



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**MODELO DE PÉRDIDA CATASTRÓFICA
POR INUNDACIÓN Y DAÑOS
CONSECUENCIALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ACTUARIO

P R E S E N T A

ALDO RAÚL RAMOS CASTILLO

Tutora

ACT. JESSICA MONTIEL ZAMBRANO

2013





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1.- Datos del alumno

Ramos

Castillo

Aldo Raúl

56118095

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

303315674

2.- Datos del Tutor

Actuaria

Jessica

Montiel

Zambrano

3.- Sinodal 1

Actuario

Ricardo

Villegas

Azcorra

4.- Sinodal 2

Actuario

Ricardo

Ibarra

Lara

5.- Sinodal 3

Maestro en Economía

Marco Antonio

García

Fernández

6.- Sinodal 4

Doctor en Ciencias Actuariales

José Ramiro

Sánchez

Aguilar

Título

Modelo de pérdida catastrófica por inundación y daños consecuenciales

90 páginas

2013

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, al universo y a la madre tierra por darme lo necesario para mi mayor beneficio y poder concluir mis estudios y por consiguiente mi tesis.

A mis padres por darme la vida, el amor y el apoyo incondicional para lograr mis objetivos y cumplir mis metas, ya que sin esto no lo hubiera podido lograr. Por los valores, los principios y la educación que me inculcaron.

A mi madre Silvia Castillo por todo su amor incondicional, por estar siempre pendiente de mí, por ser ese grandioso ser que Dios me dio, por ser mi amiga, por ser la mujer que más admiro y respeto, por su fortaleza y porque gracias a ella soy lo que soy. Te amo Mami.

A mi padre Raúl Ramos por todo su amor, por enseñarme que trabajando se obtiene lo que uno quiere, por su fortaleza, por enseñarme a respetar y a ganarme las cosas, por ser el mejor padre del mundo al que más admiro y respeto por toda su historia y porque a pesar de la adversidad siempre está firme como un roble. Te amo papá.

A mi hermana Marisol Ramos que siempre ha estado a mi lado brindándome su amor y apoyo incondicional para que yo esté bien y siga adelante en mis estudios, siendo mi ejemplo a seguir por la gran profesionalista y por ser una extraordinaria mujer admirable y de respeto.

A mi cuñado Rodrigo Rivera Gamboa por sus consejos, confianza y apoyo y por lo más importante por amar y hacer feliz a mi hermana. Te quiero cuñado.

A mis tías Elizabeth Castillo y Rosa Castillo por su amor, por procurarme y por su apoyo, las quiero muchísimo.

A mi abuelita, a mis tíos y primos por brindarme su cariño y apoyo.

A mi princesa Aslladeth Aguirre por aparecer en mi vida y darme todo ese amor y apoyo que me impulsó a terminar con éxito mi tesis, por estar junto a mí, por ser mi compañera de ruta en esta nueva etapa, por enseñarme que cuando quieres hacer las cosas las haces, solo es cuestión de decisión. Te amo Princesa.

A la familia Ortega Gallegos por brindarme las facilidades para la elaboración de mi tesis.

Al Act. Jonathan Ortega Gallegos por su amistad, apoyo y aportaciones que me dio para poder lograr este trabajo. Gracias hermano por todo este tiempo, tanto en la facultad como en esta experiencia que vivimos juntos en la creación de nuestras tesis, por todas las desveladas, por todas las

experiencias que vivimos, por estar siempre a mi lado dándome consejos y experiencias de vida. Te quiero mucho amigo, que digo amigo, hermano.

A mi directora de tesis la Act. Jessica Montiel Zambrano por su apoyo y orientación para la realización de este proyecto.

Al Act. José Fabián González Flores por su orientación, conocimiento, material, tiempo y apoyo para la estructura y forma de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por albergarme todo este tiempo y hacerme un profesionalista ético con buenos principios y brindarme los conocimientos suficientes para culminar mi carrera en la grandiosa Facultad de Ciencias.

Finalmente a todas las personas que en algún momento de mi vida influyeron y aportaron tanto conocimiento como apoyo de todo tipo para poder terminar exitosamente mi carrera.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi familia y a todas las personas antes mencionadas, con todo mi amor y esfuerzo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Aldo Raúl Ramos Castillo', written in a cursive style.

Aldo Raúl Ramos Castillo

Índice general

Índice de figuras	I
Índice de cuadros	II
Índice de gráficas.....	III
Introducción.....	1
Capítulo 1. Riesgo de inundación y registros históricos.	4
1.1 Definición del riesgo de inundación.....	4
1.2 Tipología de la inundación	6
1.2.1 Precipitación.....	7
1.2.2 Oleaje	10
1.2.3 Marea de tormenta.....	12
1.3 Clasificación por su origen	14
1.3.1 Pluvial	14
1.3.2 Fluviales.....	15
1.3.3 Costeras.....	16
1.3.4 Falla de infraestructura hidráulica	17
1.4 Estadísticas de inundaciones.....	22
1.4.1 Internacionales.....	22
1.4.2 Nacionales	24
1.5 Daños consecuenciales	28
Capítulo 2. Modelo Ley Fuga para la estimación de la pérdida catastrófica.....	30
2.1 Riesgo de inundación y registros históricos.....	30
2.2 La pérdida máxima probable.....	37
2.2.1 Definición y metodología de cálculo	38
2.3 Análisis del Riesgo	39
2.3.1 Metodología de la CNSF	41
2.3.2 Metodología del CENAPRED.....	43
2.4 Modelo Ley Fuga	50
2.4.1 Modelo Poisson-Exponencial	50
2.4.2 Distribución Poisson.....	52
2.4.3 Función de distribución de probabilidad exponencial	52
2.4.4 Función de densidad	54
Capítulo 3. Simulación estocástica de la pérdida probable.	56
3.1 Diseño, planeación y ejecución	56
3.2 Aplicación numérica	59
3.3 Escenarios de precipitación.....	69
3.3.1 Túnez	70
3.3.2 México	74
Conclusiones	81
Bibliografía.....	82

Índice de figuras

Figura 1.1 Ciclo del agua.....	6
Figura 1.2 Movimiento físico de las olas	10
Figura 1.3 Tsunami: "Olas de puerto" en japonés.....	11
Figura 1.4 Tipos de maremotos.	12
Figura 1.5 Altura de ola 1.	13
Figura 1.6 Altura de ola 2.	13
Figura 1.7 Tabasco 2007	16
Figura 1.8 La lluvia arrastra vehículo al mar en Acapulco.....	17
Figura 1.9 Esquema de la zona afectada por la falla de un bordo en el arroyo El Cajoncito B. C. S. (Franco, 1983).	19
Figura 1.10 Ubicación de la presa El Conejo.	20
Figura 1.11 Vista aérea de la presa Dolores.....	21
Figura 1.12 Falla de la presa El Capulín. Vista de los azolves.	22
Figura 2.1 Inundación en el río Amarillo en China en 1931.....	30
Figura 2.2 Inundación en Pakistán 1970.	31
Figura 2.3 Tifón Nina 1975.....	31
Figura 2.4 Albarradón de Nezahualcóyotl.	35
Figura 2.5 Inundaciones en el sureste de Chiapas.....	37
Figura 2.6 Ciclo del riesgo.....	40
Figura 2.7 Ejemplo de la identificación de la zona inundable en el río Sabinal en Tuxtla Gutiérrez.	41
Figura 3.1 Diagrama de pasos en el análisis de frecuencia	58
Figura 3.2 Datos ingresados a HYFRA.	64
Figura 3.3 Selección de la distribución Poisson/exponencial.....	65
Figura 3.4 Resultados de la distribución Poisson/exponencial.	66
Figura 3.5 Gráfica de la distribución Poisson/exponencial.	67
Figura 3.6 Características de la distribución Poisson/exponencial.....	68
Figura 3.7 Regionalización de Túnez.	71
Figura 3.8 Leyes de regionalización de la distribución de las precipitaciones mensuales en Túnez.	72
Figura 3.9 Mapas de precipitación mensual de isoyetas en Túnez.....	74

Índice de cuadros

Cuadro 1.1	Categorías de precipitación.....	8
Cuadro 1.2	Formas de precipitación.	9
Cuadro 1.3	Características de la precipitación	9
Cuadro 1.4	Mecanismos a través de los que se genera la precipitación	15
Cuadro 1.5	Posibles alternativas por mala operación.	19
Cuadro 1.6	Pérdidas locales en México en pesos.	25
Cuadro 1.7	Pérdidas locales por estado en pesos.	27
Cuadro 1.8	Estados con mayor número pérdidas humanas y damnificados.....	27
Cuadro 1.9	Estados con mayor pérdida de ganado y cultivo	27
Cuadro 2.1	Lista de inundaciones en el continente americano.....	32
Cuadro 2.2	Lista de inundaciones en el continente asiático.	33
Cuadro 2.3	Lista de inundaciones en el continente europeo.	33
Cuadro 2.4	Lista de daños por inundaciones en México.....	35
Cuadro 2.5	Nivel de umbral.....	38
Cuadro 2.6	Probabilidad de que la PML se exceda en los próximos Te años.	39
Cuadro 2.7	Probabilidad de excedencia por periodo de retorno.	47
Cuadro 3.1	Datos de las precipitaciones mensuales en Túnez.	60
Cuadro 3.2	Distribución de frecuencia por intervalos.	60
Cuadro 3.3	Prueba de ajuste χ^2	61
Cuadro 3.4	Resultado de la prueba de ajuste χ^2	61
Cuadro 3.5	Promedio y desviación estándar.....	62
Cuadro 3.6	Desarrollo de la prueba Kolmogorov-Smirnov.	62
Cuadro 3.7	Resultado de Criterios.....	63

Índice de gráficas

Gráfica 1.1	Desastres naturales relacionados con el agua en el mundo de 1990 a 2001.	23
Gráfica 1.2	Inundaciones en el mundo entre 1987 y 1997.....	24
Gráfica 1.3	Reportes de desastres naturales en México.....	24
Gráfica 1.4	Desastres naturales relacionados con el agua en México de 1970 a 2011.	25
Gráfica 1.5	Porcentaje pérdidas locales en México en pesos.....	26
Gráfica 1.6	Número de muertos en México a causa de desastres naturales.....	26
Gráfica 1.7	Reporte de las aseguradoras del monto de siniestros de acuerdo a la CNSF.....	28
Gráfica 1.8	Tipos de eventos de 2008 al 2011.....	29
Gráfica 1.9	Histórico de tipo de eventos.	29
Gráfica 2.1	Representación de distintos periodos de retorno.....	46
Gráfica 3.1	Distribución de las frecuencias observadas.....	63
Gráfica 3.2	Magnitud de los eventos de máxima precipitación por año en Motozintla, Chiapas.....	70
Gráfica 3.3	Estadísticas de tormentas intensas a nivel nacional de 1996 a 2011.	75
Gráfica 3.4	Precipitación acumulada histórica de mayor a menor.	76
Gráfica 3.5	Precipitación acumulada de 1941 a 2011.....	77
Gráfica 3.6	Proyección de precipitaciones acumuladas de 2011 a 2030.	78
Gráfica 3.7	Precipitaciones acumuladas de menor a mayor en el trimestre julio-septiembre de 1941 a 2010.	79
Gráfica 3.8	Precipitaciones acumuladas en el trimestre julio – septiembre de 1941 a 2010.	79
Gráfica 3.9	Proyección de precipitaciones acumuladas de 2010 a 2030.....	80

Introducción

El objetivo de esta tesis es identificar las causas y los impactos económicos, medioambientales y sociales de las inundaciones a partir de Informes del Centro Nacional para la Prevención de Desastres con el propósito de proponer una metodología a partir de la “Ley Fuga” o modelo Poisson-exponencial para calcular la pérdida catastrófica por este evento hidrometeorológico y sus daños consecuenciales.

Los fenómenos hidrometeorológicos han provocado grandes desastres a nivel internacional. Dentro de éstos se desprenden las inundaciones, que son el fenómeno natural que en los últimos años han acrecentado su fuerza y magnitud, aumentando la intensidad de los desastres y las pérdidas económicas, de impacto medioambiental e incluso de repercusiones sociales a las comunidades y pérdidas de vidas humanas. Es necesaria la elevación de unos cuantos centímetros del nivel normal del agua para generar daños que van desde pequeñas pérdidas hasta grandes catástrofes.

Las inundaciones son fenómenos naturales que se gestan debido a diversas causas; de hecho, son más antiguas que la civilización humana, pues el hombre en la búsqueda de un asentamiento que le brindara seguridad, comodidad y bienestar procuro lugares cercanos al agua, ya sea de ríos, lagos, mares o el océano. Las áreas planas cercanas al agua facilitaron el establecimiento de la población en su cercanía. Después de esto las civilizaciones con más experiencia buscaron situarse en zonas más altas o lugares donde el agua difícilmente llegaría.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es el órgano del gobierno federal que previene y alerta para mitigar el riesgo de la población ante fenómenos naturales y antropogénicos que amenacen sus vidas, bienes y entorno, a través de la investigación, el monitoreo, la capacitación y la difusión. Este centro ha implementado metodologías a partir de la medición de la vulnerabilidad por inundación relacionada con los bienes que poseó la población dentro de sus viviendas. Sin embargo, las inundaciones poseen una condición de aleatoriedad que puede modelarse a partir de los registros históricos.

Las inundaciones son fenómenos hidrometeorológicos de difícil cálculo debido a su naturaleza estocástica. En los últimos años se ha hecho más frecuente escuchar que este tipo de fenómenos ha dejado grandes pérdidas, debido al aumento de su fuerza, magnitud y presencia. Esta condición de aleatoriedad y severidad de pérdida, se puede ajustar a una distribución Poisson para obtener las probabilidades que ocurren de forma impredecible de este fenómeno natural.

La “Ley Fuga” o modelo Poisson-exponencial se creó originalmente para simular fugas de gas en una red de distribución en Francia, por eso su nombre. Este modelo consiste una distribución de Poisson y

distribución exponencial simultáneamente, la primera es para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento durante cierto periodo de tiempo y la segunda es la distribución de la longitud de los intervalos de variable continua que transcurren entre la ocurrencia de dos sucesos "raros", que se distribuyen según la distribución de Poisson, esto es expresar la magnitud media de dicho evento.

Los factores de riesgo que integran a las inundaciones son vulnerabilidad, exposición y severidad. Hay evidencia del incremento de la intensidad de los fenómenos, los cuales han generado daños costosos y decesos significativos para el país. Se debe lograr un claro entendimiento de los factores que afectan a los contextos político, legal, económico social, ambiental y técnico, buscando así una solución que pueda alertar, prevenir o disminuir el daño catastrófico y calcular la pérdida catastrófica al momento de presentarse este fenómeno hidrometeorológico.

En el año 2003 se registraron múltiples inundaciones de amplia dimensión que afectaron a diversos Estados de la República: Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Veracruz y Zacatecas. Los daños totales alcanzaron un aproximado de 2,359 millones de pesos; siendo el estado de Guanajuato el más afectado, seguido por Jalisco. En todos los estados perturbados la magnitud de los daños supero ampliamente el apoyo brindado por parte del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). En 2007 fue el ápice de las pérdidas económicas en México debido a catástrofes de origen hidrometeorológico. El aumento en los daños por siniestros de origen natural se debió a grandes inundaciones, lluvias y ciclones tropicales que ocasionaron 53 muertes, principalmente por los huracanes Dean, Henriette y Lorenzo.

Las inundaciones son fenómenos meteorológicos de difícil cálculo debido a su naturaleza estocástica. En los últimos años se ha hecho más frecuente escuchar que este tipo de fenómenos ha dejado grandes pérdidas, debido al aumento de su fuerza, magnitud y presencia.

La tesis se presenta *grosso modo* en tres capítulos:

El objetivo del capítulo 1 es definir que es el riesgo de inundación; dar una descripción de la tipología: precipitación, oleaje y marea de tormenta; la clasificación por su origen: pluvial, fluviales, costeras, la falla de infraestructura hidráulica que existe; las principales estadísticas por inundación registradas, tanto nacionales, como internacionales y los daños consecuenciales provocadas por estas.

Por su parte en el capítulo 2 se propone una metodología a partir de la "Ley Fuga" para la estimación de la pérdida catastrófica, usando para esto la definición de riesgo de inundación y registros históricos; la definición y la metodología de la perdida probable; analizar el riesgo mediante la metodología de la CNSF y la del CENAPRED. Emplear el modelo Poisson-exponencial, la distribución Poisson, la función de distribución de probabilidad exponencial y la función de densidad para generar los modelos Ley Fuga.

Finalmente, en el capítulo 3 mediante la aplicación numérica del caso de Túnez se aplicarán pruebas de bondad de ajuste, posteriormente se ejecutara la información de las precipitaciones en el software para hacer la Ley Fuga para hacer el análisis de regionalización y determinar las zonas con mayor precipitación. Para el caso de México se generaran escenarios de simulación estocástica para proyectar las precipitaciones a 2030.

Capítulo 1.

Riesgo de inundación y registros históricos.

1.1 Definición del riesgo de inundación

Una inundación es un fenómeno hidrometeorológico que no es permanente, durante el cual una parte del territorio afectado es ocupada temporalmente por agua. El riesgo de inundación trata de medir la frecuencia y la severidad con que se produce este fenómeno (Francés García, 1997).

Una de las definiciones más habitual de frecuencia de una determinada inundación es la probabilidad de que en un año cualquiera el caudal que la produce se vea superado al menos una vez. Sin embargo, la mayor parte de las veces se habla de período de retorno en años, que es el inverso de esta probabilidad de excedencia (Francés García, 1997).

Por otra parte, la magnitud de la inundación depende de la cantidad de precipitación, de las características de la cuenca vertiente al punto considerado (fundamentalmente su tamaño y la capacidad de infiltración del terreno), y por último de las condiciones de drenaje de ese punto concreto. De tal forma que, si la capacidad de drenaje es insuficiente para la magnitud de los caudales recogidos por la cuenca vertiente, se produce una inundación (Francés García, 1997).

Por esto, cualquier punto del territorio nacional puede estar sometido a una inundación con mayor o menor frecuencia. La diferencia se encuentra en la magnitud de la inundación que se produce. Por ejemplo, si el canal de drenaje de cualquier ciudad está diseñado para cierta capacidad basado en los periodos de retorno, esto quiere decir de acuerdo con la frecuencia en que se han presentado las inundaciones en los años anteriores (entre 2 y 25 años de periodo de retorno), estos pueden ser bajos, iguales o superiores. Sin embargo, debido al diseño original, la severidad de las inundaciones en las ciudades por insuficiencia suelen ser bajas (Francés García, 1997)

La falta de información, comunicación y conocimiento entre los actores sociales, la ausencia o nula organización institucional y comunitaria, la insuficiente preparación para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de fortaleza económica de la sociedad; contribuyen enormemente a elevar el riesgo en las comunidades susceptibles a la presencia de eventos naturales que, siendo ordinarios, se vuelven extraordinarios y catastróficos. De tal forma, que, las secuelas potenciales no sólo están relacionadas con el impacto del suceso, sino también, con la capacidad de soportar el impacto y los alcances del impacto en el espacio geográfico considerado (González Turrubiates , 2010).

El riesgo de inundación puede ser alterado por el ser humano, tanto positiva como negativamente. En el primer caso, se podría invertir más en infraestructura que evite los desbordamientos y disminuya el riesgo en mayor medida, considerando que nunca se podrá eliminar por completo. Por otra parte. El segundo caso, el riesgo de inundación puede verse incrementado respecto de la situación natural original en las siguientes situaciones:

Cambios de impacto ambiental debido a la tala de árboles en las montañas lo que ocasiona que fluya con más fuerza el agua de lluvia. Disminución de la capacidad de desagüe de un cauce debido a su ocupación total o parcial por edificios, terrenos agrícolas, puentes insuficientes, etc.

Una vez que se ha producido el desbordamiento, el flujo del agua en la zona de inundación no solo va a ser condicionado por la topografía del terreno, sino también por el tipo de construcción donde haya intervenido el hombre: desde una choza, hasta una carretera o puente que conecte a otro pueblo o ciudad (Francés García, 1997).

Las inundaciones han sido y son el riesgo hidrometeorológico con un fuerte impacto económico y social en México afectando prácticamente a toda la geografía de la república mexicana, aunque el territorio más afectado se encuentra en las costas del golfo y del sur del país.

Por lo anterior se define la vulnerabilidad del territorio como los daños producidos en función de la magnitud de la inundación. Estos daños podrán ser cuantitativos (medibles en términos económicos) o cualitativos (Francés García, 1997).

La variable de magnitud más importante en la determinación de la vulnerabilidad frente a una inundación es el nivel máximo alcanzado por el agua. A pesar de la importancia de esto, no se puede descartar que existan otros factores que influyen en los daños producidos en menor medida, como son: la velocidad del agua, la duración de la inundación, los materiales sólidos que lleva el cauce, etc. y que son más difíciles de evaluar (Francés García, 1997).

El impacto surge de la combinación entre el riesgo de inundación y la vulnerabilidad, la cual se puede definir como el daño medio que potencialmente pueden producir las inundaciones en una parte del territorio. El impacto será mayor en la medida en que la vulnerabilidad y el riesgo también lo sean (Francés García, 1997).

El objetivo de las medidas de protección contra el aumento del caudal de los ríos y arroyos debe ser disminuir el impacto de las inundaciones. Las medidas de tipo estructural lo hacen disminuyendo el riesgo, pero hay otro conjunto de medidas no estructurales que disminuyen el impacto disminuyendo la vulnerabilidad del territorio. Algunas de estas medidas no estructurales son: la adecuación de la edificación y de las infraestructuras, políticas de seguros, sistemas de alerta, planes de emergencia y la educación e información de la población (Francés García, 1997).

1.2 Tipología de la inundación

Las inundaciones en la república mexicana se originan en la temporada de lluvias, generalmente ubicadas a partir de mayo y hasta noviembre, o en la época de invierno de diciembre a marzo.

En invierno los estados más susceptibles son los ubicados en la zona noroeste del país; sin embargo, también afectan la vertiente del Golfo de México y la península de Yucatán (CENAPRED, 2009).

