. Since hazard is expressed in terms of probability and vulnerability by means of an index, risk is also expressed in terms of probability. However, when the hazard corresponds to a specific flood event in a particular time and location, it is expressed in terms of intensity, and risk has a specific value that can be compared with the actual disaster information. The challenge is to determine the proper combination of vulnerability and hazard that yields the most adequate spatial and temporal representation of the disaster. When flood activity is calculated on an annual basis, the associated vulnerability varies gradually following a logarithmic function, as

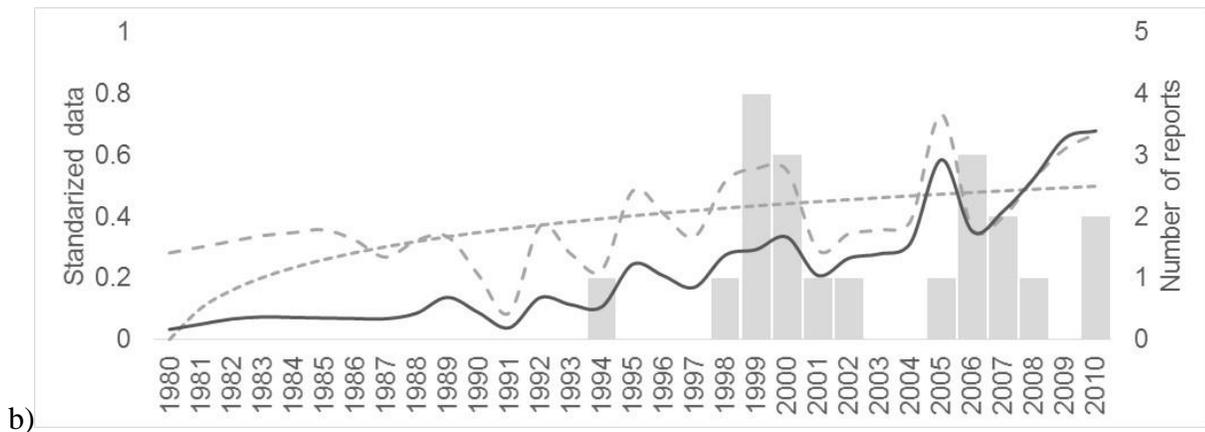
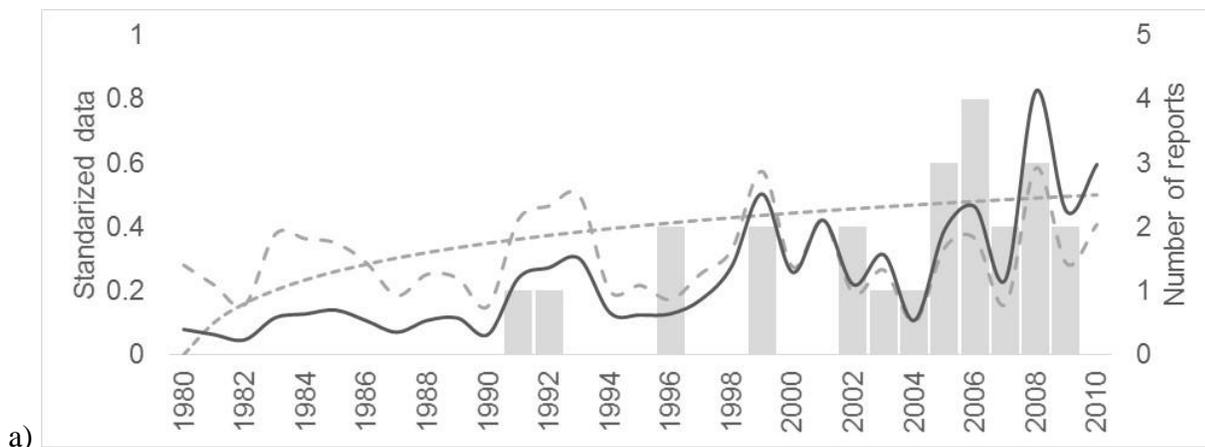
deforestation and land-cover changes progress (Fig. 10). The vulnerability index between 1970 and 2010 shows the low-frequency modulating effect of flood risk.

