



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Filosofía y Letras

Colegio de Geografía

**Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de inundaciones
en el estado de Chiapas, México: periodo 1970 y 2016.**

Tesis

**Para obtener el título de
Licenciada en Geografía**

Presenta

Diana Estefania Guzmán Morales



Asesor

Dr. Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar

Ciudad Universitaria, CDMX, marzo, 2022



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.

Sínodo

Instituto de Geografía de la UNAM.

- Mtra. Oralia Oropeza Orozco (presidente).

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas UNICACH.

- Dr. Marcelino García Benítez (vocal).

Colegio de Geografía de la UNAM.

- Dr. Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar (secretario).
- Dra. Rocío Marisol Alanís Anaya (suplente 1).
- Mtra. María Asunción Avendaño García (suplente 2).

*Gracias por sus observaciones y recomendaciones.

Agradecimientos

A mis padres

Consuelo por cada minuto que me has alentado, por tu sencillez, ser una gran mujer y nunca darte por vencida.

Gilberto por impulsarme a llegar lejos.

A mis hermanas

Karla, Michelle y Fernanda por su individualidad de la cual aprendo todos los días, por su apoyo y amor.

A mi abuelo

Gilberto por inspirarme a seguir aprendiendo y ser un ejemplo como universitario.

A mis amigos

Ale, Adriana, Diana, Esteffany y Julio, por sus consejos, aventuras y acompañamiento.

A mi asesor

Dr. Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar por su paciencia infinita, confiar en mí y ayudarme a lograr esta meta.

A la Universidad

Por los buenos momentos que se crean en sus instalaciones desde la prepa, por las amistades

encontradas y por diversificar mi conocimiento académico, social y cultural.

A mis Sinodales

A la Mtra. Oralía Oropeza Orozco del Instituto de Geografía de la UNAM, al Dr. Marcelino García Benítez de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas UNICACH y a las Dras. Rocío Marisol Alanís Anaya y María Asunción Avendaño García del Colegio de Geografía de la UNAM por su tiempo, paciencia y aportación en la mejora de este trabajo.

A mi

Por lograrlo a pesar del tiempo y las inseguridades.

Dedicatorias

A mi familia que me apoya incondicionalmente.

A mis abuelitas y la fortuna de tenerlas.

A mis tíos Rocío y Leonardo que siempre me ofrecen su apoyo y un hogar.

A Leo, Oscar y Mau mis primos más hermanos.

A la amistad, que es la familia que se elige.

A mi abuelo que ya no pudo acompañarme en este momento.

Ánimo.

A mi mejor versión de mí.

"Nobody said it was easy"

Coldplay

Con este trabajo se cierra un ciclo importante, el cual no hubiera podido disfrutar de la misma manera en otro momento. El destino quiso que las cosas se acomodaran como se encuentran hoy, con las personas que me rodean y han aportado a mi aprendizaje personal y académico.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Justificación.....	3
Planteamiento del problema.....	4
Objetivos.....	5
Capítulo 1 Marco contextual del área de estudio y principales conceptos.....	6
1.1.- Área de estudio.....	6
1.2.- Inundaciones en Chiapas.....	11
1.3.- Tipología de las Inundaciones.....	14
1.4.- Peligro por lluvias intensas.....	17
1.5.- Vulnerabilidad ambiental.....	19
1.6.- Riesgo de inundaciones.....	20
1.7.- Desastres por inundaciones.....	21
Capítulo 2 Datos y Metodología.....	23
2.1.- Análisis de registros de inundaciones.....	23
2.2.- Cálculo del peligro por lluvias intensas.....	25
2.2.1.- Escenarios de peligro por lluvias intensas.....	28
2.2.2.- Validación del modelo de inundaciones.....	29
2.3.- Datos para caracterizar el índice de vulnerabilidad ambiental.....	29
2.3.1.- Cálculo del método de número de Curva (NC).....	32
2.4.- Cálculo del índice de riesgo de inundaciones.....	40
Capítulo 3 Resultados y Discusión.....	43
3.1.- Análisis de las inundaciones en el estado de Chiapas.....	43
3.2.- Análisis del cambio de uso de suelo.....	50
3.3.- Análisis del peligro por lluvias intensas.....	57
3.4.- Índice de vulnerabilidad.....	61

3.5.- Escenarios de riesgo de inundaciones: Periodo 1970- 2015.....	72
3.6.- Evaluación del índice de riesgo (caso de estudio)	83
Conclusiones.....	85
Referencias.....	89

Índice de Figuras

Figura 1. Localización.....	7
Figura 2. Frecuencia del número de registros de inundaciones urbanas.....	13
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de mapeo de inundaciones históricas para los municipios del estado de Chiapas. Periodo 1970 – 2016.....	25
Figura 4. Distribución espacial de estaciones climatológicas del estado de Chiapas.....	27
Figura 5. Modelo del proceso de lluvia-escorrentía idealizado.....	36
Figura 6. Distribución de valores dependiente del terreno (grados).....	38
Figura 7. Diagrama de flujo utilizado para procesar e integrar información de indicadores dinámicos y estáticos para obtener un mapa de índice de vulnerabilidad para el estado de Chiapas de los períodos 1970 y 2016.....	39
Figura 8. Frecuencia de los desastres por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970- 2013.....	44
Figura 9. Anomalía de la frecuencia de desastres por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970- 2013.....	45
Figura 10. Número de registros de inundación para el estado de Chiapas. Periodo: 1970-2016.....	48

Figura 11. Distribución temporal de las inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970- 2016.....	49
Figura 12. Distribución temporal de las anomalías de los registros de inundación en el estado de Chiapas. Periodo 1970- 2016.....	50
Figura 13. Distribución espacial de coberturas de suelo del estado de Chiapas, correspondiente a los períodos 1970 y 2016.	53
Figura 14. Distribución de la superficie (km ²) de las diferentes coberturas de suelo para el estado de Chiapas, y el factor de cambio que fue obtenido de comparar los periodos de análisis (1970-2016).	54
Figura 15. Factor de cambio. Distribución espacial de valores de cambio de coberturas naturales vs no-naturales. Periodo 1970-2016.	56
Figura 16. Número de eventos de inundación registrados para 31 municipios del estado de Chiapas, durante el periodo 1970 - 2016.....	60
Figura 17. Distribución espacial de valores de número de curva (adimensionales) establecidos para el estado de Chiapas. Periodo 1970 (a) y 2016 (b).....	66
Figura 18. Niveles de Vulnerabilidad ambiental para el estado de Chiapas. Periodo 1970 (a) y 2016 (b).....	68
Figura 19. Respuesta hidrológica de las coberturas de suelo del estado de Chiapas, a partir de su grupo hidrológico (GH) y número de curva (NC) para diferentes intensidades de lluvia (PCP en mm).....	72
Figura 20. Distribución de valores de riesgo de inundación. Intensidades de lluvia	

a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Período 1970.....78

Figura 21. Distribución de valores de riesgo de inundación. Intensidades de lluvia
a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Periodo 2016.....82

Figura 22. Distribución de valores de lluvia acumulados (mm), asociados con la
Tormenta Tropical Gamma ocurrida durante el 1-4 de octubre de 2020 (a). Niveles
de riesgo de inundación.....83

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de valores de índice de vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones.....	41
Tabla 2. Principales municipios afectados por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970- 2015.....	46
Tabla 3. Municipios con mayor número de registros de inundación del estado de Chiapas. Clave de las estaciones climatológicas analizadas y valores de percentil 99 (P99), utilizados para caracterizar el peligro por lluvias intensas.....	58
Tabla 4. Valores de número de curva asignados a las diferentes coberturas de suelo por grupo hidrológico.....	62
Tabla 5. Superficie de las coberturas del suelo en el estado de Chiapas entre 1970 - 2016, de acuerdo con el tipo de cobertura y grupo hidrológico.....	63
Tabla 6. Factor de cambio (km ²) en los niveles de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas entre el periodo 1970 – 2015, para diferentes intensidades de lluvia.....	82

Resumen

La vulnerabilidad y riesgo de inundación producen efectos negativos en la población y economía de diversas regiones del mundo. En general, el riesgo de inundaciones se vincula comúnmente con la frecuencia de lluvias intensas, sin embargo, en los últimos años se ha documentado que el contexto de vulnerabilidad de las regiones contribuye con un mayor nivel de riesgo. En México, el impacto por inundaciones agrupa más del 50% del total de desastres registrados en 50 años (1970-2020), siendo las zonas costeras del país donde se centraliza la mayor distribución espacial y temporal de las inundaciones.

En esta investigación, se analiza la dinámica del cambio de cobertura de suelo en las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas, para determinar un índice de vulnerabilidad ambiental y de riesgo ante inundaciones para los períodos 1970 y 2016. El método desarrollado, permite evaluar la sensibilidad de las cuencas hidrológicas para generar escurrimientos ante lluvias intensas, utilizando el método de número de curva (NC).

La información combinada de peligro por lluvias intensas y del índice de vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, resulta en valores de riesgo de inundaciones que son utilizados para comparar y evaluar cambios en los niveles del periodo analizado. Con registros históricos de inundaciones mapeados, se compara la distribución de valores de riesgo obtenidos para el estado de Chiapas. También se reproduce un evento de inundación para establecer la eficiencia del modelo de riesgo. Los resultados mostrados, son favorables en la detección de zonas potenciales de inundación en relación con la pérdida de cobertura natural de suelo de las cuencas hidrológicas.

Abstract

Vulnerability and flood risk produce negative effects on population and economy on various regions of the world. In general, flood risk is commonly associated with frequency of intense rain, however, in recent years it has been documented that vulnerability regions context contributes to higher risk level. In Mexico, flood impact concentrates more than 50% out of the total of disasters registered in 50 years (1970-2020), being the country's coastal zones where the greatest spatial and temporal flood distribution is concentrated.

In this research the cover land dynamic change is analyzed in hydrological basins of Chiapas State, to determine an index of environmental vulnerability and flood risk for 1970 and 2016 periods. The developed method allows evaluating the hydrological basins sensibility to generate runoff in heavy rains using the curve number method (CN).

The combined information danger due to intense rains and environmental vulnerability index of hydrological basins results in flood risk values that are used to compare and value changes in levels of the analyzed period. The distribution of risk values obtained from Chiapas State is compared with historical mapped flood records. A flood event is also reproduced to establish the efficiency of potential flooding areas in relation to the loss of natural soil cover of hydrological basins.

Justificación y uso de los resultados del estudio

El proceso de crecimiento de las ciudades y el desarrollo de actividades económicas ha mostrado efectos negativos en la dinámica natural de las cuencas hidrológicas en diferentes regiones de México (Zarco, Espinosa y Mazari, 2010). Este proceso, ha generado un aumento de las superficies impermeables y pérdida de regulación y control de escurrimientos asociados a eventos de lluvia intensa, que se han traducido en un mayor número de zonas potenciales de inundación en el Estado de Chiapas. Por tal motivo, este estudio evalúa la dinámica del riesgo a partir de cambios en la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, con el objetivo de determinar en qué medida la pérdida de infiltración de los suelos entre 1970 y 2016, ha representado un aumento en el nivel de riesgo en el estado de Chiapas.

El análisis dinámico de variables ambientales y climáticas significa un esfuerzo en la evaluación y cuantificación del proceso multifactorial del riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas. El desarrollo metodológico aplicado, representa una herramienta de análisis que puede ser empleada para generar diversos escenarios de inundaciones a partir de diferente magnitud de lluvia intensa, con el objetivo de identificar las cuencas hidrológicas o regiones con mayor potencial para generar escurrimientos superficiales.

El resultado del trabajo de investigación, es una aportación importante para apoyar la gestión del territorio y la reducción del riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas, a partir de la conservación de coberturas naturales del suelo en las cuencas hidrológicas, para la prevención y reducción de posibles impactos asociados con lluvias intensas.

Planteamiento del Problema de investigación

El proceso de transformación del paisaje relacionado el crecimiento de las ciudades y las actividades económicas, como la agricultura y ganadería constituyen un factor importante en la evaluación del riesgo de inundaciones urbanas, debido al aumento de la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas por la pérdida de infiltración de los suelos naturales (Gaspari, 2011). Por ello, evaluar y cuantificar en qué medida la degradación de las cuencas se traduce en un mayor riesgo de inundaciones, representa una herramienta importante para el diagnóstico actual y futuro de posibles impactos vinculados a inundaciones urbanas para diferentes regiones del estado de Chiapas.

Un elemento importante en la evaluación del riesgo de inundaciones corresponde al análisis de datos de lluvia, sin embargo, en muchos casos la información disponible presenta limitada resolución espacial y temporal, lo que dificulta su diagnóstico. Por lo que, establecer una unidad de magnitud que se pueda combinar con la frecuencia de inundaciones con valores de lluvia intensa, permite caracterizar el peligro para el estado de Chiapas.

En estudios de análisis de riesgo de inundaciones, el desarrollo de estudios “no dinámicos”, dificulta evaluar y cuantificar en qué medida el peligro y la vulnerabilidad contribuyen con un mayor nivel de riesgo. En este estudio, se analiza y compara el riesgo de inundaciones de los períodos 1970 y 2016, para cuantificar la dinámica del riesgo en relación con el proceso de degradación de las cuencas hidrológicas (vulnerabilidad ambiental) para diferentes umbrales de peligro por lluvias intensas.

En general muchos estudios sobre inundaciones en México utilizan como unidad de análisis límites político-administrativos para determinar niveles de riesgo, lo que dificulta gestionar y reducir posibles impactos por inundaciones urbanas, ya que las inundaciones están limitadas ambientalmente. De esta forma, la propuesta de utilizar cuencas hidrológicas en esta investigación permite obtener valores de riesgo local a partir de indicadores de vulnerabilidad ambiental y peligro, mejorando los resultados obtenidos con límites no-naturales.

Objetivo general

Analizar la tendencia actual del riesgo de inundaciones en el Estado de Chiapas, a partir del desarrollo de indicadores de peligro por lluvias intensas y vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrológicas, para los períodos 1970 y 2016.

a. Objetivos particulares

I. Evaluar y cuantificar la pérdida de cobertura de suelo de las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas, para determinar su efecto en el incremento de la vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones durante el periodo 1970 y 2016.

II. Establecer indicadores de peligro por lluvia intensa y vulnerabilidad ambiental, para determinar niveles de riesgo de inundación para el estado Chiapas.

CAPÍTULO 1 Marco contextual del área de estudio y principales conceptos.

1.1.- Área de estudio

El estado de Chiapas se localiza en la región sureste de México, entre las coordenadas 14° 39' y 17° 57' de latitud norte y 90° 22' y 94° 08' de longitud oeste (Figura 1). Geográficamente, el territorio chiapaneco colinda con el estado de Tabasco (norte); Veracruz y Oaxaca (oeste); Océano Pacífico (sur) y la República de Guatemala (este). Su orografía, muestra diferencias altitudinales importantes en gradiente, van del -23 a 4083 msnm. Los valores mayores de altura, se concentran en gran parte del territorio, mientras que las zonas de menor altitud se localizan en la zona costera y, el norte, donde limita con el estado de Tabasco. Es importante mencionar que, hidrológicamente, las diferencias de altura pueden asociarse con una mayor aportación de escurrimientos (Zúñiga y Magaña, 2018).

Considerando su extensión territorial, es el octavo estado con mayor superficie de México, lo que representa aproximadamente el 3.7% (73,311.0 km²) de la superficie total del país (INEGI, Anuario estadístico de Chiapas, 2020), políticamente se integra por 124 municipios. A nivel nacional, la densidad poblacional del estado se considera media (76 hab/km²) con un nivel económico bajo. Es decir, tres de cada cuatro personas (74.7% de la población), se encuentra en condición de pobreza, ya sea moderada (42.5%) o extrema (32.2%), colocando al estado como una de las regiones con los niveles más altos de rezago socioeconómico del país junto con el estado de Oaxaca. Esta condición de vulnerabilidad de la población en el estado de Chiapas registró su máxima expresión durante el año 2010, con más del 74% (87) de sus municipios con nivel de marginación “alto”, y únicamente dos municipios (Reforma y Tuxtla Gutiérrez) con valores “bajos” de marginación (INEGI, Censo de Población y Vivienda, 2020).

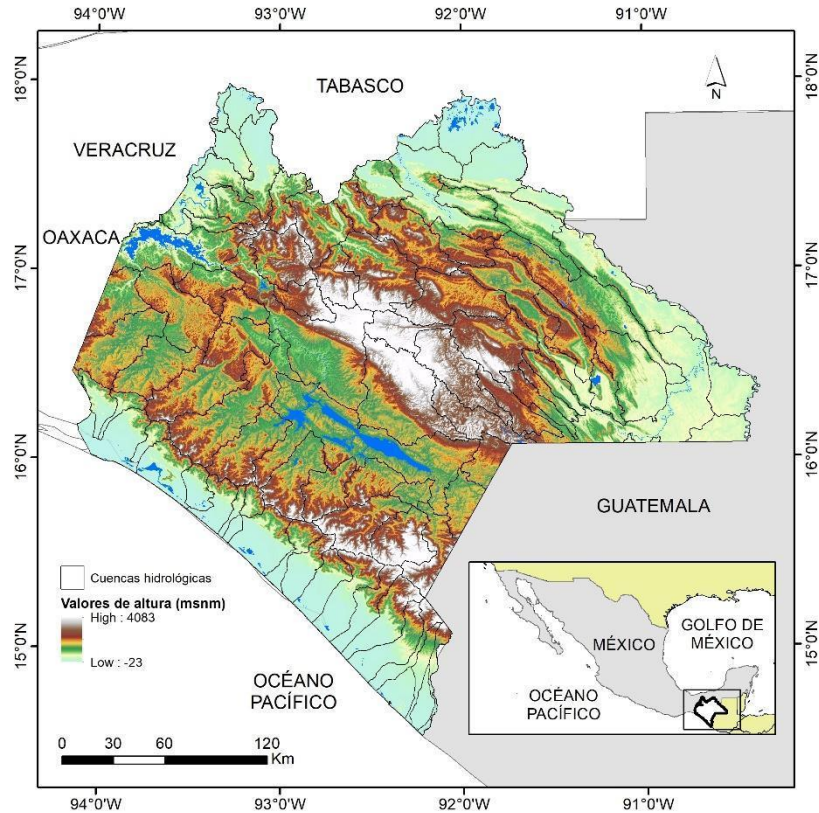


Figura 1 Localización.

En el estado, la actividad económica predominante está representada por el sector agrícola, el cual, ha destacado desde la década de los años 80. Esta actividad, ha favorecido el desarrollo económico de algunas regiones y el crecimiento de las ciudades, principalmente en las región costera y centro del estado, sin embargo, este modelo de desarrollo económico, ha mostrado efectos negativos en los ecosistemas terrestres (hidrológicos), debido al proceso de transformación y degradación en las cuencas hidrológicas, como resultado del cambio de cobertura y uso de suelo, lo que ha incrementado las superficies impermeables (Mendoza *et al.*, 2002). Otras acciones, que afectan la dinámica hidrológica natural de las cuencas, corresponden a la expansión urbana y la deforestación continua de los bosques y selvas

Las características orográficas del estado de Chiapas lo ubican como una región heterogénea, debido a la diversidad de rasgos morfológicos que lo integran. En este territorio es posible observar la existencia de tres grandes cordilleras paralelas entre

sí. La primera corresponde a la Sierra Madre, donde es posible distinguir dos zonas montañosas (la sierra Madre de Chiapas y las Montañas del Norte), las cuales son conocidas como las sierras: Independencia y de San Cristóbal. Por otro lado, ubicada al sur del estado, se localiza la meseta de San Cristóbal, donde se encuentra la Sierra Madre y una extensa depresión por donde fluye el río Grande de Chiapa o Grijalva. En la región sureste de la Sierra Madre, se encuentra la Sierra del Soconusco, donde se localiza su elevación más alta el volcán Tacaná con una altura de 3,780 m.s.n.m. Una segunda cadena montañosa, se distribuye de la región de Guatemala hasta la Sierra de Cuchumates, limitando con el estado de Tabasco.

Geomorfológicamente, el territorio chiapaneco está integrado por diversas provincias fisiográficas. En la región norte, se localiza la Llanura Costera del Golfo donde predominan los lomeríos con llanuras de reciente formación; al centro del estado la provincia Sierra de Chiapas y Guatemala, en las que se encuentran la Sierra del Norte, la Sierra Lacandona, las Sierras Bajas del Petén, los Altos de Chiapas y la Depresión Central que se caracteriza por una orografía compuesta por sierras con mesetas, cañadas, llanuras, valles y el Cañón del Sumidero por el cual fluye el río Grijalva. Finalmente, al sur del estado, se localiza la Cordillera Centroamericana, integrada por las Sierras del Sur, la Llanura Costera y las zonas: Frailesca, Sierra, Soconusco e Istmo-Costa. En esta región, el cerro Mozotal (3,050 m.s.n.m.) y el volcán Tacaná (3,780 m.s.n.m.), constituyen las mayores elevaciones del estado (SEMARNAT, 2012).

Debido a su ubicación geográfica, el estado de Chiapas recibe humedad proveniente del Océano Pacífico y Golfo de México, lo que contribuye con la extensa red hidrológica actual y el funcionamiento de las presas (La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas). La cantidad de lluvia proviene principalmente de los ciclones tropicales durante el verano, y de los Nortes en invierno (Golfo de México), que favorecen la dinámica hidrológica de las cuencas, aunque también contribuyen con el riesgo de inundaciones urbanas en diferentes regiones del estado.

Climáticamente, la precipitación se concentra principalmente entre los meses de mayo a octubre con valores que van 500 mm/año a 4,000 mm/año (SMN-

CONAGUA, 2009). Durante el mes de julio, la disminución de la tasa de lluvia representa la canícula para el estado. Como resultado de la combinación entre su localización geográfica y características orográficas, es posible identificar en el estado superficies dominadas por una variedad de climas: cálidos húmedos (39%), cálido subhúmedo (35%), semi-cálido húmedo (14%), semi-cálido subhúmedo (4%), templado húmedo (4%) y templado subhúmedo (4%) (Gobierno de Chiapas, 2018).

Debido a sus condiciones climáticas y orografía, el estado de Chiapas posee una amplia variabilidad de suelos, estos son principalmente el resultado de la dinámica entre factores ambientales como: tipo de roca, precipitación, temperatura, tipo de vegetación y procesos microbianos, que en conjunto permiten que, en Chiapas, existan 15 de las 25 categorías taxonómicas o unidades del suelo del sistema definidas por la FAO-UNESCO (1998) y Morales, (2019) para México. En términos generales, la superficie del estado está integrada por suelos de tipo: Litosol (19.89%), Rendzina (16.92%), Acrisol (15.86%), Luvisol (12%), Regosol (10.48%) y Cambisol (8.45%), y en menor medida (61.28%), es posible encontrar Feozem, Gleysol, Vertisol, Fluvisol, Solonchak, Andosol, Planosol y Nitosol. (CONABIO, 1997).

De acuerdo con datos de INEGI (2017) en el estado de Chiapas existen aproximadamente 18 tipos de vegetación y uso de suelo, entre las que se pueden encontrar: bosques de encino y pinos en la vertiente interior de la Sierra Madre de Chiapas, en los municipios de Cintalapa, Chicomuselo y Siltepec, así como en los municipios que integran la selva Lacandona (Las Margaritas, Altamirano, Ocosingo, Palenque, Maravillas, Tenejapa, Marqués de Comillas y Zamora Pico de Oro). Esta cobertura de bosque se localiza entre 1,300 a 2,500 m.s.n.m. Otra variedad representativa del estado es el bosque mesófilo identificado principalmente en pendientes pronunciadas de la vertiente norte del macizo central y de la Sierra Madre. También es posible encontrar esta vegetación natural en la costa del Pacífico, en la Sierra Madre de Chiapas y en los municipios de la región de los Altos (Aldama, Amatenango del Valle, Chalchihuitán, Chamula, Chanal, Chenalhó,

Huixtán, San Andrés Larráinzar, Mitontic, Oxchuc, Pantelhó, San Cristóbal de las Casas, San Juan Cancuc, Santiago el Pinar, Tenejapa, Teopisca y Zinacantán).

Otro tipo de vegetación es el chaparral, el cual se distribuye en los municipios de Las Margaritas y Comitán (al sureste) (INEGI, 2009), Por otro lado, en el sistema lagunar Mar Muerto de Arteaga - Suchiate predomina la cobertura de manglares y de palmar en los municipios Tzimol (al centro) y Benemérito de Las Américas (al este).

Finalmente, las selvas altas y medianas perennifolias se concentran en la región centro y noreste de la selva Lacandona (Las Margaritas, Altamirano, Ocosingo, Palenque, Maravillas, Tenejapa, Marqués de Comillas y Zamora Pico de Oro), en la vertiente del Pacífico (región del Soconusco) y de la Sierra Madre de Chiapas en los municipios Cintalapa, Ocozocoautla, Berriozabal, San Fernando, Huituipan, Simojovel, Francisco León, Selva Lacandona y en la vertiente costera del estado (Morales, 2019).

Hidrológicamente, el estado de Chiapas está integrado por 81 cuencas, que forman parte de la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, en la cual también se encuentran los territorios de Tabasco, Oaxaca y Campeche. En menor medida, el territorio chiapaneco también pertenece a la región Costa de Chiapas y a la región Coatzacoalcos (INEGI, 1998).

El río Grijalva, constituye el sistema hidrológico más importante del país junto con el río Usumacinta, debido a su longitud (más de 500 km), desembocando hacia el Golfo de México en el estado de Tabasco, con un volumen promedio de 2,700 m³/s que corresponde al 30% del total nacional (INECC, 2007), mientras que el río Usumacinta con más de 1,000 km recorre las regiones de Guatemala, Chiapas y Tabasco hasta su desembocadura, con un volumen promedio de 5,000 m³/s. Por todo lo anterior, el estado de Chiapas y Tabasco, se consideran las regiones con mayor densidad de cuerpos de agua de México.

1.2.- Inundaciones en el estado de Chiapas

Las inundaciones constituyen el fenómeno hidrológico de mayor impacto en la sociedad, prueba de ello es que representan el 50% de los desastres a nivel mundial (EM-DAT, 2009). Los desastres asociados a inundaciones frecuentemente se producen en extensas zonas de planicie, donde suelen existir importantes asentamientos humanos, y una intensa actividad económica (industrial, agropecuaria, de servicios, etc.). Por tanto, al producirse un hecho de esta naturaleza, las pérdidas humanas, socioeconómicas e incluso ambientales resultan ser muy elevadas. Ejemplo de ello, fue en 2008, los fenómenos hidrológicos afectaron en el mundo a 44.9 millones de personas, con daños económicos valorados en 1,905 mil millones de dólares (Rodríguez *et al.*, 2009).

Debido a su ubicación geográfica, características orográficas, cercanía a la zona intertropical de convergencia (ZIC), y estar dentro del campo de influencia y trayectoria de los ciclones tropicales, México es susceptible a la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos en el Golfo de México y el Océano Pacífico, se estima que el 86.8% de los desastres ocasionados por inundaciones (2000 a 2018) (INECC, 2018) ocurren en 162,000km² del territorio nacional, es decir el 8.24% de la superficie total del país (CICM, 2018).

Los patrones de lluvia en México, muestran una estrecha relación con las regiones donde la frecuencia y magnitud de las inundaciones es mayor (CENAPRED, 2020; DesInventar, 2020; SMN-CONAGUA, 2010). Esta situación, ha mostrado mayor dinámica en las regiones costeras del Golfo de México y Océano Pacífico, debido a los fenómenos atmosféricos que ocurren en verano (ciclones tropicales) y en invierno (Nortes) (Zúñiga *et al.*, 2020). En el estado de Chiapas, las inundaciones como resultado de eventos de lluvia intensas, se concentran mayormente en los municipios de Mapastepec, Acapetahua, Villa Comaltitlán y Mazatán al sur, mientras que al norte se presentan en el municipio de Catazajá, y en zonas marginales del río Lacantún ubicado en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, cerca de los municipios de Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas, y algunas zonas de Cumbrales del Volcán Tacaná.