Existen dos tipos de inundación y se clasifican en lentas y repentinas, la primera es un crecimiento lento de cauces de ríos y lagos, como resultado de lluvias durante un período largo de tiempo y la segunda es un crecimiento rápido de los cauces de ríos en zonas bajas, causando víctimas y violenta destrucción de propiedades. Su duración es variable, y depende de muchos factores. Generalmente es de unas pocas horas, pero cuando las lluvias se extienden en el tiempo, como ocurre con el paso de huracanes, entonces puede llegar a varios días y, excepcionalmente, a un tiempo mayor (BVS Desastres Guatemala).

Una de las causas que generan las inundaciones es el ciclo hidrológico o también conocido como el ciclo del agua, el cual describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Figura 1.1
Ciclo del agua



Fuente: Ciclo del agua. Ilustración por John M. Evans USGS, Colorado District.

El sol participa calentando el agua de los océanos y parte de esta agua se evapora. El hielo y la nieve pueden sublimar directamente en vapor de agua. Las corrientes de aire ascendentes toman el vapor de la atmósfera, junto con el agua de evapotranspiración, que es el agua procedente de las plantas y la evaporación del suelo. El vapor se eleva en el aire, donde las temperaturas más frías hacen que se condense en nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes alrededor del globo. Las partículas de las nubes chocan, crecen y caen del cielo como precipitación; algunas caen como precipitaciones de nieve y pueden acumularse como casquetes polares y glaciares. En climas más cálidos, los bloques de nieve a menudo se descongelan y se derriten cuando llega la primavera, y el agua derretida fluye por la tierra. La mayor parte de la precipitación cae sobre los océanos o la tierra, donde, debido a la gravedad, fluye sobre la superficie. Una parte de esa agua entra en los ríos a través de valles en el paisaje, y la corriente mueve el agua hacia los océanos. El agua filtrada pasa a las aguas subterráneas, que se acumulan y son almacenadas como agua dulce en lagos. No toda el agua fluye por los ríos. La mayor parte de ella empapa la tierra como infiltración. Un poco de agua se infiltra profundamente en la tierra y rellena acuíferos, que almacenan cantidades enormes de agua dulce durante períodos largos del tiempo. Algunas infiltraciones permanecen cerca de la superficie de la tierra y pueden emerger, acabando como agua superficial y oceánica. Algunas aguas subterráneas encuentran grietas en la tierra y emergen. Con el tiempo, el agua sigue fluyendo, para entrar de nuevo en el océano, donde el ciclo vuelve a empezar (USGS science for a *changing world*, 2013).

Otra causa de inundación son actividades humanas, la urbanización de las calles al momento de pavimentar el suelo impide que el agua de lluvia penetre en el suelo, la tala de árboles para sembrar destruye la cobertura vegetal del suelo, esto provoca que las lluvias arrastren la tierra a partes bajas tapando el drenaje, azolvando los ríos y las presas, así como la erosión del suelo y cuando se construyen viviendas cerca de las barrancas y de los ríos, ya que al llover en exceso estos crecen y ante un desbordamiento pueden destruirlas (CENAPRED, 2009).

El exceso de precipitación, la marea de tormenta y el oleaje son causa de inundación, debido a su importancia se profundizara más en estos fenómenos.

1.2.1 Precipitación

La precipitación es el producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución, este se satura a través de dos procesos por enfriamiento y añadiendo humedad (CicloHidrologico .com).

La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. La virga es la precipitación que

comienza a caer a la tierra pero que se evapora antes de alcanzar la superficie (CicloHidrologico .com).

La precipitación es un componente principal del ciclo hidrológico, y es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta. Aproximadamente 505,000 km³ de agua caen como precipitación cada año, y de ellos 398,000 km³ caen sobre los océanos. Dada el área superficial de la Tierra, eso significa que la precipitación anual promediada globalmente es más o menos de 1 m, y la precipitación anual media sobre los océanos de 1.1 m (CicloHidrologico .com). La precipitación se divide en tres categorías:

Cuadro 1.1
Categorías de precipitación.

Precipitación	Tipos
Precipitación líquida	Llovizna Lluvia
Precipitación glacial	Llovizna congelada Lluvia congelada (aguanieve)
Precipitación congelada	Nieve Bolitas de nieve Granos de nieve Bolitas de hielo Graniza Copos de nieve Cristales de hielo

Fuente: Elaboración a partir de (CicloHidrologico .com).

La precipitación se forma mediante la condensación y el proceso de Bergeron. En el primero comienza a formarse cuando asciende el aire cálido y húmedo. Al enfriarse el aire, el vapor de agua comienza a condensarse en núcleos de condensación, formando nubes. Después de que las gotas de agua aumentan su volumen, caen en forma de lluvia y el segundo ocurre cuando los cristales de hielo adquieren moléculas de agua de las gotas de agua frías cercanas. Cuando estos cristales de hielo ganan bastante masa, comienzan a caer. Esto generalmente requiere más masa que la fusión entre el cristal y las gotas de agua vecinas. Este proceso es dependiente de la temperatura, ya que las gotas de agua frías sólo existen en una nube por debajo de la congelación. Además, debido a la gran diferencia de temperaturas entre la nube y el nivel de tierra, estos cristales de hielo pueden derretirse cuando caen y convertirse en lluvia (CicloHidrologico .com).

Las formas de precipitación son las siguientes:

Cuadro 1.2
Formas de precipitación.

Actividad frontal	La precipitación estratiforme o dinámica ocurre como consecuencia del ascenso lento del aire en sistemas sinópticos, como en los frentes fríos, y antes de los frentes cálidos. Un ascenso similar se observa alrededor de los ciclones tropicales fuera del ojo, y en modelos de precipitación con cabeza de coma alrededor de los ciclones de latitud media.
Convección	La lluvia convectiva proviene de nubes convectivas, como los cumulonimbos o cúmulos congestus. Cae como chaparrones con una intensidad que varía rápidamente. La precipitación convectiva cae en un tiempo relativamente corto sobre un área determinada. La mayor parte de la precipitación en zonas tropicales parece ser convectiva; sin embargo, se ha sugerido que también se da la precipitación estratiforme. Los copos de nieve y el granizo siempre indican convección. A latitudes medias, la precipitación convectiva tiene relación con los frentes fríos (a menudo detrás del frente), las líneas de chubascos y los frentes cálidos con una significativa humedad disponible.
Efectos orográficos	Los efectos orográficos ocurren en el lado de barlovento de las montañas y está causada por el movimiento de ascendente de un flujo de aire húmedo a través de la montaña, que provoca la refrigeración adiabática y la condensación. En las zonas montañosas del mundo, sujetas a vientos relativamente consistentes prevalece un clima más húmedo por lo general en el lado de barlovento de la montaña que en el lado de sotavento. La humedad es eliminada por el ascenso orográfico, dejando el aire más seco en la bajada y una sombra de lluvias al lado de sotavento.
Actividad tropical	La actividad tropical, en general, consiste en grandes masas de aire de varios cientos de millas con la presión baja en el centro y con vientos que soplan alrededor del centro en cualquier dirección en el sentido de las agujas del reloj (hemisferio sur) o contrario a las agujas del reloj (hemisferio norte). La precipitación surge cuando un frente cálido se forma debido a una masa progresiva de aire cálido que sube por una superficie inclinada de aire frío que se retira, y es enfriada en el proceso de elevación causando la precipitación.

Fuente: Elaboración a partir de (CicloHidrologico .com).

Las características de la precipitación son las siguientes:

Cuadro 1.3
Características de la precipitación

Tamaño y forma	Las gotas de lluvia tienen tamaños en los límites de 0.1 mm hasta los 9 mm de diámetro, y por encima de ese tamaño tienden a romperse. Las gotas más pequeñas se llaman gotas de nube, y su forma es esférica. Cuando una gota de lluvia aumenta de tamaño, su forma se hace más redondeada, con un corte transversal más grande.
Intensidad y duración	La intensidad y duración de la precipitación están, por lo general, inversamente relacionadas; es decir, las tormentas de intensidad altas probablemente serán de duración corta, y las tormentas de intensidad baja pueden tener una duración larga.
Intensidad y área	Sobre un área grande la precipitación suele ser menos intensa que sobre un área pequeña.
Tamaño de gota e intensidad	Las tormentas de intensidad alta tienen un tamaño de gota más grande que las tormentas de intensidad baja.

Fuente: Elaboración a partir de (CicloHidrologico .com).

Hay varias redes de mediciones de precipitación repartidas por todo el mundo, que comparten sus datos a través de Internet o de oficinas meteorológicas locales. Los datos de precipitación son importantes para pronosticar los flujos de los ríos y la calidad del agua del río, usando modelos de transporte hidrológicos como Storm Water Management Model (SWMM), Systeme Hydrologique

Europeen (SHE) o el modelo Dynamic Stream Simulation and Assessment Model (DSSAM) (CicloHidrologico .com).

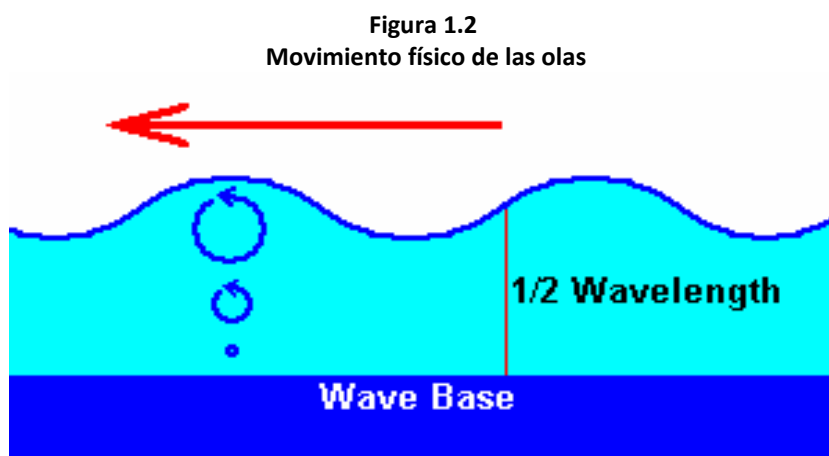
La probabilidad de que se produzca un evento, con una intensidad y duración especificada, se llama período o frecuencia de retorno. La intensidad de una tormenta puede predecirse para cualquier período de retorno y duración de la tormenta, a partir de tablas basadas en datos históricos de posición (CicloHidrologico .com).

No hay ningún modo de predecir cuándo tendrá lugar una inundación y de qué tamaño será, pero los eventos de inundaciones pasadas pueden proporcionar alguna información en cuanto a lo que se podría esperar (CicloHidrologico .com).

La precipitación es un factor muy importante en los ciclones tropicales ya que estos arrastran consigo enormes cantidades de humedad que al precipitarse toman mayor intensidad cuando encuentran una barrera montañosa, provocando avenidas súbitas, deslizamientos de tierra e inundaciones en las zonas mal drenadas (CicloHidrologico .com).

1.2.2 Oleaje

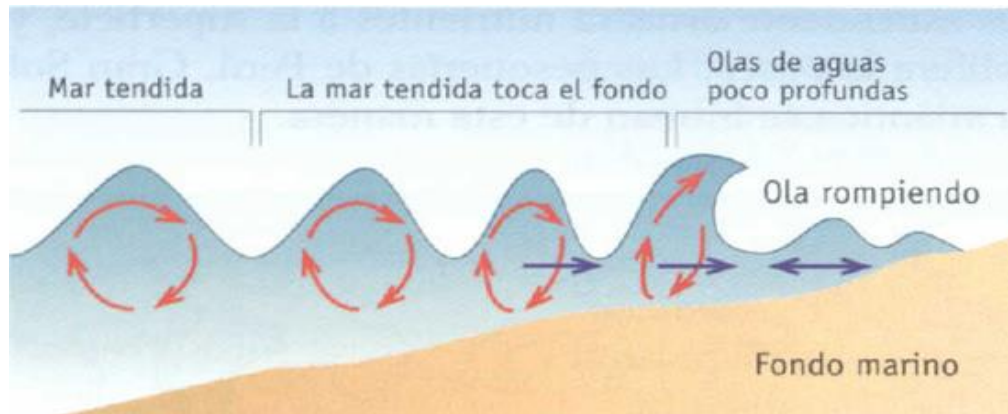
Las olas son ondulaciones del agua del mar producidas por el viento que sopla sobre su superficie. Basta que existan vientos superiores a 3 km/h, para que se generen pequeñas olas. En las olas no hay traslado de agua, sino sólo un movimiento oscilatorio. (<http://www.mardechile.cl/>, 2005)



Fuente: figura extraída de la presentación oleaje (Molina, 2013).

La ola llega a la orilla y "revienta", de tal forma que penetra unos cuantos metros en la playa o choca contra rocas. En las playas se puede observar el rompimiento de la ola. Esto se debe a que la base de la ola interrumpe su avance de forma cada vez más creciente a medida que la profundidad disminuye, llega a un punto en donde la ola se hace inestable y cae hacia adelante generando el rompimiento (<http://www.mardechile.cl/>, 2005).

Figura 1.3
Tsunami: "Olas de puerto" en japonés



Fuente: Figura extraída de la presentación oleaje (Molina, 2013).

La ola se distingue por los siguientes aspectos:

- Cresta y seno de la ola. Parte superior e inferior respectivamente de la onda
- Altura de la ola. Diferencia entre la cresta y el seno
- Longitud de la ola. Distancia entre dos senos o dos crestas
- Velocidad de la ola. Tiempo entre el paso de dos crestas en un mismo punto

Las olas provocan inundaciones por medio de los maremotos. Un maremoto se origina cuando una gran masa de agua del océano se altera fuera de su equilibrio normal, debido a que el fondo marino se mueve de manera abrupta en sentido vertical, y cuando éste intenta recuperar el equilibrio genera olas gigantescas llamadas tsunamis (<http://www.publispain.com/>, 2013).

Por ejemplo, si se produce un maremoto tectónico en un fondo oceánico a 5km de profundidad, éste removerá una columna de agua que va desde el fondo hasta la superficie marina. Este desplazamiento vertical puede llegar a ser de unos pocos centímetros, pero si éste se produce en la superficie marina, la velocidad alcanzada puede ser muy alta y la energía que se transmite a la onda es enorme (<http://www.publispain.com/>, 2013).

Figura 1.4
Tipos de maremotos.



Fuente: Elaboración a partir del sitio de internet (<http://www.publispain.com/>, 2013)

El fenómeno del oleaje es un fenómeno natural importante para las zonas costeras el cual se viene analizando desde hace mucho tiempo (SANTILLAN MONTALVO & MARCIAL, 2013).

El punto de interés de un oleaje es saber su frecuencia e intensidad para prevenir a la población y evitar daños materiales (SANTILLAN MONTALVO & MARCIAL, 2013).

La gran intensidad y extensión del campo de vientos generan fuertes oleajes que, al trasladarse pueden afectar en gran medida inclusive por las zonas alejadas del punto de incidencia del huracán sobre la tierra. En México, los ciclones tropicales producen las condiciones de oleaje más severas y, por lo que no es conveniente la navegación en esas condiciones y se considera en el diseño de las obras de protección costeras (CENAPRED, 2012).

El oleaje de un ciclón tropical es fuerte debido a la gran intensidad de los vientos y lo extenso de la zona en que actúan, esto puede dañar de modo importante a la zona costera. Por una parte, las estructuras en tierra cercanas al mar quedan expuestas al oleaje al ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta, por otra parte, puede acarrear gran cantidad de arena de la costa hacia otros sitios, con lo cual se disminuye el ancho de las playas (Rosengaus Moshinsky, Jiménez Espinosa, & Vázquez Conde, 2002).

1.2.3 Marea de tormenta

La Marea de tormenta es un aumento del nivel medio del mar de una zona costera de 80 a 160 kilómetros de ancho debido al impulso de los vientos, esta puede alcanzar una elevación hasta de siete metros. Se produce principalmente por la acción de fuerzas cortantes sobre la superficie del mar que son generadas por el ciclón tropical (Fuentes Mariles, Matías Ramírez, Jiménez Espinoza, Mendoza Estrada, & Baeza Ramírez, 2006).

Figura 1.5
Altura de ola 1.



Fuente: Figura extraída de la presentación Mapas de peligro y riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta (Fuentes Mariles, Matías Ramírez, Jiménez Espinoza, Mendoza Estrada, & Baeza Ramírez, 2006).

El máximo ascenso del mar ocurre cuando a la marea de tormenta se le suma la atracción de la Luna y el sol. Al incremento del nivel medio del mar se le agrega el oleaje que está produciendo el viento y por esto no es fácil percatarse de la existencia de dicha sobrelevación. Sin embargo, a ello se debe que las olas impacten sobre estructuras que están tierra adentro. Esta manifestación del ciclón es la menos obvia para la población en general y, a la vez, es la que mayor número de muertes produce, ya que su efecto principal es la inundación de las zonas costeras bajas (Rosengaus Moshinsky, Jiménez Espinosa, & Vázquez Conde, 2002).

Figura 1.6
Altura de ola 2.



Fuente: Figura extraída de la presentación Mapas de peligro y riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta (Fuentes Mariles, Matías Ramírez, Jiménez Espinoza, Mendoza Estrada, & Baeza Ramírez, 2006)

El principal efecto de la marea de tormenta es la inundación de las zonas costeras con agua de mar que, dependiendo de la topografía, puede llegar a cubrir franjas de varios kilómetros (CENAPRED, 2012).

Las inundaciones a causa de la marea de tormenta han ocasionado muchas pérdidas como vidas humanas, bienes materiales de los habitantes, viviendas, estructura civil y actividades económicas de la comunidad, entre otras (CENAPRED, 2012).

1.3 Clasificación por su origen

Las inundaciones pueden ser clasificadas por su origen o por el tiempo que tardan en presentarse sus efectos. La clasificación por su origen puede ser: pluvial, fluvial, costera y por fallas en la infraestructura hidráulica (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

1.3.1 Pluvial

Las inundaciones pluviales son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, ésta puede permanecer por horas o días (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

La República Mexicana se ve afectada por precipitaciones originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos. En el verano entre los meses de junio a octubre, las lluvias más intensas se asocian con los ciclones tropicales que afectan gran parte del territorio nacional y para el invierno los frentes fríos son la principal fuente de lluvia (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Otros orígenes de la precipitación son producidos por las cadenas montañosas mejor conocidas como lluvias orográficas y la producida por las lluvias convectivas, que son tormentas de corta duración y poca extensión, pero muy intensas. Estas condiciones climatológicas provocan que los ríos presenten regímenes hidráulicos muy irregulares, haciendo duraderos los niveles de precipitación con periodos de avenidas muy grandes (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Las causas de la precipitación son generadas cuando el vapor de agua se condensa en las capas altas y frías de la atmósfera y esto se transforma en nubes. De acuerdo con el contenido de vapor de agua que se condensa, se convierte en gotas de agua. Al estar suficientemente grandes aumentan su peso y velocidad, haciendo que se precipiten hacia el suelo en forma de lluvia (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Los principales mecanismos a través de los que se genera la precipitación son:

Cuadro 1.4
Mecanismos a través de los que se genera la precipitación

Ciclones tropicales	Al transportar grandes cantidades de humedad, los ciclones tropicales pueden provocar tormentas de larga duración, del orden de varios días y abarcar grandes extensiones. Por lo que pueden ser causa de inundaciones en las principales cuencas del país, principalmente en aquellas que vierten hacia el golfo de México o hacia el océano Pacífico.
Lluvias orográficas	Se originan con las corrientes de aire húmedo que chocan con las barreras montañosas, provocando su ascenso y consecuente enfriamiento, lo que da lugar para su condensación y, como resultado, la ocurrencia de precipitación en el lado por donde sopla el viento (barlovento) hacia las montañas. El relieve representa un importante factor en la distribución de las lluvias, ya que actúa como una barrera o un modificador de la dirección del viento. Usualmente esta distribución de la precipitación es muy irregular entre las dos vertientes de una misma cadena montañosa, sobre todo cuando su eje es más o menos perpendicular a la dirección de los vientos húmedos dominantes.
Lluvias invernales (frentes fríos)	Consisten en el desplazamiento de frentes de aire frío procedentes de la zona del Polo Norte. En el país, la zona más afectada por este tipo de fenómenos meteorológicos es la noroeste, donde se originan precipitaciones importantes; sin embargo, también afectan la vertiente del golfo de México y la península de Yucatán. Las grandes avenidas ocurridas en los ríos Fuerte y Yaqui en Sinaloa y Sonora, son consecuencia de este tipo de fenómenos.
Lluvias convectivas	Las lluvias convectivas tienen su origen en el calentamiento de la superficie terrestre, ya que algunas áreas de la superficie de la tierra absorben mejor que otras los rayos solares, por ello, el aire en contacto con esas "zonas cálidas" llega a calentarse más que en los alrededores, lo que da lugar a corrientes verticales con las que asciende el aire caliente húmedo. Estas corrientes al llegar a la capa de la troposfera, se enfrían rápidamente, produciéndose la condensación del vapor de agua y formándose nubes densas, por lo general del tipo cúmulos o nubes macizas. Se presentan en áreas reducidas ya que el ascenso y descenso de las corrientes sólo muestran un espacio local.

Fuente: Elaboración a partir de la serie Fascículos Inundaciones (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

1.3.2 Fluviales

Las inundaciones fluviales son procesos naturales que se han producido periódicamente y que han sido la causa de la formación de las llanuras en los valles de los ríos, tierras fértiles donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura en vegas y riberas (wikipedia, 2013).

Las inundaciones fluviales son generadas cuando el agua que se desborda de los ríos se queda sobre la superficie de los terrenos cercanos a ellos (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007). El aumento del nivel de agua se produce por deshielo o intensas precipitaciones creando saturación en el suelo o intensos procesos de escorrentía (mikebydhi., 2011). En este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones que son registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente son originadas por lluvia sobre la zona afectada (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007). Localmente, las aguas subterráneas tras sufrir un proceso de recarga natural pueden contribuir al aumento de la peligrosidad de las inundaciones (mikebydhi., 2011).

Figura 1.7
Tabasco 2007



Fuente: El Universal 31 de octubre de 2007.