The annual evolution of risk and the number of disasters for four locations in Mexico are presented as case studies: a) Boca del Río, Veracruz; b) Tapachula, Chiapas; c) Monterrey, Nuevo León; and d) Acapulco, Guerrero, all being regions where the number of floods has increased. In these locations, intense rainfall is related to tropical cyclones, cold surges, mesoscale convective systems or easterly waves, and frequently last for more than three days. The number of events when precipitation was above 100 mm in 3 days was used as a hazard index and was obtained from the records of climatological stations in those places. This measure of hazard was obtained empirically by examining the meteorological conditions that led to floods. The hazard activity varies on interannual time scales with more precipitation extremes on wet years, related to La Niña years, for instance. Therefore, hazard shows a higher frequency variability vs. vulnerability, which in the long term modulates the evolution to higher risk values. It was found that the likelihood of flood reports increases over time as a result of a higher vulnerability and not always due to more intense rainfall activity. Therefore, if increasing flood activity is to be explained, one must necessarily include the modulating effect of vulnerability. Moreover, in Tapachula or Acapulco, there is a trend toward more extreme precipitation events also contributing to the higher flood risk in recent decades (forty years). This effect may be associated with the trend to a higher incidence of tropical cyclones along the Mexican Pacific coast in recent decades (http://weather.unisys.com/hurricane/e_pacific/index.php).

One may even consider critical risk values for the probability of flood to be high, i.e., when more than one flood event occurs in a location. In recent years, the critical flood-risk value (around 0.3) has been surpassed more frequently. This risk condition may set a value for a Flood Early Warning System to be implemented. It may also serve to set vulnerability goals under climate change scenarios aiming at disaster prevention. Therefore, risk quantification is necessary for developing risk management actions,

and vulnerability factors and indicators support actions that are deemed necessary to define efficient disaster prevention practices.

In most of these locations, the number of flood disasters has grown, especially in Boca del Río and Acapulco, where the respective basins have been affected primarily by changes in land use. Our results indicate that the probability of floods grows as risk increases. In Monterrey, the hazard activity has not increased in recent decades, but risk has risen due to the increased vulnerability. In 2008, two flood events were reported in this location even when the hazard activity was low. The clearest example of the risk-modulating effect is in Boca del Río, where even when the hazard activity remains almost constant, the modulating effect of vulnerability increases the flood-risk value, just as the flood activity increases.