En estas regiones, las inundaciones son resultado principalmente del desbordamiento de ríos, debido a la pérdida de capacidad hidráulica de los cauces para controlar y conducir los escurrimientos que son generados por eventos de lluvia intensa de largo periodo que ocurren en las partes altas de las cuencas hidrológicas, durante la temporada de ciclones tropicales, inundando zonas urbanas donde las fallas en el sistema de drenaje y alcantarillado son la principal causa (CONABIO, 2013).

Entre 1980 y 1999, se registraron alrededor de 60 huracanes resultando en desastres de tipo hidrometeorológico (inundaciones), afectando diversos estados en México, entre ellos Chiapas (FONDEN, 2000).

La ocurrencia de huracanes, tormentas tropicales, depresiones tropicales, la temporada de lluvias (verano e invierno) y las lluvias extremas, colocan al estado entre los primeros cinco lugares (después de Tabasco) con mayor frecuencia de inundaciones en el país, en un periodo de 43 años (1970-2013), con un registro de más de 500 eventos de inundaciones urbanas (incluye encharcamientos) con impacto directo en la población y pérdidas económicas superiores a 10 mil millones de pesos (DesInventar 2020, CENAPRED, 2020 y FONDEN 2020).

Con base en los registros de inundación (DesInventar, 2020), cada año ocurren eventos de inundación de “baja” a “muy alta” magnitud en el estado de Chiapas. Sin embargo, en los últimos 18 años (1995 – 2013) la frecuencia de eventos de inundación se ha incrementado sustantivamente, pasando de un promedio de 10 a 40, lo que puede observarse en la siguiente Figura (2), donde también es posible realizar la comparación con la tendencia nacional, la cual, presenta el mismo patrón de crecimiento en la ocurrencia de inundaciones urbanas, principalmente en los últimos años.

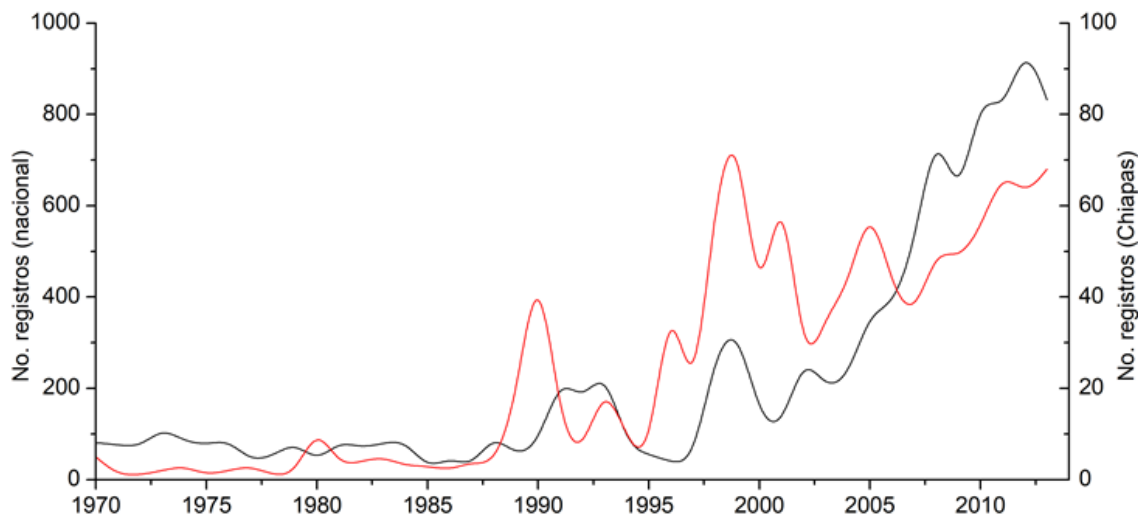


Figura 2. Frecuencia del número de registros de inundaciones urbanas Nacional (línea negra) y Chiapas (línea roja). Periodo: 1970-2016. Fuente: DesInventar 2020.

En cuanto a la distribución espacial, es posible observar que existen regiones del estado de Chiapas, en donde se concentran mayormente los desastres relacionados a inundaciones urbanas. En las regiones donde la frecuencia de inundaciones es mayor corresponde a las noreste, centro y sur (costa). En esta región del territorio nacional, las inundaciones urbanas están principalmente vinculadas con la dinámica de los ciclones tropicales que afectan la franja costera hasta la parte central del estado, mientras que hacia el norte del estado la presencia de humedad proveniente del Golfo de México, favorecen las lluvias intensas.

También es importante mencionar, que las lluvias intensas en Guatemala, generan escurrimientos importantes que son conducidos por el estado de Chiapas hacia el estado de Tabasco, a través de los ríos Usumacinta y Grijalva que recorren el territorio chiapaneco en su parte este-norte y centro-norte, respectivamente. Durante su trayectoria, los ríos reciben aportaciones de diferentes territorios, lo que incrementa la posibilidad de desbordamiento e inundaciones en las regiones por donde fluyen. Por otro lado, la frecuencia de registros de inundación, permite establecer la existencia de tres grandes regiones (noreste, centro y sur) con mayor nivel de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones en el estado de Chiapas.

1.3 Tipología de las inundaciones

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología la inundación se define como: “el aumento del agua por encima del nivel normal del cauce”. Avenida es definida como: “Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad” (OMM/UNESCO, 1974).

Es importante tomar en cuenta el tipo de inundación y su génesis, de acuerdo a este último se puede clasificar en tres tipos (Zúñiga et al., 2009; León, 1996)

1. Inundaciones lentas o de tipo Fluvial resultado de las crecidas en los cauces de los ríos.
2. Inundaciones súbitas o torrenciales generadas por precipitaciones extraordinarias.
3. Encharcamientos o pequeñas inundaciones caracterizadas por su corta permanencia.

Considerando el tipo de mecanismo a partir del cual se presenta una inundación, se pueden distinguir tres formas:

- Inundaciones fluviales.

Se define así a las inundaciones que provienen del desbordamiento de ríos a los terrenos adyacentes, esta acumulación de agua corresponde a precipitaciones en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. Es importante observar que el volumen de escurrimiento sobre el terreno a través de los cauces se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud) o que lleguen hasta las planicies costeras. (CENAPRED, 2004)

- Inundaciones costeras

Se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea de tormenta y permite que éste penetre tierra adentro en las zonas costeras, generando la

cobertura de grandes extensiones de terreno. La marea de tormenta es generada por los vientos de los ciclones tropicales sobre la superficie del mar y por la disminución de la presión atmosférica en el centro de estos meteoros. Por su parte, el oleaje en el océano puede ser provocado por diferentes factores; sin embargo, su causa más común es el viento. La suma de los efectos de ambos fenómenos puede causar importantes estragos (Jiménez, 2003)

- Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica

Existe una causa que puede generar una inundación, aún más grave que las antes mencionadas: es la asociada con falla en la infraestructura hidráulica de las presas, ya que, si su capacidad es sobrepasada, puede generar inundaciones de gran magnitud.

Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de la cuenca

De acuerdo con las características fisiográficas del terreno, será la respuesta hidrológica de la cuenca. Se puede resumir que estas se presentan en dos formas: inundaciones lentas e inundaciones rápidas. Lo anterior significa que en cuencas cuya respuesta hidrológica es lenta, se generan avenidas en un tiempo relativamente largo (del orden de varias horas o días); en ellas ocurren principalmente daños materiales. Mientras que en eventos de inundación de tipo flash flood (que van de unos cuantos minutos, hasta un par de horas o más), se conocen como inundación súbita. Estas están mayormente asociadas con la pérdida de vidas humanas (CENAPRED 2004; Cruz, 2019).

- Inundaciones lentas

Estas ocurren como resultado de la saturación del suelo, generando mayor número de escurrimientos hacia los cauces de los ríos, los cuales, son excedidos en su capacidad de controlar y conducir los escurrimientos, presentándose un desbordamiento en zonas críticas, y con ello, un desbordamiento que puede permanecer horas o días. Este efecto se presenta comúnmente en zonas donde la pendiente del cauce es menor, lo que disminuye considerablemente su capacidad hidráulica, inundando zonas cercanas a sus márgenes. Esta condición, mantiene

una evidente relación con la frecuencia y magnitud de las inundaciones en México. Aunque, este tipo de inundaciones son comunes y peligrosas, la falta de instrumentos de monitoreo continuo no permite anticiparse ante este fenómeno para reducir su impacto en la población (Protección Civil, 2019).

- **Inundaciones súbitas**

Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas, particularmente en regiones donde el impacto de los ciclones tropicales es mayor. El efecto en la hidrológica de las cuencas, favorece el aumento rápido de mayor número de corrientes superficiales que se concentran en zonas bajas de las cuencas, colocando en un mayor riesgo a las poblaciones cercanas a los ríos, y en las ciudades, debido a la falta de áreas de infiltración. Bajo este contexto, donde antes una tormenta humedecía la tierra, ahora bastan unos cuantos minutos para generar una avenida que todo lo que encuentra a su paso, generando inundaciones por desbordamiento de ríos o inundaciones urbanas por fallas hidráulicas del sistema de drenaje. (CENAPRED, 2019).

Inundaciones urbanas

Una inundación urbana, está representada por la materialización de un riesgo que combina umbrales de lluvia intensa que se consideran un peligro con un contexto de vulnerabilidad multifactorial, que en conjunto generan un impacto en la sociedad y economía de una región (Zúñiga, 2018).

En México, las inundaciones urbanas, representan la principal causa de impactos en la población y economía de diversas regiones del país (CENAPRED, 1989 – 2019). De acuerdo con su frecuencia y magnitud, las inundaciones urbanas, constituyen más de 50% del total de desastres registrados en México, durante 45 años (1970–2016) (CENAPRED, 2019; FONDEN, 2019; DesInventar v6, 2020). Para el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la vulnerabilidad y riesgo en México, indican que alrededor del 41% del territorio nacional y 31 millones de personas están expuestas a fenómenos de tipo hidrometeorológico (Cervantes-

Jaimes, *et al.*, 2012 en Hernández-Uribe, 2017), tal como las lluvias intensas asociadas a ciclones tropicales.

En general, las zonas costeras de México, registran la mayor frecuencia de eventos de inundaciones urbanas, debido a la presencia de ciclones tropicales en verano y los llamados “Nortes” durante el invierno (Zúñiga, 2017). De acuerdo con datos de (DesInventar (v6), 2020, CENAPRED, 2019 y FONDEN, 2019), el estado de Chiapas, localizado al sur del país en costas del Océano Pacífico, se considera uno de los territorios con mayor número de inundaciones registradas en 46 años (1970 – 2016).

1.4 Peligro por lluvias intensas

La lluvia es un fenómeno atmosférico, en el cual existe una precipitación (caída) de agua líquida en forma de gotas con diferente velocidad y tiempo. Aunque es posible encontrar diversos significados para lluvia, en México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la define como: Precipitación de gotas de agua líquida de diámetro mayor de 0.5 mm, o más pequeñas, pero muy dispersas (<https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>). Existen autores (Protección Civil España, 2020) que la definen a partir de su intensidad y origen.

La lluvia depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y la humedad atmosférica.

De acuerdo con Protección Civil de España (2020)

Se clasifican por su intensidad en:

- Fuertes (entre 15 y 30 mm/hora)
- Muy fuertes (entre 30 y 60 mm/hora)
- Torrenciales (por encima de 60 mm/hora).

Según su origen (Protección Civil España, 2020) las precipitaciones se pueden clasificar en tres tipos:

- Convectivas, asociadas a latitudes cálidas y a las tormentas de verano de la zona templada. Se producen por el fuerte calentamiento que experimenta la superficie de la tierra o, en general, cuando sobre una superficie caliente pasa aire húmedo e inestable.
- Frontales o Ciclónicas cuando entran en contacto dos masas de aire de características térmicas distintas, el mecanismo esencial es el ascenso de aire frío por convergencia horizontal de corrientes en una zona de bajas presiones. Se producen en latitudes templadas.
- Orográficas: Se producen cuando una masa de aire húmeda choca con un relieve montañoso y al chocar asciende por la ladera orientada al viento. Los sistemas montañosos pueden impulsar las corrientes ascendentes, frenar la velocidad de los sistemas frontales o producir en los valles un efecto "embudo" que origina una convergencia y elevación de corrientes ascendentes.

Las lluvias son un factor importante en el análisis del riesgo de inundaciones, debido a que son un detonador de escurrimientos superficiales. Por ello, las lluvias intensas se integran como un elemento dinámico del riesgo y se definen como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de origen natural que puede afectar con cierta magnitud un área o región vulnerable (Zúñiga, 2017). Con base en su dinámica espacial y temporal, diversas metodologías definen áreas de peligro y riesgo de inundación para diferentes escenarios de vulnerabilidad ambiental, donde la humedad del suelo juega un papel fundamental en la evaluación del riesgo de inundaciones.

De esta forma, el peligro está asociado con la probabilidad de ocurrencia de una inundación tomando en cuenta la magnitud de las lluvias intensas, y su efecto en un sistema vulnerable. Es importante establecer que el peligro por lluvias intensas no es sinónimo de amenaza, ya que son contextos diferentes. Mientras que una unidad de magnitud permite entender la dinámica "futura" del peligro, la amenaza está representada por la cuantificación del peligro, materializado en tiempo y espacio

(carácter determinista), el cual generó daños y pérdidas en una sociedad vulnerable (Lavell, 2004; Cardona 2003). El peligro como indicador del riesgo de inundaciones, permite establecer que una sola intensidad de lluvia, se expresa en diferente magnitud y riesgo en el espacio geográfico.

1.5 Vulnerabilidad ambiental

Por una parte, la vulnerabilidad es un concepto que se relaciona con la susceptibilidad o predisposición intrínseca de un sistema a sufrir un daño o una pérdida, asociada a la ocurrencia de un fenómeno de tipo natural. Por otra, en los últimos años, el término de vulnerabilidad ambiental se define como la susceptibilidad o predisposición intrínseca del medio y los recursos naturales a sufrir un daño o una pérdida, siendo estos elementos físicos o biológicos (Gaspari, Vagaría, Delgado, Sinisterra & Denegri, 2011); ha permitido entender en qué medida favorece el aumento en el nivel de riesgo de inundaciones en una región, integrando indicadores que anteriormente no se consideraban en este tipo de estudios, como: la pendiente del terreno, las características físicas de los suelos, el cambio de cobertura de suelo y la geometría de las cuencas hidrológicas como unidades de análisis (Gaspari, 2011; Romero, 2010; Zúñiga y Magaña, 2019). De esta forma, la comprensión de la vulnerabilidad ambiental para una determinada región implica comprender con precisión la susceptibilidad o resistencia de dicha área respecto a su problemática ambiental y cómo se manifiesta (Pérez, 2012).

La importancia que tiene el estudio de la vulnerabilidad ambiental, como una dimensión disponer de mecanismos para evaluarla y en consecuencia para dimensionar y mitigar su impacto, fortaleciendo vital para ser considerada en la proyección del desarrollo de una región, hace necesario con ello la capacidad de la región para diseñar estrategias adaptativas para minimizar con ello la menor pérdida económica, social y ambiental ante el impacto de un fenómeno de origen natural.

La vulnerabilidad es un elemento en la dinámica de riesgo ante eventos de precipitación intensa, que se puede describir en diferentes términos, como los sociales, económicos y físicos. Por ejemplo, el proceso de deforestación, es

resultado de factores físicos y sociales que conducen al deterioro de las cuencas hidrográficas, y con ello, a una mayor vulnerabilidad ambiental y riesgo ante lluvias intensas (Zúñiga; Magaña, 2017).

A nivel nacional, esta condición de vulnerabilidad ambiental está presente en las cuencas hidrológicas en la región centro y sureste de México, se ha documentado como el principal factor que conduce a inundaciones urbanas con mayor frecuencia y magnitud (Henández-Urbe, 2017).

1.6 Riesgo de inundación

El riesgo es el resultado de un proceso multifactorial y dinámico expresado como la integración de las variables peligro y vulnerabilidad, en otras palabras, es la probabilidad de pérdida y daño directo o indirecto estimado para una región expuesta, con diversos niveles de vulnerabilidad que es afectada por la ocurrencia de un fenómeno natural con una determinada intensidad.

El nivel de riesgo de inundaciones en diversas regiones de México y del mundo, responde principalmente a dos factores, la frecuencia de mayor número de eventos de lluvia intensa y el contexto de vulnerabilidad ambiental en que pueden presentarse estas lluvias (Pérez, 2002).

Dentro del campo del riesgo de inundaciones en México, la evaluación y caracterización del peligro permite establecer umbrales de intensidad de lluvia intensa que puede asociarse con la frecuencia de desastres. En general, se analizan las lluvias de verano que son producidas por ondas del este, ciclones tropicales o sistemas convectivos de mesoescala, así como las lluvias de invierno resultado de los Nortes, que tienen mayor impacto en la región costera del Golfo de México (Magaña, 2004). Por otro lado, se analiza la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológica para generar escurrimientos. Esta condición hidrológica, permite determinar la capacidad de infiltración de los suelos para diferentes intensidades de lluvia, con el objetivo de identificar zonas con mayor sensibilidad ante eventos de lluvia intensa, contribuyendo con información útil para definir niveles de riesgo de inundaciones, por escurrimiento (Kateb, 2013).

En México, el mayor nivel de riesgo de inundaciones se concentra en los meses de junio a octubre, ya que durante esta temporada la ocurrencia de ciclones tropicales es mayor, y la capacidad de los suelos para infiltrar el agua de lluvia es limitada. En la región sureste de México, donde se localiza el estado de Chiapas, así como las regiones centro y la región costera del país, constituyen las zonas con mayor nivel de riesgo de inundaciones, ya que se combinan niveles altos de peligro y de vulnerabilidad ambiental.

1.7 Desastres por inundaciones

Las inundaciones como un desastre, pueden entenderse como la última etapa del riesgo. Es decir, cuando la condición de peligro y vulnerabilidad ambiental de forma combinada favorece una inundación. En México, este tipo de desastres, han mostrado una tendencia importante en los últimos 50 años (1970-2002) (CENAPRED, DesInventar y FONDEN). El aumento en la frecuencia de eventos de lluvia cada vez más intensa y el deterioro de las cuencas hidrológicas, son las principales causas de las inundaciones en diversas regiones de México, en particular en las zonas costeras, donde se concentra aproximadamente el 65% del total de los registros de inundaciones. Aunque, el peligro por lluvias intensas puede explicar gran parte de los desastres que han ocurrido, la pérdida de coberturas naturales permite entender el contexto en que se producen las inundaciones y su magnitud.

La pérdida de coberturas naturales de suelo a partir de la década de los 80 como resultado del modelo de desarrollo económico en México, permitió el aumento de coberturas menos permeables que favorecen el desarrollo agrícola y ganadero (McMahon, 2011), lo cual, trajo consigo impactos en la regulación de escurrimientos en las cuencas hidrológicas ante eventos de lluvia intensa o de menor intensidad (Zúñiga 2019). Por lo que, los estudios de riesgo de desastres están enfocados principalmente a determinar en qué medida el aumento de episodios de lluvia intensa considerada como un peligro o la vulnerabilidad ambiental de las cuencas, representan un mayor nivel de riesgo de inundaciones, de forma individual o combinada con el objetivo de identificar zonas con mayor riesgo de inundaciones,

para focalizar estrategias que busquen reducir posibles impactos por inundaciones, a partir de medidas de prevención y/o mitigación del riesgo de inundaciones.

En el estado de Chiapas, durante los meses de mayo a octubre cuando se presenta la temporada de ciclones tropicales, se incrementa el número de inundaciones urbanas, que están asociadas con episodios de lluvia intensa que afectan principalmente las regiones costeras, donde las cuencas hidrológicas presentan un mayor grado de pérdida de cobertura natural. En regiones del centro del estado y norte, el efecto de los ciclones es menor, sin embargo, también favorecen con un mayor número de escurrimientos que generan desbordamiento de ríos en las zonas urbanas.

El efecto de las lluvias asociadas a frentes fríos en la costa del Golfo de México y los escurrimientos provenientes de Guatemala, se suman a los generados en el territorio chiapaneco, y con ello, un mayor riesgo de desastres en el estado. A partir de los registros históricos de desastres en el estado (FONDEN, 2015 CENAPRED, 2015 y DesInventar, 2013), las inundaciones han aumentado significativamente, lo que permite establecer la existencia de zonas con mayor vulnerabilidad ante lluvias intensas.

CAPÍTULO 2 DATOS Y METODOLOGÍA

Uno de los principales retos cuando se analiza el proceso multifactorial y dinámico de los riesgos de desastres por inundaciones, es la búsqueda de información que permita representar de forma adecuada los componentes del riesgo, caracterizados como el peligro ante lluvias intensas (P) y la vulnerabilidad ambiental (V).

Por ello, este trabajo no sólo se enfoca en analizar de forma integral el efecto de las lluvias intensas y el cambio en la cobertura del suelo como factores que de forma individual y combinada contribuyen con un mayor nivel de riesgo para el estado de Chiapas, sino que también genera escenarios de riesgo y evalúa el resultado del modelo de riesgo propuesto aplicándolo en un caso de estudio, con la finalidad de contribuir con una herramienta para la toma de decisiones y la gestión del riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas.

A continuación, se detallan los datos y metodologías utilizadas para determinar niveles de peligro y vulnerabilidad ambiental, así como para la generación de escenarios de riesgo ante inundaciones.

2.1.- Análisis de registros de inundaciones

Con la finalidad de conocer la distribución espacial de los desastres asociados a inundaciones urbanas, se analizaron datos del Inventario de Desastres, obtenidos de la dirección electrónica <https://www.desinventar.org/software.html>. Esta plataforma contiene un inventario de registros históricos de desastres que pueden ser consultados de acuerdo con su origen (hidrometeorológicos, geodinámicos y antropogénicos).

Estos registros, cuentan con información para diferentes países de Latinoamérica y el Caribe, así como para algunos países de Europa, Asia y África. Para el caso de México, es posible encontrar registros con una temporalidad de por lo menos 40 años (1970 a 2015) y una resolución espacial que considera límites municipales, lo que permite un análisis espacial de mayor detalle.

Debido a la falta de información fue necesario recurrir al registro del CENAPRED para completar la información histórica del periodo en análisis (1970-2016) (http://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria?categoria=Series+especiales+%2F&subcategoria=Impacto+Socioecon%26oacute%3Bmico+de+los+desastres+en+M%26eacute%3Bxico&palabraClave=de+los+Desastres+en). Este rango de valores se ajusta adecuadamente con los objetivos del trabajo.

La selección de datos y su descarga, se realiza dentro del portal del DesInventar. Los datos se descargan en un formato de Excel, el cual permite su manejo y procesamiento con sistemas de información geográfica (SIG) (ArcGIS), debido a su compatibilidad.

Para asegurarse de la utilidad de la información, se realizó la revisión de los datos, con el objetivo de: *i*) eliminar información duplicada; *ii*) validar la información de los registros; *iii*) eliminar registros no útiles para la investigación y *iv*) validar datos para su manejo en el SIG. Para lograr el análisis espacial de la información sobre desastres por inundaciones, se utilizaron herramientas de geoprocésamiento en SIG para integrar datos tabulares con información vectorial de límites político-administrativos del estado de Chiapas. Los datos en formato *shape*, se obtuvieron del repositorio de datos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (Repositorio).

La información geoespacial generada, permite representar la distribución de desastres por inundaciones en el estado de Chiapas, para el periodo de análisis. Todo el procesamiento y análisis de la información descrita se muestra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 3).

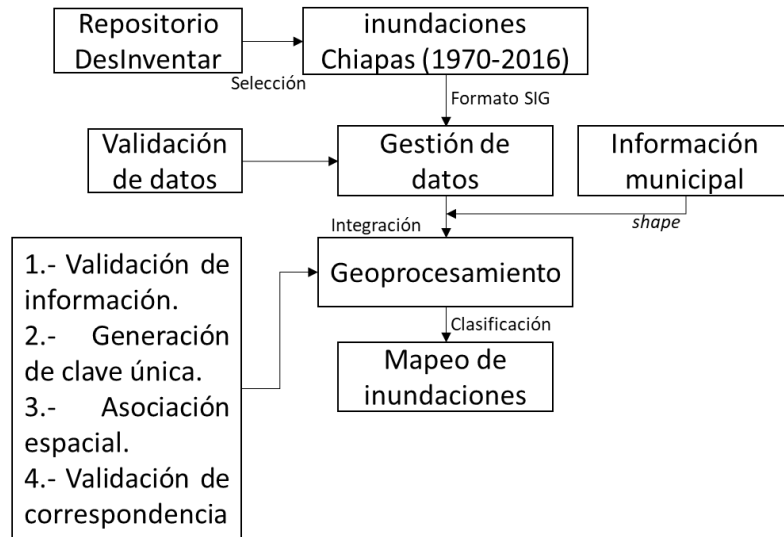


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de mapeo de inundaciones históricas para los municipios del estado de Chiapas. Periodo 1970 – 2016.

2.2.- Cálculo del peligro por lluvias intensas

Dentro de la ecuación del riesgo, el peligro está representado por una variable de tipo dinámica, a partir de la cual, se establecen valores de probabilidad de lluvia con cierta intensidad que se puede asociar con desastres originados por inundaciones.

El peligro por lluvias intensas, es una de las variables más difíciles de caracterizar, ya que generalmente su efecto en la generación de escurrimientos, no sólo depende del contexto de vulnerabilidad de las cuencas hidrológicas, sino que también de su intensidad, temporalidad y duración. Por lo que, establecer un único valor como umbral de lluvia intensa para evaluar el riesgo de inundaciones, debe estar acompañado por un análisis individual y combinado del peligro y vulnerabilidad ambiental, ya que, de otra forma, los valores generados pueden sobre-estimar o subestimar la condición actual del riesgo.

Para determinar umbrales de lluvia intensa que pudieran ser considerados un peligro para el estado, debido a su asociación con la frecuencia de desastres por inundaciones, se analizaron datos de lluvia diaria de las estaciones climatológicas que se encuentran bajo resguardo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los

datos utilizados, son de acceso libre en la siguiente dirección electrónica <https://smn.conagua.gob.mx/es/>. La información se puede obtener en formato de texto, lo cual, permite un adecuado manejo en cualquier software para análisis de datos.

En el estado de Chiapas se cuenta con 301 estaciones climatológicas, de las cuales 136 se encuentran fuera de operación. Para este estudio, se utilizó información de 31 estaciones que se consideraron representativas del estado (Figura 4). Para la selección de las estaciones, se establecieron criterios espaciales y de calidad de datos.

Para el primer criterio se consideró: *i)* la proximidad de la estación a la zona urbana con registro de inundaciones; *ii)* su proximidad a cuerpos de agua con reporte de desbordamiento y *iii)* su posición en las cuencas hidrológicas que integran el estado de Chiapas. Un segundo criterio consideró: *i)* que la temporalidad de los registros históricos se ajustará con la temporalidad del estudio; *ii)* errores por ausencia de datos que afectará la serie histórica; *iii)* datos duplicados, asociados a errores sistemáticos y *iv)* datos incongruentes debido a la sobreestimación de valores.