Las inundaciones fluviales más importantes se dan en los ríos con mayor longitud o que lleguen hasta las planicies costeras ya que el volumen excedente de agua que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se va incrementando con el área de aportación de la cuenca (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Las inundaciones fluviales varían considerablemente en tamaño y duración. En el caso de grandes ríos, las inundaciones pueden producirse mucho tiempo después de las precipitaciones y prolongarse durante días, semanas o hasta meses. Por otra parte, las inundaciones repentinas, generalmente debidas a precipitaciones ya conocidas e intensas, pueden causar enormes daños, especialmente si van acompañadas de otros fenómenos naturales como corrimientos de tierras o ríos de barro. Este tipo de inundaciones es bastante común en áreas de montaña y representan un peligro especial para las poblaciones por su carácter súbito e inesperado (COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, 2004).

1.3.3 Costeras

Las inundaciones costeras son causadas por los vientos y las olas generadas por las tormentas tropicales, huracanes o fuertes ciclones de latitudes medias que envían agua del océano hacia el interior de las costas. Las inundaciones costeras pueden producir erosión de las playas y daños a las propiedades en las playas (Meteorología básica, 2013).

Las inundaciones costeras se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

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 (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

En las zonas costeras, los mayores impactos de un ciclón tropical que golpea tierra se deben a la marea de tormenta, el oleaje, vientos fuertes y lluvias intensas. Históricamente y a lo largo del mundo, la marea de tormenta ha sido responsable de una mayor cantidad de daños comparada con los otros efectos. Sin embargo, el viento y la marea están concentrados dentro de unos pocos kilómetros del centro del ciclón, mientras que las lluvias intensas frecuentemente afectan áreas a cientos de kilómetros del centro de ciclón, esto es por el efecto de las bandas nubosas de la tormenta (Jiménez Espinoza, Matías Ramírez, Fuentes Mariles, & Prieto González, 2007).

Figura 1.8
La lluvia arrastra vehículo al mar en Acapulco.



Fuente: Foto Notimex y EFE.

Las inundaciones costeras destruyen estructuras pequeñas y las estructuras grandes son dañadas por el oleaje. Las zonas costeras que están hasta 1.5 m sobre el nivel del mar pueden ser inundadas hasta 13 kilómetros o más tierra adentro (Jiménez Espinoza, Matías Ramírez, Fuentes Mariles, & Prieto González, 2007).

1.3.4 Falla de infraestructura hidráulica

Las inundaciones por falla de infraestructura hidráulica son más graves que las antes mencionadas: si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran obras (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Las inundaciones por insuficiencia de obras de almacenamiento y control han sido poco frecuentes. En 1976, el huracán Liza produjo lluvias extraordinarias que hicieron fallar uno de los bordos del arroyo El Cajoncito, afectando la ciudad de La Paz, en el estado de Baja California Sur. Durante el año de 1973, la falla de la presa El Conejo y algunas otras represas pequeñas provocaron una inundación en la zona del Bajío. En el año 2003, la falta de mantenimiento, debido a la conclusión de la vida útil de la infraestructura, propició la falla de la presa Dolores en San Luis Potosí y la presa El Capulín en Zacatecas (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

En el caso de presas de materiales sueltos (tierra y roca), es particularmente importante evitar el desbordamiento de éstas, ya que en caso de que ocurra, en pocas horas, provocaría su propia destrucción y el gran volumen de agua almacenado en su embalse sería descargado de manera súbita, de modo que esa descarga repentina provocaría considerables fuerzas de arrastre, superando la capacidad del cauce y provocando daños muchas veces mayores a los ocasionados sin la existencia de la obra (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

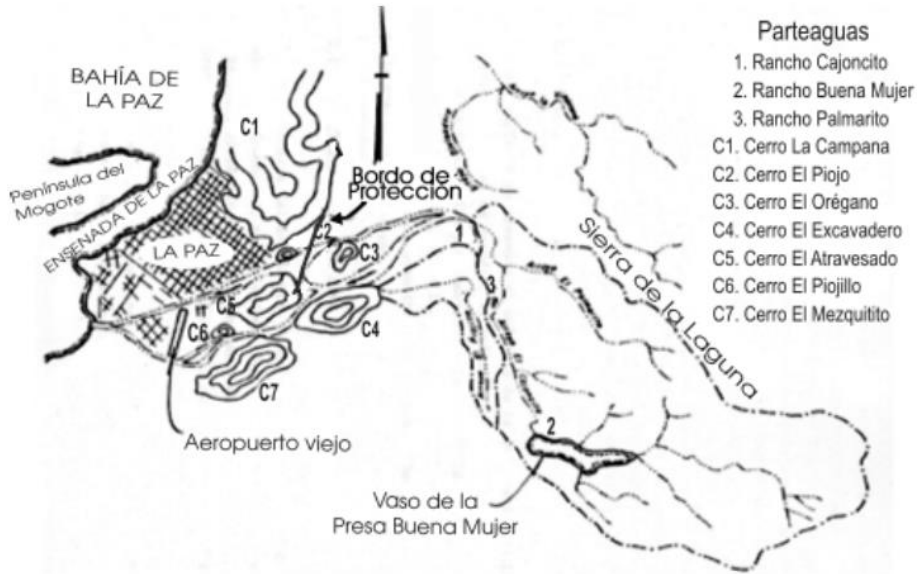
Estas obras pueden presentar fallas en su funcionamiento hidráulico debido a diferentes factores: La primera es por su diseño escaso provocado por la falta de información hidrológica en la cuenca o de la climatología misma que afecta la región. Otra causa es el empleo de criterios o metodologías inapropiadas u obsoletas para el diseño de las obras (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Un ejemplo de esto fue el ocurrido en el bordo de protección del arroyo “El Cajoncito”. En la ciudad de La Paz, periódicamente, sufría problemas de inundaciones por el desbordamiento de los arroyos El Cajoncito y El Piojillo, generalmente, debido a la ocurrencia de ciclones que pasan por la zona. Por este motivo, se llevó a cabo la construcción de obras de protección cuya finalidad era desviar la corriente del arroyo El Cajoncito hacia el arroyo El Piojillo; sin embargo, esto propició el crecimiento de asentamientos humanos en un tramo del cauce de El Cajoncito y, el 30 de septiembre de 1976 la presencia del huracán Liza produjo una avenida que hizo fallar un bordo que protegía la zona urbanizada, ubicada dentro del antiguo cauce, provocando con ello una inundación de consecuencias graves que ocasionó la pérdida de vidas humanas y daños materiales de consideración.

Al parecer, el problema principal fue que la capacidad de los bordos fue rebasada por la creciente generada por el huracán Liza, debido a que la información disponible para su diseño era escasa y, en consecuencia, el escurrimiento calculado fue menor que el real (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Figura 1.9

Esquema de la zona afectada por la falla de un bordo en el arroyo El Cajoncito B. C. S. (Franco, 1983).



Fuente: Figura extraída de la serie fascículos INUNDACIONES (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

La segunda por mala operación, esto se refiere, básicamente, a las presas con compuertas.

Cuadro 1.5
Posibles alternativas por mala operación.

Posibles alternativas
Cuando la compuerta de una presa se abre más de lo necesario y las descargas a través del vertedor producen una cantidad de agua mayor a la que puede conducir el cauce aguas abajo, se provoca el desbordamiento del río y, en consecuencia, una inundación.
Cuando dicha compuerta no se abre lo suficiente para dejar pasar la crecida, tratando de almacenar el mayor volumen de agua y posteriormente su capacidad es insuficiente, el agua sube de nivel más allá de lo diseñado y pone en peligro la estabilidad de la cortina.

Fuente: Elaboración a partir de la serie fascículos INUNDACIONES (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Un ejemplo de esto es lo que se suscitó en la presa “El Conejo”, en el estado de Guanajuato. El 18 de agosto de 1973 la ciudad de Irapuato fue inundada. Supuestamente, hubo un periodo en el que la presencia de la lluvia fue muy constante, desde finales del mes de junio hasta el 18 de agosto. Las consecuencias fueron grandes volúmenes de escurrimiento que rebasaron la capacidad de varias presas pequeñas y bordos, ubicados aguas arriba de la presa El Conejo. Al darse cuenta que la capacidad del vertedor no era suficiente para desalojar los volúmenes que entraban en el embalse de esta presa, se tomó la decisión de hacer una escotadura sobre uno de los bordos de tierra, para sacar un volumen adicional por el vertedor; sin embargo, esa descarga se salió de control debido a la erosión que causó el agua al pasar sobre el bordo, con lo que esa escotadura fue el inicio para que se abriera un boquete que terminó por hacer fallar el bordo (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Aparentemente, y dada la cantidad de precipitación que se registró en la cuenca alta de la presa El Conejo, las extracciones debieron ser mayores para contar con una mayor capacidad de regulación para la avenida que venía; no obstante, las compuertas no se abrieron de la manera requerida, para evitar que se inundaran los terrenos ubicados aguas abajo de la misma (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Figura 1.10
Ubicación de la presa El Conejo.



Fuente: INEGI.

La tercera es por falta de mantenimiento o término de la vida útil de la obra, es el caso de muchas estructuras pequeñas, principalmente bordos de protección y algunas presas de principios del siglo pasado (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

De acuerdo con la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA), las presas Dolores “La Ventilla”, en San Luis Potosí y El Capulín, en Zacatecas, fueron construidas hace más de 100 años. En ambos casos, las cortinas de las presa tenían deficiencias de operación y defectos estructurales, ya que antes de su falla se encontraban muy azolvadas y con filtraciones en algunas zonas del cuerpo de las cortinas. Un ejemplo es la presa “Dolores”, en el estado de San Luis Potosí, la cortina fue sobre elevada, por lo menos en tres ocasiones, motivado por la reducción de la capacidad de almacenamiento debida a la acumulación de azolves en su embalse (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Se tiene conocimiento que antes de la falla existían filtraciones a través del cuerpo de la cortina, lo que motivaba el crecimiento descontrolado de vegetación en su paramento aguas abajo, además de que los vertedores se encontraban cerrados intencionalmente, impidiendo el derrame de los volúmenes excedentes a la capacidad útil de la presa para aumentar su capacidad de almacenamiento (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

La cortina de mampostería de la presa Dolores fue desbordada debido a la falta de capacidad de almacenamiento del vaso debido a un azolvamiento excesivo, aproximadamente del 100% de su capacidad y a que el vertedor estaba obstruido (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Figura 1.11
Vista aérea de la presa Dolores.



Fuente: (Bitrán, 2003).

Otro caso es el de la presa “El Capulín”, en el estado de Zacatecas, esta presa contaba con una cortina construida con base en un muro de mampostería de 12 m de altura por 0.80 m de ancho, con un terraplén de apoyo en el paramento aguas debajo de la cortina. De manera similar al caso anterior, al reducirse la capacidad de almacenamiento y la de regulación, por el exceso de azolve, durante las lluvias del 14 y 15 de agosto de 2002 el embalse incrementó su nivel por encima de la corona desbordándose sobre el terraplén de apoyo. Este proceso fue acelerado debido a que los vertedores estaban sellados, con la finalidad de recuperar parte de la capacidad perdida (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

La cortina de mampostería de la presa El Capulín también fue desbordada debido a la falta de capacidad de almacenamiento del vaso por un azolvamiento excesivo, aproximadamente del 71% de su capacidad y a que el vertedor estaba obstruido (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Figura 1.12
Falla de la presa El Capulín. Vista de los azolves.



Fuente: (Bitrán, 2003).

Es importante recordar que la vida útil de este tipo de estructuras en términos generales, es de 50 a 100 años. Debido a que fueron construidas a finales del siglo XIX, se considera que han rebasado su periodo de vida útil (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

Tanto el azolvamiento existente, como las filtraciones a través del cuerpo de las cortinas, son indicios de una falta de mantenimiento, posiblemente porque las estructuras llegaron al término de su vida útil. Sin embargo, un punto de suma importancia es el referente a las modificaciones, supuestamente realizadas por la población local, con las cuales fue alterado su funcionamiento hidráulico, respecto al diseño original (Salas Salinas & Jiménez Espinoza, 2007).

1.4 Estadísticas de inundaciones

A lo largo de la historia se han registrado fenómenos meteorológicos tanto nacionales como internacionales que han marcado a la historia de los países donde se han suscitado, dejando grandes pérdidas humanas y económicas, provocando importantes daños en las estructuras tanto públicas como casas y edificios, a causa de esto los recintos para vivir son inhabitables; en el sector agrícola, grandes pérdidas de hectáreas de cultivo y ganado. Esto sin duda provoca es un gasto significativo para el gobierno del país donde se suscita el desastre natural hidrometeorológico de inundación contemplando la gente que resulta herida, afectada, damnificada y desaparecida; también las viviendas afectadas y destruidas.

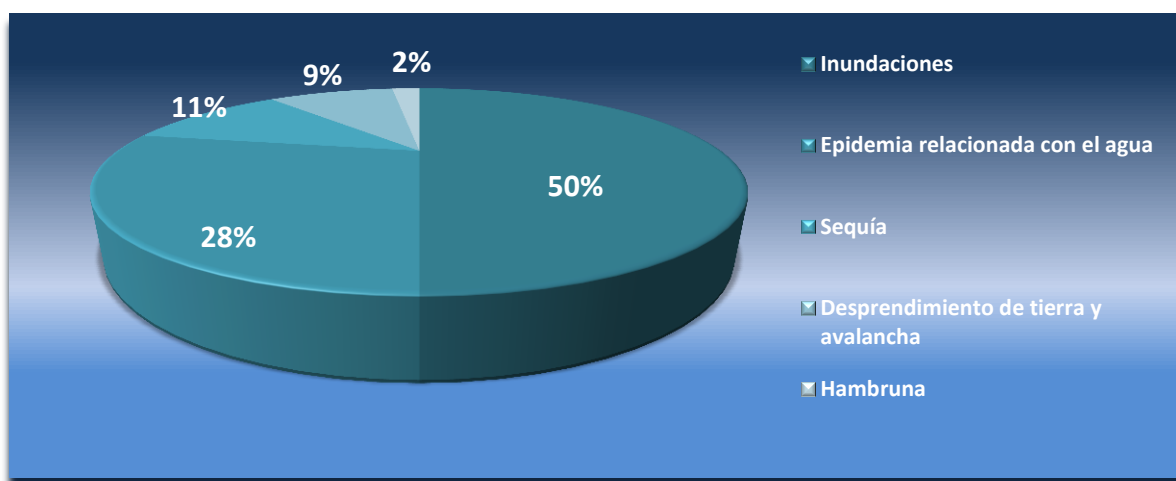
1.4.1 Internacionales

La mayor parte de los desastres naturales que ocurren en el mundo son causados por fenómenos hidrometeorológicos, es decir, desastres relacionados con el agua que no se limitan a los huracanes,

sino que abarcan una gama amplia de eventos que afectan de forma directa a los países (<http://www.sadm.gob.mx>, 2011).

Más de 2,200 desastres naturales de mayor y menor importancia relacionados con el agua ocurrieron en el mundo entre 1990 y 2001, la mitad de los cuales fueron inundaciones. Asia y África fueron los continentes más afectados (<http://webworld.unesco.org/>, 2002).

Gráfica 1.1
Desastres naturales relacionados con el agua en el mundo de 1990 a 2001.



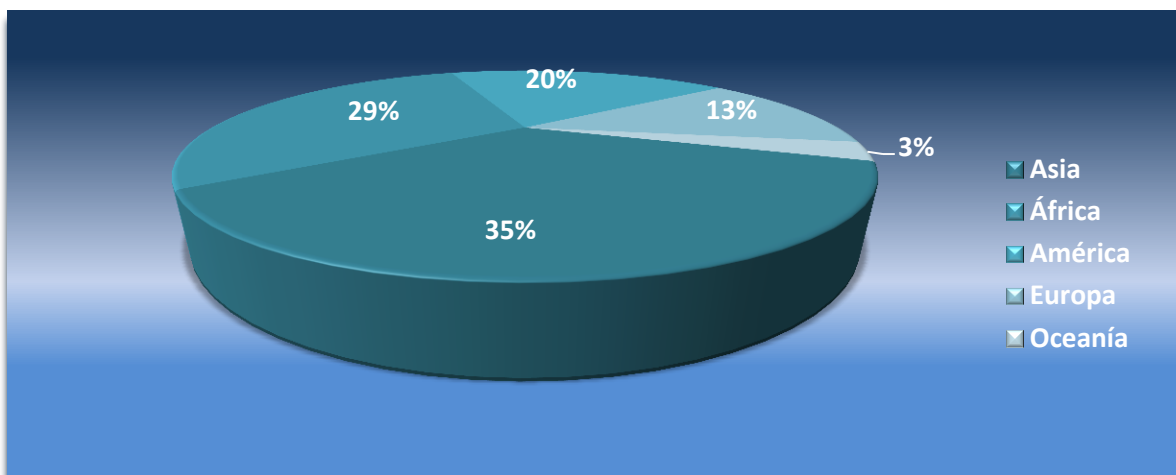
Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos de (<http://webworld.unesco.org/>, 2002).

De acuerdo a la gráfica 1.1 las inundaciones ocupan el primer lugar con el 50% de los desastres naturales relacionados con el agua en el mundo y en segundo lugar con el 28% las epidemias, en el periodo de 1990 a 2001.

Las inundaciones fueron la causa del 15% del total de decesos debidos a desastres naturales; la hambruna fue responsable de un 42%. Aproximadamente unos 66 millones de personas sufrieron daños causados por las inundaciones entre 1973 y 1997 (<http://webworld.unesco.org/>, 2002).

Entre 1987 y 1997, el 35% del total de las inundaciones en el mundo sucedieron en Asia, con un saldo de 228,000 vidas (más o menos un 93% de todas las muertes relacionadas con inundaciones en el mundo entero). Las pérdidas económicas de la región se elevaron a \$136.000 millones de dólares (<http://webworld.unesco.org/>, 2002).

Gráfica 1.2
Inundaciones en el mundo entre 1987 y 1997.

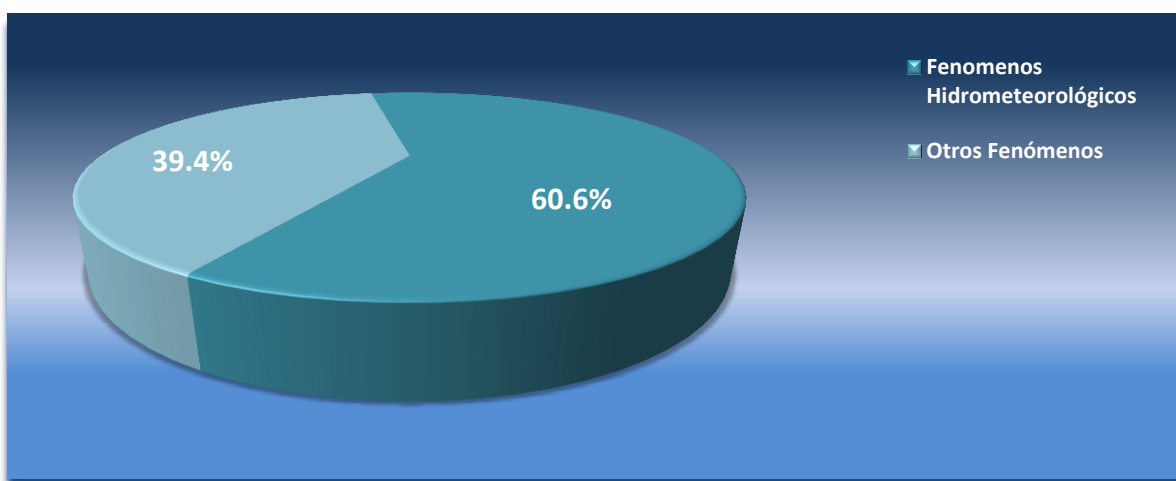


Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos de (<http://webworld.unesco.org/>, 2002).

1.4.2 Nacionales

En México, más del 60 % de los reportes de desastres naturales están asociados a eventos de origen hidrometeorológico, en particular inundaciones y sequías. Estos se presentan principalmente entre los meses de junio y septiembre. Todos los estados tienen uno o varios municipios que han sido afectados de manera más recurrente por algún evento natural, socio-natural o antrópico (CIESAS; Mansilla, Elizabeth, 2012).

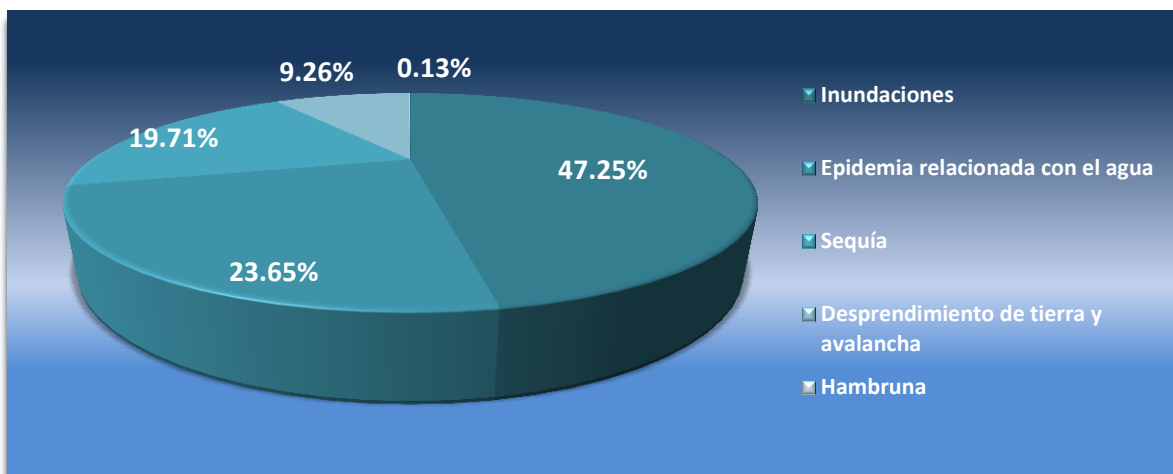
Gráfica 1.3
Reportes de desastres naturales en México



Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

El registro de tipo de desastres naturales relacionados con el agua en México en el periodo correspondiente de 1970 a 2011, revelan que el 47.25% pertenece a las inundaciones, 23.65% a epidemias relacionadas con el agua, 19.71% por sequias, 9.26% por desprendimiento de tierra y avalanchas y el 0.13% por hambruna (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

Gráfica 1.4
Desastres naturales relacionados con el agua en México de 1970 a 2011.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

Las pérdidas locales en pesos más importantes a causa de los desastres naturales en el país son las siguientes:

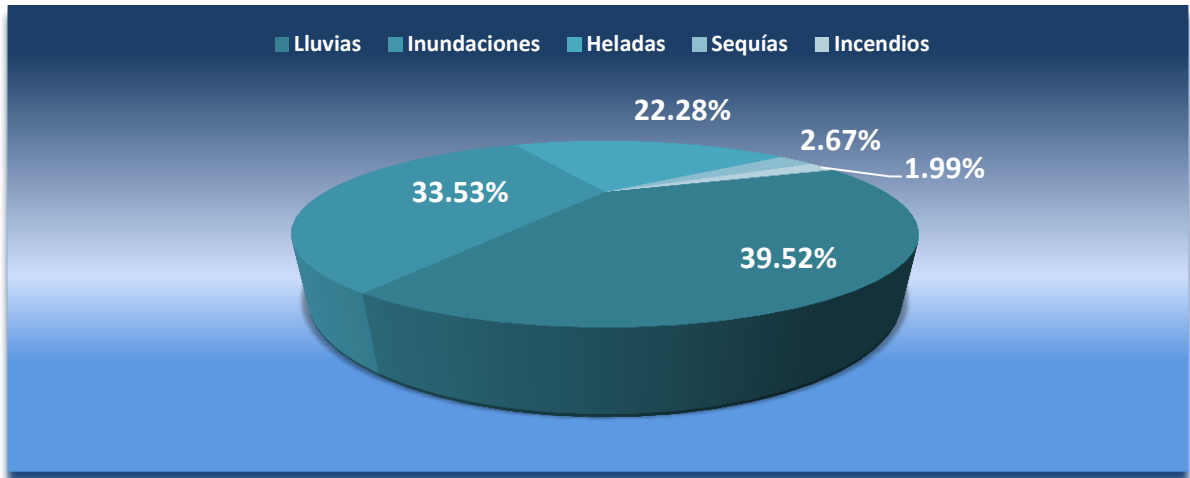
Cuadro 1.6
Pérdidas locales en México en pesos.