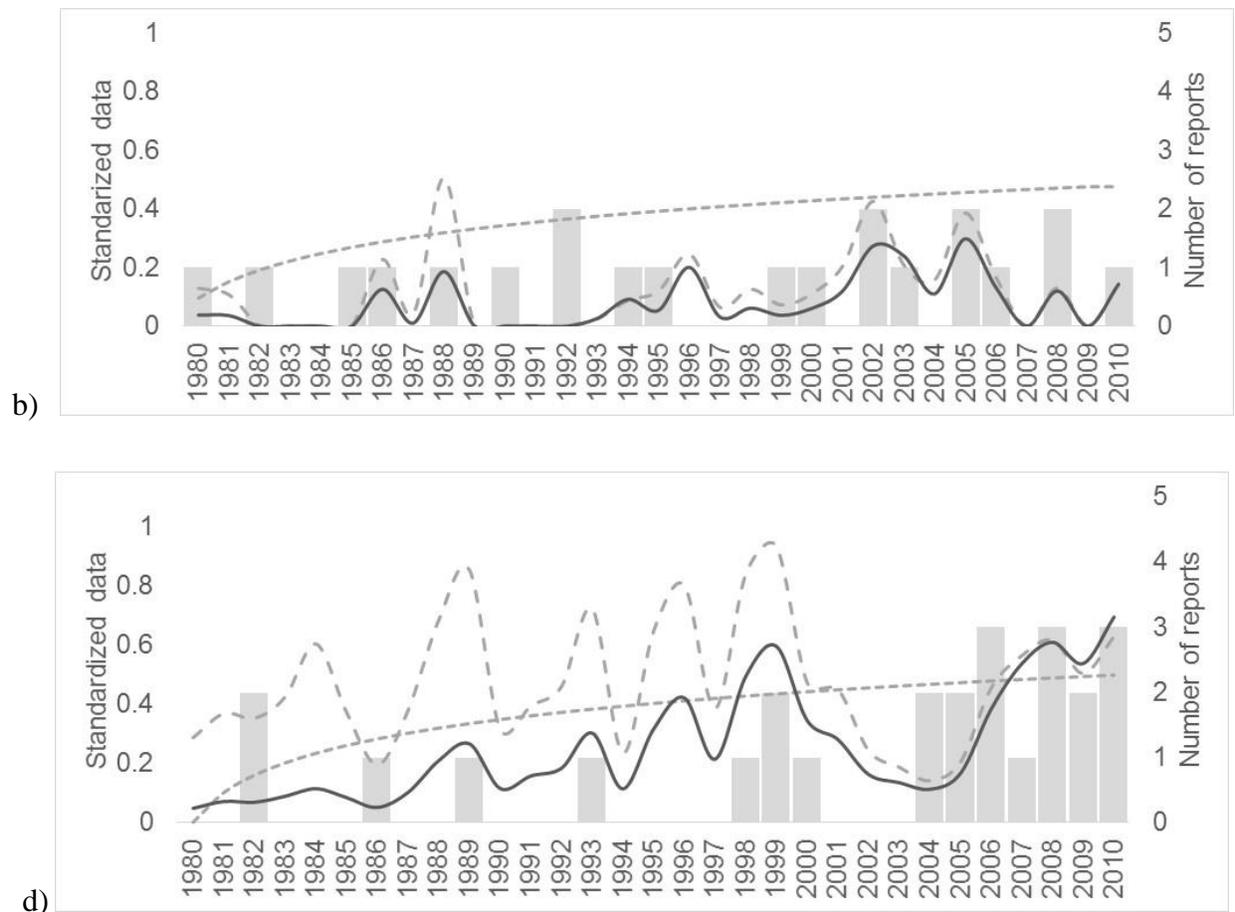


Fig. 10 Time series of number of events when precipitation in three consecutive days exceeded 100 mm (long-dashed line), vulnerability index (short-dashed lines), risk estimate (solid line), and number of flood reports (grey bars) for: a) Boca del Río, Veracruz; b) Tapachula, Chiapas; c) Monterrey, Nuevo León; and d) Acapulco, Guerrero.

It is clear that the risk model may be improved by including additional elements in the vulnerability analyses. For instance, the increased amount of sediments in the riverbeds or the actual soil moisture conditions prior to the flood may contribute to make a region more vulnerable for river flooding. This requires finding creative ways to represent this effect when insufficient data is a limitation. Even more, to better define regions that mostly contribute to increase vulnerability to intense rainfall, the risk analysis requires constant updates in time, with a frequency tailored to the evolution rate of the vulnerability factors.

d) Floods in Acapulco

In Acapulco, vulnerability and hazard increased in recent years, and hence the frequency of flood events (Fig. 10d). The presence of tropical cyclones nearby constitutes a major natural hazard to the coastal cities of the southern Mexican Pacific coast. Tropical cyclone Paulina in 1997 resulted in numerous fatalities (120 deaths) and significant economic losses (300 million pesos) for Acapulco (Ramírez, 1998). Hurricane Manuel in 2013 caused 100 human losses and 23,000 million pesos in damages (CENAPRED, 2013). Pauline in 1997 was a much stronger tropical cyclone than Manuel in 2013, but vulnerability was higher in recent years, which led to a more intense flood disaster. Acapulco has undergone rapid urban growth in recent decades, particularly over the mountains surrounding Acapulco Bay (Fig. 11). The index of vulnerability to heavy rainfall in 1970 rose from low or average values to high and very high vulnerability values over most of the coastal region and lowlands, particularly near Laguna de Tres Palos, in the southwest of the domain.