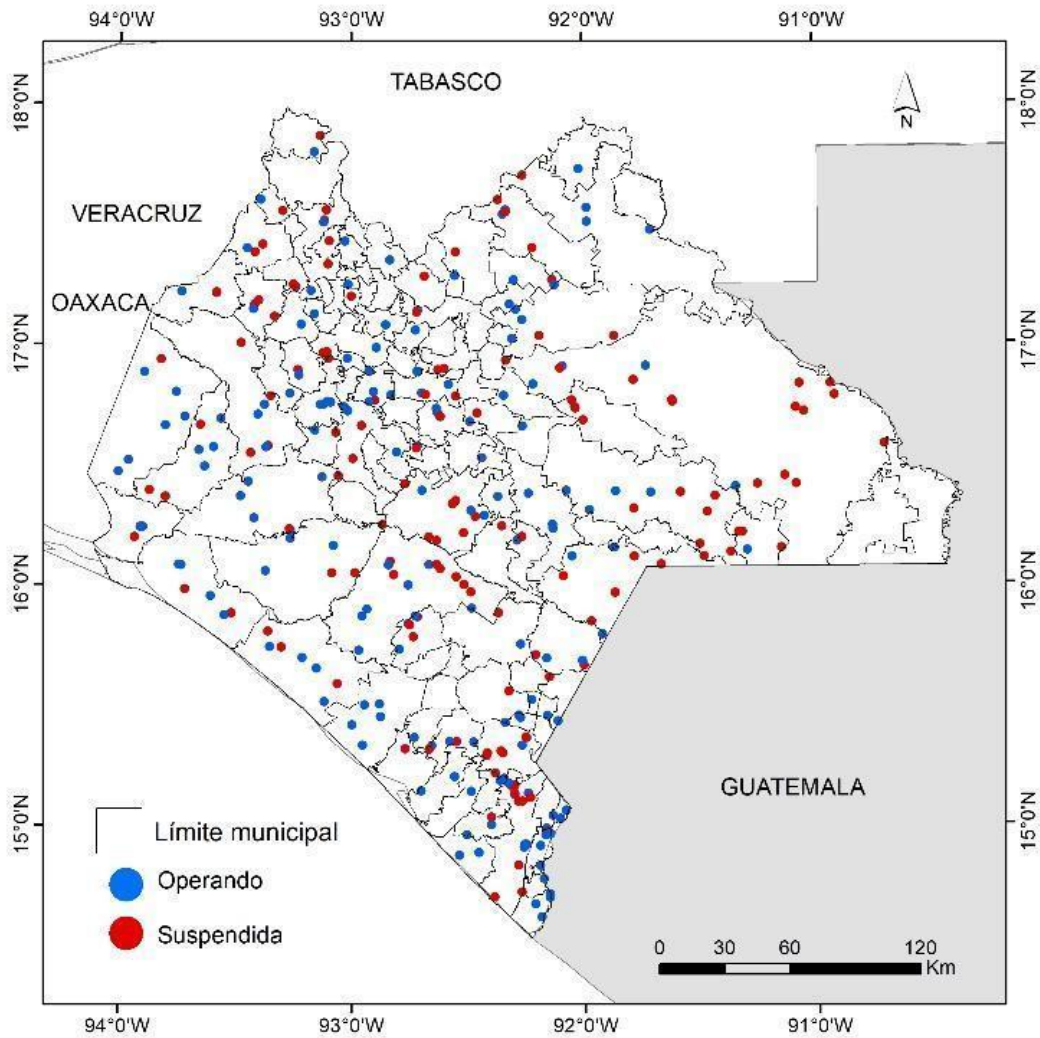


Figura 4. Distribución espacial de estaciones climatológicas del estado de Chiapas. Elaboración propia con datos de estaciones climatológicas (SMN).

Con el propósito de establecer una unidad de magnitud que permitiera representar la dinámica del peligro por lluvias intensas para el estado de Chiapas, se realizó un análisis comparativo de los datos de lluvia obtenidos de las estaciones climatológicas con la frecuencia de desastres por inundaciones del periodo analizado, con el fin de encontrar patrones de intensidad de lluvia, que permitieran establecer valores de peligro considerando eventos de lluvia aislados (una única tormenta) o bien, eventos acumulados de lluvia.

El resultado del análisis se utilizará para establecer los umbrales de lluvias intensas que históricamente han representado un mayor peligro y riesgo de inundaciones para el estado cuando se combina con la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas. Con la información generada se determinará una unidad estadística que pueda ser utilizada para representar los diferentes valores de intensidad de lluvia intensa y su distribución espacial.

2.2.1.- Escenarios de peligro por lluvia intensa

Al considerar la importancia de contar con diversos escenarios de riesgo de inundaciones que puedan apoyar en la toma de decisiones dentro de un contexto de gestión del riesgo, en la prevención de impactos y daños por inundaciones en el estado de Chiapas, se diseñaron cuatro eventos de lluvia intensa (30, 50, 70 y 100 mm) para caracterizar la distribución espacial de eventos de lluvia intensa para el estado de Chiapas, que sirvieran para identificar zonas potenciales de inundación.

Para los eventos de lluvia sintética, se consideró la intensidad de lluvia obtenida del cálculo de umbrales de peligro. Con apoyo de información vectorial en formato *shape* correspondiente a los límites político-administrativos del estado de Chiapas, que fueron obtenidos del servidor de datos <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150> del INEGI, se diseñaron las máscaras de lluvia intensa. La información vectorial se utilizó para definir el límite espacial de los datos de lluvia. La incorporación de campos numéricos como atributos espaciales al archivo vectorial, fue el procedimiento realizado para generar la información geoespacial de eventos de lluvia intensa, que será utilizada para determinar valores de riesgo de inundaciones.

El procesamiento e incorporación de atributos espaciales con valores de lluvia intensa, se realizó por medio de un SIG y herramientas de geoprocésamiento espacial. Para realizar el cálculo de zonas potenciales de inundación para el estado, es necesario realizar la conversión geométrica (vector-raster) de los resultados, ya que es el formato requerido para su procesamiento y obtención de valores de escurrimiento y riesgo de inundaciones para los periodos analizados.

2.2.2.- Validación del modelo de inundaciones

Con la finalidad de validar la eficiencia del modelo propuesto para determinar zonas potenciales de inundación para el estado de Chiapas, se utiliza información de lluvia intensa asociada con inundaciones ocurridas en el territorio chiapaneco, que por su magnitud representaron un gran impacto en diversas regiones del estado. Los registros de lluvia, corresponden a los días 1 – 4 de octubre de 2020 correspondientes con la Tormenta Tropical Gamma.

Para realizar este ejercicio de validación, se utilizó información de Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Cloud Classification System (PERSIANN-CCS) disponible en el portal web <https://chrsdata.eng.uci.edu/>. Es de alta resolución $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ (4km x 4km), permite eliminar el ruido asociado con las nubes, a partir de un algoritmo de enmascaramiento, lo que facilita el análisis de la información en el tope de nubes para la asignación de valores de intensidad de lluvia. Es decir, realiza un análisis de asociación entre la tasa de lluvia con la temperatura de brillo de las nubes, de forma iterativa (continua).

Los datos de PERSIANN, son de acceso libre y son procesados para su descarga dentro del portal. Aunque la información puede adquirirse para diferentes resoluciones temporales (horaria, diaria, semanal, mensual, etc.), para los fines del trabajo, se utilizaron datos diarios. Es ampliamente utilizada para el análisis de lluvias y la modelación de inundaciones, por lo cual, se considera una fuente de datos confiable. La información de tasa de lluvia descargada de PERSIANN, se utilizó para validar la magnitud espacial de las inundaciones reportadas para el estado de Chiapas.

2.3.- Datos para caracterizar el índice de Vulnerabilidad ambiental

En general, los estudios que analizan el riesgo de inundaciones evalúan la vulnerabilidad como una condición interna de un sistema expuesto ante un

fenómeno natural peligroso. La cuantificación de daños y pérdidas es utilizada para establecer niveles de vulnerabilidad socioeconómica y estructural (físicos).

En este estudio, se evalúa la vulnerabilidad ambiental como un elemento dinámico del riesgo, que permite evaluar la sensibilidad de las cuencas hidrológicas para generar escurrimientos, desde un contexto morfométrico (pendiente del terreno) y ambiental (uso de suelos y edafológica) (Gaspari, 2011; Melesse y Shih, 2002; Gandini *et al.*, 2004). Esta variable, es relativamente nueva en estudios de riesgos de inundaciones en México, debido a que la vulnerabilidad está mayormente asociada con impactos sociales y económicos relacionados con la altura de la lámina de agua.

La vulnerabilidad ambiental analizada para los períodos 1970 y 2016 permitirá entender el contexto en que ocurren las inundaciones en el estado de Chiapas. Aunque no se realiza un estudio hidrológico exhaustivo, ya que no se evalúa la dinámica de los flujos superficiales, se analiza la pérdida de infiltración de los suelos naturales como un factor que contribuye con el aumento de escurrimientos superficiales en las cuencas hidrológicas, en donde el cambio de uso de suelo es mayor.

Con el objetivo de generar un producto que permitiera representar niveles de riesgo cuando se combina con información de peligro por lluvias intensas, se construyó un índice de vulnerabilidad ambiental para el estado de Chiapas, considerando como unidad de análisis las 90 cuencas hidrológicas que conforman el territorio chiapaneco.

El índice de vulnerabilidad ambiental (V) propuesto, permitirá evaluar y cuantificar en qué medida la pérdida de cobertura natural del suelo representa un factor importante en el aumento del número de inundaciones. Para ello, se integraron dos indicadores dinámicos que sirvieron para determinar valores de número de curva. Posteriormente, se integró un indicador de tipo estático que permitió ajustar los valores de número de curva, a partir de valores de pendiente del terreno. La información del índice de vulnerabilidad obtenida, se utilizó para calcular niveles de

riesgo de inundaciones a partir de diferentes láminas de escurrimiento para las cuencas hidrológicas de Chiapas.

Un primer paso en la construcción del índice de vulnerabilidad consistió en agrupar la información vectorial en formato *shape* de uso de suelo y vegetación de los periodos 1970 y 2016 recolectada del repositorio web de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>) con escala 1:250 000.

Para realizar la homologación y comparación de las coberturas de suelo para los periodos de estudio (1970-2016), se utilizó el manual para la interpretación de la carta de uso de suelo y vegetación de INEGI escala 1: 250 000, correspondiente a la serie I (1985), debido a su importancia como periodo inicial de cambio. Dentro de este manual, fue posible encontrar la información necesaria para la agrupación de las diferentes coberturas en ocho diferentes tipos: Agrícola, Asentamiento humanos, Bosque, Matorral, Otra vegetación, Pastizal, Selva y Sin vegetación aparente. Esta clasificación permitió definir las coberturas de suelo como mayor extensión espacial durante 1970 y 2016. Otras coberturas de suelo registradas en la información de 2016, no están presentes en 1970, por lo cual, se decide utilizar como base 1970. Con apoyo de herramientas de geoprocésamiento dentro de un SIG, fue posible realizar la agrupación de las coberturas utilizando su información tabular.

Paralelamente, una segunda variable dinámica que corresponde a las características físicas del suelo se utilizó para obtener información sobre el potencial de infiltración para las diferentes coberturas previamente agrupadas. Esta variable edafológica en formato *shape* con escala 1:250 000 se obtuvo del repositorio de datos del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>) con temporalidad 1997 y 2014, se procesó utilizando el mismo procedimiento realizado para las coberturas de suelo. Las características físicas de los suelos (textura, estructura y permeabilidad), se utilizaron para definir las condiciones hidrológicas y de permeabilidad (A, B, C y D). La combinación de variables físicas de los suelos, consideran los criterios establecidos por la USDA-NRCS, 2009, los cuales, asocian el potencial de infiltración de los suelos con base en su textura, plasticidad y

permeabilidad. Esta información edafológica agrupada se conoce como condición hidrológica (GH) de los suelos.

CLASE A: Suelos con alta capacidad de infiltración. Arenas, gravas y loess profundos.

CLASE B: Suelos con capacidad de infiltración moderada. Son poco profundos y arenosos.

CLASE C: Suelos con capacidad de infiltración bajas. Suelo arcilloso y arenoso poco profundo; suelos de bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.

CLASE D: Suelos con muy baja capacidad de infiltración o en los que el nivel freático está cerca de la superficie. Suelos que aumentan de volumen cuando están mojados, arcillas plásticas pesadas y algunos suelos salinos.

La combinación de datos vectoriales de cobertura de suelo agrupada con la condición hidrológica de los suelos permitió obtener información sobre la capacidad de infiltración de los suelos a partir de sus características físicas. Con esta información, fue posible establecer los valores de número de curva. El proceso de la información para su integración en un nuevo archivo se realizó utilizando herramientas de geoprocetamiento en un SIG.

2.3.1.- Cálculo del método de número de curva (NC)

El método del número de curva (NC), es una de las herramientas más utilizadas a nivel mundial dentro del campo de la hidrología aplicada, ya que permite evaluar el potencial de las cuencas para generar escurrimientos, de acuerdo con el tipo de suelo y sus características físicas.

Este método, que fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del United States Department of Agriculture (USDA) en la década de los años 40 ahora el Natural Resources Conservation Service (NRCS), ha mostrado a lo largo de 80 años

su habilidad para integrar información de diferentes fuentes y escalas para evaluar la relación del proceso de lluvia-escorrimento en las cuencas hidrológicas, el cual se ha visto fuertemente favorecido por su incorporación como herramienta de análisis dentro de los sistemas de información geográfica (SIG), facilitando el manejo e interpretación espacial de los datos, así como en la generación de escenarios hidrológicos para diversas condiciones de humedad del suelo, lo que ha permitido reducir costo y tiempo en el desarrollo de proyectos.

Debido a las ventajas mostradas por el método de número de curva, su utilidad y ventaja ha sido un factor importante para su aceptación y aplicación en otros campos del quehacer científico, diferentes a la agricultura para el cual fue desarrollado (USDA – NRCS, 2004; 2007). Una de las principales aplicaciones actuales, se ha enfocado al análisis del riesgo de inundaciones en los últimos 20 años.

En el estado de Chiapas, son muy pocas las cuencas hidrológicas que cuentan con instrumentos (pluviómetros) para el monitoreo de ríos, por lo cual, metodologías como el número de curva permiten evaluar la sensibilidad de las cuencas hidrológicas para generar escurrimientos para diferentes intensidades de lluvia. Por ello, este trabajo utilizó este método en una primera etapa para construir un índice de vulnerabilidad ambiental a partir de la integración de indicadores dinámicos y estáticos. En una segunda etapa, el resultado del índice de vulnerabilidad se utilizó para diseñar escenarios de riesgo de inundaciones, considerando diferentes intensidades de lluvia.

Aunque este método, representa un gran aporte al campo de la hidrología superficial y a los estudios de inundaciones, presenta algunas limitaciones en el proceso de transformación de lluvia-escorrimento (Paz – Pellat, 2009), ya que el modelo plantea que el escurrimiento generado por las cuencas hidrológicas será igual que la precipitación total registrada ($Q = P$) como consecuencia del proceso de saturación de los suelos de tipo natural, sin embargo, esta condición, no se cumple cuando los valores de escurrimiento son bajos, mientras que con intensidades de

lluvia más intensa el modelo inicia un proceso de estabilidad, cumpliéndose la relación hidrológica: *escurrimiento directo* (Q) = *precipitación* (P) (Chow, 1994).

El método de número de curva puede describirse matemáticamente como una relación empírica entre Gasto (Q) y Precipitación (P). A continuación, se describe el desarrollo de su ecuación (USDA, 1986).

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (1)$$

Donde:

Q = Lámina de escurrimiento (pulgadas)

P = Lluvia total (pulgadas)

S = Potencial máximo de retención (pulgadas)

I_a = Abstracción inicial (pulgadas)

La variable I_a representa las pérdidas antes de iniciar el proceso de escurrimiento. En esta variable se incluye el agua retenida en depresiones del terreno, el agua capturada por la vegetación, la evaporación y la infiltración. Esta variable, resulta de desarrollar la siguiente ecuación empírica (2).

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Los valores de S y P utilizados para generar los escurrimientos, para la variable I_a (SCS, 1972; USDA – NRCS, 2004) se obtienen de sustituir (2) en (3).

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (3)$$

La variable S , se asocia directamente con la condición del suelo a través de los valores adimensionales de NC (0 a 100) (4), los cuales son resultado de la condición de humedad del suelo (seco, normal o saturado), la pendiente del terreno y el tipo y uso de suelo. Los valores de NC, representan nulo escurrimiento (0) y máximo

escurrimiento (100) cuando la cobertura del suelo y sus condiciones hidrológicas son impermeables (Gaspari, 2007).

$$S = \frac{1000}{NC} - 10 \quad (4)$$

Debido a que la ecuación original (3), considera unidades de pulgada en la curva de escurrimiento, esta fue modificada por Aparicio (2008) para obtener unidades de milímetros (5) para la lámina de escurrimientos calculada.

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{NC} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{NC} - 20.32} \quad (5)$$

Donde:

Pe = Potencia del escurrimiento (mm)

P = Lámina de lluvia (mm)

NC = Valor de número de curva (adimensional)

Otros valores en la ecuación son parámetros constantes, que son utilizados para el cambio de unidades (pulgada – mm)

NC es el "número de escurrimiento-infiltración" cuyo valor depende del índice de vulnerabilidad calculado. Los valores generados, se establecen de 0 a 1, donde 0 representa mínimo escurrimiento y 1 máximo escurrimiento.

Considerando la dinámica de los escurrimientos como resultado de la ecuación 5, la relación lluvia-escurrimiento en las cuencas hidrológicas debe mostrarse como se observa en la siguiente Figura (5). Los diferentes cambios observados en las curvas de escurrimiento, son resultado directo de la intensidad de lluvia y los valores de número de curva utilizados para el cálculo. Para escurrimientos con valores cercanos a la intensidad de lluvia, el número de curva será 100, mientras que en valores cercanos a 0 los suelos presentan mayor eficiencia para infiltrar los escurrimientos.

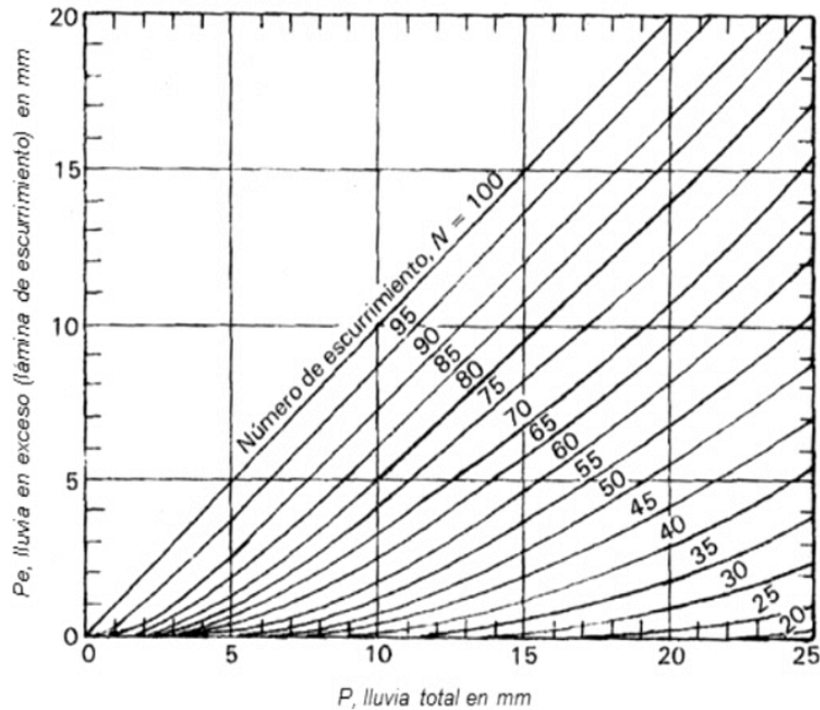


Figura 5. Modelo del proceso de lluvia-escurrimiento idealizado generado a partir de la relación de valores de número de curva y diferentes intensidades de lluvia. Fuente: Aparicio 2008

Finalmente, la pendiente del terreno como indicador estático se utilizó para ajustar los valores asignados de número de curva a los indicadores dinámicos. Estos valores fueron obtenidos de las tablas estandarizadas que fueron desarrolladas por el USDA-NRCS y que se encuentran contenidas en la metodología *Urban Hydrology for Small Watershed* del Technical Release *TR – 55, USDA – NRCS* (1986).

Los valores seleccionados, consideran una condición de humedad antecedente normal (promedio), ya que se sugiere utilizar esta condición cuando no se cuenta con información de capacidad de campo. Los valores de pendiente del terreno se obtuvieron del continuo de elevaciones mexicano (CEM) del INEGI con resolución de 30 metros que corresponden a una escala $\approx 1:60\ 000$. Aunque esta escala es mayor que la utilizada para los indicadores dinámicos, su importancia radica en el valor Z, el cual, para este caso en particular fue de 3 metros de acuerdo con el re-escalamiento del SIG. Los datos de dinámicos escala 1: 250 000 (125 metros de resolución) se rasterizaron y re-muestrearon a 50 metros (1: 100 000) para tratar

conseguir una integración de datos matriciales ajustada geométricamente, reduciendo posibles efectos negativos durante el cálculo de la vulnerabilidad ambiental. Esta información, se encuentra disponible en el portal web <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>. A partir de los valores de altura del modelo digital de elevaciones (MDE) del CEM, se generó la información necesaria para representar la pendiente del terreno en unidades de grados. Los resultados permitieron un mejor manejo de los valores para su procesamiento e integración con los de número de curva. La información de pendiente del terreno permitió ajustar la capacidad de escurrimiento-infiltración de los suelos (NC). Es decir, a mayor pendiente del terreno, los suelos con permeabilidad alta reducirán su capacidad de infiltración, mientras que los suelos poco permeables generan mayores escurrimientos cuando la pendiente del terreno es menor.

El proceso y clasificación de los valores del MDE, se realizó en un ambiente SIG. Para establecer los valores de pendiente del terreno, se consideró la clasificación propuesta por Pedraza, 1996, la cual, ha sido utilizada ampliamente en el análisis hidrológico de avenidas e inundaciones, ya que su clasificación está basada en los cambios del terreno y su efecto en la dinámica del flujo superficial.

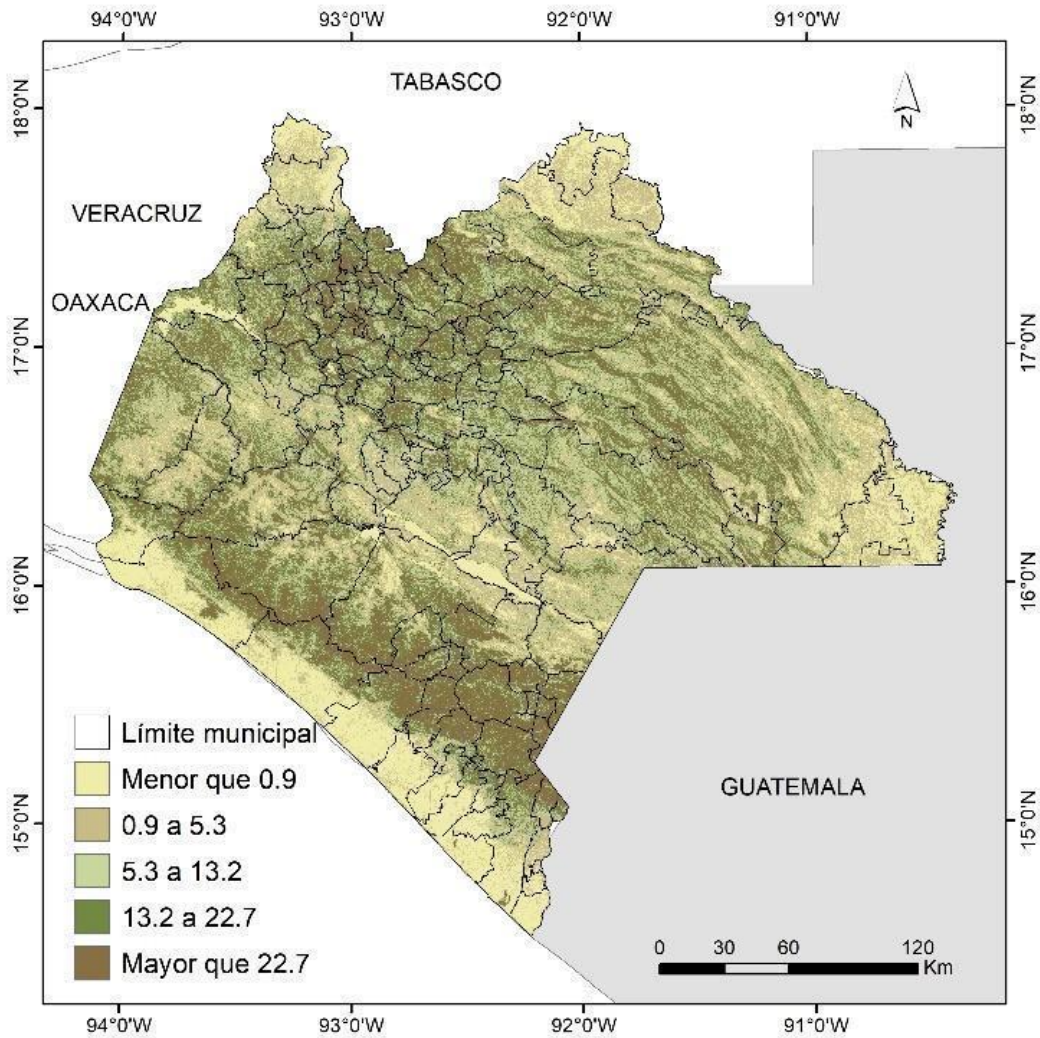


Figura 6. Distribución de valores de pendiente del terreno (grados) generados a partir de un modelo digital de elevaciones (CEM –INEGI) para el estado de Chiapas.

Aunque el método del número de curva, fue diseñado considerando un valor de pendiente $<1\%$ (3°), su mayor efectividad se establece para zonas semi-planas y onduladas, por lo que, diversos autores (Askar, 2013; Villarroya *et al.*, 2013), sugieren la necesidad de integrar nuevos valores de pendiente del terreno cuando el área de estudio presenta un contexto orográfico heterogéneo, debido a que un gradiente altitudinal mayor contribuye con el potencial de los suelos para generar escurrimientos, independientemente de su valor de número de curva. Por ello, en este trabajo se integró la pendiente del terreno (variable estática), ya que el estado de Chiapas presenta valores altitudinales máximos y mínimos del orden de 4083

m.s.n.m. y -23 m.s.n.m., por lo que, su gradiente altitudinal es mayor a 4,000 m.s.n.m.

A continuación, se muestra el procedimiento utilizado para procesar e integrar la información de cobertura de suelo con los diferentes grupos hidrológicos para establecer los valores de número de curva que posteriormente fueron ajustados utilizando los valores de pendiente del terreno, bajo un contexto de humedad antecedente normal, permitiendo obtener el índice de vulnerabilidad para los periodos de estudio para estado de Chiapas.