Evento	Pérdidas locales en México en pesos
Lluvias	\$ 573,522,468,000
Inundaciones	\$ 486,640,231,000
Heladas	\$ 323,403,736,000
Sequias	\$ 38,803,845,000
Incendios	\$ 28,860,171,078

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

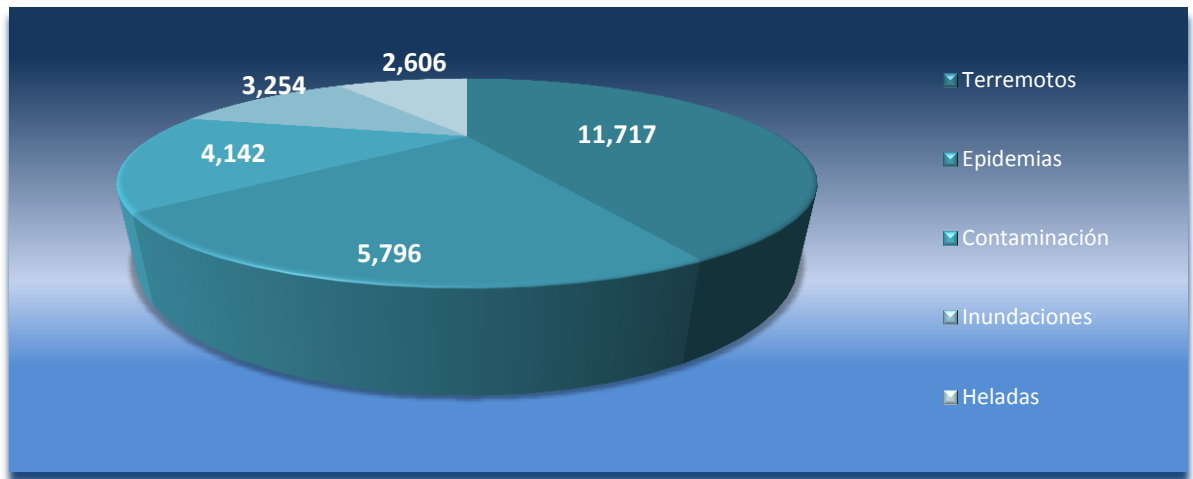
En el cuadro 1.7 se observa que las lluvias superan a las inundaciones en pérdidas económicas, esto en un periodo de registro de 1970 a 2011. Las inundaciones ocupan el segundo lugar en pérdidas monetarias para el país con el 33.53%.

Gráfica 1.5
Porcentaje pérdidas locales en México en pesos.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

Gráfica 1.6
Número de muertos en México a causa de desastres naturales.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

Las Pérdidas humanas han sido significantes en México a causa de los desastres naturales, las inundaciones ocupan el cuarto lugar con 3,254 muertes.

Los cinco estados que presentan mayor número de pérdidas económicas en pesos por inundaciones son los siguientes:

Cuadro 1.7
Pérdidas locales por estado en pesos.

Estado	Pérdidas en pesos
Tabasco	\$ 318,020,000,000
Querétaro	\$ 64,520,000,000
Veracruz	\$ 55,558,610,000
Sinaloa	\$ 14,004,300,000
Chiapas	\$ 10,693,240,000

Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

En el cuadro 1.8 encabeza la lista tabasco que aunque no ha tenido pérdidas humanas significativas, es el estado con mayor pérdida económica debido a la catástrofe que sufrió en 2007.¹ Los estados con mayor número de pérdidas humanas y damnificados son:

Cuadro 1.8
Estados con mayor número pérdidas humanas y damnificados.

Estado	Muertos	Estado	Damnificados
Veracruz	529	Veracruz	4,112,477
Chiapas	331	Tabasco	1,174,579
Jalisco	285	Oaxaca	640,124
Chihuahua	272	Chiapas	359,170
Oaxaca	186	Estado de México	314,470

Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

En un periodo de 41 años, Veracruz tuvo 529 pérdidas humanas y 4, 112,477 damnificados debidos a las constantes inundaciones que ha sufrido en este lapso de tiempo. En Gutiérrez Zamora en 1999 se registró una inundación que causo la muerte a 307 personas debido al desbordamiento del río Tecolutla y a las intensas lluvias. Los estados con mayor pérdida de ganado y hectáreas de cultivo son:

Cuadro 1.9
Estados con mayor pérdida de ganado y cultivo

Estado	Ganado	Estado	Daños cultivos Ha
Tabasco	1,530,100	Tabasco	2,184,042
Veracruz	411,980	Veracruz	1,999,460
Campeche	42,000	Tamaulipas	992,047
Chiapas	2,800	Sinaloa	846,806
Sinaloa	1,800	Oaxaca	705,362

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de (<http://www.desinventar.net/>, 2011).

¹ Inundación en tabasco a consecuencia del desbordamiento de los ríos más importantes de la región.

Conforme a los datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el 45% de la población del estado de Tabasco es rural; sin embargo, únicamente un 19.5% de la población económicamente activa (PEA) se dedica a las actividades primarias (agricultura, ganadería, pesca y forestería), las cuales aportan el 4.8% del PIB estatal (CEPAL, 2011).

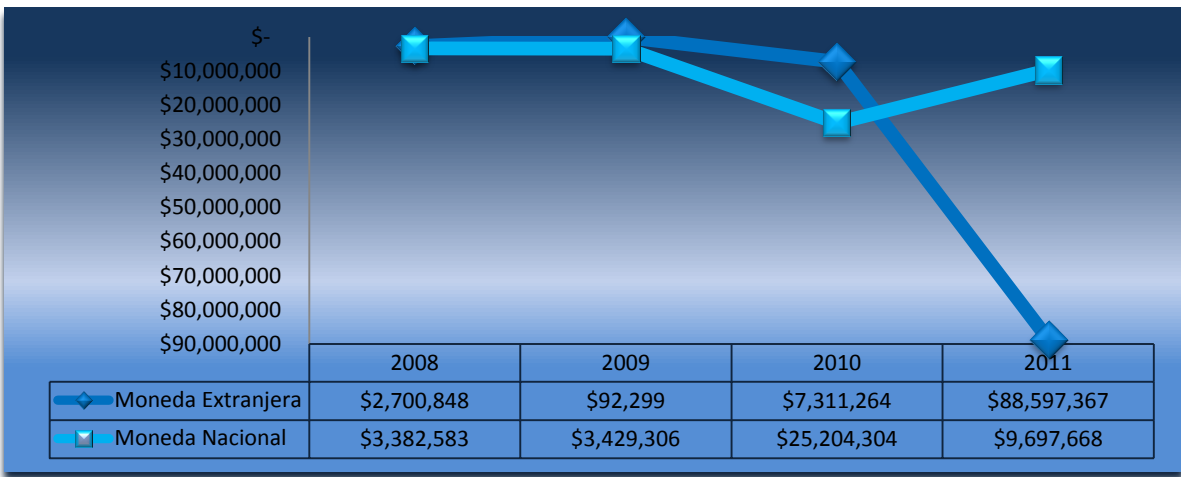
Las inundaciones de septiembre y octubre del 2008 afectaron un área total de 360,000 has, de las cuales 349,033 corresponden a pastizales (34,457 con daños totales) y 10,989 a cultivos (5,028 con daños totales). El monto total de daños y pérdidas por dichas inundaciones en el sector primario se estima en 679 millones de pesos. De ese total un 73.2% corresponde al subsector agrícola (497 millones) y un 26.8% al subsector pecuario (181 millones) (CEPAL, 2011).

1.5 Daños consecuenciales

Se da este nombre de daño consecencial a aquel daño que es consecuencia mediata o indirecta de un siniestro, el cual se diferencia del daño directo. Por ejemplo, una inundación, daño directo es la pérdida originada por el agua y daño consecencial puede ser el producido por una excavadora al momento de retirar el lodo o escombros de las calles o casas (<http://www.mapfre.com>, 2013).

De acuerdo con la información estadística de la Comisión Nacional de Seguros y Fianzas con relación a la información detallada de seguros publica la base estadística de riesgos hidrometeorológicos, la cual contiene emisiones, sumas aseguradas y siniestros. Dentro del reporte de siniestros está la parte de cobertura, en esta se encuentra la opción pérdidas consecuenciales que es la que cubre este daño.

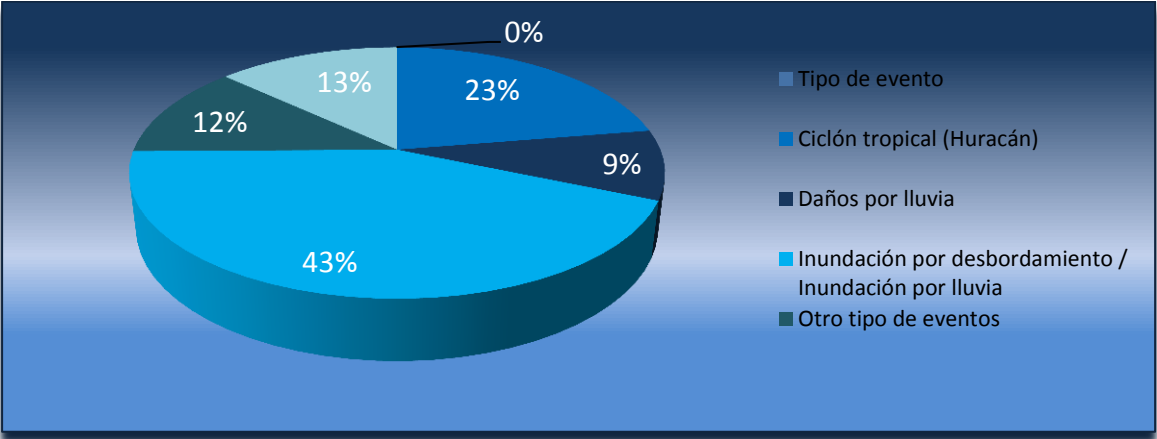
Gráfica 1.7
Reporte de las aseguradoras del monto de siniestros de acuerdo a la CNSF.



Fuente: Elaboración a partir de las Hidro bases emitidas por la CNSF.

De acuerdo a la gráfica 1.6 muestra el monto de los siniestros en moneda nacional y extranjera con el tipo de bien pérdida consecuencial que reportaron las a aseguradoras a la CNSF en el periodo de 2008 a 2011, con respecto a riesgos hidrometeorológicos en especial por el tipo de evento que es inundación por desbordamiento e Inundación por lluvia. Se puede observar que el año con mayor pérdida fue 2011 con \$88, 597,367 en moneda extranjera en las coberturas de remoción de escombros, riesgos hidrometeorológicos y ganancias brutas (CNSF, 2011).

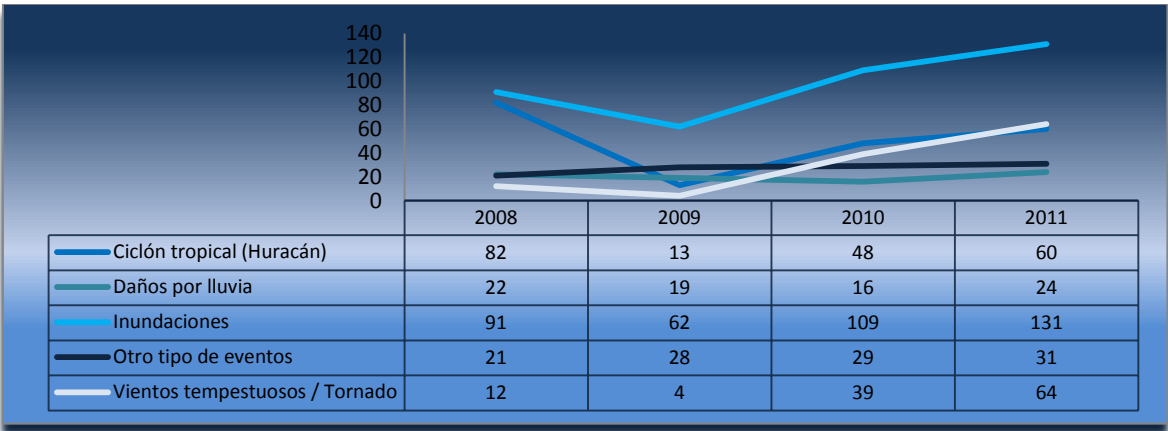
Gráfica 1.8
Tipos de eventos de 2008 al 2011.



Fuente: Elaboración a partir de las Hidro bases emitidas por la CNSF.

Las inundaciones ocupan el 43% de los eventos que ocurrieron de 2008 a 2011, de acuerdo a las bases extraídas de riesgos hidrometeorológicos con un 23% los ciclones tropicales.

Gráfica 1.9
Histórico de tipo de eventos.



Fuente: Elaboración a partir de las Hidro bases emitidas por la CNSF.

La gráfica 1.8 muestra que las inundaciones, a partir del histórico, es el riesgo hidrometeorológico con mayor ocurrencia, esto impacta con un monto de siniestralidad importante al sector asegurador.

Capítulo 2.

Modelo Ley Fuga para la estimación de la pérdida catastrófica

2.1 Riesgo de inundación y registros históricos

Comenzando por el “concepto” de riesgo de inundación, se entiende como tal la combinación de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones con las consecuencias asociadas a dicha situación. En segundo lugar, el entendimiento de ambos factores (probabilidad de ocurrencia y consecuencias), explica de por sí cómo el riesgo es un concepto dinámico, dado que los factores que lo integran varían inexorablemente con el tiempo (Escuder, Matheu, & Castillo, 2010).

La inundación más antigua del siglo pasado se originó en el río Amarillo en China el 18 de agosto de 1931, hubo entre 3.7 y 4 millones de muertos. Luego de dos años de sequía total, unas lluvias torrenciales provocaron el desbordamiento del río Amarillo, cubriendo pueblos y asentamientos urbanos. El resultado fue una total catástrofe, se ahogaron aproximadamente 300,000 personas, se inundó un área de 1,300 km cuadrados, se arruinaron cosechas, faltó comida y las epidemias pusieron fin a la vida de muchas personas. Se estiman un total de casi cuatro millones de muertes y algunas personas vinculan el hecho con la peste bubónica (Hirtz, 2010).

Figura 2.1
Inundación en el río Amarillo en China en 1931.



Fuente: Figura extraída de la página (<http://noticias.terra.com/>, 2011).

Otro de los desastres naturales que han provocado daños mayores han sido las inundaciones en Pakistán. El 12 de noviembre de 1970, un huracán con vientos de 190 kilómetros por hora provocó una marejada de siete metros que golpeó la parte este de Pakistán, actualmente Bangladesh, causando la muerte de aproximadamente 300,000 personas y hubo importantes daños en la agricultura e infraestructura que tardaron varios años en reconstruirse (Hirtz, 2010), (<http://noticias.terra.com/>, 2011).

Figura 2.2
Inundación en Pakistán 1970.



Fuente: Figura extraída de la página (<http://noticias.terra.com/>, 2011).

El tifón Nina en 1975, ha sido el más devastador de la historia de China. Se trató de un huracán de baja intensidad que tras atravesar Taiwán, llegó debilitado a las costas de China, donde los vientos no fueron excesivamente fuertes, pero las torrenciales lluvias provocaron el colapso de la presa de Banqiao, se registra que cayeron 104 centímetros de lluvia en un sólo día, más del promedio en un año . Las inundaciones consecuentes elevaron el número de muertos de la catástrofe a cerca de 100.000 personas, pero también provocaron el colapso de otras presas elevando el número total de fallecidos a 200.000 personas (<http://recuerdosdepandora.com/>, 2010), (<http://noticias.terra.com/>, 2011)

Figura 2.3
Tifón Nina 1975



Fuente: Figura extraída de la página (<http://recuerdosdepandora.com/>, 2010).

La siguiente es una lista de las inundaciones más importantes en todo el mundo.

Cuadro 2.1
Lista de inundaciones en el continente americano.

América		
Fecha	Lugar	Evento
Julio de 1916	Carolina del Norte, USA.	Crecidas en Asheville.
Abril de 1959	Uruguay.	Las inundaciones más grandes y dañinas de la historia de este país.
1972	Nueva York y Pensilvania, USA.	El huracán Agnes causó 122 muertes, la mayoría por las crecidas de los ríos en Nueva York y Pensilvania.
Noviembre de 1985	Armero, Colombia.	Fue una avalancha de agua y lodo provocado por el deshielo del Nevado del Ruiz, ocasionado por una erupción volcánica, provocando la destrucción total de la ciudad de Armero con 25.000 muertos.
1993	USA.	La Gran inundación de 1993 ha sido el mayor desastre hidrológico, después de las catastróficas inundaciones de los años treinta, de Estados Unidos y se debió al desbordamiento del río Misisipi, que sucede de tres a cuatro veces por siglo.
Abril de 1995	Pergamino, Argentina.	Catastrófica inundación del 7 de abril de 1995 en Pergamino, el 60% de la ciudad de 90,000 habitantes en el norte de la provincia de Buenos Aires (Argentina) sufrió una lluvia de 55 mm/30 min durante 3 h, matando a 3 personas y evacuando a 13,000.
1997-1998	Ecuador, Perú, Argentina.	Un fenómeno de El Niño excepcional causó importantes inundaciones en la costa ecuatoriana y en la costa peruana. También creció el río Paraná, causando muchas pérdidas en la provincia de Corrientes (Argentina), provocando inundaciones que tomaron semanas en disminuir.
Diciembre de 1999	Venezuela.	La Tragedia de Vargas provocada por las intensas lluvias a mediados de este mes, que ocasionaron deslaves en las laderas septentrionales de la Cordillera del Ávila, la muerte de decenas de miles de personas, miles de casas y edificios destruidos y unos 300,000 damnificados que quedaron sin hogar.
Febrero de 2002	La paz, Bolivia.	Una colosal nube de más de 10 km de altura desató, desde la parte norte de la ciudad, una fuerte lluvia que inundó rápidamente el centro de la misma. Las calles y avenidas se convirtieron en verdaderos ríos mortales, por la velocidad que adquirió el agua producto del desnivel natural de la ciudad así como por el granizo acumulado que contribuyó a taponar los desagües. Se registraron 69 muertes.
2003	Santa Fe, Argentina.	El río Salado (Norte de Argentina) se desbordó y cubrió gran parte de la ciudad de Santa Fe.
Agosto de 2005	Nueva Orleans, Luisiana Misisipi, USA.	El Huracán Katrina arrasa Nueva Orleans y otras ciudades costeras de los estados de Luisiana y Misisipi, causando 1619 muertos. En Nueva Orleans el agua alcanzó 9 m en algunos barrios y la ciudad tuvo que ser totalmente evacuada.
Febrero de 2010	Buenos Aires, Argentina.	Con lluvias de casi 100 mm, se inunda gran parte de la ciudad, algo poco visto, dejando el saldo de un muerto y un desaparecido.
Abril de 2013	Buenos Aires, Argentina	Inundación en Buenos Aires de 2013. Afecta principalmente a la ciudad de Buenos Aires, al Gran Buenos Aires y el Gran La Plata.

Fuente: Elaboración propia a partir de la página (<http://es.wikipedia.org/>, 2013).

Cuadro 2.2
Lista de inundaciones en el continente asiático.

Asia		
Fecha	Lugar	Evento
Diciembre de 2004	Sur de Asia	Tsunami en las costas del océano Índico. Tras un terremoto de magnitud 9.2 en la escala de Richter con epicentro al oeste de Indonesia se produjo una ola de gran altura más de 30 m en algunas zonas que arrasó las costas de Tailandia, Indonesia, Bangladesh, Sri Lanka, India, e incluso países tan lejanos como Somalia. La cifra de muertos se cifra en 300,000 aunque aún hay muchos desaparecidos.

Fuente: Elaboración propia a partir de la página (<http://es.wikipedia.org/>, 2013).

Cuadro 2.3
Lista de inundaciones en el continente europeo.