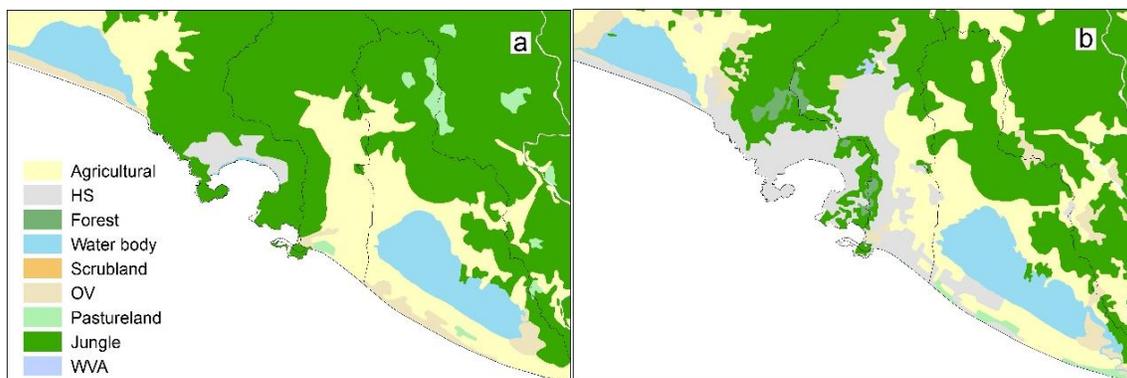


Figure 11. Land-cover change around in the Papagayo basin and Acapulco Bay in a) 1970, and b) 2000. HS (human settlement), OV (other type of vegetation) and WVA (without apparent vegetation) (INEGI, 1970 and 2010).

Between 1970 and 2010, approximately 110 km² of natural vegetation were transformed in the Acapulco Bay region. If flood-risk index values are divided into five equal categories, from very low to very high, it is found that the Acapulco area changed from low flood risk in approximately 30% of area, to high and

very high flood risk in approximately 40% of the area, particularly near Laguna de Tres Palos and around Laguna de Coyuca (Fig. 12).

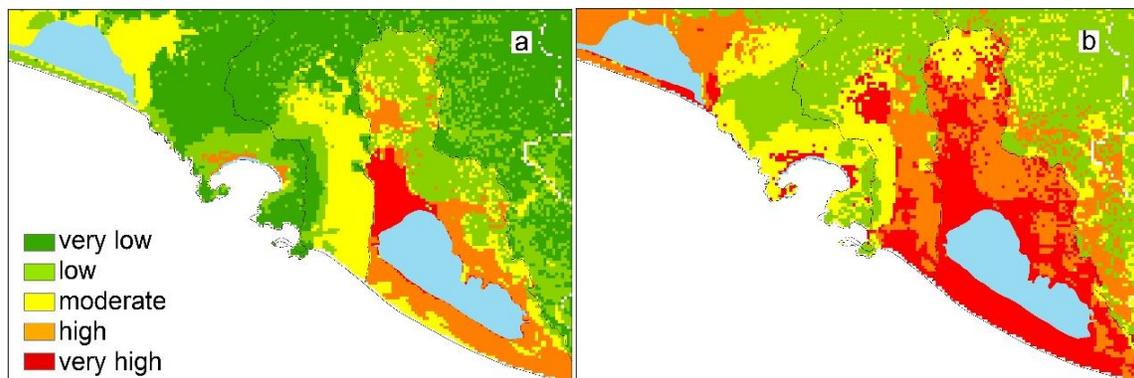


Fig 12. Flood risk in the area surrounding Acapulco, Guerrero for: a) 1970 and b) 2010.

In September 2013, the region surrounding Acapulco experienced a major flood event in relation to the intense rainfall produced by tropical cyclone Manuel (Pedrozo-Acuña, 2014 and 2015). Precipitation rapidly exceeded 100 mm in a single day and more than 500 mm in three days in the Papagayo basin. The region most affected by floods was around Laguna de Tres Palos (Fig. 13), where the risk to heavy rainfall has increased in recent decades, mostly in relation to the deforestation process in the Acapulco mountainous region.