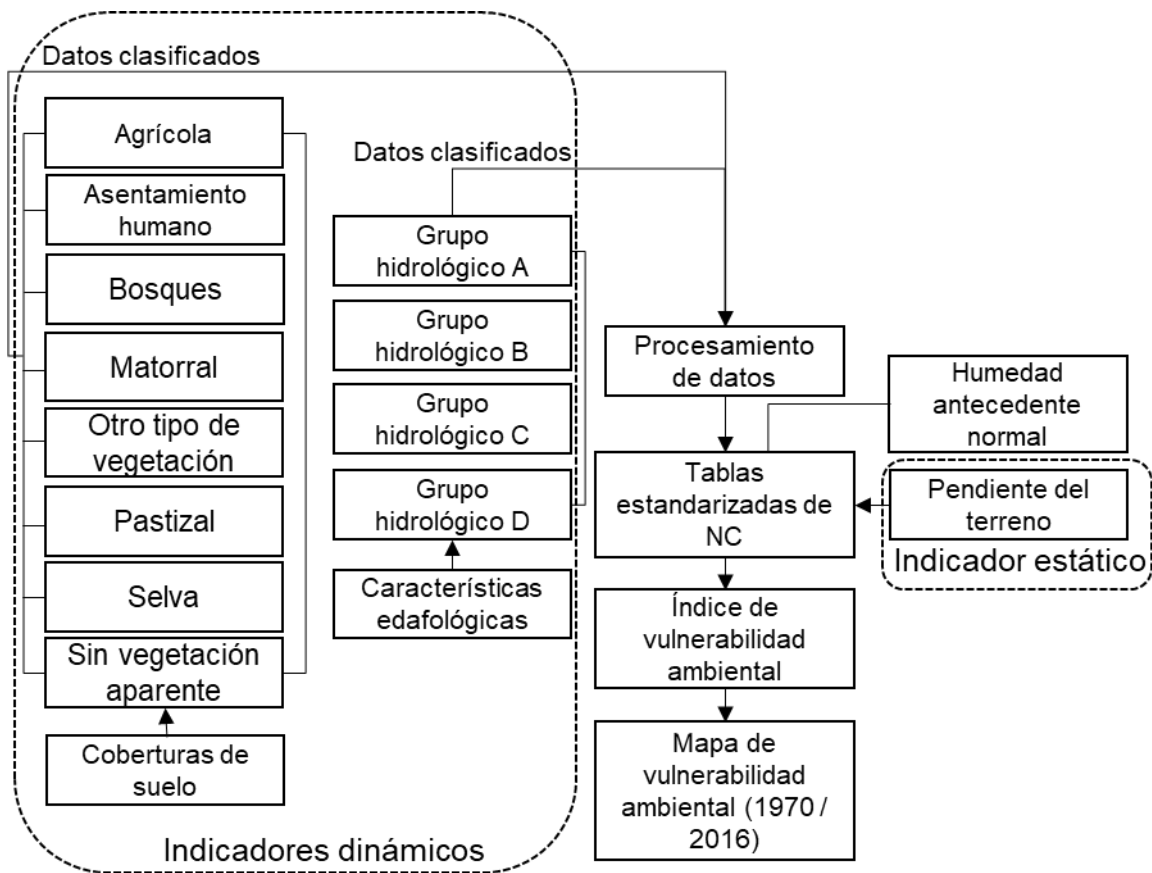


Figura 7. Diagrama de flujo utilizado para procesar e integrar información de indicadores dinámicos y estáticos para obtener un mapa de índice de vulnerabilidad para el estado de Chiapas de los períodos 1970 y 2016.

2.4.- Cálculo del índice de riesgo de inundaciones

El mapa de riesgo de inundaciones resultó de integrar información del índice de vulnerabilidad ambiental con los valores de intensidad de lluvia dentro de la ecuación 5. Para generar valores de riesgo de inundaciones, la información de vulnerabilidad ambiental fue transformada de un archivo *shape* (vectorial) a un formato raster, ya que es el formato que requiere la ecuación para operar. Los datos de lluvia utilizados (lluvia sintética y eventos de lluvia correspondiente a los casos de estudio), ya contaban con este formato. Aunque el índice de vulnerabilidad ambiental fue normalizado para una mejor interpretación visual, es importante mencionar que para ejecutar la ecuación (5), se conservaron los valores de NC sin normalizar. Con ayuda de herramientas de geoprocésamiento en un SIG, fue posible integrar la información de vulnerabilidad ambiental y peligro, como una ecuación en lenguaje de *Python* (Py) para realizar la operación de álgebra de mapas para los diferentes escenarios de riesgo de inundaciones analizados.

Desarrollo de la ecuación (5), utilizada para generar valores de riesgo de inundaciones en un SIG.

$$\text{Power}([valores_de_precipitación] - (508 / [índice_vulnerabilidad_ambiental]) + 5.08, 2) / ([valores_de_precipitación] + (2032 / [índice_vulnerabilidad_ambiental]) - 20.32) \quad (5)$$

Como parte de esta propuesta de investigación, que utiliza la vulnerabilidad ambiental como un elemento dinámico para evaluar y determinar zonas potenciales de riesgo de inundaciones, se incluyó como unidad mínima de análisis las 90 cuencas hidrológicas del estado de Chiapas, con la finalidad de generar información individual para cada cuenca, lo cual, permitiría una mejor gestión del riesgo ante inundaciones.

El archivo vectorial de tipo *shape* correspondiente a las cuencas hidrológicas, se obtuvo del repositorio web <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> de la CONABIO. Para asignar los valores de riesgo de inundaciones a las cuencas

hidrológicas, se utilizaron herramientas SIG que permiten la extracción de información geoespacial mediante un proceso iterativo, permitiendo la asignación de valores a las unidades de análisis establecidas.

Para una mejor representación y análisis de la información del índice de vulnerabilidad y de riesgo de inundaciones, la información obtenida se normalizó utilizando la ecuación (6) "Scaling". Este método permite obtener valores en un rango de 0 – 1, representando el valor 0 como valores nulos, mientras que el valor 1 corresponde a valores máximos.

$$X' = \left(\frac{X}{X_{min}} \right) / \left(\frac{X_{max}}{X_{min}} \right) \quad (6)$$

Donde:

X' = Indicador estandarizado

X = Valor que será estandarizado

Xmax y Xmin = Valores extremos de la serie de datos

A partir de la escala de valores obtenidos (0-1) con (6), se realizó la clasificación de la información del índice de vulnerabilidad ambiental y del riesgo de inundaciones, resultando en 5 niveles (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de valores de índice de vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones

Nivel	Niveles	Índice de vulnerabilidad ambiental	Nivel de riesgo de inundaciones
1	0.0 – 0.2	Muy bajo	Muy bajo
2	0.2 – 0.4	Bajo	Bajo
3	0.4 – 0.6	Moderado	Moderado
4	0.6 – 0.8	Alto	Alto
5	0.8 – 1.0	Muy alto	Muy alto

Los niveles “muy bajos” en el índice de vulnerabilidad ambiental, representan mejores condiciones de infiltración en los suelos, lo que reduce los escurrimientos superficiales y el nivel de riesgo de inundaciones, mientras que un nivel “muy alto” en riesgo, significa un índice de vulnerabilidad ambiental limitado en la regulación de escurrimientos generados por lluvias intensas. Esta normalización de valores permitirá una mejor interpretación espacial y temporal de la vulnerabilidad y el riesgo de inundaciones en las cuencas hidrológicas que integran el estado de Chiapas.

La combinación de los indicadores propuestos permitió identificar las zonas con mayor nivel de riesgo de inundaciones, a partir de la dinámica de las cuencas:

- a) El potencial de las cuencas hidrológicas para generar escurrimientos, considerando el volumen que puede ser capturado y transformado en escurrimientos superficiales.
- b) El proceso de regulación de los escurrimientos, asociado con la capacidad de los suelos para infiltrar el agua de lluvia capturada (NC) y el potencial para acelerar o disminuir su infiltración a partir de la inclinación del terreno (pendiente).

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Análisis de las inundaciones en el estado de Chiapas

Con base en los registros históricos de eventos de inundaciones analizados de la base de datos del inventario de desastres (DesInventar), es posible observar que el estado de Chiapas ha mostrado una tendencia en el número de desastres asociados a inundaciones que se ha incrementado en los últimos 15 años (Figura 8). Este aumento de inundaciones en el estado se ha observado también en el costo económico y social de las regiones donde la frecuencia y magnitud de las inundaciones es mayor (DesInventar).

La tendencia registrada en la base de datos permite establecer que en promedio las inundaciones se han incrementado de menos de 5 eventos entre 1970-1998 a un promedio de 23 desastres, entre 1998 a 2013. Esta situación expresa que la vulnerabilidad y riesgo en el estado se ha incrementado también en los últimos años, situándose en el cuarto lugar con mayor número de inundaciones, sólo por debajo de Veracruz, Ciudad de México y Estado de México. Es importante mencionar, que el número de inundaciones ocurridas no está relacionado directamente con el impacto socioeconómico, ya que un solo evento puede generar enormes pérdidas en relación con un acumulado de eventos de inundación. Por lo que, es importante consultar investigaciones especializadas en el tema para poder cuantificar las pérdidas y daños causados por inundaciones en el estado de Chiapas.

Aunque, en este estudio no se analiza el impacto socioeconómico causado por las inundaciones, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en sus publicaciones sobre el *impacto socioeconómico de los desastres en México* es posible obtener información sobre el costo de las inundaciones a nivel nacional. En el caso particular del estado de Chiapas, por ejemplo, durante el año 2000 el impacto de las inundaciones causó pérdidas superiores a 4,000 millones de pesos, mientras que en 2008 fueron de aproximadamente 98 millones de pesos (CENAPRED 2008; 2010), aunque durante 2008 el número de registro de inundaciones fue superior al registrado en el año 2000.

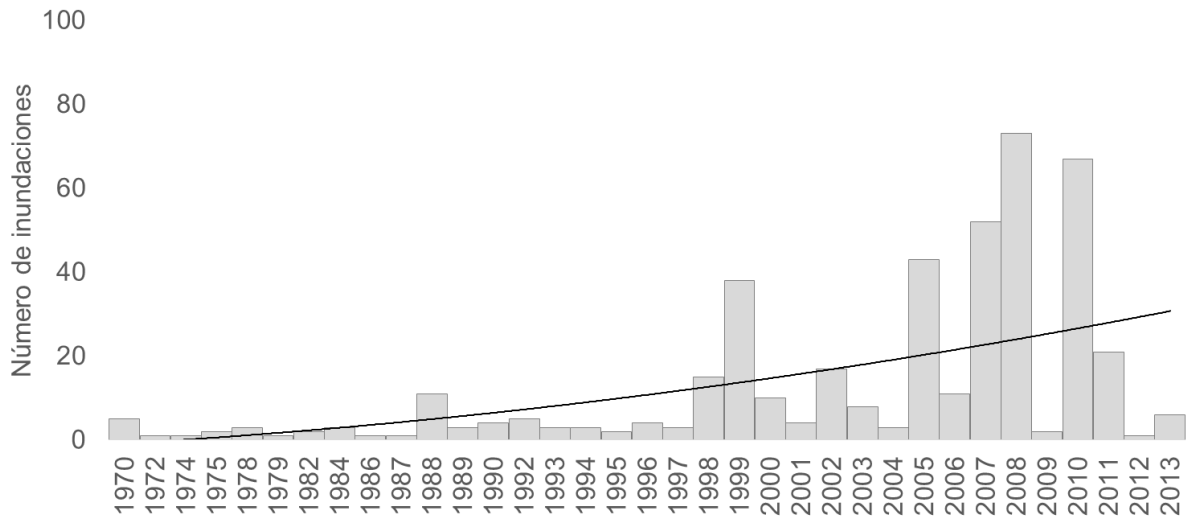


Figura 8. Frecuencia de los desastres por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970-2013. Elaboración propia con datos de DesInventar (<https://www.desinventar.net/>)

Como efecto de la dinámica de las inundaciones en el estado de Chiapas, es posible notar que, al calcular la anomalía del número de desastres por inundaciones en el estado, la tendencia muestra un incremento de alrededor de un 300% en los últimos años (1999-2013), en relación con sus registros históricos (Figura 9). Este fenómeno claramente se percibió en la figura anterior (Figura 8) en el periodo 1970-1998 que mostró un promedio de 3 eventos de inundaciones.

Esta variación en los registros, permite también establecer que en décadas pasadas (antes de 1998) la existencia de factores como: *i) medios de comunicación limitados, ii) menor número de elementos expuestos, iii) menor impacto ambiental en cuencas hidrológicas y iv) lluvias menos intensas*, pudieron ser la principal causa de un menor registro de desastres que en la actualidad. Sin embargo, es importante resaltar que si bien existe una anomalía que nos indica una mayor frecuencia de inundaciones en años recientes, se han registrado periodos con valores negativos de anomalía, lo que podría asociarse con la dinámica espacial de las inundaciones. Es decir, regiones donde la condición de vulnerabilidad y riesgo es menor ante lluvias intensas.

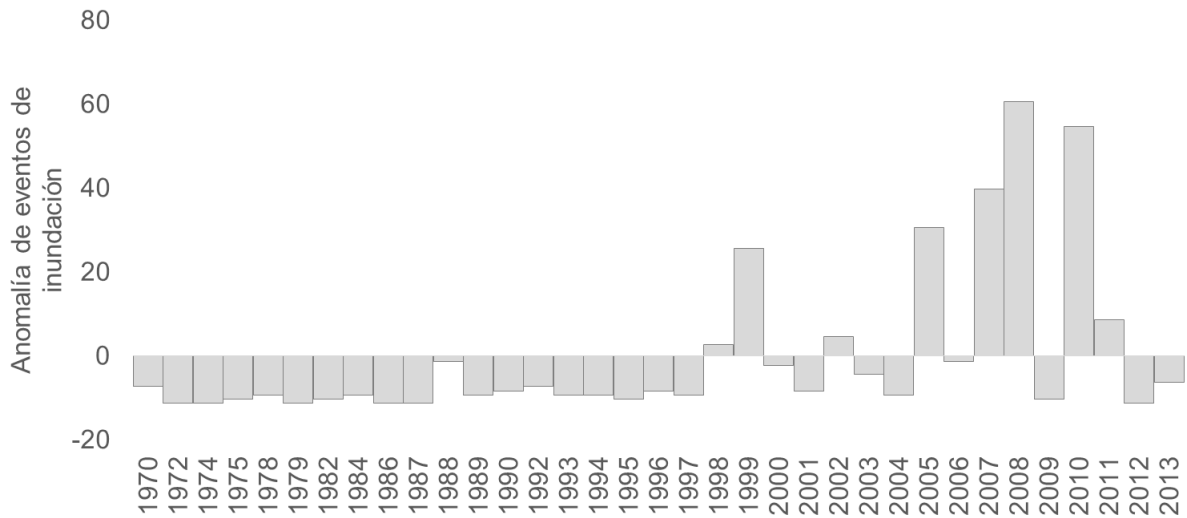


Figura 9. Anomalía de la frecuencia de desastres por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970-2013. Elaboración propia con datos de DesInventar (<https://www.desinventar.net/>)

A partir de los registros analizados, se pudo identificar que de 123 municipios que integran el territorio chiapaneco, en 31 se concentra el 75% del total de las inundaciones ocurridas en los últimos 46 años (1970-2016) (DesInventar, CENAPRED, FONDEN). De acuerdo con los datos analizados, los municipios donde se concentra el mayor número de inundaciones urbanas están integrados por cinco regiones (Tabla 2).

En primer lugar, podemos mencionar la zona costera del estado con la mayor frecuencia de desastres asociados a inundaciones. Esta condición de mayor riesgo tiene como factor común estar localizada en la zona de paso de ciclones tropicales y otros fenómenos de escala sinóptica, los cuales, aportan gran cantidad de agua precipitable que transformada en escurrimientos puede incrementar el riesgo de inundaciones por desbordamiento de ríos, afectando a las poblaciones localizadas próximas a las corrientes y cuerpos de agua.

En ciudades como Tuxtla Gutiérrez y los municipios que limitan con el estado de Tabasco, la presencia de los ciclones tropicales en verano y durante el invierno las lluvias causadas por los Frentes Fríos, aportan lluvia a las cuencas hidrológicas en prácticamente todo el año, posibilitando la generación de escurrimientos no-controlados por ríos y por los sistemas de drenaje que se ven limitados para el

control y desalojo oportuno de las aguas pluviales, causando inundaciones en estas regiones del estado por desbordamiento de ríos (DesInventar, CENAPRED).

Tabla 2. Principales municipios afectados por inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970-2016.

ID	Municipio	Número de eventos	Región
1	Tapachula	47	Costa-sur
2	Acapetahua	24	Costa-sur
3	Tuxtla Gutiérrez	21	Centro
4	Suchiate	20	Costa-sur
5	Huixtla	19	Costa-sur
6	Villa Comaltitlán	19	Costa-sur
7	Mazatán	17	Costa-sur
8	Mapastepec	15	Costa-sur
9	Pichucalco	14	Noroeste
10	Pijijiapan	14	Costa-sur
11	Huehuetán	12	Costa-sur
12	San Cristóbal de las Casas	12	Centro
13	Acacoyagua	8	Costa-sur
14	Cintalapa	8	Centro
15	Ostuacán	8	Noroeste
16	Motozintla	7	Costa-sur
17	Ocosingo	7	Noreste
18	Ocozocoautla de Espinosa	7	Centro
19	Tecpatán	7	Noroeste
20	Tonalá	7	Costa-sur
21	Catazajá	6	Norte
22	Ixhuetán	6	Noroeste
23	Villa Corzo	6	Costa-sur
24	Arriaga	5	Costa-sur
25	Berriozábal	5	Centro
26	Chiapa de Corzo	5	Centro
27	Escuintla	5	Costa-sur
28	Las Margaritas	5	Noreste
29	Palenque	5	Norte
30	Salto de Agua	5	Norte
31	Unión Juárez	5	Costa-sur

En la siguiente Figura (10), es posible observar la distribución espacial de los desastres asociados con inundaciones urbanas en el estado de Chiapas, durante el periodo analizado. Los valores numéricos mostrados, están referidos a los municipios con la mayor frecuencia de inundaciones (Tabla 2). Aunque, climáticamente el territorio chiapaneco es favorecido por una precipitación promedio anual mayor a 1,000 mm en la región central, y mayor a 2,000 mm en las región costera y norte del estado (SMN página web), la distribución de los desastres parece no estar asociada con el número de registros de inundaciones en los municipios.

Es importante resaltar que las inundaciones forman parte de un proceso multifactorial y dinámico. Es decir, dependen del contexto de vulnerabilidad en que ocurren. Esto permite entender que la materialización del riesgo de desastres por inundaciones no es resultado directo de valores altos de lluvia intensa (peligro) en las diferentes regiones chiapanecas. Aunque, el número de registros de desastres mostrado, permite definir los municipios con mayor impacto, es necesario considerar que las bases de datos revisadas (DesInventar, CENAPRED y FONDEN), únicamente registran desastres en zonas urbanas (ciudades), por lo que, seguramente los valores y el número de municipios afectados es mayor.

En las siguientes secciones el análisis e interpretación de las variables de peligro y vulnerabilidad ambiental, permitirá generar escenarios de riesgo de inundaciones con la finalidad de identificar esas regiones no-consideradas en riesgo, debido a la falta de datos.

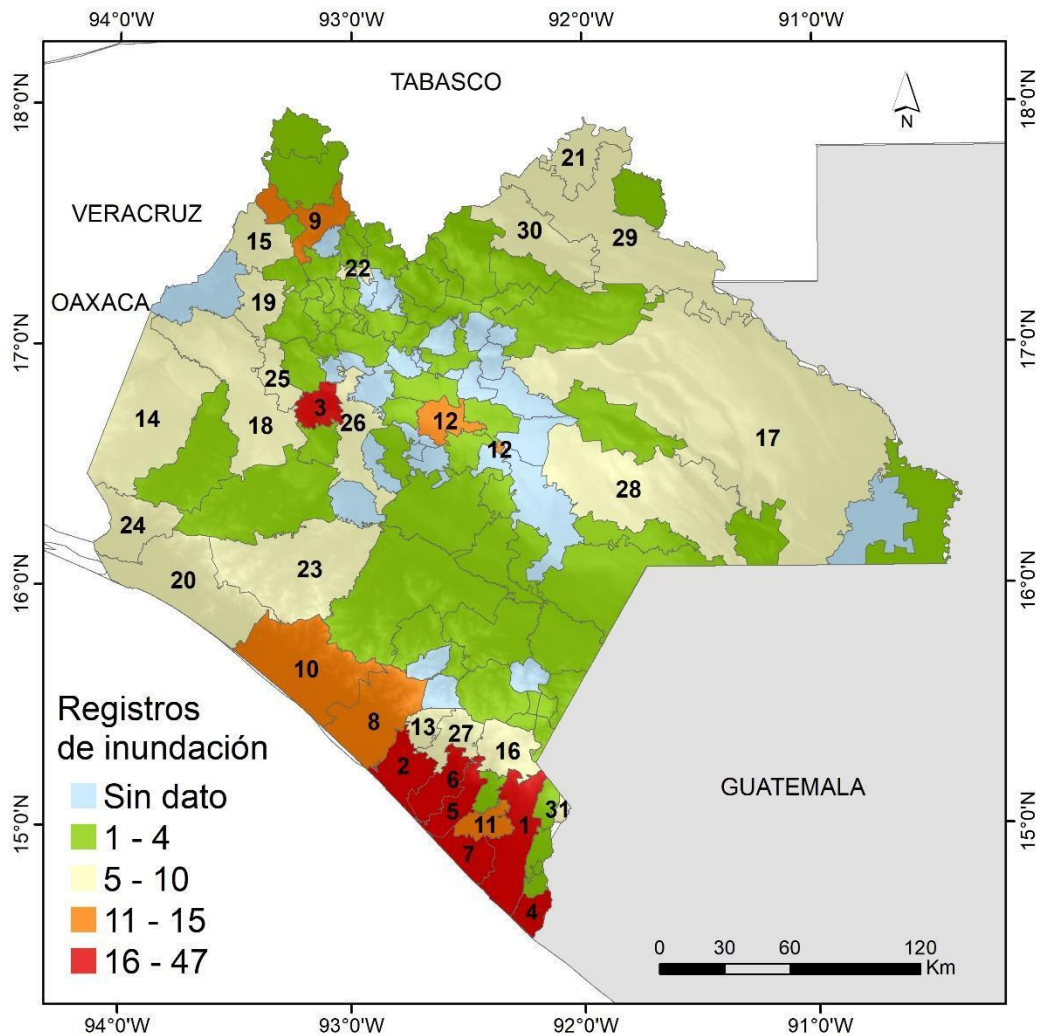


Figura 10. Número de registros de inundación para el estado de Chiapas. Periodo: 1970-2016. Los números corresponden a los municipios con mayor frecuencia de desastres (ver Tabla 2).

Otro factor importante que debe analizarse en estudios sobre riesgos de inundaciones está asociado con la distribución temporal de los desastres (Figura 11), ya que este permite entender su comportamiento “climatológico” durante el año. La distribución temporal de las inundaciones en el estado muestra dos periodos de mayor actividad en las inundaciones: junio-julio y septiembre-octubre con un periodo de descenso que corresponde a la canícula. En general, este comportamiento se presenta en todo el territorio mexicano (Zúñiga & Magaña, 2018) con un primer periodo que registra mayor número de eventos de inundación, como resultado del

arrastre de sedimentos que azolvan los cauces de los ríos, reduciendo su área hidráulica, y con ello, una mayor posibilidad de desbordamiento.

En las ciudades, la conducción de desechos urbanos a las alcantarillas es la principal causa de colapso del sistema de drenaje, limitando el desalojo de las aguas pluviales, y con ello, un mayor riesgo de inundaciones. Durante el segundo periodo observado (septiembre-octubre), la saturación de los suelos y el azolvamiento del sistema de drenaje favorecen un mayor número de inundaciones. Por lo que, cualquier estrategia de gestión de riesgo de desastres encaminada a la prevención debe considerar la distribución temporal de las inundaciones y el contexto en que estas ocurren.

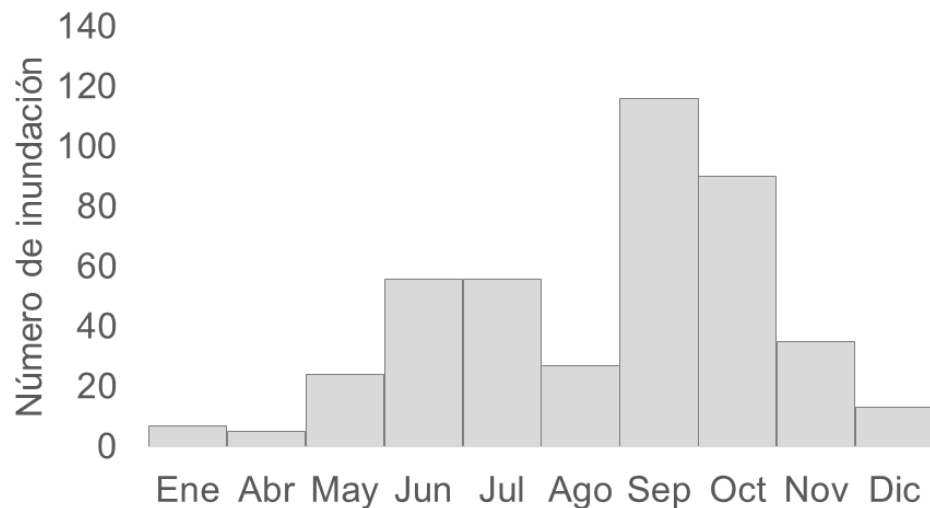


Figura 11. Distribución temporal de las inundaciones en el estado de Chiapas. Periodo 1970-2016. Elaboración propia con datos de DesInventar (<https://www.desinventar.net/>) y CENAPRED (<https://www.gob.mx/cenapred>)

Cuando se analizaron las anomalías temporales de inundaciones para el estado de Chiapas, se encontró que durante los meses de noviembre a mayo se presenta una disminución importante en los desastres, mientras que durante los meses de septiembre y octubre se registra un importante incremento de desastres, el cual, es superior a 40 eventos de inundación en relación con los registros históricos.

Esta condición podría indicar una mayor frecuencia de episodios de lluvia intensa que bien, puede combinarse con un sistema hidrológico y un sistema de drenaje

que se encuentran bajo una condición de vulnerabilidad ambiental mayor que en otros meses del año. Esta situación, es resultado principalmente a la saturación de los suelos, lo que reduce su capacidad de infiltración aumentando los escurrimientos que no pueden ser controlados y regulados por los cauces, aumentando el riesgo de inundaciones. Esta tendencia observada en el incremento de registros de inundaciones durante los meses de septiembre y octubre, también se observó en los municipios con mayor frecuencia de inundaciones en el estado (Tabla 2) con porcentajes de 32% (septiembre) y 20% (octubre).

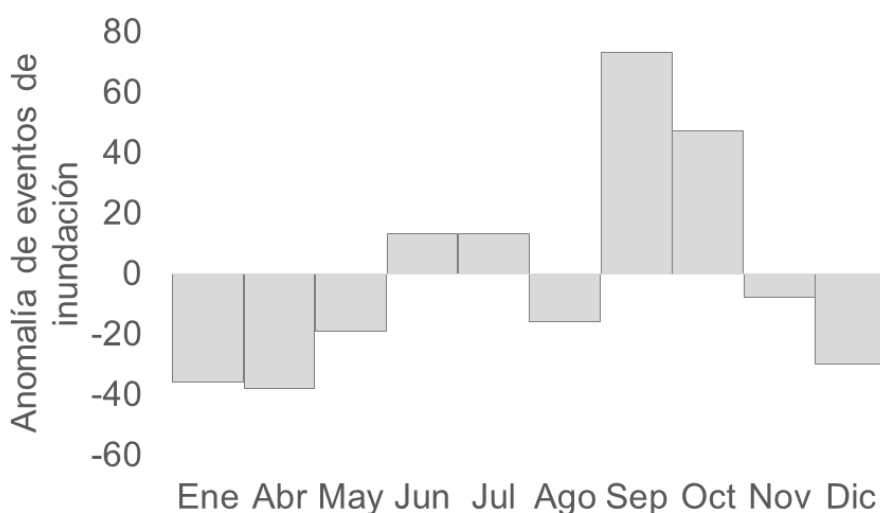


Figura 12. Distribución temporal de las anomalías de los registros de inundación en el estado de Chiapas. Periodo 1970-2016. Elaboración propia con datos de DesInventar (<https://www.desinventar.net/>) y CENAPRED (<https://www.gob.mx/cenapred>).