Europa		
Fecha	Lugar	Evento
Enero de 1219	San Marcelo en los Países Bajos	Primera inundación de san Marcelo en los Países Bajos; unas 36,000 muertes.
Enero de 1362	San Marcelo, Países Bajos.	Segunda inundación de san Marcelo o Primer Grote Mandrenke (gran ahogamiento de hombres) en los Países Bajos; entre 40,000 y 100,000 muertes.
Noviembre de 1530	San Félix, Países Bajos	Inundación de San Félix o Sábado Maléfico en los Países Bajos; más de 100.000 muertes.
Octubre de 1634	San Marcelo, Países Bajos.	Segundo Grote Mandrenke ('gran ahogamiento de hombres') en los Países Bajos; entre 8.000 y 15.000 muertes.
Enero de 1910	París	Desde finales de diciembre de 1909 las precipitaciones, muchas de ellas en forma de nieve, fueron muy superiores a lo normal en toda la cuenca del Sena, llegando a 160 mm en algunos puntos. Otro factor fue la coincidencia de los picos de crecida del Sena, Marne, Yonne, Aube y otros ríos de menor envergadura. El 23 comenzó el Sena a desbordarse en París con un caudal punta, el 28 de 2,400 m ³ /s y una altura de 8.62 m en el puente de Austerlitz, la segunda crecida más fuerte desde el siglo XVI, tras la del 27 de febrero de 1658 (8.96 m). Se inundaron 500 ha tan solo en la capital francesa, afectando a 150,000 personas y anegando zonas como Notre Dame, los Campos Elíseos o la torre Eiffel.
Marzo de 1930	Montauban, Moissac, Francia.	Inundaciones en la cuenca del Garona y su principal afluente, el Tarn, Francia. Las fuertes lluvias provocaron una avenida del Tarn en Montauban de 6100 m ³ /s y de 8000 m ³ /s en su confluencia con el Garona, en Moissac, donde el agua en las calles alcanzó una altura de 6 a 7 m. Esta riada provocó 200 víctimas mortales, inundó 30.000 hectáreas y destruyó 3000 viviendas y 11 puentes. En Toulouse, el desbordamiento del Garona causó 171 muertos.
Octubre de 1940	Rosellón, Francia.	Inundaciones en el Rosellón, Francia. Las lluvias torrenciales superaron los 1000 mm y esto causó una gran avalancha de agua en los ríos Agly, Têt y Tech, de corto recorrido y fuerte pendiente, que bajaron impetuosos desde los Pirineos inundando la llanura rosellonesa. El desastre se cobró la vida de 50 personas y las riadas destruyeron 43 puentes.
Noviembre	Rovigo,	En Italia se desborda el río Po, que llegó a un caudal de 13,000 m ³ /s afectó a las provincias de Rovigo y Venecia con 84 víctimas mortales, 180,000 personas sin hogar y

Europa		
de 1951	Venecia, Italia.	100,000 anegadas. La rotura de tres diques provocó que el Po arrasara la provincia de Rovigo la cual quedó arruinada y perdió, como consecuencia de la ola migratoria tras el desastre, el 50% de su población.
Febrero de 1953	Zelanda, Holanda Meridional	Una combinación de marea viva con una severa tormenta del noroeste provocó la rotura de numerosos diques y una inundación enorme que costó la vida a más de 1.800 personas. A partir de este desastre se iniciaron los trabajos del Plan Delta.
Noviembre de 1966	Véneto, Toscana, Italia	Aluvión, en las regiones italianas del Véneto y Toscana. Las lluvias en menos de 24 horas fueron de más de 400 mm en la cabecera del Arno y de 190 mm en Florencia lo que provocó la mayor crecida de este río que se cifró en 3,540 m ³ /s en Rosano y 4500 m ³ /s en la capital toscana. Las aguas invadieron el casco histórico florentino alcanzando más de 5 m de altura en algunos puntos como la Piazza de la Santa Croce, y causando graves daños, sobre todo en el Ponte Vecchio. Pisa sufrió también el desbordamiento. Otro foco lluvioso importante se localizó más al norte, en el Véneto.
Agosto de 2002	Alemania, Austria, República Checa, Eslovaquia, Hungría, Croacia y Rumanía.	Inundaciones europeas de 2002 que afectó principalmente a las cuencas del Elba y del Danubio, en Alemania, Austria, República Checa, Eslovaquia, Hungría, Croacia y Rumanía. En Praga el río Moldava, afluente del Elba, llegó al máximo histórico de 5000 m ³ /s inundando buena parte del centro histórico y el metro. En Dresde el Elba alcanzó el nivel récord que databa de 1845, afectando a buena parte de la ciudad. El río Danubio se desbordó en Passau (Alemania), y aunque la crecida fue muy fuerte no causó daños importantes aguas abajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la página (<http://es.wikipedia.org/>, 2013).

El registro más antiguo de inundaciones que se tiene en México es el de Tenochtitlán, llamado "Albarradón de Nezahualcóyotl". Durante el reinado de Moctezuma, Tenochtitlán sufrió la inundación más severa desde su fundación, devastando con esta la ciudad, cultivos y muchas pérdidas humanas. Como consecuencia Netzahualcóyotl, ordenó hacer una cerca de madera y piedra para detener la fuerza del agua, evitando con esto que no llegara a la ciudad. Esta tenía una longitud de 16 kilómetros y quince metros de ancho, la albarrada dividió la laguna en dos partes: la del oriente, de aguas saladas y la occidental, que rodeaba la metrópoli de aguas dulces. El objetivo de la albarrada era evitar el desbordamiento de lago de Texcoco sobre Tenochtitlán cuando el agua creciera, esta servía como presa y distribuidora de agua. Después de esta construcción la ciudad sufrió escasas inundaciones y las pocas que padecieron fueron por errores humanos (<http://www.elombligodelaluna.com.mx>, 2012).

Figura 2.4
Albarradón de Nezahualcóyotl.



Fuente: Figura extraída de la página (<http://www.elombligodelaluna.com.mx>, 2012).

Durante la Nueva España en 1629 se registró la peor tormenta de la historia en la ciudad de México, causando treinta mil víctimas y el desalojo de veinte mil familias españolas. Esta inundación duro un periodo aproximado de cinco años (<http://www.elombligodelaluna.com.mx>, 2012).

El 16 de mayo de 1900, durante el gobierno de Porfirio Díaz se inauguraron el Gran Canal del Desagüe y el primer Túnel de Tequixquiac, esto tuvo un costo de dieciséis millones de pesos. Gracias a esta obra se pudo prevenir las inundaciones que tanto afectaban al valle de México (<http://www.elombligodelaluna.com.mx>, 2012).

Cuadro 2.4
Lista de daños por inundaciones en México.

Fecha	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada
1940	Lluvias de invierno	Sinaloa y Sonora	10	159,000
1959	Ciclón de Manzanillo	Colima y Jalisco	1500	1,600
1960	Lluvias de invierno	Sonora, Sinaloa y Chihuahua	3	96,000
1976	Huracán Lisa	Baja California Sur y Sonora	600	10,000
1988	Huracán Gilbert	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila	225	139,374
1990	Huracán Diana	Veracruz e Hidalgo	139	50,000
1992	Lluvias de invierno	Nayarit	64	100,000
1995	Huracán Ismael	Sonora, Sinaloa y Baja California Sur	200	24,111
1997	Huracán Pauline	Guerrero y Oaxaca	228	8,500
1998	Lluvias	Chiapas	229	28,753
1999	Depresión tropical 11	Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco	387	1,904,000
2000	Huracán Keith	Quintana Roo, Chiapas, Tamaulipas y Nuevo León	9	

Fecha	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada
2001	Lluvias	Varios Estados	95	126,954
2002	Huracán Isidore	Yucatán y Campeche	4	500,000
2003	Lluvias de verano	Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas	14	256,301
2004	Frente frío no. 49	Coahuila	38	6,692
2005	Huracán Stan	Chiapas	86	162,570
2006	Huracán John	Baja California Sur	5	13,090
2007	Lluvias, inundaciones y ciclones tropicales	Tabasco y Nuevo León	53	2,906,940

Fuente: Elaboración propia a partir de (CENAPRED, 2009).

En el 2007 los estados de Tabasco y norte de Chiapas vivieron la mayor catástrofe natural de su historia. A partir del 23 de octubre de este año, en la costa del Golfo de México, delante de Tabasco, empezaron los efectos del frente frío número 4, uno de los fenómenos más violentos que se haya registrado. Con el paso de los días, el frente frío no. 4 se estacionó sobre el sureste de México y el Mar Caribe, incrementando sus efectos sobre estos estados, debido a la presencia de una depresión tropical a la altura de Cuba, que después se convertiría en el huracán "Noel" (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

El Servicio Meteorológico Nacional calculó que sus días de mayor fuerza, fueron del 28 al 30 de octubre de 2007, el frente frío no. 4 derramó 962 milímetros de lluvia, es decir, casi un metro (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

El desbordamiento de la cuenca del río Grijalva que es la que abraza a la capital tabasqueña, y la rodea con dos brazos fluviales que conforman su complicada hidrografía, este sistema está conformado por dos grandes fuerzas de agua, mismas que operan sobre Villahermosa, fue la que en mayor parte provoco la gran inundación de 2007 (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

A causa de esto fue necesario evacuar a 850 mil personas, de las cuales 158 mil permanecieron en alguno de los 1,435 albergues instalados y el resto con familiares o amigos. Se estima que por lo menos 500,000 de los damnificados perdieron en el agua, una parte importante o la totalidad de su patrimonio (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

Según la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), los daños globales a la economía de la región fueron de 31 mil 871 millones de pesos (equivalente al 30% del PIB del estado), traducidos en las pérdidas de los patrimonios familiares, en los daños mayores en carreteras y puentes, en la pérdida de 570 mil hectáreas agrícolas, y en los daños a la industria y a los servicios (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

En el momento más supremo de la inundación, el 62 por ciento de la llanura tabasqueña se encontraba cubierto por agua. Dada su magnitud, la anegación podía ser vista desde el espacio por los satélites de la NASA (Jiménez, Jorge Eduardo ; <http://www.tabascohoy.com/>, 2011).

Figura 2.5
Inundaciones en el sureste de Chiapas.



Fuente: Figura extraída de la página (<http://www.elombligodelaluna.com.mx>, 2012).

2.2 La pérdida máxima probable

La pérdida máxima probable es una metodología de análisis de riesgos que busca determinar el máximo potencial de pérdidas, derivadas estas de daños tanto a personas como a propiedades, que puedan ser razonablemente esperadas como resultado de las operaciones (Magallanes R., 2011).

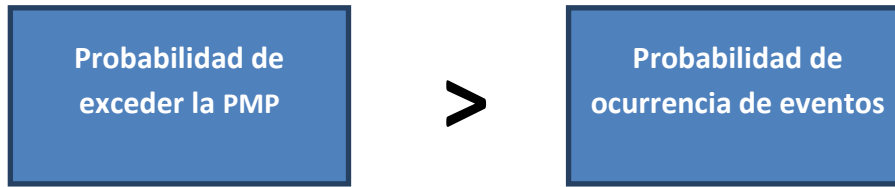
La metodología busca medir probabilidades, no posibilidades, para identificar eventos que sean suficientemente probables como para establecer una cobertura financiera para cubrir las consecuencias de los eventos (Magallanes R., 2011).

Las coberturas de los seguros se establecen a un nivel que provee la suficiente protección financiera contra las consecuencias de los eventos que se estima serían suficientemente probables de acuerdo a las regulaciones (Magallanes R., 2011).

La pérdida máxima probable utiliza normalmente un umbral de probabilidad como medida cuantitativa para distinguir eventos improbables de aquellos que deberían ser incluidos en la estimación de esta y contar con una cobertura financiera (Magallanes R., 2011).

El nivel de ocurrencia debe ser menor que la probabilidad de que las pérdidas excedan la pérdida máxima probable:

Cuadro 2.5
Nivel de umbral.



Fuente: Elaboración a partir de (Magallanes R., 2011).

Esta metodología busca medir probabilidades, por lo cual es necesario contar con estadísticas de ocurrencia de eventos. Estas estadísticas buscan responder, por ejemplo, a cuál es el valor promedio y el valor máximo de los daños directos y consecuenciales en una inundación (Magallanes R., 2011).

2.2.1 Definición y metodología de cálculo

De acuerdo al ANEXO 7.9.1 que emite la Comisión Nacional de Seguros y fianzas, con el título Bases técnicas para la determinación de la pérdida máxima probable de los Seguros de huracán y/u otros riesgos hidrometeorológicos, presenta los fundamentos técnicos para la estimación de la pérdida máxima probable asociada a carteras de bienes asegurados contra daños producidos por huracán y otros riesgos hidrometeorológicos (CNSF, 2010).

La definición de pérdida máxima probable, también conocida como PML, es un estimador del tamaño de la pérdida que se excedería poco frecuentemente en una cartera sometida a la ocurrencia de ciertos eventos, en este caso los hidrometeorológicos (CNSF, 2010).

La PML para estos casos se define como la pérdida asociada a un periodo de retorno de 1,500 años, es decir, aquella que se exceda, en promedio, una vez cada 1,500 años. Esto quiere decir que la PML es la pérdida para la cual se satisface que:

$$V(PML) = \frac{1}{1500} \text{años}^{-1}$$

La PML es una pérdida que será excedida poco frecuentemente. Qué tampoco frecuentemente se esté dispuesto a aceptar que las pérdidas excedan la PML, mide, esencialmente, el riesgo tolerable (CNSF, 2010).

El riesgo tolerable al asociar la PML a un periodo de retorno de 1,500 años es, en promedio, una excedencia cada 1,500 años. Por tratarse de un proceso de ocurrencia aleatorio, modelado como un proceso de Poisson, que en promedio se tenga una excedencia cada 1,500 años no significa que la

próxima excedencia ocurrirá dentro de 1,500 años; el tiempo de ocurrencia es aleatorio y no puede determinarse cuándo ocurrirá el siguiente gran evento (CNSF, 2010).

Sin embargo, aunque no se puede saber el instante de ocurrencia del próximo evento, bajo la hipótesis de ocurrencia Poissoniana, si es posible determinar la probabilidad de que en los próximos T_e años (el lapso de exposición) ocurra al menos un evento con pérdidas superiores a la PML, es decir, lo que en análisis probabilista se conoce como la “probabilidad de ruina”, P_R (CNSF, 2010).

Esta probabilidad se puede calcular de la siguiente forma:

$$P_R = 1 - \exp(-T_e/T_r)$$

donde T_r es el periodo de retorno asociado a la PML, en este caso 1,500 años. Un ejemplo sería, la probabilidad de que la PML se exceda al menos una vez durante el próximo año, P_{R1} , vale:

$$P_{R1} = 1 - \exp(-1/1500) \approx \frac{1}{1500}$$

de donde se observa que, para periodos de retorno grandes, la probabilidad anual de excedencia es aproximadamente igual al inverso del periodo de retorno de la PML. En la tabla siguiente se presentan valores de la probabilidad de excedencia de la PML que tiene un periodo de retorno de 1500 años, para diversos valores del lapso de exposición:

Cuadro 2.6
Probabilidad de que la PML se exceda en los próximos T_e años.

Periodo de exposición (T_e , años)			
1	10	20	50
0.1%	0.7%	1.3%	3.3%

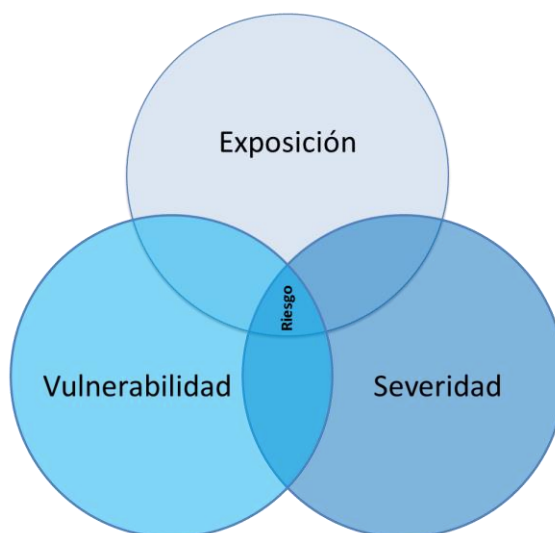
Fuente: Elaboración a partir de (CNSF, 2010).

Se puede observar que la probabilidad de que la PML sea excedida en los próximos 20 años es 1.3% (CNSF, 2010).

2.3 Análisis del Riesgo

Los factores que integran al riesgo de inundación son los siguientes:

Figura 2.6
Ciclo del riesgo.



Fuente: Elaboración a partir de (Arreguín Cortés, 2011).

El análisis del riesgo debe convertirse en un componente fundamental de la planificación del desarrollo de cualquier región. Los diferentes eventos potencialmente peligrosos para la población deben ser analizados, no sólo en su dinámica propia, sino en la forma que los seres humanos han influido para que dichos eventos puedan llegar a convertirse en desastres, los que en muchos casos han causado impactos severos sobre poblaciones y sus infraestructuras (Giraldo Rincón & Valencia Zambrano, 2005).

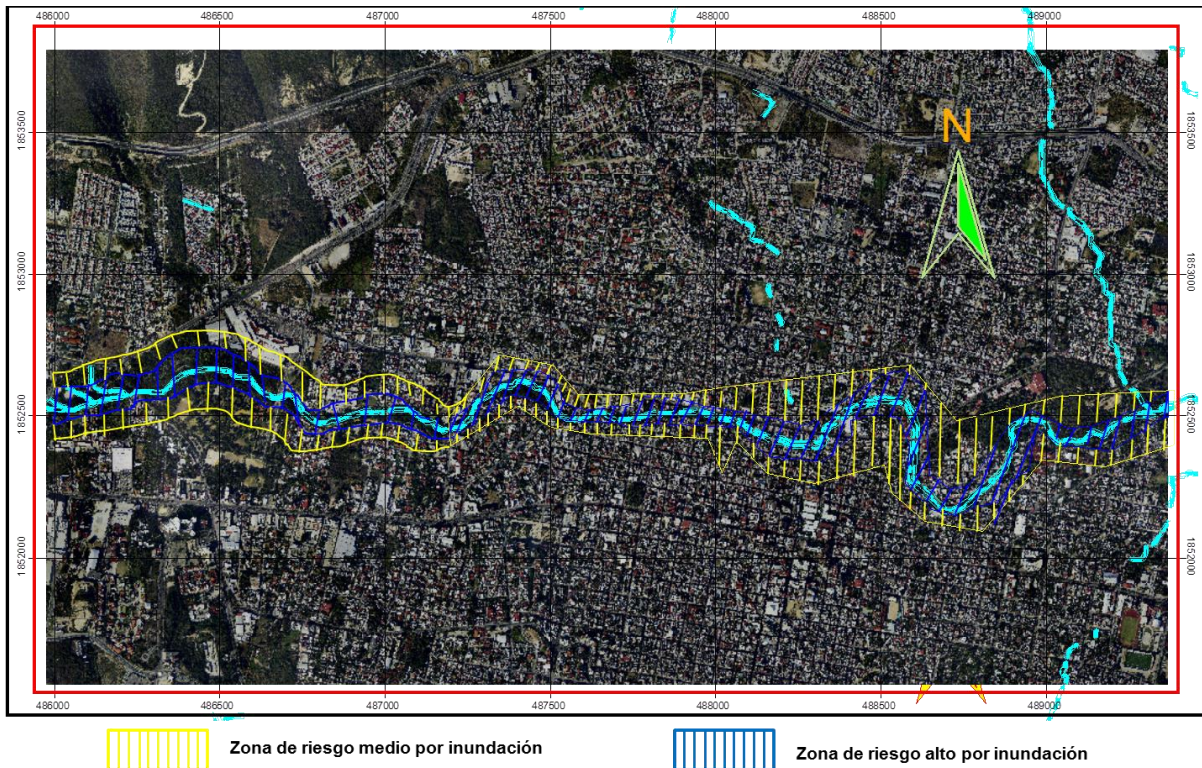
Para realizar un análisis de riesgo por inundación se empieza por investigar los aspectos generales de la región a estudiar, los antecedentes, una descripción de la zona, conceptos generales como aproximación a la amenaza, aproximación a la vulnerabilidad e identificación y aproximación al riesgo; los aspectos metodológicos y el alcance del estudio.

En segunda instancia se procede a analizar la amenaza, lo que se refiere a las características de esta como es la tipología de la inundación, la geomorfología del cauce, los aspectos hidrológicos, los aspectos hidrodinámicos, el análisis de la dinámica del río, los factores que condicionan la dinámica del río y por último la zonificación. Después se empieza con la categorización de la amenaza hidrológica y la categorización de la amenaza geotécnica asociada al río obteniendo los factores de ponderación y aplicación de parámetros para ambos casos.

El tercer paso es analizar la vulnerabilidad mediante los componentes de esta, como los factores de exposición, la vulnerabilidad física indicativa, la evaluación estructural, el análisis de resultados de vulnerabilidad física indicativa y la vulnerabilidad relativa.

El cuarto paso es la evaluación del riesgo, cuales son los componentes principales, cuál es su clasificación y el análisis sectorial de resultados. Y el último paso es buscar una estrategia para la reducción del riesgo mediante los elementos de análisis, los escenarios de acción, la gestión compensatoria y la gestión prospectiva, promoviendo sus acciones y prioridades.

Figura 2.7
Ejemplo de la identificación de la zona inundable en el río Sabinal en Tuxtla Gutiérrez.



Fuente: Elaboración a partir de (Sistema Nacional de Protección Civil Chiapas, 2005).

2.3.1 Metodología de la CNSF

La metodología de la CNSF para el cálculo de riesgo por inundación, es mediante el modelo de inundación, publicado en el anexo 7.9.1., emitido por la comisión. A continuación se describe su construcción.

El peligro de inundación por exceso de lluvia se relaciona directamente con la precipitación pluvial en la cuenca donde se ubica el inmueble asegurado y las características de la topografía del terreno circundante (CNSF, 2010).

Por lo tanto, el procedimiento utilizado para determinar los escurrimientos a partir de la precipitación que los origina está basado en un modelo de lluvia-escurrimiento; así, la secuencia metodológica del

sistema de estimación de riesgo por inundación divide la evaluación del peligro en un análisis hidrológico y en otro hidráulico (CNSF, 2010).

El análisis hidrológico incluye el estudio de la precipitación en la cuenca donde se localiza el inmueble asegurado y su relación con el escurrimiento que habrá de concentrarse en las obras de drenaje o las corrientes naturales. El análisis hidráulico se refiere al comportamiento en el tiempo del caudal obtenido con el análisis hidrológico, al transitar por el drenaje o los cauces fluviales (CNSF, 2010).