Fig.13 Satellite image a) for a period prior to 15 September 2013, and b) a few days after the flood event of September of 15 September 2013 (source: Rapideye Image)

In recent decades (forty years), the number of floods in the state Guerrero have at least doubled. The municipalities most affected are Chilpancingo and Acapulco, where much of the population of the state of Guerrero lives.

4. Conclusions

The rapid transformation of the Mexican territory during the twentieth (past) century has led to significant vegetation losses (Mas *et al.*, 2004). The change in the frequency of heavy rainfall and a higher vulnerability of watersheds to intense rainfall have increased the risk of flooding in various parts of central southern Mexico. From a risk management perspective, reforestation and rehabilitation of ecosystem services at the basin level constitute adequate structural measures to prevent flooding activity and become adapted to climate change in the coming years. Heavy rainfall, represented by the P95 of daily precipitation, is more intense and frequent now than in previous decades, partially in relation to more tropical cyclones, as in the northeastern tropical Pacific.

On the other hand, the dynamics of vulnerability of watersheds to heavy rainfall is becoming higher due to continuous changes in land cover and, consequently, the risk of floods has risen. The number of floods (Last forty years) is higher in regions where physical vulnerability, related to the local orography and the presence of rivers, results in larger runoff. Therefore, more floods are largely the result of human activities, given the important land-cover transformations. The naturalistic focus, which tends to explain the occurrence of disasters only in terms of natural hazards such as intense rainfall, is not adequate to explain the increased frequency of hydro-meteorological disasters, at least for the case of Mexico.

There are other factors that increase the risk of flooding, which have not been examined here but that require special consideration. Sediments from deforested areas that are carried into riverbeds reduce streamflow capacity and results in more frequent floods in river meanders. These factors should be considered as part of a comprehensive flood risk analysis in order to reduce the negative impacts of floods on a more exposed society. The quantification of risk and the identification of critical or intolerable risk levels can guide some of the risk management options to reduce the occurrence and costs of floods. Structural vulnerability reduction measures would result in benefits for several region and communities, not only by reducing the number of natural disasters, but also by achieving sustainable development goals. To this end, however, authorities and society should:

- i) leave behind the naturalistic focus to explain disasters:
- ii) use a risk analysis methodology to understand the dynamics of disasters; and
- iii) promote prevention by means of structural measures after identifying the vulnerability factors.

The present study describes a methodology to quantify vulnerability and construct a risk model that spatially and temporally explains floods in recent decades. It may take some time to reduce vulnerability

effectively by means of robust structural measures, but in the mean time, early-warning systems referred to critical risk levels could be useful to reduce the impacts of floods on society.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was partially funded by CONACYT through a doctoral fellowship awarded to Emmanuel Zúñiga and a CONACYT-INEGI Grant 209932. The financial support from the PAPIIT-IN106815 and PAPIIT-112717 Projects is also appreciated, for the development of precipitation data fields used in the hazard characterization.

We thank Luis Galván, Ernesto Caetano and Christian Domínguez, for various scientific discussions on the meaning of a flood risk model for Mexico. The technical support of Gustavo Vázquez and Tania Pérez is also appreciated.

5. BIBLIOGRAPHY

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin, and E. Nelkin. (2003), “The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)”, *Journal Hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167.
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M.,...& Valle, V. E. (2005), “Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23).
- Alcantara, I (2004), “Hazard assessment of rainfall - induced landsliding in Mexico”, *Geomorphology*, 61, 19-40.