3.2.- Análisis del cambio de uso de suelo

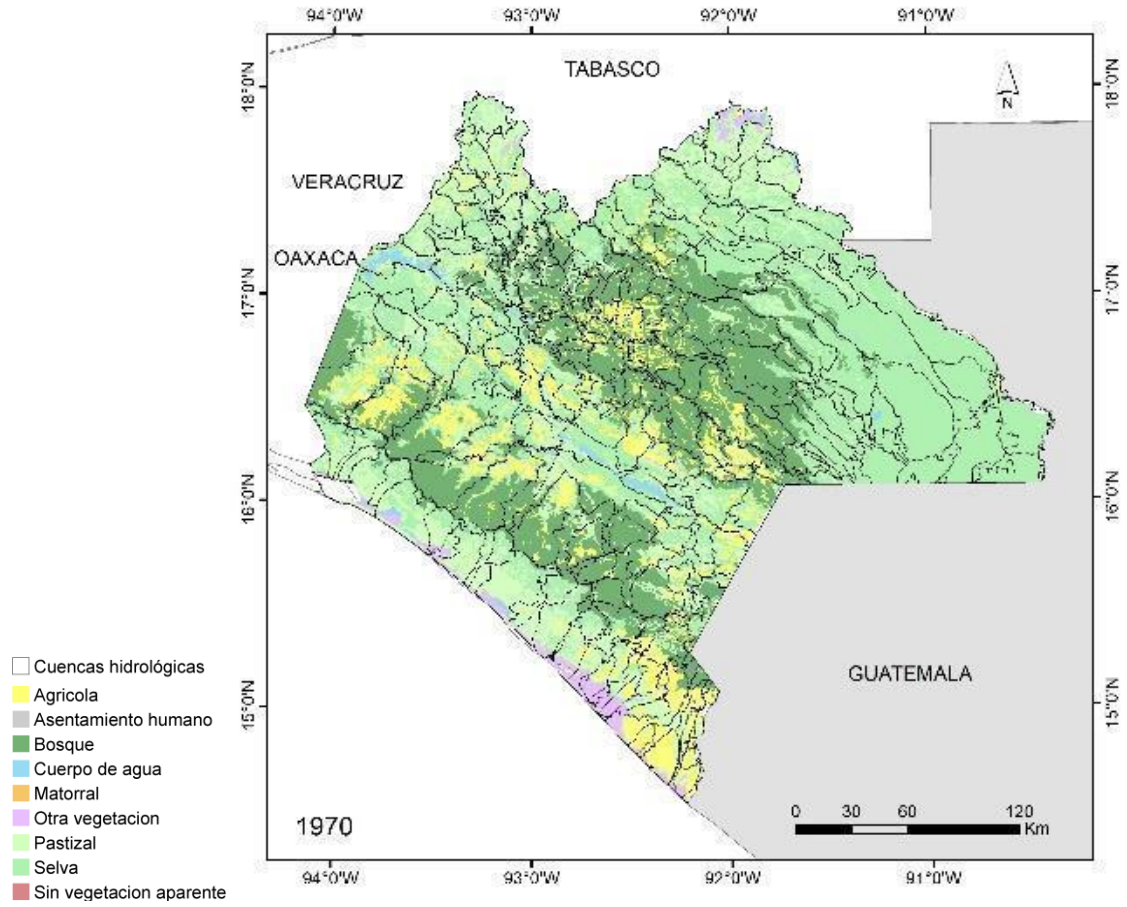
Un análisis comparativo realizado con la información de cobertura de suelo correspondiente a los períodos 1970 y 2016, permitió identificar que el estado de Chiapas ha presentado cambios importantes en la distribución espacial de coberturas de suelo de tipo natural.

En la siguiente Figura (13), es posible observar que gran parte del territorio chiapaneco ha mostrado diferentes grados de transformación, aunque el mayor proceso de degradación se presentó en la región noroeste que colinda con los estados de Tabasco y Veracruz, así como en la región costera. En ambos casos la

cobertura de selva y pastizal fue sustituida por superficies agrícolas y de otras vegetaciones. Estas últimas constituidas principalmente por vegetación inducida, que comúnmente está asociada por pastizales para la cría de ganado, o la vegetación que reaparece después tiempo después de forma natural o por acción humana, de acuerdo con INEGI (http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf y SEMARNAT (https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap2_ecosistemas.pdf)). En el caso del estado de Chiapas, se puede asociar este tipo de cobertura con el desarrollo ganadero de la región, debido a su importancia nacional como el décimo lugar en la crianza de ganado, aumentando el doble de su producción en 10 años (2010-2020)

(https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/BECH/reporte_Ganaderia_2020.pdf). Otras coberturas como los manglares no se consideraron en este estudio, debido a que se analizaron las inundaciones de tipo fluvial, como resultado de los escurrimientos superficiales, además que en la revisión sobre desastres no mostraron impactos en la población por inundaciones asociados a esta cobertura. Por lo que, se integró en clase “otro tipo de vegetación”.

En la región centro del estado, la superficie modificada ha sido menor, sin embargo, el nivel de fragmentación de los ecosistemas terrestres representados por bosques, selvas y pastizales ha sido la mayor del estado. Es importante resaltar, que el crecimiento de zonas urbanas se incrementó crucialmente en esta región central y costera. Caso contrario, se puede observar al noreste, en donde las coberturas naturales predominan las selvas, el impacto por cambio de uso de suelo mostró menor impacto. En esta región, el crecimiento urbano y el desarrollo de actividades económicas como la ganadería y agricultura ha sido menor. Más adelante, se mostrará la relación entre el efecto de la degradación de las cuencas hidrológicas que integran el estado de Chiapas con la distribución espacial de zonas de riesgo de inundaciones, como consecuencia del cambio de uso de suelo.



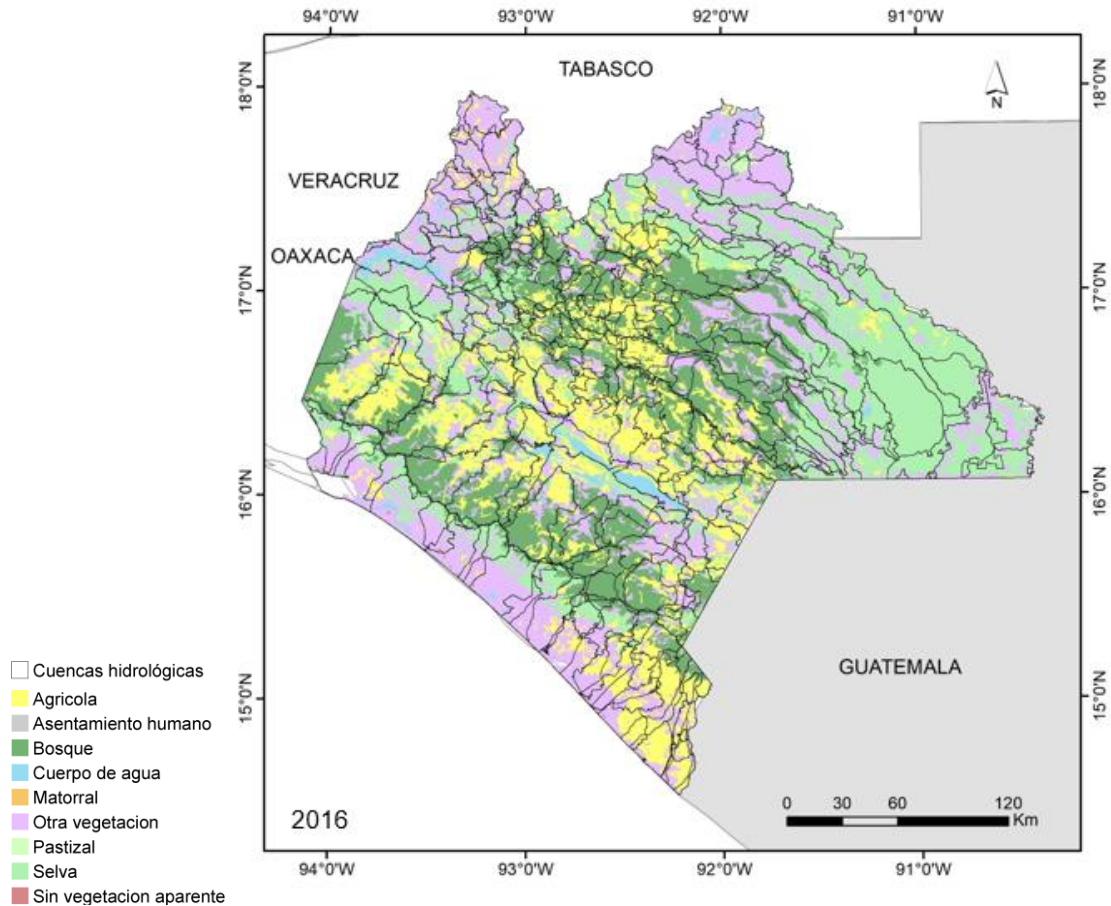


Figura 13. Distribución espacial de coberturas de suelo del estado de Chiapas, correspondiente a los periodos 1970 y 2016.

Como resultado de comparar las diferentes coberturas de suelo del estado de Chiapas entre 1970 y 2016, se determinó que la superficie natural sufrió una pérdida de más de 25,000km², lo que equivale a una disminución del alrededor 41% de esta cobertura. De acuerdo con estos datos las superficies de bosque, selva y pastizales registraron las mayores pérdidas con 14% (2,726.9 km²), 29% (7,989.8 km²) y 97% (1,4809.1 km²) respectivamente. Este cambio en la cobertura de suelo natural se puede observar claramente en la siguiente Figura 14.

Otros cambios importantes que pueden apreciarse son el incremento de coberturas con influencia antrópica, en donde la superficie agrícola aumentó en 66% (5,438.5 km²), mientras que las coberturas de tipo urbano y otra vegetación tuvieron un incremento de más de 1,000%, al pasar de 35.3km² a 500 km² y de 1,300 km² a

20,405 km², respectivamente. El resultado, mostró que las selvas, pastizales y bosques fueron sustituidos por las coberturas de tipo agrícola y otra vegetación (vegetación inducida), tal y como se puede apreciar en su distribución espacial (Figura 14).

En general, la sustitución de superficie de cobertura de suelo natural por otras donde la actividad humana tiene mayor influencia ha mostrado un incremento importante en gran parte del territorio chiapaneco, lo que representa un impacto en los servicios ecosistémicos hidrológicos, lo cual, se muestra en los siguientes apartados, donde se identifica la pérdida de infiltración y el aumento de los escurrimientos superficiales.

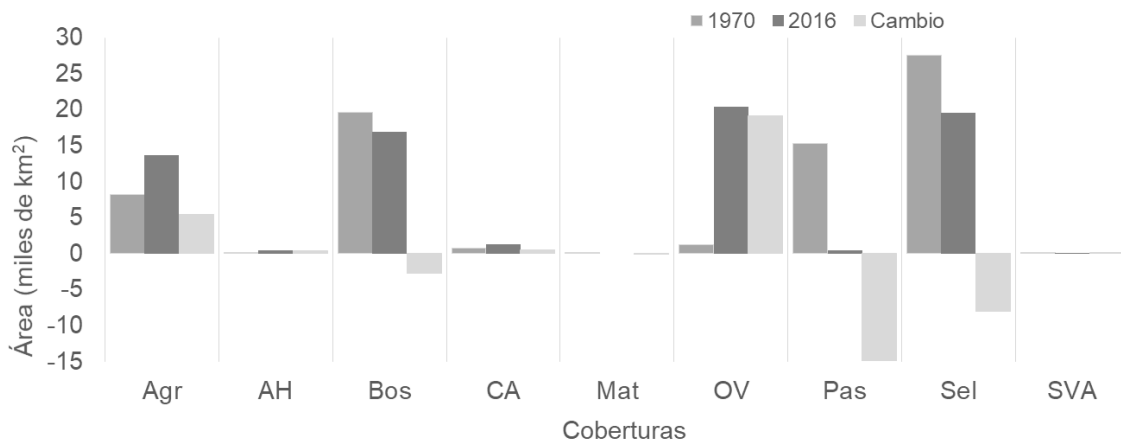


Figura 14. Distribución de la superficie (km²) de las diferentes coberturas de suelo para el estado de Chiapas, y el factor de cambio que fue obtenido de comparar los periodos de análisis (1970-2016). Coberturas: Agrícola (Agr), Asentamientos humanos (AH), Bosque (Bos), Cuerpos de agua (CA), Matorral (Mat), Otra vegetación (OV), Pastizal (Pas), Selva (Sel) y Sin vegetación aparente (SVA).

Espacialmente, el incremento de superficies con diferente grado de intervención humana (agrícola, asentamientos humanos y otra vegetación), tal y como se mostró anteriormente, ha significado que actualmente la superficie del estado de Chiapas (73,211 km²) ha perdido aproximadamente el 50% de sus coberturas de tipo natural, disminuyendo en un 30%, entre 1970 a 2016. El resultado de la pérdida de este recurso natural se observa en la siguiente Figura (15).

La distribución de valores muestra las áreas, donde aumentaron las coberturas no-naturales en relación con las de tipo natural, las cuales disminuyeron en aproximadamente 25,000 km². Estos cambios observados, pueden representar un efecto adverso en la población en cuanto al riesgo de inundaciones urbanas, debido a que los escurrimientos generados por las cuencas hidrológicas pueden incrementarse por pérdida de infiltración de los suelos.

Diversos estudios mencionan que la frecuencia de inundaciones urbanas está asociada con el nivel de vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, como resultado de cambios en las coberturas de suelo de tipo natural (Shanableh *et al.*, 2018; Abdulkareem *et al.*, 2018).

La degradación de las cuencas hidrológicas en cualquier parte del territorio mexicano puede significar un incremento en los escurrimientos del orden de 35% a 50%, de acuerdo con su grado de transformación (Zúñiga & Magaña, 2018). Con base en el análisis realizado, se puede establecer que más del 30% de las cuencas que integran el territorio chiapaneco, presentan un porcentaje de degradación mayor al 50%. Esta condición de mayor vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones se localiza principalmente en las regiones: norte, centro y costera del estado, donde también se concentran las zonas urbanas más densas y el mayor desarrollo de actividades económicas relacionadas con la agricultura de los últimos 46 años (1970-2016).

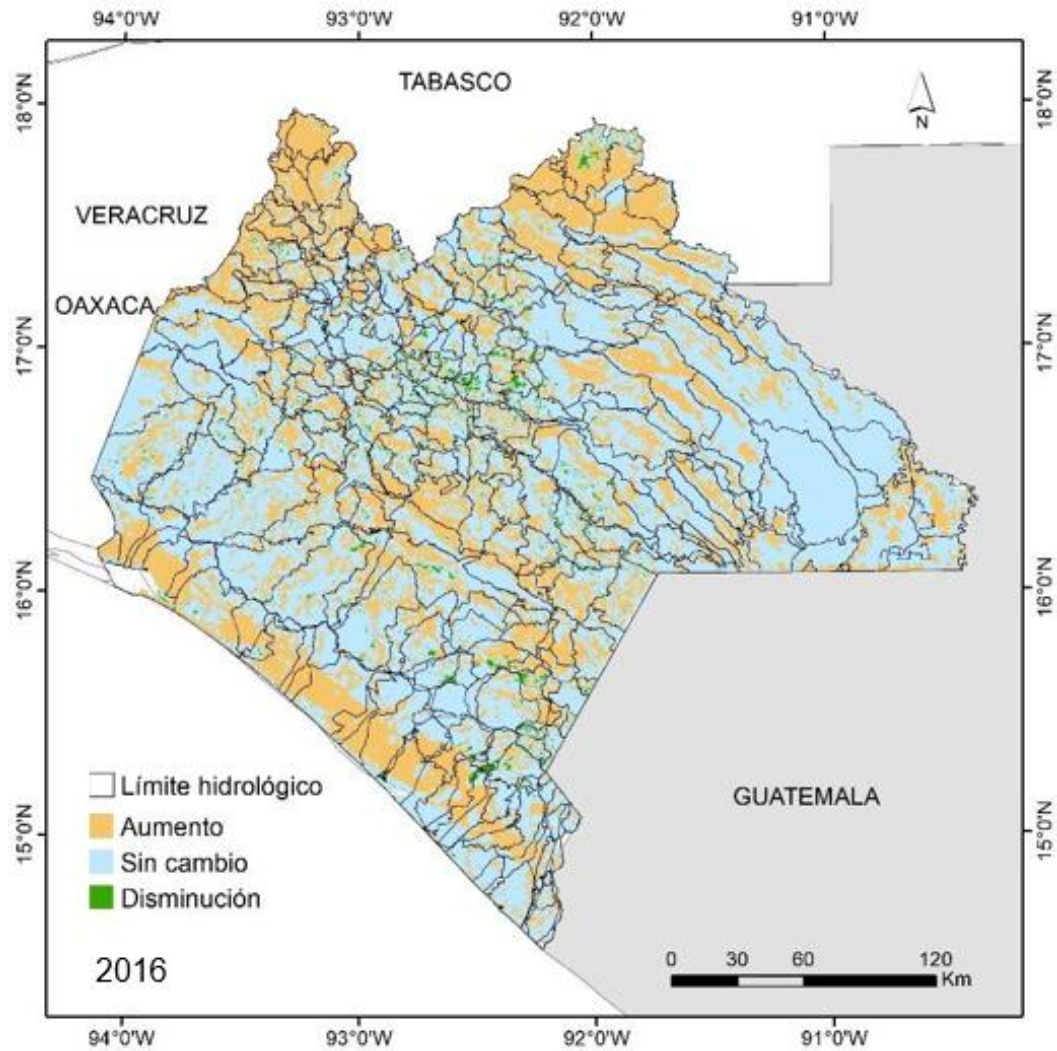


Figura 15. Factor de cambio. Distribución espacial de valores de cambio de coberturas naturales vs no-naturales. Periodo 1970-2016.

Las áreas donde el factor de cambio significó la mayor pérdida de selvas y pastizales, constituyen áreas que hidrológicamente son más sensibles a lluvias intensas actualmente, debido a que estas coberturas representan un regulador natural de escurrimientos superficiales, mientras que las nuevas coberturas (agrícola y urbana) limitan la capacidad de infiltración de los suelos, y con ello, un mayor riesgo de inundaciones en las cuencas donde este fenómeno tiene mayor efecto.

3.3.- Análisis del peligro por lluvias intensas

Con base en el análisis realizado a los registros históricos de inundaciones para el estado de Chiapas, se determinó que 31 municipios registran la mayor frecuencia de inundaciones urbanas (Tabla 3). Esta clasificación, permite analizar y comparar con los datos de lluvia diaria registrada para un número similar de estaciones climatológicas.

Como resultado de comparar los eventos de inundación con los valores de lluvia diaria, se pudo establecer un patrón en las intensidades de lluvia asociadas con la frecuencia de inundaciones en el estado. La intensidad de lluvia, que en general se registró por las estaciones superó los 50 mm/d. Este valor representó más del 70% de los casos revisados. Otros eventos de inundación (30%), presentaron valores cercanos o mayores a 50 mm como resultado de la lluvia acumulada por dos eventos consecutivos. Esta situación, se presentó en mayor medida en los municipios localizados al interior del estado, mientras que los eventos de inundación en municipios costeros fueron causados por las tormentas causadas por ciclones tropicales.

Para poder establecer una unidad de magnitud que pudiera representar la intensidad de lluvia, se analizaron los datos de lluvia diaria, utilizando el percentil 90 (P90), 95 (P95) y 99 (P99). Este estadístico, ha sido ampliamente utilizado para caracterizar los valores de peligro por lluvias intensas en trabajos sobre riesgo de inundaciones, debido a su no-rigidez al establecer un valor de percentil (Suhaila & Jemain, 2012; Bisht *et al.*, 2016). Es decir, determina un valor mínimo a partir del cual, existe la probabilidad de ocurrencia de una inundación, siempre que existan las condiciones de vulnerabilidad que favorezcan la materialización de un riesgo existente.

Como resultado de evaluar los registros de lluvia con los diferentes percentiles, se estableció que el P99, mostraba mejores resultados para caracterizar el peligro para los municipios analizados. Aunque, es posible identificar en la tabla valores menores a 50 mm/d, esto no significa que exista un error en el cálculo del P99, sino

que, en estos municipios la ocurrencia de inundaciones es resultado de valores de lluvia acumulados por dos tormentas consecutivas.

Tabla 3. Municipios con mayor número de registros de inundación del estado de Chiapas. Clave de las estaciones climatológicas analizadas y valores de percentil 99 (P99), utilizados para caracterizar el peligro por lluvias intensas.

ID	Municipio	Número de eventos	Clave Estación climatológica	P99 (mm/d)
1	Tapachula	47	7200	74
2	Acapetahua	24	7328	64
3	Tuxtla Gutiérrez	21	7176	46
4	Suchiate	20	7163	63
5	Huixtla	19	7077	88
6	Villa Comaltitlán	19	7038	87
7	Mazatán	17	7326	80
8	Mapastepec	15	7113	82
9	Pichucalco	14	7193	124
10	Pijijiapan	14	7129	77
11	Huehuetán	12	7075	81
12	San Cristóbal de las Casas	12	7144	40
13	Acacoyagua	8	7053	92
14	Cintalapa	8	7023	51
15	Ostuacán	8	7367	130
16	Motozintla	7	7119	26
17	Ocosingo	7	7122	60
18	Ocozacoautla de Espinosa	7	7123	45
19	Tecpatán	7	7178	75
20	Tonalá	7	7168	68
21	Catazajá	6	7022	71
22	Ixhuetán	6	7167	82
23	Villa Corzo	6	7174	45
24	Arriaga	5	7182	68
25	Berriozábal	5	7372	44
26	Chiapa de Corzo	5	7392	50
27	Escuintla	5	7053	92
28	Las Margaritas	5	7104	42
29	Palenque	5	7085	80
30	Salto de Agua	5	7141	99
31	Unión Juárez	5	7172	92

En la Figura 16, se representa el comportamiento de valores de peligro por lluvias intensas caracterizado con el P99 y la frecuencia de eventos de inundación registrados entre 1970 y 2016. El análisis de la información permite observar que la dinámica de las lluvias intensas, muestra un comportamiento heterogéneo con valores que van de 26 mm/d a 130 mm/d, con un valor promedio de 70 mm/d.

Aunque las intensidades de lluvia como las obtenidas, pueden sugerir una alta frecuencia en el número de eventos de inundación, en algunos municipios los registros son bajos. Este fenómeno, es causado por diferentes factores. El primero está asociado con la localización espacial de los municipios (costeros o interiores), y por otro lado, la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, debido al cambio de uso de suelo. Es decir, entre mayor sea el nivel de degradación la capacidad de infiltración de los suelos será menor y con ello, mayor posibilidad de inundaciones en zonas bajas de las cuencas. Este aspecto, se abordará con mayor detalle más adelante.

Un tercer factor que contribuye con esta condición en el estado de Chiapas está representado por la geometría de las cuencas hidrológicas, ya que esta permite estimar su potencial para capturar agua de lluvia y la velocidad en que los escurrimientos pueden ser conducidos hacia las zonas más bajas de las cuencas. Esta variable hidrológica, no se evaluó en este trabajo, ya que como se mencionó anteriormente no se realizó un análisis hidrológico extenso.

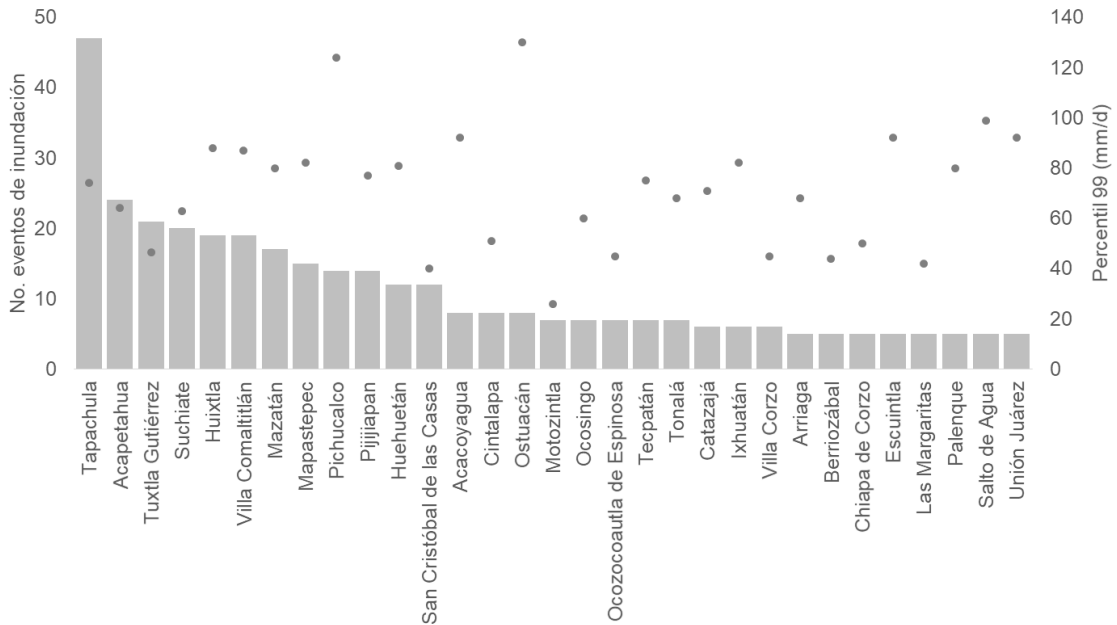


Figura 16. Número de eventos de inundación registrados para 31 municipios del estado de Chiapas, durante el periodo 1970 -2016 (barras en gris). Representación de valores de Peligro por lluvias intensas que fueron obtenidos con el percentil 99 (P99) para los municipios analizados (puntos negros).

También es importante señalar que las cuencas hidrológicas en las que se localizan las principales zonas urbanas de los municipios analizados, se encuentran en una condición de degradación moderada-alta, lo cual, aumenta su vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones, mientras que en los 92 municipios restantes del estado, la condición que prevalece en las cuencas es menor, lo cual favorece la infiltración, y una menor generación de escurrimientos superficiales en estos municipios donde la densidad de asentamientos humanos es menor.

A partir de los valores de peligro obtenidos, y su relación con la frecuencia de eventos de inundación registrados, se decidió generar valores de lluvia sintética con intensidades de 30mm, 50mm y 100mm de lluvia, para poder generar escenarios de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas. El cálculo del riesgo de inundaciones se presenta con mayor detalle en la sección: 4.4 cálculo del riesgo de inundaciones.

3.4.- Índice de vulnerabilidad ambiental

La vulnerabilidad ambiental, es uno de los elementos que integran la ecuación del riesgo junto con el peligro. Éste, es el único de estos elementos que puede ser intervenido para reducir posibles impactos por lluvias intensas. En este estudio se propuso su análisis, debido a que el proceso de degradación de las cuencas contribuye en gran medida con el nivel de riesgo existente y futuro, ya que en la medida que el nivel de vulnerabilidad ambiental sea mayor los escurrimientos se incrementaran, y con ello, una mayor posibilidad de inundaciones en zonas bajas de las cuencas por acumulación o por desbordamiento de ríos.