Para conocer la cantidad de precipitación en una cuenca dado un escenario de lluvia, se calcula la media aritmética de las alturas de precipitación, P_m (CNSF, 2010),

$$P_m = \frac{1}{A} \int_A P(x, y) dA \quad (1.29)$$

Donde $P(x, y)$ es la precipitación por unidad de área y A es el área de la cuenca analizada (CNSF, 2010).

El volumen de precipitación que sobrepasa la capacidad de la sección de un cauce natural dado un escenario de lluvia, se derramará hacia la llanura circundante al punto de desbordamiento, dando lugar a una inundación que afectará a los inmuebles localizados en el sitio. Este nivel de inundación se calcula con la diferencia entre el gasto que escurre hasta un punto analizado en el cauce del río, y el gasto que puede fluir por la sección del cauce natural dadas sus propiedades geométricas (CNSF, 2010).

El gasto que ocurre hasta un punto analizado en el cauce del río se calcula de la siguiente manera:

$$Q_p = \frac{2V_{ed}}{t_b} \quad (1.30)$$

donde: Q_p es el gasto de pico que escurrirá hacia el punto analizado en el cauce del río; V_{ed} es el volumen de escurrimiento directo en el punto analizado, el cual depende del coeficiente de escurrimiento para el área drenada y el área de la cuenca; t_b es el tiempo de base para el hidrograma unitario que contiene el gasto pico (CNSF, 2010).

El gasto que puede fluir por la sección de un cauce natural dada su geometría, se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{n} * S^{1/2} * R_{Río}^{2/3} * A_{Río} \quad (1.31)$$

donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, S es la pendiente longitudinal del cauce, $R_{Río}$ es el radio hidráulico y $A_{Río}$ es el área de la sección transversal (CNSF, 2010).

La diferencia de los gastos calculados con las ecuaciones 1.30 y 1.31 corresponden al gasto en exceso que sobrepasa la capacidad de la sección del cauce natural y que ocasionará inundación el cauce del terreno circundante (CNSF, 2010).

Para determinar el área del terreno inundado durante un escenario de lluvia y el tirante de inundación, se emplean ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical (CNSF, 2010).

Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{\frac{4}{3}}} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad (1.32)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{\frac{4}{3}}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad (1.33)$$

en donde u y v son los componentes de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente, n es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, h es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y t es el tiempo (CNSF, 2010).

El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad (1.34)$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo Δx y ancho Δy . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales formado por las expresiones 1.32, 1.33 y 1.34 considerando condiciones iniciales y de frontera (CNSF, 2010).

2.3.2 Metodología del CENAPRED

La metodología del CENAPRED para el cálculo de riesgo por inundación es a partir de la “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómeno Hidrometeorológicos)”, en lo correspondiente al capítulo 1 anexo 3. El cálculo de este riesgo es de la siguiente manera.

El riesgo desde el punto de vista de pérdida, puede verse como el movimiento de tres factores importantes entre sí: el costo o valor de los bienes expuestos a un evento, por su nivel de vulnerabilidad o daño ante el evento en acción, por la probabilidad de que el evento ocurra. De lo anterior podemos expresar al riesgo como:

$$R = CVP \quad (1)$$

donde C es igual al valor de los bienes expuestos, P es igual al peligro y V igual a la vulnerabilidad (CENAPRED, 2006).

Se entiende por el valor de los bienes expuestos (C en la ecuación 1) a la cuantía de lo que es susceptible de afectarse durante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. En muchos casos C tiene unidades monetarias; sin embargo, habrá ocasiones en que se necesite expresar a C de otra forma, por ejemplo, si lo susceptible de afectarse son vidas humanas (CENAPRED, 2006).

La vulnerabilidad es una medida de qué tan susceptible es un bien expuesto a ser dañado ante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños. La vulnerabilidad suele expresarse como un número entre 0 y 1. 0 implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y 1 implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. La vulnerabilidad puede representarse con una función matemática o en forma de una tabla llamada matriz de vulnerabilidad (CENAPRED, 2006).

Para las medidas de peligro, se dirá que evaluarlo significa cuantificar, en términos de probabilidades, la ocurrencia, en un lapso dado, de fenómenos potencialmente dañinos para los bienes expuestos. Para evitar ambigüedades en la definición del acontecimiento potencialmente dañino, conviene medir su potencial con una cantidad que se llama intensidad (CENAPRED, 2006).

La caracterización del fenómeno, entonces, sólo es completa si se especifica su intensidad. Idealmente, ésta debe ser una cantidad (o un vector de cantidades) que puede ser asociada mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos (CENAPRED, 2006).

Como herramienta para medir el peligro, se utiliza la tasa de excedencia de eventos con intensidad i , $u(i)$, definida como el número medio de veces en que, por unidad de tiempo, ocurre un evento que excede tal intensidad. La tasa de excedencia es una función decreciente con la intensidad. En vista de su definición, la densidad de probabilidades de la intensidad, $p(i)$, puede obtenerse derivando $u(i)$ de derecha a izquierda y normalizando posteriormente:

$$p(i) = -k \frac{du(i)}{di} \quad (2)$$

Donde la constante k es tal que $p(i)$ integra 1. Se puede notar que $du(i)/di$ es proporcional al número de eventos con intensidad igual a i o, más rigurosamente, con intensidad entre i e $i+di$ (CENAPRED, 2006).

A partir de $\nu(i)$, suponiendo ocurrencias aleatorias con distribución exponencial, es posible calcular la probabilidad que cierto valor de intensidad es excedido en un lapso T , que no es más que la probabilidad que haya que esperar menos de T años para que se produzca un evento en que se exceda la intensidad i . Puesto que el tiempo entre eventos con intensidad igual o superior a i tiene distribución exponencial:

$$Pe(i, T) = \int_0^T \nu(i)e^{-\nu(i)t} dt = 1 - e^{-\nu(i)T} \quad (3)$$

$Pe(i, T)$, conocida como la probabilidad de excedencia de la intensidad i en un lapso T , es una medida de peligro adecuada para todo proceso de ocurrencia, mientras que $\nu(i)$ lo es sólo para el modelo de ocurrencias aleatorias de Poisson (CENAPRED, 2006).

La expresión (1), nos da el riesgo ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad, sin embargo, para medir el riesgo será preferente tomar el promedio de daños esperados cuando ocurra un evento, es decir, obtener el riesgo ante el próximo evento (CENAPRED, 2006).

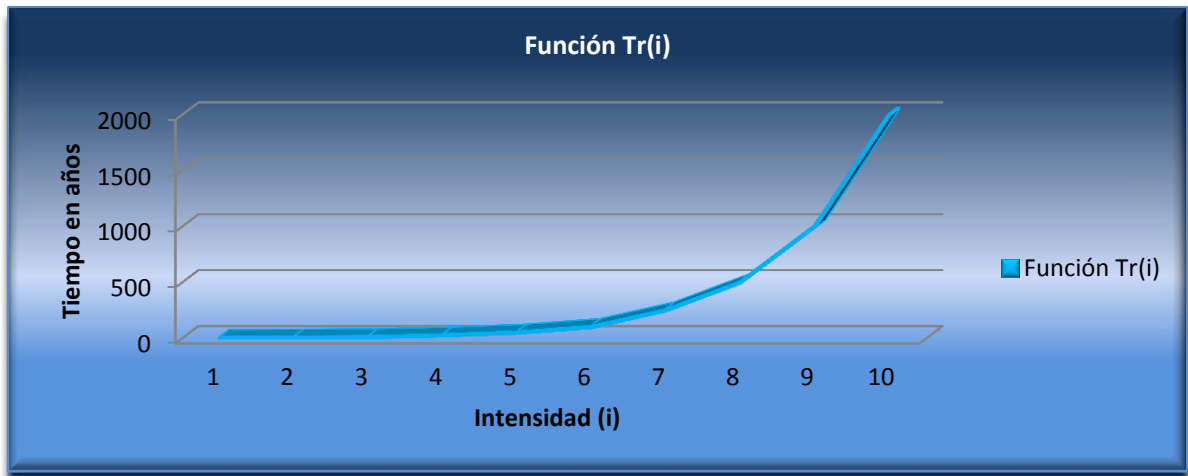
El riesgo ante el próximo evento es la suma de los asociados a los diferentes niveles de intensidad. De la ecuación (1) sumamos los riesgos para cada intensidad, y llegamos a:

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \quad (4)$$

Otra forma que tiene el CENAPRED para calcular el riesgo es a través de periodos de retorno, esta forma mide la excedencia de intensidad de un fenómeno a través del tiempo. El periodo de retorno es definido como el tiempo promedio entre las ocurrencias de un evento que excede cierta intensidad (CENAPRED, 2006).

El periodo de retorno puede verse como la función $Tr(i)$, cuyo dominio son los diferentes niveles de intensidad i , y la imagen es el lapso promedio de tiempo entre ocurrencias de eventos con intensidad i , generalmente dada en años. La función $Tr(i)$ es creciente con la intensidad, es decir, a mayor magnitud o grado de un evento, aumenta el tiempo entre excedencias (CENAPRED, 2006).

Gráfica 2.1
Representación de distintos periodos de retorno.



Fuente: Elaboración a partir de (CENAPRED, 2006).

Lo que interesa conocer es el periodo de retorno de eventos máximos anuales, ya que es la manera más común de trabajar con series hidrológicas (CENAPRED, 2006).

Se puede decir que la función de periodo de retorno de máximos anuales no aprovecha toda la información disponible. Es importante señalar que la varianza de las observaciones del fenómeno del cual se obtuvieron los periodos de retorno para cada nivel de intensidad, permitirá la estimación el error de la función $Tr(i)$ (CENAPRED, 2006).

Si una excedencia ocurre en promedio cada $Tr(i)$ años, entonces la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i en cualquier año es ²

$$Pe = \frac{1}{Tr(i)} \quad (5)$$

siempre que $Tr(i) > 1$.

En la siguiente tabla se muestran las probabilidades de excedencia para cada periodo de retorno (CENAPRED, 2006).

² Statistical Methods in Hydrology. Charles T. Haan, 6ª Edición, 1994. Página 3.

Cuadro 2.7
Probabilidad de excedencia por periodo de retorno.

Intensidad (i)	Pe
1	0.5
2	0.2
3	0.1
4	0.04
5	0.02
6	0.01
7	0.004
8	0.002
9	0.001
10	0.0005

Fuente: Elaboración a partir de (CENAPRED, 2006).

A pesar de que se puede obtener la probabilidad de excedencia de intensidad de un fenómeno para un tiempo determinado por medio del periodo de retorno, ésta no resulta suficiente para medir el peligro ante la existencia de un próximo evento (CENAPRED, 2006).

Se puede observar que de (2), la expresión $u(i)$ es la tasa de excedencia de intensidad i , definida como el número medio de veces en que, por unidad de tiempo ocurre un evento que excede tal intensidad (CENAPRED, 2006).

La tasa de excedencia es una función decreciente con la intensidad.

Se sabe que, por su definición, la función de peligro requiere de la existencia de una tasa de excedencia de intensidad, de tal forma que si solamente contamos con la información estadística de los periodos de retorno, se deberá construir la función $u(i)$ partiendo de la función $tr(i)$ (CENAPRED, 2006).

Un método para obtener la tasa de excedencia de un fenómeno, partiendo de sus periodos de retorno para diferentes intensidades, consiste en realizar una proyección del número de eventos que ocurrirán en promedio durante un intervalo de tiempo (CENAPRED, 2006).

En general, se puede obtener $u(i)$ con la siguiente expresión

$$v(i) = \frac{t}{Tr(i)} \quad (6)$$

donde t es el número de años proyectado.

La función de peligro se calcula usando la ecuación (2), para obtener la probabilidad de excedencia $P(i)$ de que un evento sea de intensidad i , integrando de i a $i+1$

$$P(i) = -\frac{1}{v(i)} \int_i^{i+1} \frac{dv(i)}{di} di = -\frac{1}{v(1)} [v(i+1) - v(i)]$$

Para saber cuál es la relación entre la función de peligro y el periodo de retorno, se tiene que, la función de peligro da la probabilidad de que un evento exceda cierta intensidad y no avance a la siguiente y el periodo de retorno proporciona el tiempo esperado entre excedencias de cierta intensidad (CENAPRED, 2006).

Matemáticamente se tiene la siguiente expresión.

De (2) y (6) se obtiene que

$$p(i) = -\frac{1}{v(1)} \frac{dv(i)}{di} = -\frac{Tr(1)}{t} \frac{d}{di} \frac{t}{Tr(i)} = -Tr(i) \frac{dTr(i)^{-1}}{di} \quad (7)$$

Integrando $p(i)$ de i a $i+1$ se llega a

$$P(i) = \int_i^{i+1} p(i) di = -Tr \int_i^{i+1} \frac{dTr(i)^{-1}}{di} di = -Tr(1) \left[\frac{1}{Tr(i+1)} - \frac{1}{Tr(i)} \right] = \frac{Tr(1)}{Tr(i)} - \frac{Tr(1)}{Tr(i+1)} \quad (8)$$

La expresión (8) se puede interpretar como el número de eventos promedio que exceden la intensidad i al tiempo $Tr(1)$, que no llegaron a intensidad $i+1$, es decir, $Tr(1)/Tr(i)$ es la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i durante el tiempo $Tr(1)$ (CENAPRED, 2006).

De igual forma, $Tr(1)/Tr(i+1)$ es la probabilidad de que un evento exceda la intensidad $i+1$ durante el tiempo $Tr(1)$, entonces la expresión (12) da la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i sin que avance a la intensidad $i+1$ durante el tiempo $Tr(1)$ (CENAPRED, 2006).

Es importante recordar las diferencias que tienen los distintos métodos, tanto Pe como $P(i)$ manejan un concepto diferente. El resultado de la correlación puede decirse que es muy significativo ya que se está obteniendo $P(i)$ y Pe partiendo ambas de $Tr(i)$. Si $Tr(1)=1$, tenemos que

$$P(i) = \frac{1}{Tr(i)} - \frac{1}{Tr(i+1)} \quad (9)$$

Si $Tr(i+1)$ es un valor muy grande, de tal forma que $1/Tr(i+1)$ converge a cero, entonces

$$\frac{1}{Tr(i)} - \frac{1}{Tr(i+1)} \approx \frac{1}{Tr(i)} \quad (10)$$

Es decir

$$P(i) \approx Pe \quad (11)$$

Aparentemente se puede usar como función de peligro $P(i)$ la probabilidad de excedencia Pe , aunque para periodos de retorno pequeños el error es grande (CENAPRED, 2006).

La consideración de agregar una intensidad “ficticia” aumenta un poco el error para el Tr mayor.

Para las medidas del riesgo con periodos de retorno se tiene que $R(i)$ es un índice de riesgo para cada intensidad i que se obtiene de operar la expresión (1) haciendo a C igual a \$1.00

$$R(i) = P(i)V(i) \quad (12)$$

El riesgo anual por intensidad, $Ra(i)$, es el riesgo para cada intensidad i que se tendrá para el inicio del año; se obtiene de multiplicar el promedio n_i de eventos que superan la intensidad i por la expresión (12).

$$R(a, i) = n_i P(i)V(i) \quad (13)$$

Para el cálculo de riesgo ante el próximo evento de la expresión (5), si $C = \$1.00$, el riesgo es la suma de las $R(i)$

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \quad (14)$$

Para obtener el riesgo anual del próximo evento Ra , bastara con multiplicar (14) por el promedio N de eventos que superan la mínima intensidad capaz de causar daños al año.

$$R_a = CN \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \quad (15)$$

Como se puede observar, el riesgo ante el próximo evento R_p expresa la pérdida promedio por evento, mientras que el riesgo anual Ra lo podemos ocupar para realizar un fondo anual para resarcir

el promedio de pérdidas causadas durante un año por eventos dañinos. Ra y Rp se pueden ver como índices de riesgo para el caso en que $C=\$1.00$ (CENAPRED, 2006).

2.4 Modelo Ley Fuga

El modelo de Ley Fuga o modelo Poisson-Exponencial, se emplea utilizando simultáneamente una distribución Poisson, esta representa la probabilidad de ocurrencia de un evento; y una distribución Exponencial, que expresa la magnitud media de dicho evento (de la Cruz Bartolón , 2009).

El nombre de “Ley Fuga” (Loi de Fuites), en francés, se deriva del estudio que realizó M. Morlat (BABUSIAUX, C., 1969) en la distribución de los gastos que se fugaban de una red de distribución de gas en Francia. Esta ley ha sido utilizada para describir los regímenes de lluvia en África, en Benin (Lebel y Le Barbé 1997), en Togo (Seguis, 1988), en Nigeria (Le Barbé y Lebel, 1997) y en Burkina Faso (Tapsoba, 1997). En el caso de México los estudios realizados por el Dr. Martin Alfonso Gutiérrez López sobre su tesis de doctorado con título Modelos estocásticos de los patrones de precipitación a escala regional para la previsión de inundaciones en el norte de México (de la Cruz Bartolón , 2009).

Esta Ley tiene todo un sustento matemático, esta tiene su origen en el estudio de series cronológicas de eventos separados por duraciones aleatorias. Sus bondades en la aplicación a la hidrología estocástica son innumerables; permite conocer el régimen de precipitación en una región determinada, los dos parámetros de la Ley se pueden asociar con variables físicas y con ello conocer con detalle la distribución temporal y espacial de la lluvia, además de encontrar relaciones simples de los parámetros con el entorno geográfico y físico de estudio. Estos parámetros se obtienen de forma (λ) y escala (β) usando el modelo Poisson-Exponencial (Ley Fuga), esto nos indica el número de eventos con lluvia y la lámina media de lluvia por evento, según el intervalo de tiempo T (de la Cruz Bartolón , 2009).

Las virtudes que tiene el empleo de la Ley Fuga es que sirve como una herramienta adecuada en el tratamiento del problema de eventos extremos, en el caso de inundaciones este evento es la lluvia (de la Cruz Bartolón , 2009).

2.4.1 Modelo Poisson-Exponencial

La forma más adecuada para trabajar la función de distribución de probabilidad conjunta, la distribución Poisson y la distribución Exponencial, para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento y la magnitud media del mismo, es a través de la Ley Fuga (de la Cruz Bartolón , 2009).

Si se considera una variable aleatoria, $y \geq 0$, que sigue una distribución exponencial simple, con parámetro de escala, su función de densidad, puede expresarse como:

$$f(y) = \frac{1}{\beta} e^{-y/\beta} \quad (1)$$

Sea ℓ un número entero aleatorio > 0 , que sigue una distribución Poisson, de parámetro de forma $\lambda > 0$. El valor de su probabilidad estará dado por:

$$p(\ell) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^\ell}{\ell!} \quad (2)$$

De esta forma, una variable aleatoria $x = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_\ell$ puede representarse como la suma de $\ell > 0$ variables aleatorias independientes que siguen una Ley Fuga con parámetro de forma λ y de escala β . Respecto a la duración, es equivalente decir: que un número de eventos $n(t)$ seguirá una distribución Poisson para una duración t , o bien que el intervalo T entre dos eventos consecutivos sigue una ley exponencial de parámetro de escala μ_T , sobre el mismo tiempo t (de la Cruz Bartolón, 2009).

$$f(T) = \frac{1}{\mu_T} e^{-T/\mu_T} \quad (3)$$

Donde:

μ_T es el parámetro de forma de la ley exponencial

T es el intervalo entre dos eventos

Sea $t_r = T_1 + T_2 + \dots + T_r$ la suma de r variables que siguen una distribución exponencial. Es sabido que la función de densidad de la suma de r variables aleatorias independientes es el producto de convolución de las densidades de cada una de ellas (Tapsoba, 1997). De esta forma, la ley condicional de t_r será una distribución Gamma incompleta, con función de densidad de probabilidad igual a:

$$f(t_r) = \frac{\left(\frac{t_r}{\mu_T}\right)^{r-1} e^{-\frac{t_r}{\mu_T}}}{\mu_T (r-1)!} \quad (4)$$

Se cumple que $Prob(t_r \leq t) = \int_0^t f(t_r) dt_r = F_{t_r}(t)$; por lo que $Prob[n(t) = t] = Prob(t_r > t) = 1 - F_{t_r}(t)$ que también puede expresarse como:

$$Prob[n(t) = t] = Prob[n(t) < r + 1] - Prob[n(t) < r] = F_{t_r}(t) - F_{t_{r+1}}(t).$$

Desarrollando para x , se tiene:

$$Prob[n(t) = r] = \int_0^t \frac{\left(\frac{x}{\mu_T}\right)^{r-1} e^{-\frac{x}{\mu_T}}}{\mu_T(r-1)!} dx - \int_0^t \frac{\left(\frac{x}{\mu_T}\right)^r e^{-\frac{x}{\mu_T}}}{\mu_T(r)!} dx \quad (5)$$

Integrando por partes:

$$Prob[n(t) = r] = \frac{e^{-\frac{t}{\mu_T}} \left(\frac{t}{\mu_T}\right)^r}{r!} \quad (6)$$

Partiendo de una distribución exponencial como la duración entre dos eventos, con parámetro de forma μ_T , se ha demostrado que el número de eventos $n(t)$, sobre un periodo t , sigue una distribución Poisson con parámetro $\left(\frac{t}{\mu_T}\right)$ (de la Cruz Bartolón, 2009).

2.4.2 Distribución Poisson

La función de distribución de Poisson, es discreta, representa los éxitos llegados como si fueran puntos de una línea continua. Predice el número de sucesos en un determinado período de tiempo; y en general permite representar situaciones en las cuales hay una numeración, ya que la variable toma valores enteros positivos (de la Cruz Bartolón, 2009).

Su expresión es la siguiente:

$$f(x) = P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad x > 0 \quad (7)$$

Donde: $\lambda = \bar{x}$

Donde: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

2.4.3 Función de distribución de probabilidad exponencial

La distribución exponencial tiene aplicación cuando una secuencia de eventos hidrológicos es considerada como un proceso de Poisson, donde los eventos suceden instantáneamente a lo largo del tiempo. El tiempo entre tales eventos, o de interarribo, se describe por una distribución exponencial cuyo parámetro β es la tasa media de ocurrencia de los eventos (de la Cruz Bartolón, 2009).