- Álvarez Gordillo, G. D. C., & Tuñón Pablos, E. (2016), “Vulnerabilidad social de la población desplazada ambiental por las inundaciones de 2007 en Tabasco (México), “*Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 25(1), 123-138.
- Aparicio F (2008). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, Mexico, 304 pp.
- Aparicio, J., Martínez-Austria, P. F., Güitrón, A., & Ramírez, A. I. (2009), “Floods in Tabasco, Mexico: a diagnosis and proposal for courses of action”, *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 132-138.
- Askar, M. K. (2013), “Rainfall-runoff model using the SCS-CN method and geographic information systems: a case study of Gomal River watershed”, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 178, 159-170.
- Balica, S., Dinh, Q., & Popescu, I. (2015), “Vulnerability and Exposure in Developed and Developing Countries: Large-Scale Assessments”, *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*, 125-162.
- Bullock, C. C. (1993), “Ways of knowing: the naturalistic and positivistic perspectives on research”, *Research in therapeutic recreation: concepts and methods*. 25-42.
- Campos, D (1987). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mexico.
- Cannon, T. (1994), “Vulnerability analysis and the explanation of ‘natural’ disasters”, *Disasters, development and environment*, 13-30.
- CENAPRED (2014). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana 1998 - 2013*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, No. 1 a 15, Secretaria de Gobernación.
- Clark, J. J., & Wilcock, P. R. (2000), “Effects of land-use change on channel morphology in northeastern Puerto Rico”, *Geological Society of America Bulletin*, 112(12), 1763-1777.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2010). Uso de Suelo y Vegetación. MAYO 20, 2015, consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Atlas del agua en México 2015. Junio 15, 2015, consultado en

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2000). Principales cuencas de México. Mayo 20, 2015, Consultado en <http://siga.cna.gob.mx/>.

Coutu, G.W. and C. Vega (2007), “Impacts of land use changes on runoff generation in the east branch of the brandy wine creek watershed using a gis-based hydrologic model”, *Middle States Geographer*, 40:142-149.

Cressman G. P. (1959), “An operational objective analysis system”, *Monthly Weather Review*, 87 (10), 367-374.

Daley, R. (1993). *Atmospheric data analysis* (No. 2). Cambridge university press.

DesInventar (2013). Sistema de Inventario de Desastres para México. Junio 15, 2015, Consultado en <https://online.desinventar.org/>.

Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008), *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 89 pp.

Fuchs, S., Birkmann, J., & Glade, T. (2012), “Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges”, *Natural Hazards*, 1-7.

Gain, A. K., Giupponi, C., & Renaud, F. G. (2012), “Climate change adaptation and vulnerability assessment of water resources systems in developing countries: a generalized framework and a feasibility study in Bangladesh”, *Water*, 4(2), 345-366.

- Gaspari F (2007), “Relación precipitación – escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo. Cuenca model del Sistema serrano de La Venta Argentina”, *Facultad de Agricultura y Ciencias Forestales*. Universidad Nacional de la Plata. Vol. XXXIX. No.1: 21-28.
- Hernandez, M., Miller, S. N., Goodrich, D. C., Goff, B. F., Kepner, W. G., Edmonds, C. M., & Jones, K. B. (2000), “Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds”, *Environmental monitoring and assessment*, 64(1), 285-298.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S. ... &Kanae, S. (2013), “Global flood risk under climate change”, *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2011). Uso del suelo y vegetación Series 1 a 5. Junio 15, 2015, Consultado en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>
- Instituto Nacianl de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2013). Modelo Digital de Elevaciones - Continuo de elevaciones mexicana 3.0. Junio 30, 2015, Consultado en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>
- Istomina, M. N., Kocharyan, A. G., &Lebedeva, I. P. (2005), “Floods: genesis, socioeconomic and environmental impacts”, *Water resources*, 32(4), 349-358.
- Jáuregui E. and E. Romales (1996), “Urban effects on convective precipitation in México City”, *Atmospheric Environmental*. 30, 3383–3389.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999), “The midsummer drought over Mexico and Central America”, *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588.
- Magaña, V., Pérez, J., & Méndez, M. (2003), “Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin”, *Geofísica Internacional - México*, 42(2), 247-260.