El índice de vulnerabilidad ambiental que se obtuvo como resultado de combinar dos indicadores dinámicos (coberturas de suelo y suelo) y uno de tipo estático (pendiente del terreno), aportaron la información necesaria para asignar los valores de número de curva (NC) que fueron utilizados para generar los diferentes escenarios de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas, considerando diferentes eventos de lluvia sintética que fueron establecidos con el P99.

En el campo de la hidrología aplicada, el proceso de infiltración de los suelos corresponde a la variable con mayor dificultad para su evaluación. En este estudio, este factor se obtuvo utilizando el grupo hidrológico (GH) de los suelos. Este valor hidrológico, se integra por los tipos: "A" (máxima infiltración), "B" (moderada infiltración), "C" (baja infiltración) y "D" (nula infiltración), los cuales, establecen la capacidad de permeabilidad de los suelos a partir de sus características físicas, como la textura y el tipo de suelo. En la siguiente Tabla (4), se muestran los valores de número de curva asignados a cada cobertura de suelo por grupo hidrológico (GH). Aunque, los cuerpos de agua no corresponden a una cobertura de suelo se incluyen en el estudio, ya que forman parte de la dinámica hidrológica de las cuencas.

Considerando, la información que proporciona el número de curva (0=mínimo escurrimiento; 100=máximo escurrimiento), se establece que las coberturas de tipo natural presentan mayor capacidad de infiltración que los suelos con coberturas no-

naturales. Particularmente, esta condición se observa en los bosques, los cuales, muestran los valores más bajos en todos sus grupos hidrológicos (mayor capacidad de infiltración), en relación con la cobertura agrícola donde los valores son prácticamente del doble. Como parte del resultado del factor de cambio, se pudo determinar que la superficie de la cobertura “Otra vegetación” mostró un incremento mayor a 1,9000 km², los cuales, están representados por valores “moderados-altos” de número de curva. Es decir, con un potencial significativo para generar escurrimientos superficiales.

Tabla 4. Valores de número de curva asignados a las diferentes coberturas de suelo por grupo hidrológico

ID	Cobertura	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
1	Agrícola	46	60	70	77
2	Urbano	95	95	95	95
3	Bosque	13	31	42	48
4	Cuerpo de agua	100	100	100	100
5	Otra vegetación	55	66	72	92
6	Pastizal	39	47	79	89
7	Selva	30	51	63	70
8	Sin vegetación aparente	72	86	91	94
9	Matorral	50	56	65	73

Después de comparar los valores de superficie de las diferentes coberturas y grupo hidrológico del estado de Chiapas entre los periodos de análisis (1970 – 2016), se pudo establecer que existen cambios significativos en el incremento de las superficies con características hidrológicas del tipo “B” (moderado escurrimiento) y D (nulo escurrimiento) en las coberturas donde existe diferente grado de intervención humana (agrícola, asentamiento humano y otra vegetación), mientras que en las de tipo natural (bosque, matorral y pastizal) se tuvo una reducción en las superficies “B” y “D” principalmente (Tabla 5).

En general, el incremento en los grupos hidrológicos con características “B” y “D” representan un efecto negativo en las cuencas hidrológicas, debido a la pérdida de infiltración de los suelos, ya que la capacidad de estos grupos para regular los

escurrimientos superficiales, está representada por valores de número de curva altos (>50) principalmente en las coberturas agrícola, asentamientos humanos u otra vegetación (Tabla anterior), las cuales mostraron también un importante aumento de su superficie en estos grupos.

Otras superficies constituidas por los bosques y las selvas que representan los suelos con mayor permeabilidad disminuyeron significativamente en prácticamente en todos los grupos hidrológicos, excepto en el grupo tipo “C” correspondiente a la cobertura de selva, donde este incremento es resultado de la pérdida del grupo “B” que contaba con una superficie de 15,826 km² en 1970, mientras que el tipo “C” estaba representado por 665 km² en el mismo periodo. Este nuevo nivel hidrológico (B a C), representa un incremento en el valor de número de curva al pasar de 51 a 63, y con ello, un incremento potencial en la generación de escurrimientos superficiales.

Finalmente, es importante resaltar la importancia de evaluar e identificar la dinámica espacial de los grupos hidrológicos en el territorio chiapaneco, debido a que gran parte de la superficie de este estado presenta una condición hidrológica tipo “C” y “D” con moderada y nula infiltración, y con ello, una mayor vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrológicas y riesgo de inundaciones urbanas.

Tabla 5. Superficie de las coberturas del suelo en el estado de Chiapas entre 1970 - 2016, de acuerdo con el tipo de cobertura y grupo hidrológico.

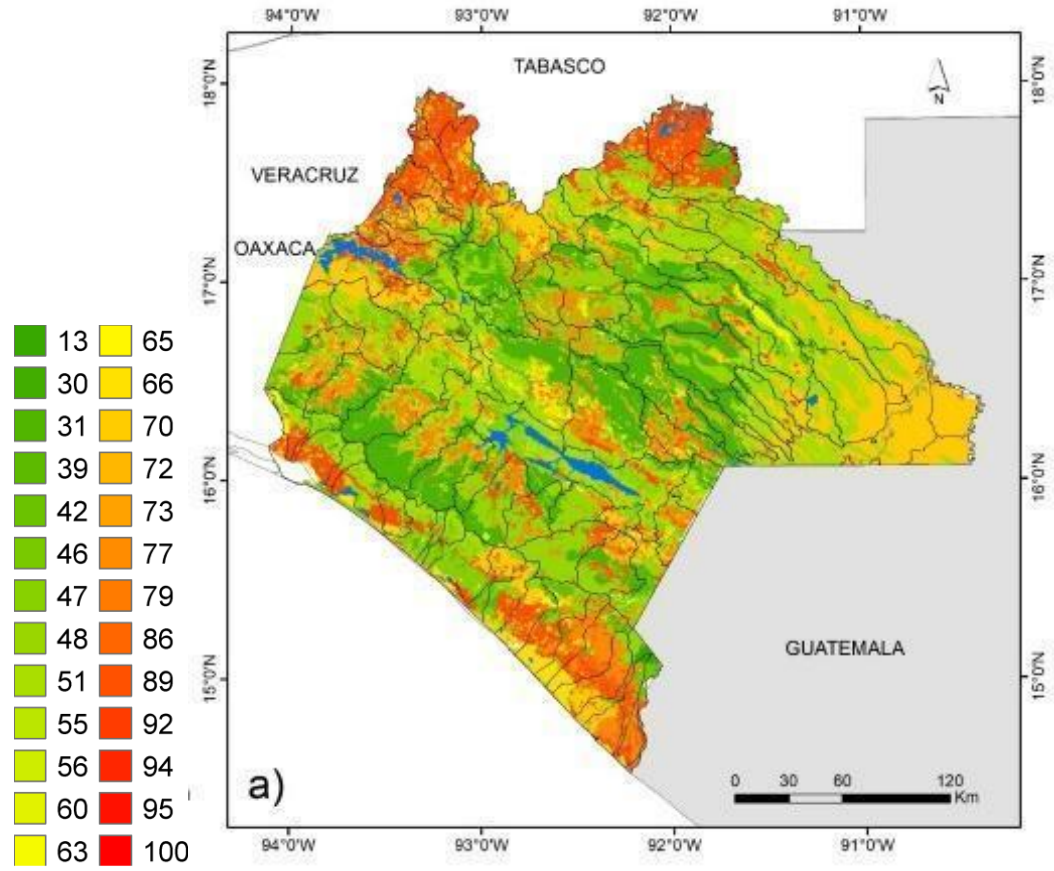
Cobertura (km2)	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Agrícola	-25	2765	375	2323
Asentamiento humano	-1	-1	0	466
Bosque	-39	-1735	-305	-648
Matorral	0	-3	-27	-2
Otra vegetación	756	7607	1495	9246
Pastizal	-740	-4805	-690	-8574
Selva	-62	-2922	2187	-7194
Sin vegetación aparente	3	37	0	15

Como resultado de integrar la información de variables dinámicas, como las coberturas de suelo con sus características físicas representadas por el grupo hidrológico (A, B, C y D) con la pendiente del terreno como variable estática del terreno, se diseñaron los mapas de número de curva (índice de vulnerabilidad) de los periodos 1970 – 2016 (Figura 17).

Los diferentes valores de número de curva representados espacialmente para el territorio chiapaneco, como resultado de consultar información estandarizada, permitió identificar 26 valores que van del 13 al 100. Esto significa que los valores cercanos a 100 muestran las zonas con mayor potencial de inundaciones, debido a la limitada capacidad de los suelos para regular los escurrimientos generados por lluvias intensas y transportados hacia zonas más bajas. Por otro lado, los valores cercanos a 13, indican zonas donde los escurrimientos generados son menores por infiltración y pendiente del terreno.

Con base en la distribución de valores de número de curva, es posible identificar que, en un periodo de 46 años, se presentaron cambios significativos en vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas del estado, debido principalmente a la pérdida de coberturas de tipo natural, tal y como, se analizó en secciones anteriores.

El proceso de transformación, incrementó en gran parte del territorio las áreas con valores de curva mayores a 50 (Figura 17b) en aproximadamente 55,200 km², lo que equivale a un poco más del 75% de la superficie del estado de Chiapas. Este incremento en la vulnerabilidad ambiental, se observa principalmente en las regiones centro, norte y costera del estado, donde existe un mayor potencial de las cuencas para generar escurrimientos superficiales, y con ello, un mayor riesgo de inundaciones e impacto en la población y su economía.



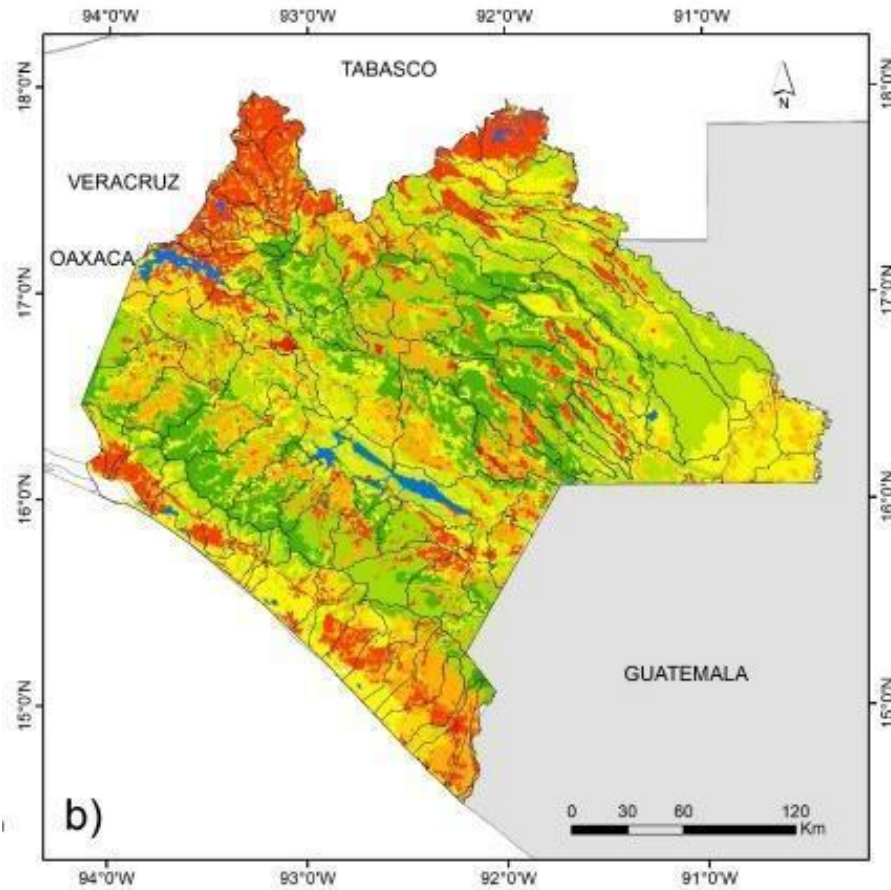


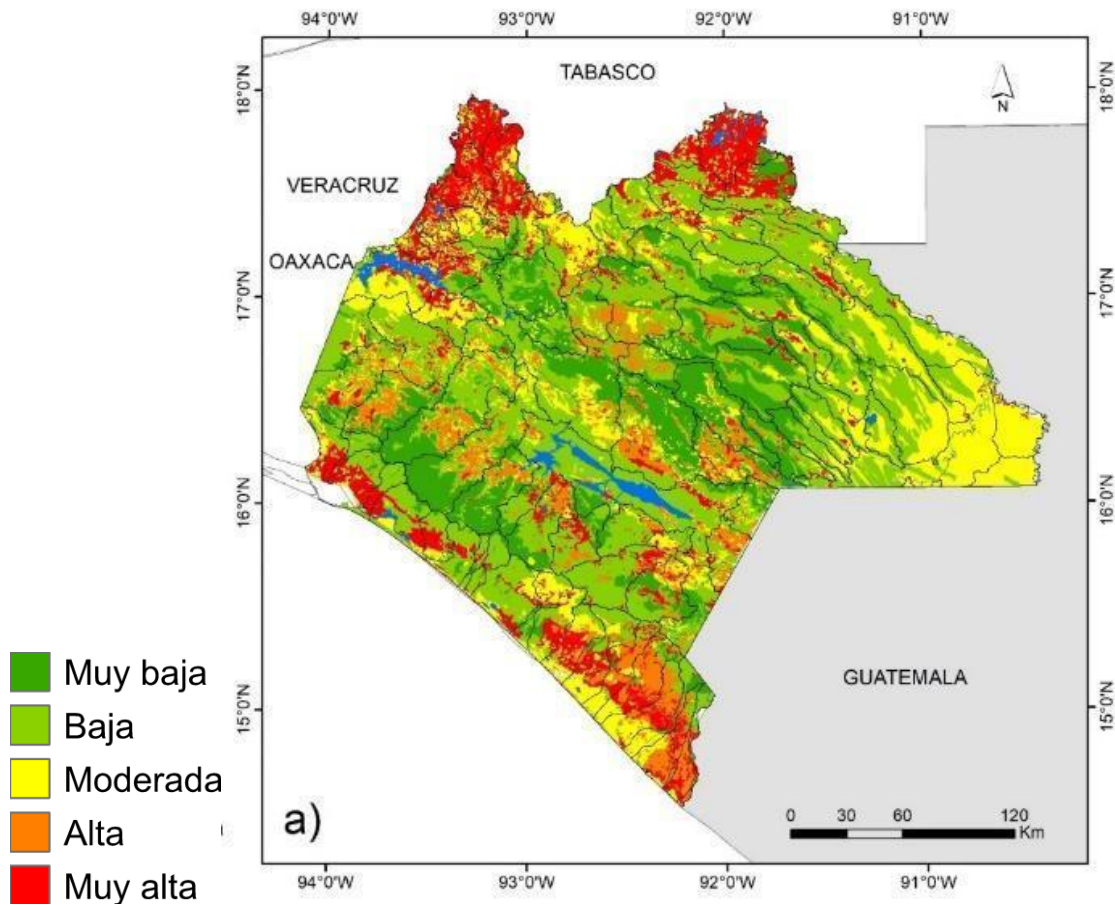
Figura 17. Distribución espacial de valores de número de curva (adimensionales) establecidos para el estado de Chiapas. Periodo 1970 (a) y 2016 (b).

Para una mejor lectura de la dinámica espacial del índice de vulnerabilidad ambiental del estado de Chiapas en el periodo analizado, los valores de número de curva obtenidos se normalizaron (ecuación 6) en cinco clases: 0.0 – 0.2 (Muy baja), 0.2 – 0.4 (Baja), 0.4 – 0.6 (Moderada), 0.6 – 0.8 (Alta) y 0.8 – 1.0 (Muy alta). Estos valores agrupados, permiten identificar de forma práctica las zonas donde los suelos presentan mayor capacidad para generar escurrimientos, debido a su condición hidrológica (Figura 18).

Con base en esta clasificación, los valores menores a 0.4 están representados por suelos más permeables; en valores de 0.4 - 0.6 su capacidad de infiltración es moderada y para mayores a 0.6 predominan las coberturas con mayor potencial de escurrimientos superficiales. De esta forma se identificó que la vulnerabilidad

ambiental se incrementó principalmente en el nivel “moderado”, pasando de 4.4% a 22% entre 1970 y 2016, debido a la pérdida de zonas con nivel “bajo” la cual disminuyó de 40.1% a 29% en el mismo periodo.

En los otros niveles de vulnerabilidad, los cambios observados fueron del orden de 14% y 19.5% de pérdida para el nivel “Muy bajo” y “alto”, así como del 15.5% de incremento para el nivel “muy alto”. Estos valores de vulnerabilidad ambiental, muestran relación con la distribución de registros de inundación en el estado. Aunque, es posible observar zonas con vulnerabilidad ambiental “moderada-muy alta” la frecuencia de inundaciones reportadas es baja o nula, esto podemos relacionarlo principalmente con la menor densidad poblacional expuesta.



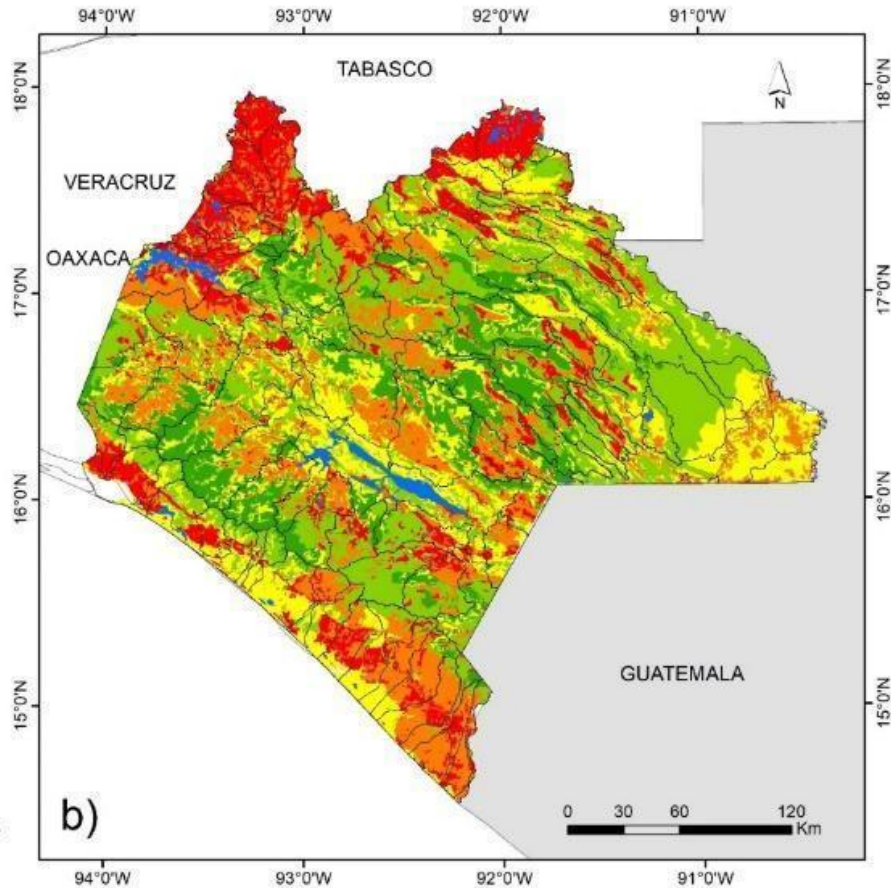


Figura 18. Niveles de Vulnerabilidad ambiental para el estado de Chiapas. Periodo 1970 (a) y 2016 (b).

Con el objetivo de conocer la posible respuesta hidrológica de las cuencas que integran el estado de Chiapas, a partir de su condición de vulnerabilidad ambiental, se utilizaron diferentes intensidades de lluvia (30, 50, 70, 100, 120 y 150 mm) para calcular los escurrimientos superficiales (mm) que podrían ser generados (Figura 19).

El resultado mostró que los suelos con coberturas de tipo natural, representan la mayor capacidad para regular el agua de lluvia capturada por las cuencas para todas las intensidades de lluvia analizadas. Un ejemplo que resalta es la cobertura de bosque, la cual mostró una reducción de escurrimientos superficiales del orden de 50% para lluvias de 50 mm.

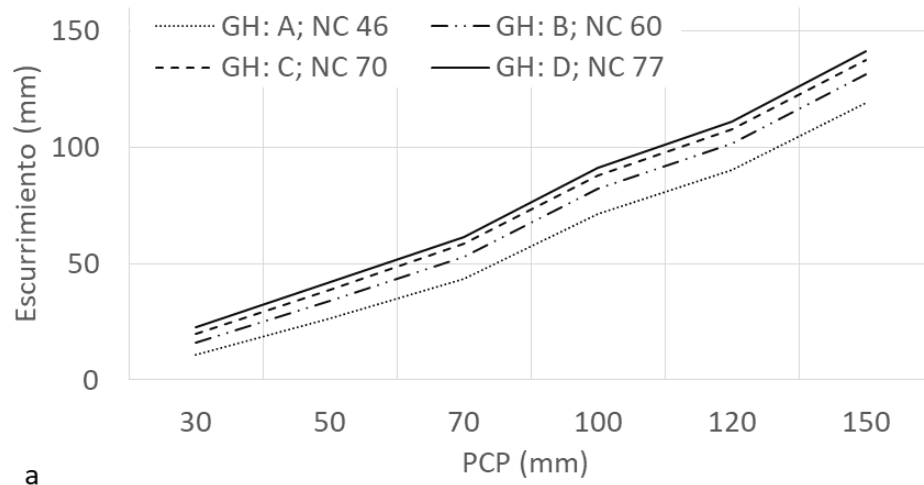
En su tipo hidrológico “A” esta cobertura mostró un porcentaje cercano a 90% en reducción de escurrimientos (Figura 19c). Por otro lado, la cobertura agrícola podría ser capaz de generar escurrimientos de 52% y 80% en su GH tipo “A” y “D” a partir de una intensidad de lluvia de 50 mm. Es decir, la diferencia que existe entre estas coberturas para un mismo evento de lluvia, se pudo establecer en aproximadamente 42% para el grupo hidrológico “A”, el cual, se considera con mayor capacidad de infiltración, mientras que para el tipo “D” fue del orden de 29% en su capacidad de infiltración.

Lo anterior, significa que la pérdida de coberturas de tipo natural, afecta significativamente la dinámica natural de las cuencas hidrológicas, y con ello, una mayor posibilidad de generación de escurrimientos que pueden impactar de forma negativa a la población y economía de las regiones.

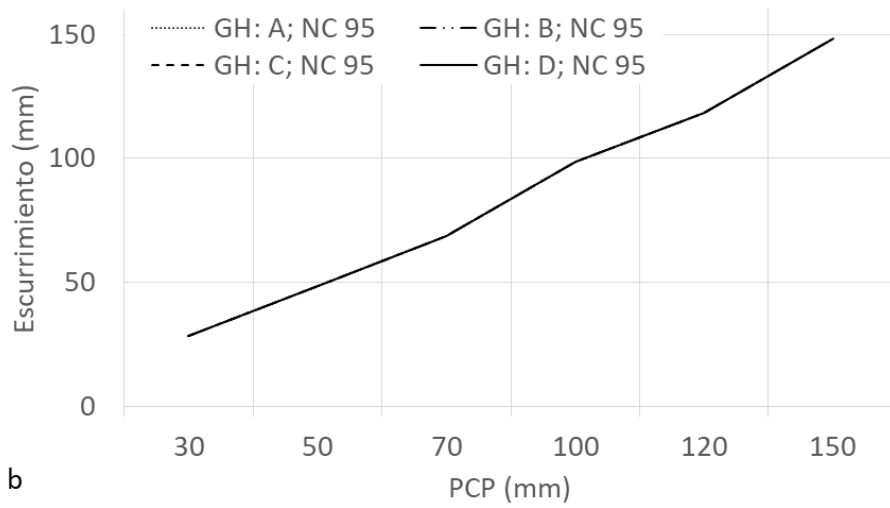
Otras coberturas como la urbana, debido a su superficie impermeable, reduce la capacidad de infiltración en todos sus grupos hidrológicos en más del 95% para cualquier intensidad de lluvia. Por otro lado, la cobertura “otro tipo de vegetación”, la cual, representa la mayor extensión de superficie en el estado mostró un porcentaje de alrededor de 63% y 94% en intensidades de lluvia de 50 mm.

En general, todas las coberturas de suelo, reducen su capacidad de infiltración con intensidades de lluvia mayores. Estos cambios se observan en mayor medida en las coberturas no-naturales (agrícola, asentamientos humanos y otra vegetación), tal y como se observa en la Figura 19a, b y e.

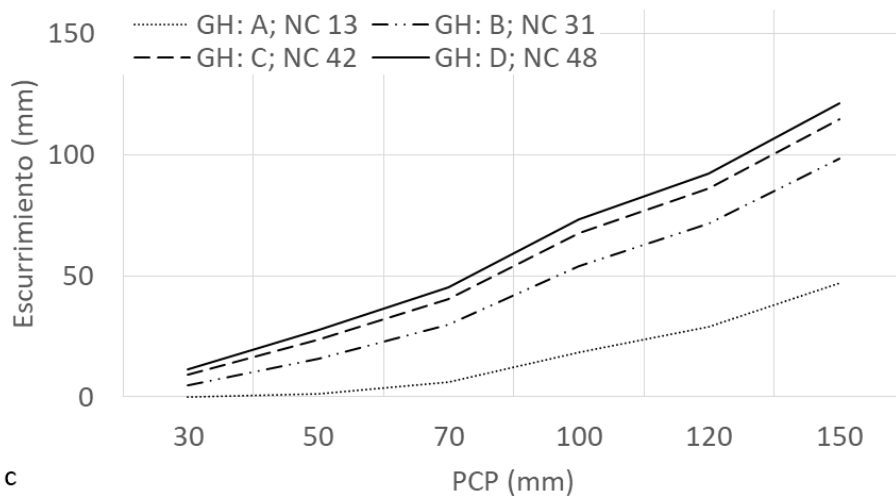
En coberturas de tipo natural, el aumento de escurrimientos se presenta en menor medida. Este método que se utilizó para determinar la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, permitió evaluar la sensibilidad de las diferentes coberturas, y con ello, poder establecer en qué medida diferentes intensidades de lluvia pueden representar un riesgo de inundaciones para alguna región en particular del estado de Chiapas. Sin embargo, es importante incorporar análisis hidrológicos que permitan validar la utilidad de los resultados para áreas locales.