La ventaja que ofrece esta distribución es en la facilidad de estimar el parámetro a partir de la información observada (de la Cruz Bartolón, 2009).

$$F(x) = 1 - \beta e^{-\beta x}; \quad x \geq 0 \quad (8)$$

$$f(x) = \beta e^{-\beta x} \quad (9)$$

Donde

β es el parámetro de escala

$$\mu = 1/\beta; \quad \sigma^2 = 1/\beta^2$$

Y los estimadores por momentos y máxima verosimilitud son: $\beta = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\bar{x}}$

En el caso de la función de distribución exponencial con parámetro β y x_0 .

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)} \quad (9)$$

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)} \quad (10)$$

Donde

x_0 es el parámetro de ubicación

β es el parámetro de escala

$$\mu = x_0 + \beta; \quad \sigma^2 = \beta^2 \quad y \quad \gamma = 2$$

En este caso los estimadores por momentos son:

$$\beta = S, \quad y \quad \check{x} = \bar{x} - S$$

Y por máxima verosimilitud:

$$\beta = \frac{\sum(x_i - x_{(1)})}{n-1} \quad (11)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_i - x_{(1)})}{n-1} \left(\frac{1}{n}\right) = x_i - \frac{\beta}{n} \quad (12)$$

Donde x_1 es el primer valor de la muestra ordenada de menor a mayor (de la Cruz Bartolón , 2009).

La desventaja del uso de la distribución exponencial es que se necesita que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente de sus vecinos; ese aspecto ha llevado a desarrollar procesos de Poisson compuestos (de la Cruz Bartolón , 2009).

2.4.4 Función de densidad

Sea y una variable aleatoria positiva que sigue una distribución exponencial simple con parámetro de escala β y que tiene la función de densidad de probabilidad dada por la expresión (1). ℓ es un número entero aleatorio que sigue una distribución Poisson, de parámetro de forma $\lambda > 0$, de probabilidad:

$$p(\ell) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^\ell}{\ell!}$$

Siendo $x = y_1 + y_2 + \dots + y_\ell$, $\ell > 0$, la suma de un número de variables independientes las cuales siguen una distribución Gamma incompleta, de densidad de probabilidad igual a:

$$f(x, \ell) = \frac{1}{(\ell-1)!} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\ell-1} \frac{e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta} \quad (1.12)$$

Si se trabaja con la variable reducida $U = \frac{x}{\beta}$ se tiene:

$$f(x, \ell) = \frac{1}{(\ell-1)!} U^{\ell-1} e^{-U} \quad (1.13)$$

A partir de éstas se obtiene la distribución marginal de U para ℓ tomando los valores de 1 a infinito, resultando:

$$f(U) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^\ell}{\ell!} \frac{1}{(\ell-1)!} U^{\ell-1} e^{-U} \quad (1.14)$$

o bien

$$f(U) = e^{-\lambda} \lambda e^{-u} \left[1 + \frac{\lambda U}{2} + \dots + \frac{(\lambda U)^i}{i!(i+1)!} + \dots \right] \quad (1.15)$$

Con ayuda de la función de Bessel modificada de primer orden, los términos entre corchetes pueden expresarse como:

$$I_1(2\sqrt{\lambda U}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sqrt{\lambda U})^{2n+1}}{n!(n+1)!} = \sqrt{\lambda U} + \frac{(\sqrt{\lambda U})^3}{1!2!} + \dots + \frac{(\sqrt{\lambda U})^{2i+1}}{i!(i+1)!} + \dots \quad (1.16)$$

De esta forma, la función de densidad de probabilidad de la llamada Ley Fuga para la variable reducida $U = \frac{x}{\beta}$ estará dada por la expresión:

$$f(U) = e^{-\lambda} \lambda e^{-u} \frac{I_1(2\sqrt{\lambda U})}{\sqrt{\lambda U}} \quad (1.17)$$

$$f(0) = f_0 = e^{-\lambda}$$

donde:

λ = es el parámetro de forma, $\lambda = 0$ (número de eventos dentro de un periodo de tiempo T)

β = es el parámetro de escala, $\beta = 0$ (lámina media de lluvia por evento)

I_1 = es la función de Bessel de primer orden

Esta ley es una distribución mixta que tiene una discontinuidad para el valor cero (excepto cuando $\lambda = 1$), es decir la ordenada al origen tiene un valor de $\lambda e^{-\lambda}$. La expresión (1) muestra las funciones $f(U = \frac{x}{\beta})$ y $F(U = \frac{x}{\beta})$ (de la Cruz Bartolón , 2009).

Capítulo 3.

Simulación estocástica de la pérdida probable.

3.1 Diseño, planeación y ejecución

Para poder realizar la una simulación estocástica de perdida probable, primero se debe hacer un análisis de frecuencia de precipitaciones mensuales en la región o país donde se lleve a cabo el estudio. Esto permitirá la identificación de la variable estadística que más se adecua para representar las precipitaciones mensuales. Se utilizan varias técnicas estadísticas para identificar el ajuste más adecuado para la distribución de esta variable para las diferentes regiones de estudio. Para el ajuste de las precipitaciones se utilizan dos leyes, la Ley Fuga y la log normal, la importancia de estas leyes varía con el tiempo y el espacio (Merzougui & Slimani, 2012).

El resumen del análisis de frecuencias de las precipitaciones mensuales que se recoge de la red de estaciones pluviométricas en el conjunto del territorio a estudiar permite identificar la distribución estadística que más se adecue para representar las precipitaciones mensuales. Se emplean varias técnicas estadísticas que se utilizan para identificar la mejor distribución que permita que esta variable sea ocupada para diferentes áreas de la región. Las dos distribuciones que más se adecuan para representar las precipitaciones mensuales en una región son: la distribución (Ley Fuga) compuesta por la distribución de Poisson y la distribución exponencial (Merzougui & Slimani, 2012).

El objetivo de este estudio es la definición y la regionalización de las leyes estadísticas para mostrar la variación temporal (frecuencia) de la precipitación mensual en el territorio a tratar y la determinación del gradiente de precipitación para diferentes estaciones del año. La intención de este estudio es la valuación de la variable lluvia, registrando cuanto llueve en una hora para la modelización hidrometeorológica en esta variable, esto para efectos de la detección del cambio climático y / o el diseño de estructuras hidráulicas grandes, para los valores extremos de la variable y / o la gestión de los recursos hídricos para obras de conservación de agua y suelo y regadío, esto para los valores medios de la variable (Merzougui & Slimani, 2012).

Se debe tomar en cuenta la descripción de las características climáticas de la región a estudiar saber cuál es su longitud y su latitud, identificar las principales regiones climáticas y los factores regionales (la circulación atmosférica y las masas de aire) y factores locales (costas, montañas, lagos y desiertos), los cálculos atmosféricos más importantes son las depresiones de los golfos y océanos, además de la circulación atmosférica esféricas, las variaciones climáticas en la región, las masas de aire que pueden ser de orígenes diferentes, las más conocidas son la masa de aire tropical, la masa de aire polar y la masa de aire ártico (Merzougui & Slimani, 2012).

El establecimiento de un modelo de evaluación para la frecuencia precipitación y su variabilidad espacial y temporal requiere de la existencia de una base de datos de lluvia bastante largo y con un número importante de series repartidas en todo el territorio a analizar, por desgracia, nunca se tienen largas series de datos o un histórico continuo (Merzougui & Slimani, 2012).

La longitud de las series de precipitaciones son fechas de apertura que dependen de las estaciones, estas varían de una estación a otra. Por otra parte, cualquier adquisición de muestreo de datos es a menudo sujetos a errores de todos los tipos (Merzougui & Slimani, 2012).

El Método estadístico de análisis de frecuencia es para comprender, predeterminar y estudiar los acontecimientos pasados, este cuenta con un proceso dado, con el fin de identificar oportunidades de ocurrencia futura. Esta predeterminación basada en la definición e implementación un modelo espectral (distribución estadística), que es una ecuación que describe el comportamiento estadístico de un proceso. Estos modelos describen la probabilidad de ocurrencia de un valor determinado en un evento. Las etapas de análisis de frecuencia se resumen en el diagrama de la figura 3.1.

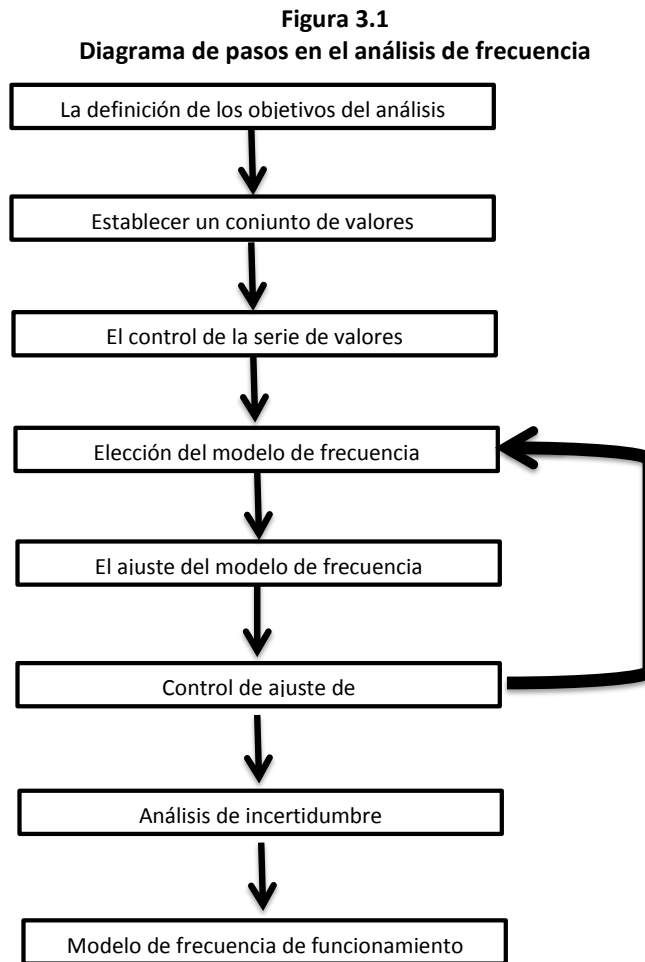
El análisis de frecuencia utiliza varias técnicas estadísticas y es un sector complejo que debe ser tratado con gran rigor. Es también un interés particular para la gestión y prevención de eventos hidrológicos, especialmente para los eventos extremos, y su validez depende mucho más de los resultados de la ley aprobada que de la técnica de retoque digital utilizada (Merzougui & Slimani, 2012).

Este método también implica el supuesto de un comportamiento similar en las zonas donde no se conoce el proceso y aquellos en los que fue observado. Esta presunción abarca dos aspectos, la sostenibilidad de la conducta (estacionario tiempo de proceso depende del tamaño de la muestra) y el aspecto del comportamiento asintótico de la cola de distribución (altos valores de $F(x)$) de manera que uno de los principales objetivos del análisis de frecuencia es el estudio de los problemas de desconfianza que supera un determinado evento (Merzougui & Slimani, 2012).

Al final de este proceso se hace la verificación del modelo de compatibilidad entre las observaciones y el modelo que se necesite. Esta comprobación se realiza habitualmente a través de pruebas de bondad de ajuste estadístico que pueden llevar a la conclusión del acuerdo entre el modelo y las observaciones, pero esto no prueba y no indica que el modelo es apto para describir el fenómeno observado (Merzougui & Slimani, 2012).

Los enfoques posibles para la elección de una ley estadística se deben a la validez de un análisis de frecuencia que está estrechamente relacionado con la elección el tipo de modelo (Ley de ajuste) que facilita por diversos enfoques, por medio de: consideraciones teóricas (por ejemplo, Simetría distribuciones, teorema del límite central), el comportamiento asintótico que presentan las familias, la experiencia y la costumbre de la adecuación empírica en algunos países y regiones (Kolmogorov-

Smirnov AndersonDarling), el uso de las pruebas de aptitud (χ^2) y el uso de diferentes esquemas (el Diagrama de momento de Pearson y el de L-momentos de Hosking) (Merzougui & Slimani, 2012).



Fuente: Elaboración a partir de (Merzougui & Slimani, 2012).

Las técnicas de ajuste son numerosas, pero las más utilizadas en la hidrología son:

- I. El método gráfico basado en el hecho para ajustar los puntos de ajuste de la teoría de la ley de distribución que considera deducir los parámetros. Aunque este método es una aproximación, tiene la ventaja de proporcionar una representación visual de los datos y del ajuste, que es un aspecto esencial en la adecuación de la ley seleccionada.
- II. El método de momentos que consiste en identificar los momentos teóricos a momentos de la muestra y en la deducción de los parámetros de la misma. El número de tiempo de cálculo debe ser igual al número de parámetros del modelo elegido, y
- III. El método de máxima verosimilitud, que consiste en considerar que los parámetros desconocidos de la ley son tales y que se ajusten a maximizar la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada (Merzougui & Slimani, 2012).

El funcionamiento del modelo de frecuencia consiste en usar la relación que existe con el valor de un cuantil xq de acuerdo a una frecuencia acumulada $q = F(xq)$ o, a la inversa, para calcular la frecuencia acumulada, y así el período de retorno que corresponde a un valor dado. Por otro lado, podemos calcular la probabilidad ocurrencia de un evento o la combinación particular de eventos hidrológicos (Merzougui & Slimani, 2012).

El ajuste estadístico de la serie de precipitaciones promedio mensual se realiza por medio del software HYFRAN (análisis de frecuencias Hidrológico), desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación Científica- Agua, la Tierra y el Medio Ambiente (INRS-ETE) Universidad de Quebec. Originalmente se diseñó para el análisis de la frecuencia de los fenómenos extremos, HYFRAN se puede utilizar en cualquier estudio que requiere el ajuste de una distribución estadística en una serie de datos independientes e idénticamente distribuidos (Merzougui & Slimani, 2012).

Este software proporciona pruebas estadísticas estándar antes de la adaptación de la legislación a fin de verificar las hipótesis de independencia, la estacionalidad y la homogeneidad de la muestra y permite ajustar 15 distribuciones estadísticas distintas, una de ellas es la Ley Fuga (Poisson – exponencial). Esta ley se estima por el método de máxima verosimilitud ya que es el método que más se recomienda, ya que en teoría es más eficaz por que produce una varianza más pequeña en el muestreo de los parámetros estimados y como consiguiente el cuantil de la varianza es más pequeño, especialmente para muestras grandes. La prueba de χ^2 se aplica con el fin de verificar la adecuación de las leyes a los valores de la muestra observados (Merzougui & Slimani, 2012).

Aplicando estas pruebas se concluye que la distribución que mejor se ajusta es la Ley Fuga, ya que es la que mejor se adapta al tiempo. Con el resultado que arroja el HYFRAN se procede a regionalizar el territorio estudiado ya que nos indica el número estaciones y los meses en las que se retiene mayor precipitación (Merzougui & Slimani, 2012).

Ahora que se sabe qué región y en qué meses hay mayor precipitación se realiza el cálculo de cuánto dinero se perdió a causa del exceso de precipitación, lo que genera una inundación, haciendo un análisis de todo lo que cuesta reconstruir y ayudar a la población y los daños que ocasiona a nivel regional y a nivel país económicamente.

3.2 Aplicación numérica

La aplicación numérica se hará mediante los datos de un estudio realizado a Túnez, los datos de precipitación mensual utilizadas en este estudio fueron recogidos por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y la Dirección General de Recursos Hídricos (R & E) del Departamento de Agricultura y Recursos Hidráulicos de 158 estaciones distribuidas en todo el país.

El planteamiento de la hipótesis es el siguiente:

Hipótesis alterna (H_a). La probabilidad del valor de χ^2 no está dentro de la región de rechazo.

Hipótesis nula (Ho). La probabilidad del valor de χ^2 está dentro de la región de rechazo.

El nivel de significación que se emplea es para todo valor de probabilidad igual o menor que 0.05, se acepta Ha y se rechaza Ho y la zona de rechazo es para todo valor de probabilidad mayor que 0.05, se acepta Ho y se rechaza Ha.

Los datos a los que se le aplicaran las pruebas antes mencionadas son los siguientes:

Cuadro 3.1
Datos de las precipitaciones mensuales en Túnez.

n	Qanuals	n	Qanuals	n	Qanuals	n	Qanuals
1	121.3	11	79	21	52.3	31	144.7
2	144.9	12	76.9	22	36.3	32	109.2
3	144.4	13	110.1	23	88	33	48.5
4	205.8	14	95.6	24	122.4	34	59.6
5	114.5	15	48.8	25	162.1	35	40.3
6	72.5	16	148.3	26	97.2	36	112.2
7	26.7	17	67.5	27	52.5	37	137.1
8	92.8	18	70	28	165.6	38	32.9
9	58.8	19	63.4	29	64.2		
10	57.4	20	76.3	30	110.2		

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Se procede a realizar la tabla de distribución de frecuencia por intervalos para aplicar la prueba de bondad de ajuste χ^2 .

Cuadro 3.2
Distribución de frecuencia por intervalos.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	I.Cmin	I.Cmax	M.C	Frec. Abs. (q)	Frec. Rel.	Frec. Acum	$\sum xi \cdot fi = 3 \times 4$	$(x - media)^2$	$4 \cdot 8$
1	8.7	44.7	26.7	4	0.11	0.11	106.80	4028.91	16115.63
2	44.7	80.7	62.7	15	0.39	0.50	940.50	754.80	11322.05
3	80.7	116.7	98.7	9	0.24	0.74	888.30	72.70	654.28
4	116.7	152.7	134.7	7	0.18	0.92	942.90	1982.59	13878.15
5	152.7	188.7	170.7	2	0.05	0.97	341.40	6484.49	12968.98
6	188.7	224.7	206.7	1	0.03	1.00	206.70	13578.38	13578.38
						suma	3426.60		
						media	90.17	S	43.03

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Aplicando la prueba de bondad de ajuste χ^2 .

Cuadro 3.3
Prueba de ajuste χ^2 .

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	I.Cmin	I.Cmax	Lim. Clase	Z	Area bajo la curva	Frec. Rel.	Frec. Abs.	~Frec. Abs.	Frec. Observada	X ²
1		8.7	8.7	-1.89	0.47	****		ei	qi	
2	8.7	44.7	44.7	-1.06	0.36	0.12	4.38	5	4	0.2
3	44.7	80.7	80.7	-0.22	0.09	0.27	10.20	10	15	2.5
4	80.7	116.7	116.7	0.62	0.23	0.32	12.14	12	9	0.75
5	116.7	152.7	152.7	1.45	0.43	0.19	7.38	7	7	0
6	152.7	188.7	188.7	2.29	0.49	0.06	2.38	3	2	0.333
	188.7	224.7	224.7	3.13	0.50	0.01	0.38	1	1	0

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Cuadro 3.4
Resultado de la prueba de ajuste χ^2 .

X ²	3.783
G.L	3
a	0.05
X ² Tabla	7.81

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

El valor calculado de χ^2 se compara con los valores críticos de la tabla de valores críticos de χ^2 . Se puede observar que para una probabilidad de 0.05 corresponde la cifra de 7.81; por lo tanto, el estadístico ji cuadrada de 3.783 tiene una probabilidad mayor que 0.05.

En virtud de que la probabilidad obtenida al calcular el valor de χ^2 está dentro de la región de rechazo, se acepta H_0 , entonces tenemos que: $3.783 < 7.81$, se acepta H_0 .

Se procede a realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov para validar y sustentar el análisis de frecuencia, antes se calcula el promedio y la desviación estándar de las precipitaciones mensuales en Túnez.

El planteamiento de la hipótesis es el siguiente:

Hipótesis alterna (H_a). Los valores observados de las frecuencias para cada clase son diferentes de las frecuencias teóricas de una distribución normal.

Hipótesis nula (H_0). Las diferencias entre los valores observados y los teóricos de la distribución normal se deben al azar.

El nivel de significación que se emplea es para todo valor de probabilidad igual o menor que 0.05, se acepta H_a y se rechaza H_0 y la zona de rechazo es para todo valor de probabilidad mayor que 0.05, se acepta H_0 y se rechaza H_a .

Cuadro 3.5
Promedio y desviación estándar.

Promedio	92.37632
Desvest	42.86513

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Cuadro 3.6
Desarrollo de la prueba Kolmogorov-Smirnov.

n	Qanuals	Qanuals2	P(x)	Z	F(Z)	F(Z)-P(x)	Distr.N F(Z)-P(x)
1	121.3	29	0.7436	0.67	0.7501	0.0065	0.015585065
2	144.9	34	0.8718	1.23	0.8898	0.0180	0.015595551
3	144.4	32	0.8205	1.21	0.8876	0.0670	0.015640433
4	205.8	38	0.9744	2.65	0.9959	0.0216	0.015598832
5	114.5	28	0.7179	0.52	0.6971	0.0208	0.015598159
6	72.5	16	0.4103	-0.46	0.3214	0.0888	0.015660385
7	26.7	1	0.0256	-1.53	0.0627	0.0371	0.015613028
8	92.8	21	0.5385	0.01	0.5039	0.0345	0.015610667
9	58.8	10	0.2564	-0.78	0.2167	0.0397	0.015615392
10	57.4	9	0.2308	-0.82	0.2073	0.0235	0.015600604
11	79	19	0.4872	-0.31	0.3775	0.1097	0.015679516
12	76.9	18	0.4615	-0.36	0.3590	0.1025	0.015672933
13	110.1	25	0.6410	0.41	0.6604	0.0193	0.0155968
14	95.6	22	0.5641	0.08	0.5300	0.0341	0.01561031
15	48.8	6	0.1538	-1.02	0.1547	0.0008	0.015579891
16	148.3	35	0.8974	1.30	0.9040	0.0066	0.01558512
17	67.5	14	0.3590	-0.58	0.2808	0.0781	0.015650585
18	70	15	0.3846	-0.52	0.3008	0.0838	0.015655767
19	63.4	12	0.3077	-0.68	0.2495	0.0582	0.015632303
20	76.3	17	0.4359	-0.38	0.3538	0.0821	0.015654207
21	52.3	7	0.1795	-0.93	0.1749	0.0046	0.015583313
22	36.3	3	0.0769	-1.31	0.0954	0.0185	0.015596009
23	88	20	0.5128	-0.10	0.4593	0.0535	0.015628012
24	122.4	30	0.7692	0.70	0.7582	0.0111	0.015589235
25	162.1	36	0.9231	1.63	0.9481	0.0250	0.015601976
26	97.2	23	0.5897	0.11	0.5448	0.0449	0.015620202
27	52.5	8	0.2051	-0.93	0.1761	0.0290	0.015605635
28	165.6	37	0.9487	1.71	0.9562	0.0075	0.015585968
29	64.2	13	0.3333	-0.66	0.2555	0.0778	0.015650325
30	110.2	26	0.6667	0.42	0.6612	0.0054	0.015584102
31	144.7	33	0.8462	1.22	0.8889	0.0427	0.015618184
32	109.2	24	0.6154	0.39	0.6526	0.0373	0.015613177
33	48.5	5	0.1282	-1.02	0.1530	0.0248	0.015601793
34	59.6	11	0.2821	-0.76	0.2222	0.0598	0.015633803
35	40.3	4	0.1026	-1.21	0.1122	0.0096	0.015587936
36	112.2	27	0.6923	0.46	0.6781	0.0142	0.015592083
37	137.1	31	0.7949	1.04	0.8516	0.0567	0.015630992
38	32.9	2	0.0513	-1.39	0.0826	0.0314	0.015607779

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

De acuerdo al resultado que arroja $|F(Z)-P(x)|$, obtenemos el criterio de decisión máximo el cual es el en valor más grande de esta columna debe ser menor al valor crítico que se obtiene con la siguiente formula $0.05 = \frac{1.36}{\sqrt{N}}$ como $N > 35$ se toma la formula con el conteo total de la columna $|F(Z)-P(x)|$ el cual es $N=38$.

$$0.05 = \frac{1.36}{\sqrt{N38}} = 0.22062$$

Cuadro 3.7
Resultado de Criterios.