- Magaña, V., López, L. C., & Vázquez, G. (2013), “El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México”. *TIP*, 16(1), 18-25.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... & Pérez-Vega, A. (2004), “Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.
- Melesse, A. M., & Shih, S. F. (2002), “Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1), 173-183.
- Messner, F., & Meyer, V. (2006), “Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research”. *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, 149-167.
- Mishra, S. K., & Singh, V. (2013), *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. (Vol. 42). Springer Science & Business Media. 516 pp. DOI: 10.1007/978-94-017-0147-1
- Nayak, T. (2012), “SCS curve number method in Narmada basin”, *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 3(1).
- Neri, C., & Magaña, V. (2016), “Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico”, *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.
- Paz-Pellat, F. (2009). “Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS”. *Agrociencia*, 43(5), 521-528.
- Pedraza J (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial, Madrid, 414 pp.
- Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Domínguez-Mora, R. (2014), “The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico” *Weather*, 69(11), 295-302

- Pedrozo-Acuña, A., et al (2015), “Lecciones aprendidas de la inundación en Acapulco Diamante”, *H2O Gestión del Agua*, vol. 5, enero – marzo, pp. 34-38.
- Pérez Vega, A., & Ortiz Pérez, M. A. (2002), "Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz", *Investigaciones geográficas*, (48), 90-105.
- Plate, E. J. (2002), “Flood risk and flood management”, *Journal of Hydrology*, 267(1), 2-11.
- Ramírez, M., & Guadalupe, L. (1998). “Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero”. *Investigaciones geográficas*, (37), 7-19.
- Re, M. (2011). “Great Natural Catastrophes Worldwide 1950–2010”. *Münchener Rückversicherungsgesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE, Munich, Germany*.
- Romero Lankao, P. (2010), “Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?”, *Environment and Urbanization*, 22(1), 157-178.
- Saavedra, F. (2010), *Vulnerabilidad de la Población Frente a Inundaciones e Inestabilidad de Laderas*. En: SEMARNAT – INECC: Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización, Ciudad de México. 132-137.
- Schutt, R. K. (2010), A Sociological Perspective on Disasters. In *Rebuilding Sustainable Communities for Children and their Families after Disasters: A Global Survey* (Vol. 3, No. 11, pp. 3-11). Cambridge Scholars Publishing in association with GSE Research.
- Seingier, G., Espejel, I., & Almada, J. L. F. (2009), "Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana", *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).
- Singh, R. B., & Singh, S. (2011), “Rapid urbanization and induced flood risk in Noida, India”, *Asian Geographer*, 28(2), 147-169.

- Solín, L., Feranec, J., & Nováček, J. (2011), "Land cover changes in small catchments in Slovakia during 1990–2006 and their effects on frequency of flood events", *Natural hazards*, 56(1), 195-214.
- Svoboda A (1991), "Changes in flood regime by use of the modified curve number method", *Journal of Hydrological Sciences*, 36(5), 461-470.
- Tejeda-Martínez, A., & Welsh-Rodríguez, C. (2006), *Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana, México.
- Trenberth, K. E. (2011). "Changes in precipitation with climate change". *Climate Research*, 47(1-2), 123-138.
- United Nations Disasters Relief Coordinator (UNDRO) (1991), *Disasters and development: Trainer's guide for the UNDP/UNDRO Disasters Management Training Program*. R.S. Stephensonm ed. Madison, Wisc.: University of Wisconsin, Disasters Management Center.
- USDA (1979), *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. SCS-TP-149. Washington, U. S. Govt. Print.
- USDA – NRCS (1986), *Urban Hydrology for Small Watershed*, U. S. Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, Engineering Division. Technical Release 55, 210-VI-TR-55, cap. 2, 2da edición, 1-6.
- _____ (2004), *Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall*. Natural Resources Conservation Service. United State Department of Agriculture. (210-VI-NEH, Jul 2004).
- Viglione A, Rogger M. (2015), "Flood processes and hazards". In: Paron P, Di Baldassarre G, Shroder JF Jr, eds. *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier; 2015.
- Walling, D. E. (1999), "Linking land use, erosion and sediment yields in river basins", *Hydrobiologia* 410: 223-240. DOI: 10.1023/A:1003825813091

- Weiss, A. (2001), Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference (July), San Diego, CA (Vol. 200).
- Wood, M. K. and Blackburn, W. H. (1984), "An evaluation of the hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on Rangelands", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 20: 379–389. doi:10.1111/j.1752-1688.1984.tb04720.x
- Worldwide, I. R. (2012). "*Feeling the heat: The human cost of poor preparation for disasters*". Islamic Relief Worldwide.