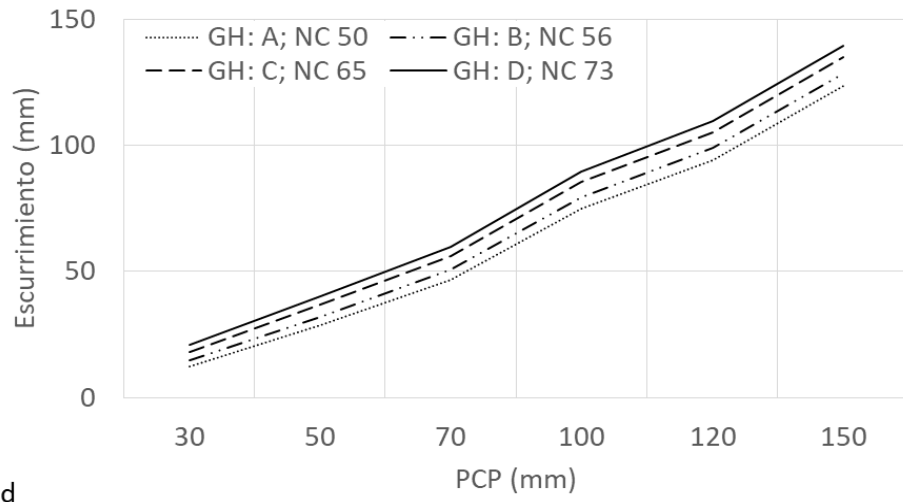
a



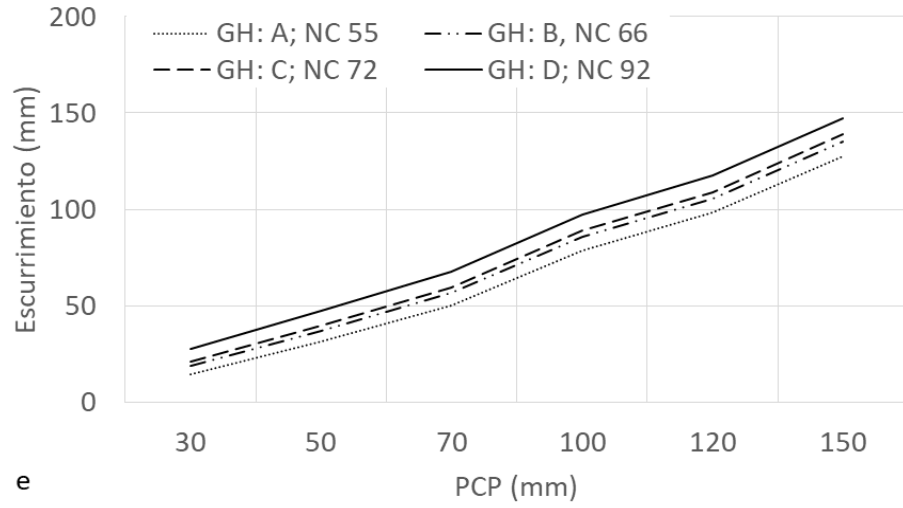
b



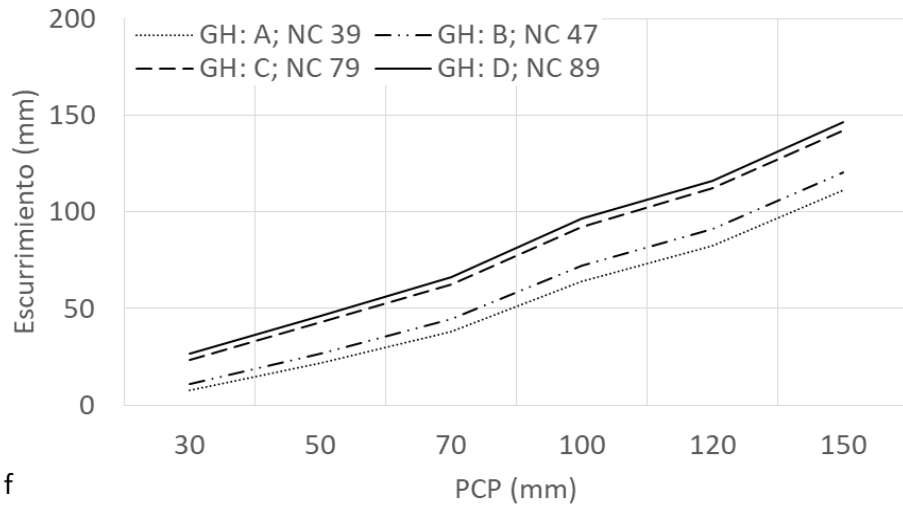
c



d



e



f

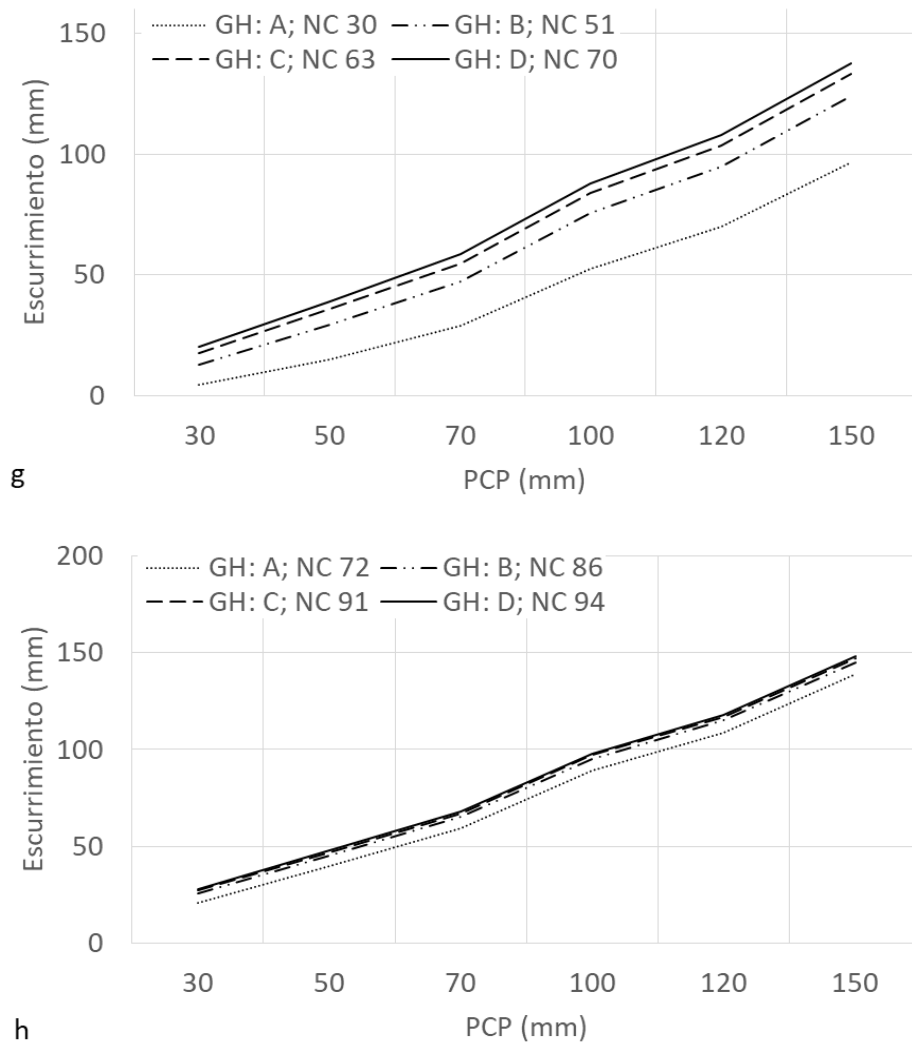


Figura 19. Respuesta hidrológica de las coberturas de suelo del estado de Chiapas, a partir de su grupo hidrológico (GH) y número de curva (NC) para diferentes intensidades de lluvia (PCP en mm). Agrícola (a), Asentamiento urbano (b), Bosques (c), Matorral (d), Otra vegetación (e), Pastizal (f), Selvas (g) y Sin vegetación aparente (h).

3.5.- Escenarios de riesgo de inundaciones: Periodo 1970 - 2016

Uno de los objetivos del análisis del riesgo de inundaciones, es examinar las variables de peligro por lluvias intensas y la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, a fin de identificar zonas con mayor potencial de ser afectadas por una posible inundación. También busca identificar en qué medida el peligro o la vulnerabilidad de forma independiente o combinada contribuyen con un mayor nivel de riesgo de inundaciones.

La aproximación que se realiza cuando se estudian las inundaciones, permite estimar la distribución espacial de valores de riesgo sobre un territorio. Esta evaluación, es utilizada comúnmente para desarrollar herramientas para la toma de decisiones, dentro de un contexto de prevención y mitigación del riesgo. Debido a la frecuencia y magnitud de los desastres relacionados con inundaciones en diferentes regiones de México y del mundo, se han desarrollado metodologías que buscan reducir su impacto en la población y en la economía donde la frecuencia es mayor. Por lo cual, cualquier esfuerzo realizado para tratar de entender no sólo la dinámica de las lluvias intensas sino el contexto de vulnerabilidad en que se presentan las inundaciones, constituye un gran aporte en el estudio y conocimiento de los riesgos de desastres por inundaciones urbanas (Neri & Magaña 2016; Zúñiga & Magaña 2018).

En este estudio, se determinaron valores de peligro por lluvias intensas como resultado de evaluar su dinámica. El percentil 99 (P99) como indicador de probabilidad, permitió establecer que, gran parte de los registros de desastres por inundaciones en el estado de Chiapas, pueden asociarse con intensidades de lluvia mayores a 50 mm/d (Tabla 3).

A partir de estos resultados, se diseñaron cuatro capas vectoriales de lluvia sintética (30, 50, 70 y 100 mm) para evaluar el comportamiento de los escurrimientos en las cuencas hidrológicas, para los periodos analizados: 1970 y 2016. Por otro lado, se determinó la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas para establecer la capacidad de los suelos al regular los escurrimientos superficiales, considerando el proceso de cambio de uso de suelo.

Como resultado de combinar estas variables (peligro y vulnerabilidad), se diseñaron cuatro diferentes escenarios de posible generación de escurrimientos, con el objetivo de identificar niveles de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas (Figuras 20 y 21).

Aunque el peligro por lluvias intensas representa una variable importante en el análisis del riesgo de inundaciones urbanas, por su contribución con la intensidad

de lluvia que puede detonar un desbordamiento de ríos e inundación, en este estudio, se analizó con mayor detalle la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas, debido a que este elemento del riesgo contribuye con el aumento de escurrimientos en la medida que las coberturas naturales del suelo disminuyen, al mismo tiempo, que es la única variable que puede ser intervenida dentro de un esquema de gestión de riesgo que busque prevenir impactos futuros en las zonas urbanas. Como resultado de aplicar la ecuación del número de curva (ecuación 5) se identificaron las áreas con mayor potencial de inundaciones a partir de los escurrimientos generados por las diferentes intensidades de peligro sobre las cuencas hidrológicas del estado.

Es importante mencionar, que la escala de colores utilizada para representar los diferentes niveles de riesgo de inundación para el estado de Chiapas (Figuras 20 y 21), es resultado de clasificar los valores de escurrimiento en cinco categorías: “Muy bajo”, “Bajo”, “Moderado”, “Alto” y “Muy alto”, lo que permite una mejor visualización de las zonas con mayor sensibilidad a las intensidades de lluvia.

En esta investigación, el objetivo de utilizar lluvias sintéticas para diseñar escenarios de riesgo correspondientes a 30mm (Figuras 20a y 21a), 50mm (Figuras 20b y 21b), 70 mm (Figuras 20c y 21c) y 100 mm (Figuras 20d y 21d), fue mostrar el comportamiento de las cuencas hidrológicas en todo el territorio. De esta forma, se logró identificar que entre menor sea la intensidad de lluvia, la capacidad de las cuencas hidrológicas es mayor para regular los escurrimientos superficiales, sin embargo, para intensidades mayores (por ejemplo, 50 mm) esta capacidad hidrológica se reduce significativamente, tal y como se explica en la sección 3.4: índice de vulnerabilidad ambiental.

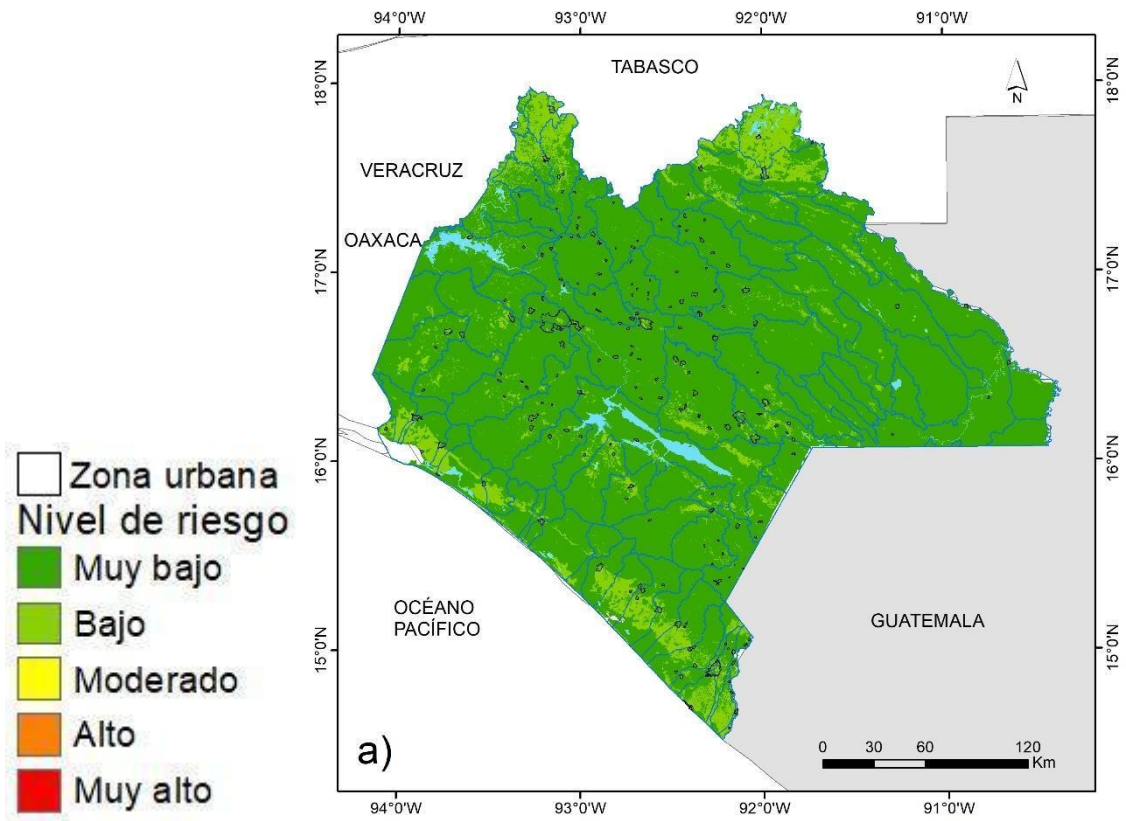
Con base en el análisis realizado para el periodo 1970, se pudo observar que la distribución de valores de riesgo de inundación se incrementó en sus diferentes niveles en gran parte del estado, aunque también es posible identificar zonas donde el riesgo presentó cambios menores. Este aumento en el riesgo en algunas regiones, mostró estar asociado con el incremento del peligro cuando los valores de lluvia intensa son $\geq 50\text{mm}$ (Figuras 20b, c y d). Esta condición de peligro,

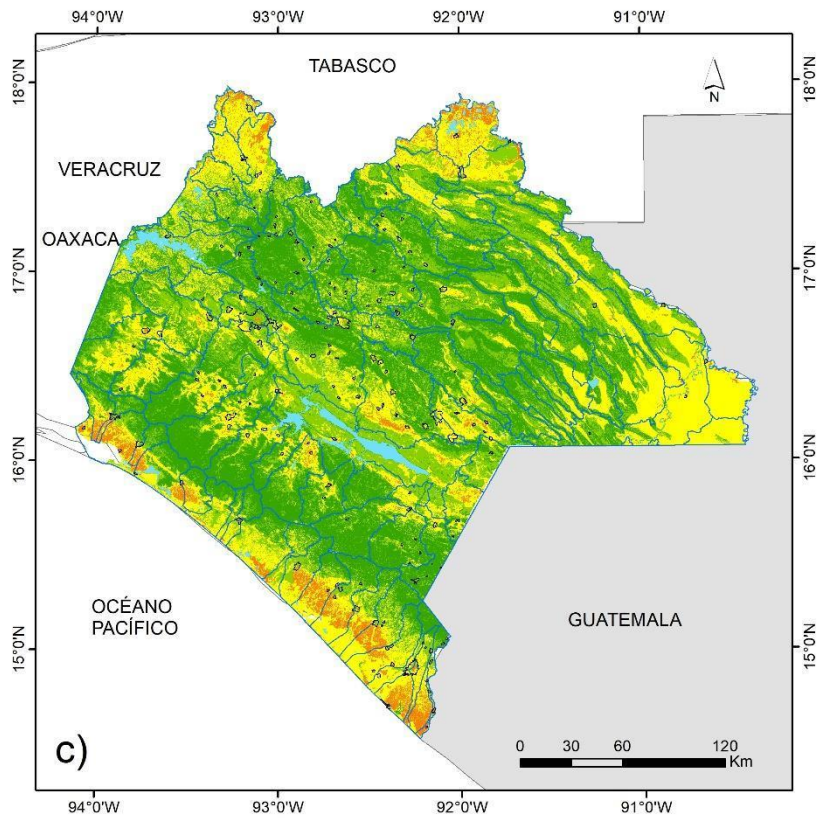
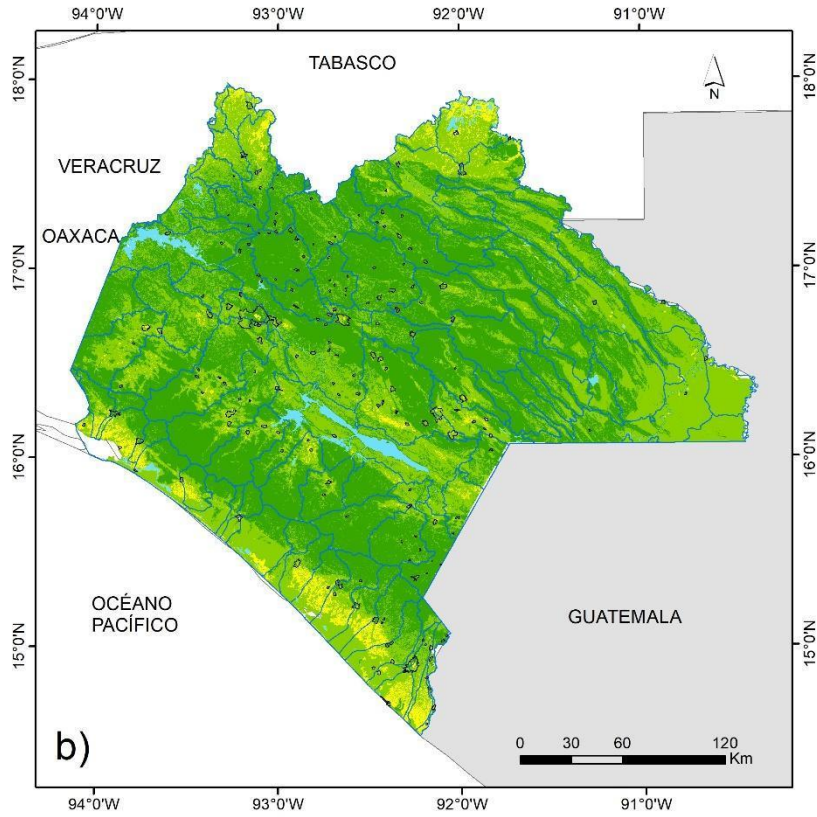
corresponde con el valor obtenido del análisis y comparación de registros de inundación con datos de lluvia diaria de las estaciones climatológicas, el cual se obtuvo a partir del cálculo del percentil 99 (P99) utilizado para caracterizar el peligro por lluvias intensas. De esta forma, se puede establecer, que, a partir de esta intensidad de lluvia, el potencial de inundaciones para el estado es mayor en gran parte de su territorio.

De suma importancia significa identificar espacialmente las zonas urbanas que pueden ser afectadas por una inundación, con base en la combinación de variables utilizadas para este trabajo. Se agregaron 188 localidades urbanas, para identificar su relación con el nivel de riesgo en las cuencas hidrológicas. En el resultado se observó que 40% de estas urbanizaciones (zona centro norte) se encontraban en cuencas con niveles de riesgo muy bajo, mientras que el 60% restante se localizaba en niveles de riesgo bajo, para un escenario de lluvia de 30 mm (Figura 20a), mientras que para intensidades entre 30mm y 50mm más del 60% estaba representada por nivel de riesgo moderado (Figura 20b). Para valores mayores a 50 mm y menores que 100 mm, dominan los niveles de riesgo alto en la región costera y centro, al mismo tiempo, que es posible observar que las cuencas concentran las zonas urbanas con mayor área (Figura 20c). Finalmente, el escenario con intensidades de 100mm mostró que la totalidad de zonas urbanas presentan riesgo muy alto, incluyendo las localizadas en la región centro-norte que mostraron niveles de riesgo muy bajo para 30 mm (Figura 20d).

Indudablemente, en la medida que la intensidad de lluvia se incrementó en los escenarios de riesgo de inundaciones, la respuesta hidrológica en las cuencas fue menor. Sin embargo, esta condición es afectada en la medida que la degradación de las cuencas aumenta, debido a cambios en la cobertura del suelo. Esta situación, se observó en la región centro, donde las cuencas mostraron mayor eficiencia para regular los escurrimientos que en otras, debido a su condición de vulnerabilidad ambiental (Figura 18). Para intensidades mayores a 50mm, el nivel de riesgo de inundaciones aumentó en gran parte del estado, lo que se alinea con los registros

de inundación analizados, incluyendo las cuencas con menor nivel de vulnerabilidad ambiental.





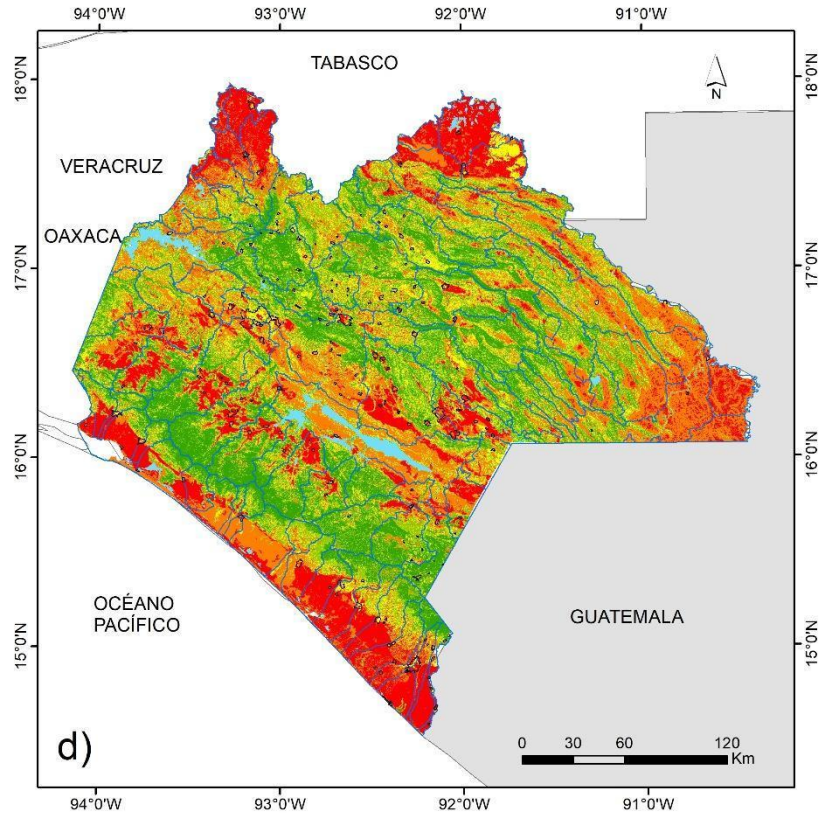


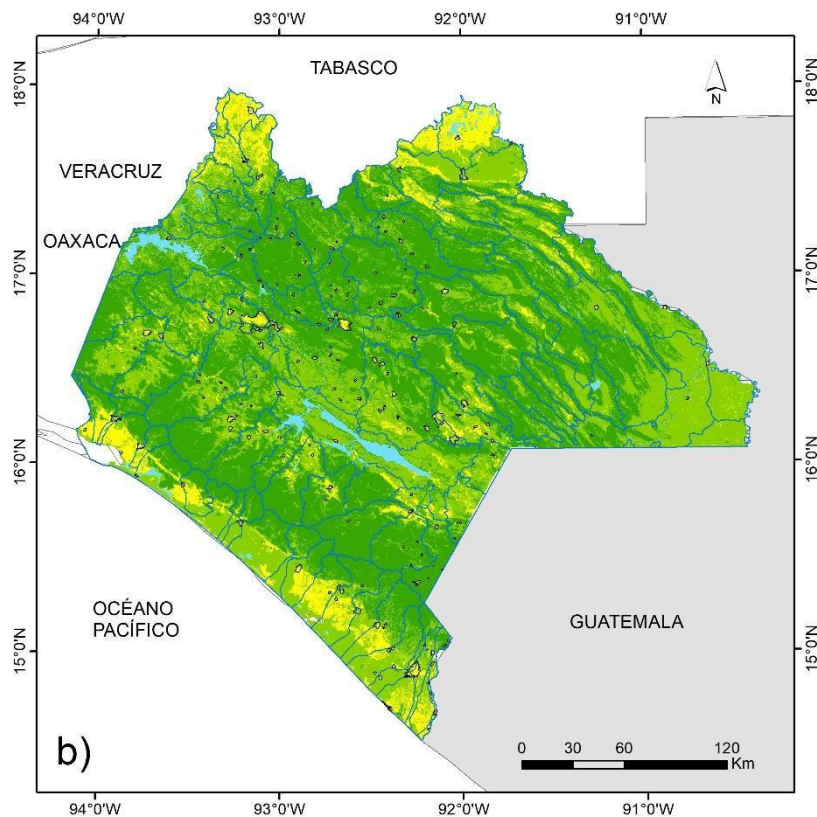
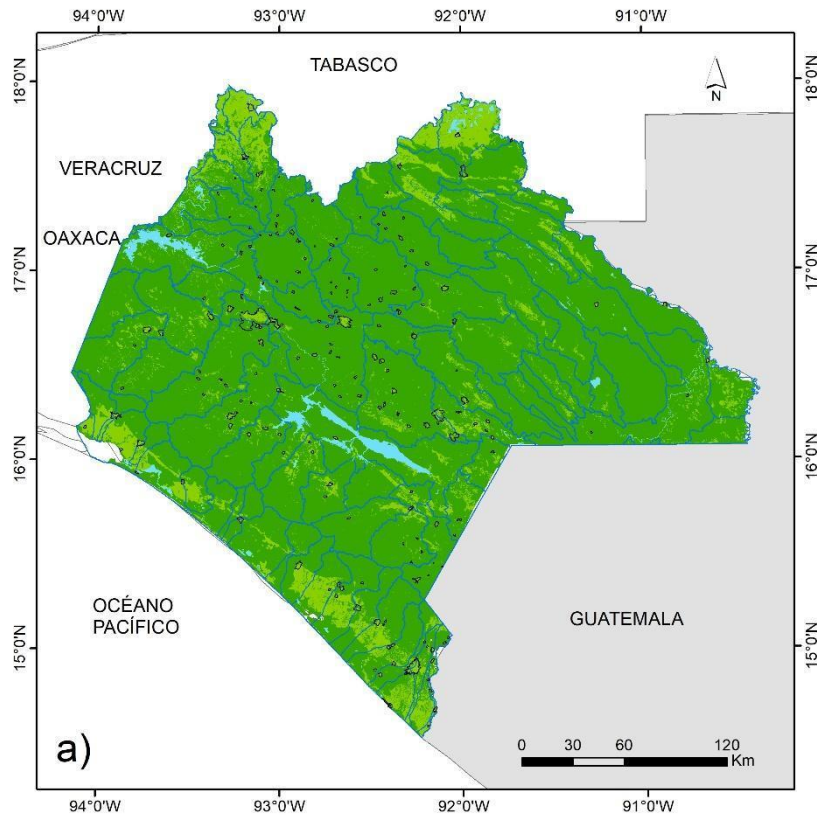
Figura 20. Distribución de valores de riesgo de inundación. Intensidades: a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Periodo 1970.

A partir de la pérdida de cobertura de suelo natural y su impacto en los diferentes grupos hidrológicos entre 1970 y 2016, el cambio en los escurrimientos superficiales y el nivel de riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas, aumentó significativamente con intensidades de lluvia superiores a 50 mm, tal y como, se menciona en el párrafo anterior. En general, la distribución espacial de las cuencas hidrológicas con mayor potencial de inundación para el estado de Chiapas, presentan un comportamiento similar al observado para el periodo 1970 (Figura 20), sin embargo, los niveles de riesgo asociados a estas cuencas se incrementaron, y con ello, el riesgo de inundaciones con mayor magnitud para el periodo 2016 (Figura 21). Este incremento, muestra una alta correspondencia con la distribución de registros de inundación para el estado (Figura 21) durante los años 1970 – 2016, permitiendo establecer que el análisis de riesgo realizado, permite localizar y reproducir eficientemente la distribución espacial de zonas con mayor potencial de

inundaciones, como resultado del aumento en la vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas y el umbral de peligro asociado con una mayor frecuencia de desastres. Este resultado, también refleja la sensibilidad de las cuencas antes eventos de lluvia intensa, en las regiones donde se localizan el sistema de presas del estado (La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas), las cuales, en diferentes momentos históricos, han sido sobrepasadas sus límites hidráulicos contribuyendo con el riesgo y los desastres asociados a inundaciones en el estado de Tabasco.

Como parte del análisis de los escenarios de riesgo de inundaciones y sus posibles efectos en zonas urbanas, durante este periodo 2016 más del 80% de estas poblaciones mostraron nivel de riesgo bajo (Figura 21a), aumentando 20% respecto a lo observado para 1970 (Figura 20a). Lo que indica un incremento del nivel de vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrológicas para esta intensidad de lluvia (30mm). Para intensidades de 50 mm, aproximadamente 80% de las zonas urbanas mostró niveles de riesgo moderado, no sólo como valor, sino que también gran parte de su superficie urbanizada está representada por este nivel de riesgo (Figura 21b). Los escenarios mayores a 50mm (Figura 21c y d), mostraron dominio de niveles de riesgo alto y muy alto, respectivamente para porcentajes mayores a 86% de zonas urbanas. Estos niveles, aumentaron en aproximadamente 20% respecto a 1970.

Este comportamiento observado en los niveles de riesgo para 2016 responde a la misma condición de vulnerabilidad ambiental de las cuencas hidrológicas mostrada para 1970, aunque con un mayor nivel, debido al proceso de transformación del territorio en 46 años. Por lo cual, la distribución espacial del riesgo mostró cambios significativos en para los diferentes niveles de riesgo y, su posible efecto negativo en las poblaciones urbanas.



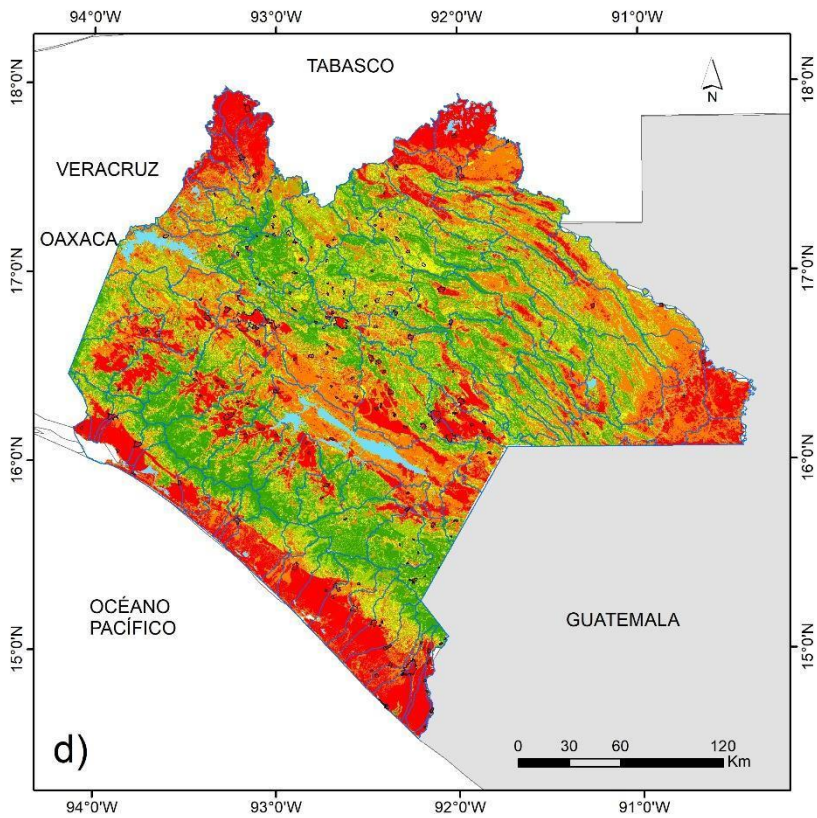
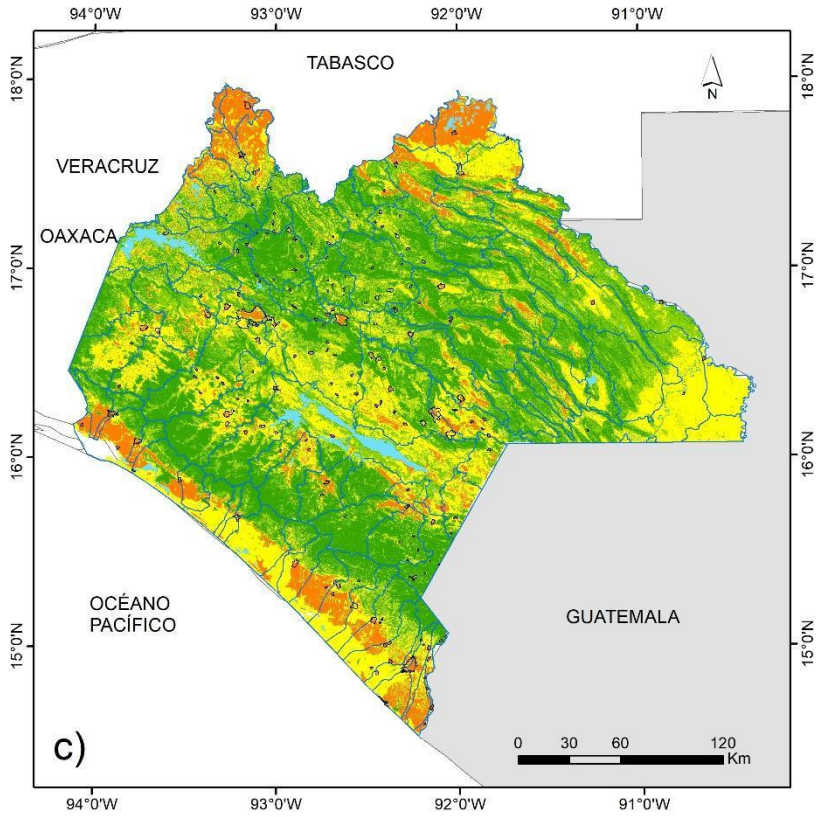


Figura 21. Distribución de valores de riesgo de inundación .Intensidad: a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Periodo 2016.

Debido a la importancia que representa conocer la dinámica de cambio en el nivel de riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas, el cálculo de factor de cambio realizado entre los periodos 1970 y 2016, mostró la evolución de la superficie en riesgo a partir de las diferentes intensidades de lluvia utilizadas para el análisis (Tabla 6). Es decir, entre mayor sea la intensidad de lluvia, la sensibilidad de los suelos en las cuencas hidrológicas para regular los escurrimientos será menor, y con ello, un incremento del riesgo de inundaciones por aumento de escurrimientos superficiales. Este incremento en las superficies con mayor nivel de riesgo también es resultado del proceso de transformación del territorio que ha contribuido con un mayor nivel de vulnerabilidad ambiental.

Con base en los resultados, se establece que las áreas con riesgo “muy bajo” han disminuido significativamente para todas las intensidades de lluvia, lo que significa, que actualmente existen cuencas con mayor potencial para generar escurrimientos que en 1970 (20a y 21a). Por otro lado, con intensidades de 50 mm, predominan los valores moderados de riesgo (21b), mientras que los niveles de riesgo “alto” y “muy alto” mostraron mayor predominio espacial en gran parte del territorio chiapaneco, con intensidades de 100 mm (21d).

Tabla 6. Factor de cambio (km2) en los niveles de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas entre el periodo 1970 – 2016, para diferentes intensidades de lluvia.

Nivel de riesgo	30mm	50mm	70mm	100mm
Muy bajo	-1104.5	-4472.6	-2870.4	-1015.6
Bajo	1125.8	-169.2	-1481.0	-1854.8
Moderado		4663.2	-290.5	-1409.5
Alto			4663.3	1345.0
Muy alto				2956.3

3.6.- Evaluación del índice de riesgo (caso de estudio)

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del modelo de riesgo desarrollado, se realizó el cálculo de las zonas con mayor potencial de inundaciones, utilizando información de lluvia acumulada entre los días 01 – 04 de octubre de 2020, durante los cuales la Tormenta Tropical Gamma, afectó gran parte del territorio chiapaneco. Este fenómeno atmosférico tuvo un impacto espacial en prácticamente todo el estado, afectando un total de 107 municipios de 123 que integran el estado de Chiapas.

La información de intensidad de lluvia que se obtuvo del repositorio de datos PERSIAN, permite observar que en las regiones norte, sureste y sur (costa) del estado se presentaron las mayores acumulaciones de lluvia (Figura 22a). En algunas regiones del centro, también se observan núcleos de lluvia intensa muy importantes, ya que en esta zona se concentra la mayor densidad de población de Chiapas. Aunque, existen valores de lluvia que podrían considerarse no-intensos (<10 mm), existe intensidades mayores a 26 mm que corresponden con el Percentil calculado (P99) como umbral mínimo de lluvia intensa a partir de la cual se asocia la frecuencia de inundaciones urbanas registradas, durante el periodo de análisis.

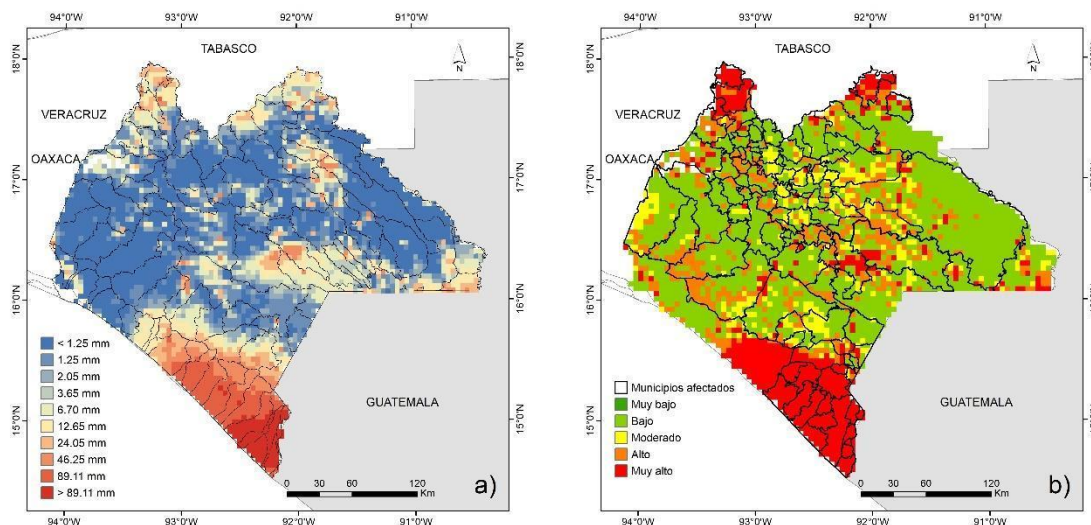


Figura 22. Distribución de valores de lluvia acumulados (mm), asociados con la Tormenta Tropical Gamma (1-4-octubre-2020) (a). Niveles de riesgo de inundaciones, como resultado de integrar la vulnerabilidad del periodo 2016 y los valores de lluvia de la Tormenta Tropical Gamma (b).

La distribución de valores de riesgo potencial de inundaciones urbanas, fue obtenida como resultado de combinar información de vulnerabilidad ambiental y peligro, permitió identificar las regiones donde el riesgo sería mayor. Aunque, la distribución de valores de lluvia, representa un importante modulador en las inundaciones, es posible observar que, la condición ambiental de las cuencas hidrológicas representa un factor importante en el nivel de riesgo. Esta condición se puede observar en gran parte del estado, por ejemplo, en la región central del estado, donde el patrón de lluvias es limitado espacialmente, la respuesta hidrológica de las cuencas, debido a su nivel de vulnerabilidad (moderado a muy alto) representó un factor para que el nivel del riesgo para esta región sea mayor en superficie.

En la región costera (sureste), es posible observar que los valores de lluvia que se extienden hacia el norte y oeste, son atenuados por una mejor condición de vulnerabilidad, mientras que los más cercanos hacia el océano, son resultado de los altos niveles de vulnerabilidad y peligro. Por lo que, el efecto de la vulnerabilidad en las cuencas hidrológicas, permite establecer que aún bajo condiciones de peligro, el nivel de riesgo puede ser menor (Figura 22b).

Con base en los resultados obtenidos, podemos decir que el modelo de riesgo de inundaciones propuesto, mostró una efectividad superior al 85% para identificar las zonas con registro de inundaciones, asociadas con la TT Gamma. Al mismo tiempo, determina otras zonas potenciales de inundación, las cuales no tuvieron impacto severo, por lo cual, no fueron consideradas como zonas de desastre. El 15% restante no identificado, se localizó en la región suroeste del estado, donde la información de PERSIANN no registró información de lluvia, lo que dificultó, el análisis puntual del modelo.

CONCLUSIONES

Debido a la frecuencia y magnitud de las inundaciones en el estado de Chiapas, actualmente, se considera una de las cuatro regiones de México con mayor número de eventos registrados en los últimos 46 años (DesInventar, 2013; CENAPRED, 2020; FONDEN, 2016). Generalmente, la tendencia en el número de inundaciones se atribuye a la dinámica de las lluvias intensas, las cuales, en esta región son resultado de la actividad ciclónica.

En diversos estudios (Zúñiga *et al* 2020), el efecto de las lluvias intensas, puede considerarse como un elemento modulador del riesgo de inundaciones, sin embargo, en los últimos años, el estudio de la vulnerabilidad ambiental en estudio de riesgos, ha mostrado ser un componente importante en la dinámica actual de las inundaciones en México, principalmente en las regiones costeras, donde el efecto del cambio de uso de suelo ha mostrado mayor impacto en los ecosistemas terrestres (Mas *et al*, 2004; Pérez, 2002). En este sentido, el cambio de cobertura natural del suelo en las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas, durante el periodo de análisis (1970-2016) mostró una alta correspondencia con los municipios donde la frecuencia de eventos de inundación es mayor (DesInventar, 2015; CENAPRED, 2020; FONDEN, 2015).

Esta condición de vulnerabilidad ambiental, se observó principalmente en las regiones costeras y centro-norte del estado donde el porcentaje de degradación de las cuencas es mayor a 50%, debido al aumento de coberturas menos permeables como la agrícola y urbana, las cuales, han conducido a un incremento de escurrimientos mayor a 50% y hasta 90% respecto a coberturas de naturales con grupo hidrológico "A" (Figura 19). Este proceso de fragmentación de los ecosistemas naturales, se presenta en gran parte del estado. Esta condición, no sólo puede asociarse con las inundaciones en Chiapas, sino que posiblemente contribuye con los escurrimientos e inundaciones que ocurren en el estado de Tabasco, debido al gran volumen de agua que conducen los ríos Grijalva y Usumacinta, los cuales, en su recorrido por el estado de Chiapas, son controlados

y regulados por un sistema de presas (La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas).

Por otro lado, cuando se analiza el peligro como elemento del riesgo, generalmente se asocian un valor de lluvia intensa para representar a las inundaciones. Sin embargo, el análisis realizado a este elemento modulador del riesgo, mostró que espacialmente son diferentes las intensidades de lluvia que favorecen un mayor nivel de riesgo de inundaciones en el estado.

El análisis asociativo de eventos de lluvia vs registros de inundaciones, permitió identificar como unidad de magnitud el percentil 99 (P99) para representar las intensidades de lluvia, las cuales, van de 20 mm/d hasta 130 mm/d (Tabla 3). También fue posible identificar (Figura 16) que existen municipios con alta frecuencia de inundaciones con intensidades de lluvia “moderada-baja”, y otros municipios donde los desastres registrados son menos frecuentes, aunque las intensidades de lluvia corresponden a valores de P99 mayores.

Para evaluar en qué medida la vulnerabilidad ambiental y el peligro contribuyen con el nivel de riesgo en el estado de Chiapas, el método de número de curva (NC) se utilizó para cuantificar la relación que existe que puede existir entre el incremento de escurrimientos asociados con intensidades de lluvia con la degradación de las cuencas hidrológicas por cambio de cobertura de suelo.

Los resultados logrados fueron ajustados considerando la orografía del territorio, debido a su importancia como elemento que contribuye con el potencial para infiltrar y conducir los escurrimientos superficiales. Los resultados mostraron diferentes niveles de sensibilidad para las cuencas hidrológicas (Figura 17a y 17b) y diferentes niveles de riesgo de inundaciones (Figuras 20 y 21 a, b, c y d) cuando se combinó información de vulnerabilidad ambiental (Figuras 18 a, b) con valores de intensidad de lluvia (30mm, 50mm, 70mm y 100mm) para los periodos 1970 y 2016, al mismo tiempo, que permitió identificar las zonas con mayor cambio en los niveles de riesgo. Estas zonas, mostraron estar asociadas espacial y temporalmente con la pérdida de coberturas naturales (Figura 15), por lo cual, es posible establecer que

efectivamente existe una relación entre la vulnerabilidad ambiental determinada a partir del porcentaje de degradación de las cuencas hidrológicas con el nivel de riesgo de inundaciones y el umbral de lluvia.

El desarrollo de escenarios de riesgo, pone en evidencia cómo el efecto del cambio de uso de suelo genera mayor vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones, al mismo tiempo que, muestra que no necesariamente la existencia de zonas urbanas representa un mayor nivel de riesgo, ya que en 20% de las cuencas donde no se localizaron zonas urbanas, los niveles de riesgo también se incrementaron. Esta situación, está relacionada con el desarrollo económico de la región (agricultura) y a la deforestación. De esta forma, esta propuesta puede contribuir con estudios de planeación del territorio con base en la dinámica de los escurrimientos generados combinando la vulnerabilidad ambiental y el peligro por lluvias intensas.

Por lo que, el diseño de escenarios de riesgo, basados en los cambios ambientales de las cuencas hidrológicas, constituye una herramienta dinámica que permite analizar el riesgo de inundaciones bajo un contexto multifactorial representado por la importancia de preservar y conservar los servicios ambientales que proveen las cuencas hidrológicas como reguladoras de escurrimientos superficiales.

Una parte importante cuando se propone un modelo, corresponde a su validación, la cual, en este caso fue del tipo determinística, ya que se utilizaron datos observados. El resultado mostró una eficiencia espacial del 85% para caracterizar de zonas potenciales de inundación (ZPI) y mayor a 75% para representar niveles de riesgo de inundaciones, para un evento de gran magnitud como la Tormenta Tropical Gamma). Sin embargo, es necesario considerar otros elementos ambientales y antrópicos que no fueron utilizados en el estudio (muestreo en campo, densidad de la vegetación natural, profundidad de suelos, deforestación, etc.), con el objetivo de mejorar la resolución espacial de los resultados y, reducir su incertidumbre espacial, y con ello, obtener mayor precisión en las zonas urbanas.

Finalmente, el desarrollo de un modelo de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas, no sólo permitió comparar dos periodos de tiempo (1970-2016), sino que permitió identificar espacialmente la dinámica del riesgo como resultado de combinar diferentes intensidades de lluvia con el efecto del cambio de cobertura de suelo en las cuencas hidrológicas. Por lo que, este trabajo representa un esfuerzo que busca contribuir con la gestión del territorio para la toma de decisiones enfocadas a reducir el impacto de las inundaciones.

REFERENCIAS

Abdulkareem, J. H., Sulaiman, W. N. A., Pradhan, B., & Jamil, N. R. (2018). Relationship between design floods and land use land cover (LULC) changes in a tropical complex catchment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(14), 1-17.

Aparicio, F. (2008). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.

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.

Bisht, D. S., Chatterjee, C., Kalakoti, S., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. *Natural Hazards*, 84(2), 749-776.

Cardona. O. (2003) La necesidad de representar 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, 18p

Cenapred (1998-2020) Impacto socioeconómico de los desastres en México 1998-2020. Serie Impactos Socioeconómicos de los Desastres en México, No 1-10, secretaria de Gobernación.

Cenapred (2004), Centro Nacional de Prevención de Desastres, Inundaciones. D.F. México: Secretaría de Gobernación.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010) Estadísticas del Agua en México, edición 2010 16 julio 2020, consultado en <http://conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/CAM2010-16junio2010.pdf>

Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. Hidrología Aplicada; McGraw-Hill: Santafé De Bogotá, Colombia, 1994; ISBN 0-07-010810-2.

CICM (2018) ¿Está México preparado para enfrentar los retos del agua? https://cicm.org.mx/wp-content/files_mf/conferenciaticm30dejulio2018_3m.pdf

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2013. La biodiversidad en Chiapas: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Gobierno del Estado de Chiapas. México.

Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). (2017) Uso de suelo y vegetación. 15 febrero 2021, consultado en <https://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Cruz García Liliana Ernestina (2019). Análisis de obras para mitigar las inundaciones en la ciudad de Tapachula Chiapas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) pp 4-8

Desinventar (2003). Sistema de inventario de desastres para México 5 agosto 2020. Consultado en <https://online.desinventar.org>

DesInventar v6 (2020). Base de datos de desastres. Red de Estudios de Desastres. <https://www.desinventar.org/>

Dirección General de Prevención Civil y Emergencias (2020). Lluvias intensas. Gobierno de España. 10 de agosto de 2021 consultado <http://proteccioncivil.es/coordinación/gestion-de-riesgos/meteorologicos/lluvias-intensas>

El Kateb, H, Zhang, P., & Mosandl, R. (2013), "Soil erosion and slope gradients: a field experiment in Southern Saoni Province, Cina" Catena, 105, 1-10

EM-DAT, 2009. The International disaster database (en línea) Emergency Events Database, Université Catholique de Louvain, Brussels. Centre for search on the epidemiology of disaster (RED).

FAO-UNESCO (1998), Mapa mundial de suelos. Traducción de World soil Resources report 60, Colegio de Posgrados, Montecillos, México

Fondo de Desastres Nacionales, F.O.N.D.E.N., (2000). Sistema Nacional de Protección Civil, México.

Gandini M., and Coauthors (2004). "SCS Curve Number estimation using remote sensing NDVI in a GIS environment". Environ Hydrol. 12, 1-9.

Gaspari, F.J., Rodríguez Vagria, A.M., Delgado, M.I., Sesterra, G.E., & Denegri, G.A. (2011), "Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG" *Multequina*, 20(1),03-13 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.

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*, XXXIX(1), 21-28.

Hernández-Urbe, Rubén Ernesto, Barriga-Piña, Héctor & Ramírez, Aldo I. (2017) análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y ciencias del agua*, 8 (3, 5-25) <http://doi.org/102850/tyca-2017-03-01>

INECC (2007), La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html> Consultado 20 mayo de 2021.

INECC (2020). Sistemas de alerta temprana y reducción de riesgos por inestabilidad de laderas asociados a deforestación y degradación por cambio climático. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/colaboracion-del-inecc-en-proyectos-de-investigacion-286714>

INEGI (1998) Estadísticas Vitales del estado de Chiapas, Cuadro núm. 5. Disponible en:

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825431495/702825431495_2.pdf

Consultado 15 abril de 2021.

INEGI (2009), Anuario estadístico y Geográfico de Chiapas. Disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825201203-1/702825201203-1_1.pdf Consultado 26 abril de 2021.

Lavell A. (2004) Conceptos y nociones relevantes para la gestión del riesgo. La Red de estudios sociales en prevención de desastres. La Red, 10p.

León P. (1996) Natural Disasters. San Diego State University. pp. 293-320

Magaña, J. M. Méndez, R. Morales y C. Millán (2004), "Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático: una visión desde México INE-SEMARNAT, México, pp.203-213

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.

McMahon, M., Valdés, a., Cahill, C., & Jankowska, A. (2011). Análisis de extensionismo Agrícola en México. Paris: Organismo para la Cooperación y el Desarrollo, 1-73

Mendoza, Manuel., Bocco, Gerardo, López Granados, Erna, & Bravo Miguel. (2002.) Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: Una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la Cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. Investigaciones geográficas, (9),92-117. Recuperado en 1 de septiembre de 2020, de [Http://www.scielo.org.mx/scielo.pp?script=sci_arttext&prt=S0188-46112002000300007&lng=es&tlgn=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.pp?script=sci_arttext&prt=S0188-46112002000300007&lng=es&tlgn=es)

Morales Iglesias, Horacio (2019), La heterogeneidad de los paisajes físicos-geográficos y su relación con la riqueza biológica del estado de Chiapas. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM p9-22

Neri, C., and Magaña, V. (2016). Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.

OMM/UNESCO (1974) "Glosario hidrológico Internacional", WMO/OMM/BMO, No 305, Secretaría Organización Meteorológica Mundial, Suiza.

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.

Pérez A. 2012 la integración de la gestión de riesgos de la gestión del desarrollo local desde la perspectiva de la vulnerabilidad ambiental en los territorios DELOS: Desarrollo Local Sostenible, vol. 5, No 13,1-9 (agosto)<http://eumed.net/rev/delos/13/apf.html>

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.

Rodríguez, J, VOS F., BELLOW R. and Guha-SAPIR, D. Anual Disaster Statistical Review 2008, The number and trends, Melin Belgun: Centre for Research of Epidemiology of disasters (CRED) Université Catholique de Lovaina, 2009,33pp

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

Shanableh, A., Al-Ruzouq, R., Yilmaz, A. G., Siddique, M., Merabtene, T., & Imteaz, M. A. (2018). Effects of land cover change on urban floods and rainwater harvesting: a case study in Sharjah, UAE. *Water*, 10(5), 631.

Suhaila, J, & Jemain, A. A. (2012). Spatial analys of daily rainfall intensity and concentration index in Peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1), 235-245.

USDA-NRCS. (2004). *Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall. Natural Resources Conservation Service*. Washington: United States Department of Agriculture. (210-VI-NEH, Jul 2004).

Villarroya, J. P., Farías, H. D., & Amarilla, M. E. (2013). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante SIG y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo.

Zarco A, Espinosa-García, A.C. Y Mazari, M. (2010) Riesgo potencial de las actividades del sector económico sobre la biodiversidad y la salud humana. En H. Cotler (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.* (pp.III-119). México. D. F.: Instituto Nacional de Ecología/ Semarnat/ Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P

Zarco, Espinoza y Mazari, 2010. Dinámicas de las ciudades de México en el siglo XXI (SEGOB) Cap. 3 SEMARNAT 2012. Informe de la situación del medio ambiente a México, compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental edición 2012.

Zúñiga Tovar A. E. (2009). Análisis del riesgo por inundaciones como conveniencia del desbordamiento del río Yautepec, Morales, México.

Zúñiga Tovar A. E. (2017). Incremento de la vulnerabilidad y riesgo ante lluvias intensas en México por cambio en la cobertura del suelo. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México, CDMX. 122 pp.

Zúñiga, E., & Magaña, V. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land uses cover change. *Investigaciones geográficas*, (95).

Zúñiga, E., Magaña, V., & Piña, V. (2020). Effect of Urban Development in Risk of Floods in Veracruz, Mexico. *Geosciences*, 10(10), 402.