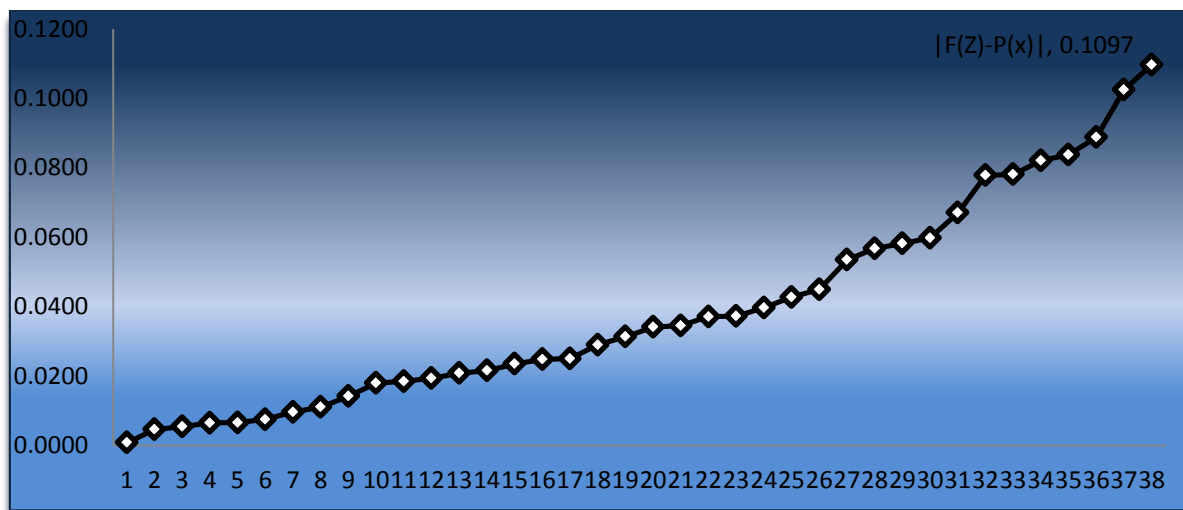
Criterio de decisión max.	0.10968045
Valor crítico	0.22062113

Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Lo anterior quiere decir que para todo valor menor que el crítico para una probabilidad de 0.05, la probabilidad correspondiente es mayor que 0.05, y todo valor mayor que $|F(Z)-P(x)|$ al calculado tienen una probabilidad menor que 0.05, o sea, es inversamente proporcional al crítico determinado o localizado en la columna.

Como criterio de decisión $\max < \text{valor crítico}$, la decisión que se toma es que en virtud de esto, el estadístico de Kolmogorov-Smirnov obtenido es menor que el crítico y su probabilidad mayor que 0.05, por lo tanto, se acepta H_0 . La interpretación que se obtiene es que las frecuencias observadas y las teóricas calculadas no difieren significativamente. Por lo tanto, las observaciones tienen una distribución normal.

Gráfica 3.1
Distribución de las frecuencias observadas.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Casimiro, 2012).

Ahora que se sabe que los datos de las precipitaciones mensuales en Túnez se ajustan a las leyes estadísticas, el paso siguiente es introducir las precipitaciones al software HYFRAN, el cual realizara el análisis mediante la distribución Poisson –exponencial (Ley Fuga). Con base a los resultados que arroje se podrá determinar en qué área hay mayor precipitación y en qué meses hay mayor frecuencia.

Primero se ingresan los datos de las precipitaciones mensuales de las 158 estaciones distribuidas por todo el país de Túnez a los que anteriormente se les aplico las pruebas de bondad de ajuste.

Figura 3.2
Datos ingresados a HYFRA.

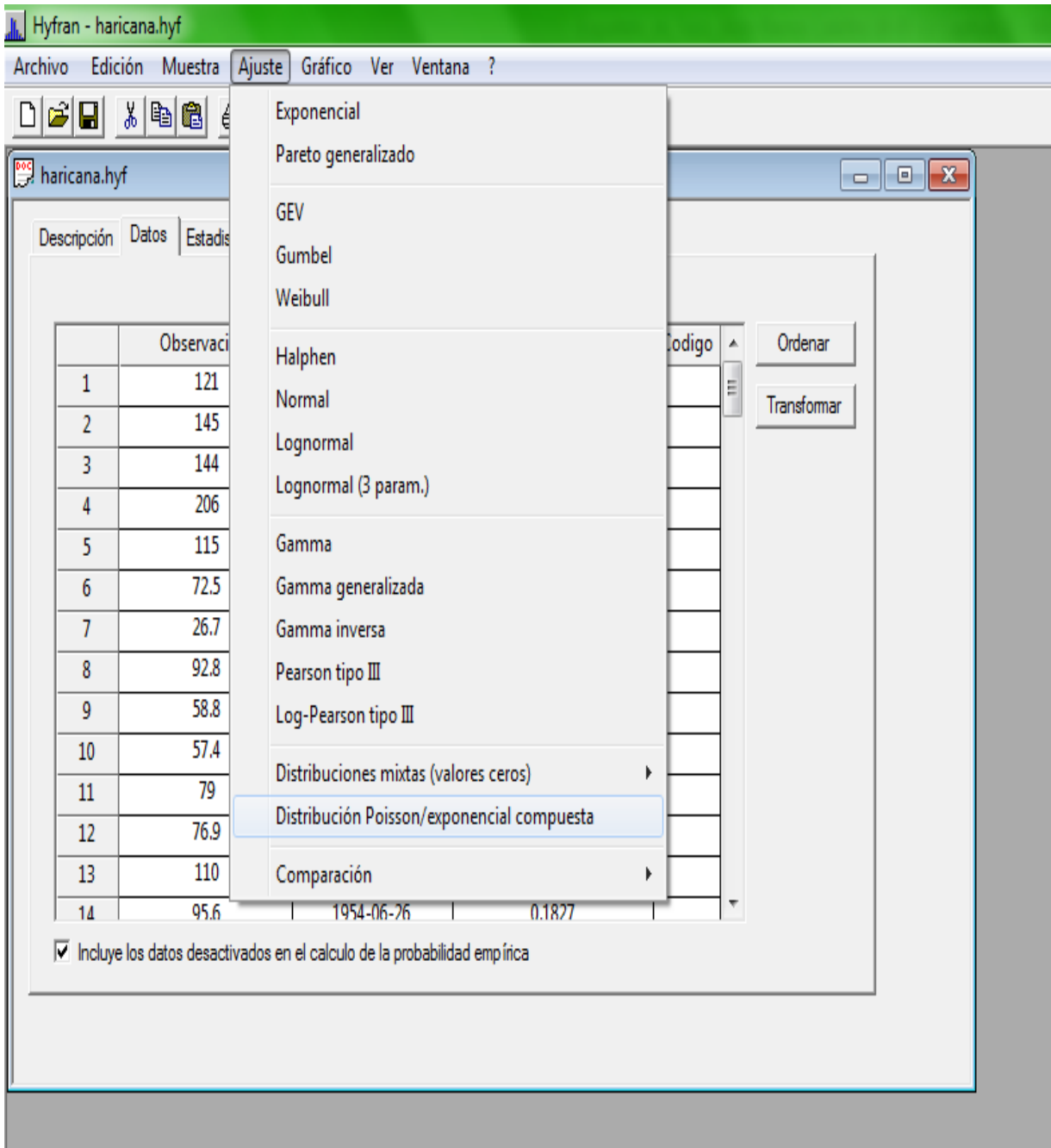
	Observación	Identificador	Probabilidad empírica	Codigo
1	121	1998-03-12	0.2843	
2	145	1956-08-23	0.3689	
3	144	1987-04-18	0.3519	
4	206	1967-09-24	0.8088	
5	115	1984-01-07	0.2589	
6	72.5	1981-05-25	0.1320	
7	26.7	1994-02-01	0.0051	
8	92.8	1963-04-15	0.1743	
9	58.8	2001-05-16	0.0812	
10	57.4	2005-11-02	0.0728	
11	79	2000-12-24	0.1574	
12	76.9	1977-10-24	0.1489	
13	110	1982-07-17	0.2335	
14	95.6	1954-06-26	0.1827	

Incluye los datos desactivados en el calculo de la probabilidad empírica

Fuente: Elaboración a partir del software HYFRAN.

Porteriormente se selecciona en la pestaña ajuste, para elegir la opción distribución Poisson/exponencial compuesta para realizar el estudio de los datos.

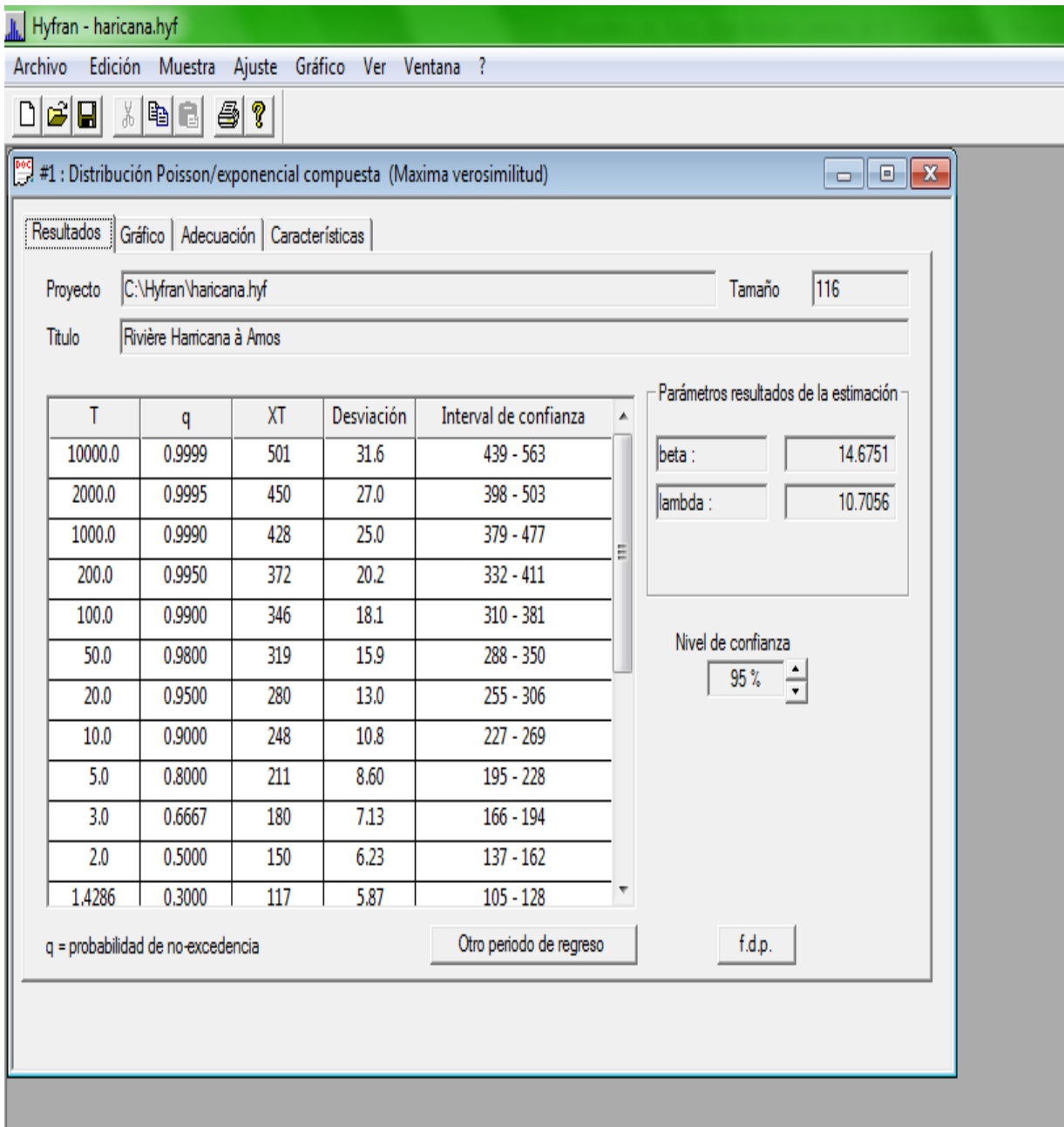
Figura 3.3
Selección de la distribución Poisson/exponencial.



Fuente: Elaboración a partir del software HYFRAN.

Por último se muestran los resultados que arroja el software HYFRA aplicando la Ley Fuga, donde se indica el tamaño de la muestra, el valor de beta y lambda, el nivel de confianza, la desviación estándar y los intervalos de confianza.

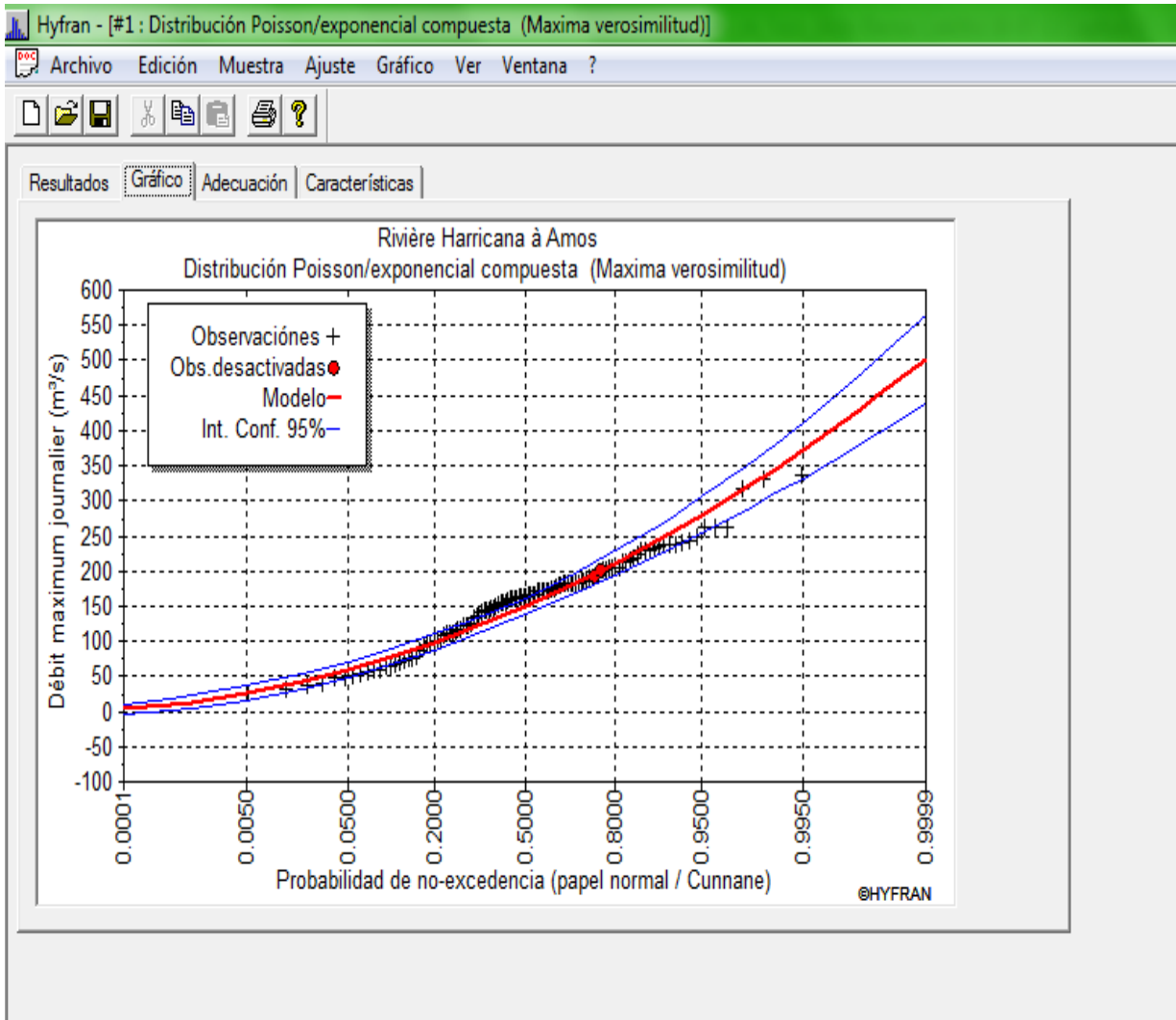
Figura 3.4
Resultados de la distribución Poisson/exponencial.



Fuente: Elaboración a partir del software HYFRAN.

La apreciación de los resultados es más comprensible en la gráfica que arroja el ajuste, ya que en esta se puede apreciar la concentración de las precipitaciones y en qué mes es el significativo para poder hacer el reporte que indique que región es a la que las hay que ponerle atención para poder minimizar el daño producido por las inundaciones.

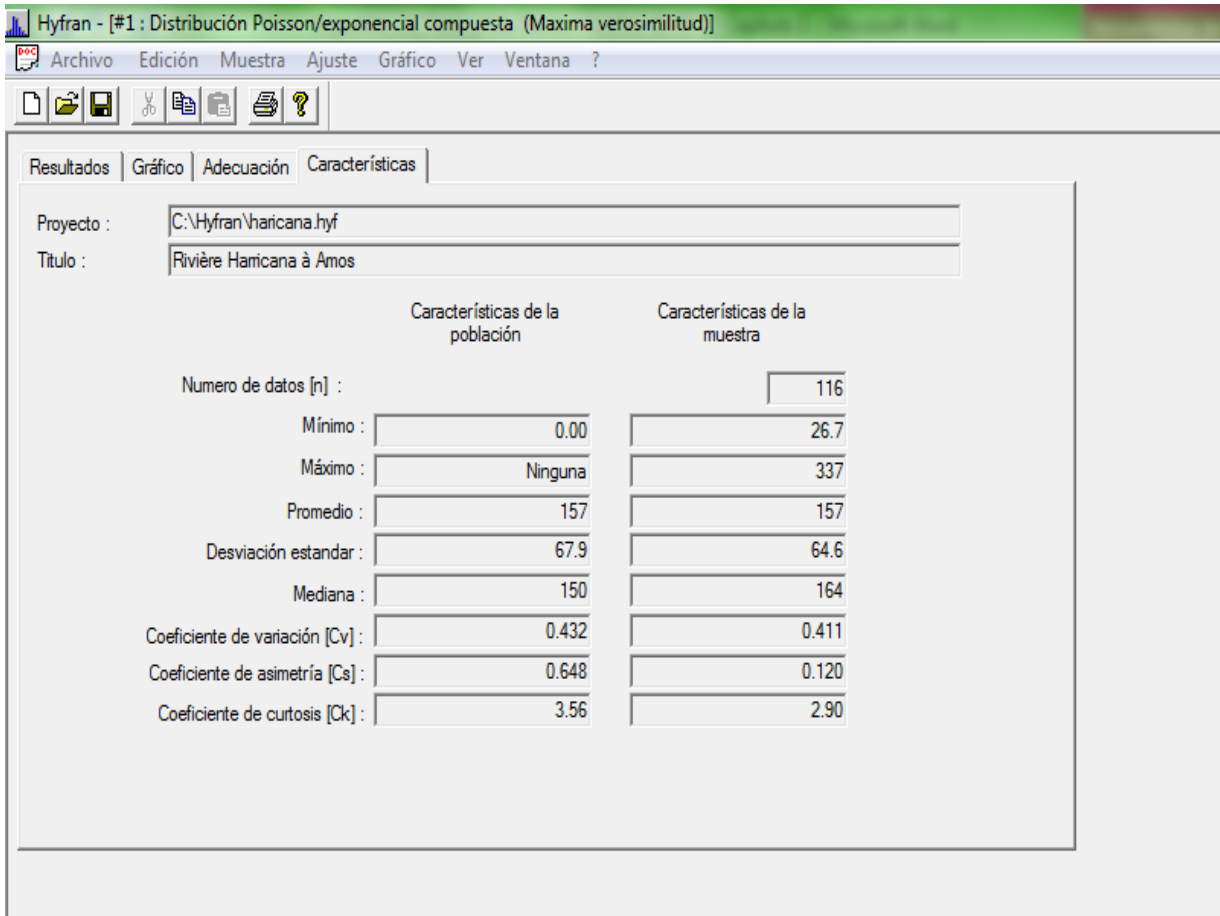
Figura 3.5
Gráfica de la distribución Poisson/exponencial.



Fuente: Elaboración a partir del software HYFRAN.

Las características que da el software HYFRAN son las de la población y las de la muestra, el número de datos, el mínimo y el máximo de estos, el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación, de asimetría y de curtosis; este analiza el grado de concentración que presentan los valores alrededor de la zona central de la distribución, de acuerdo al grado de curtosis esta puede presentar una distribución mesocúrtica, leptocúrtica o platicúrtica.

Figura 3.6
Características de la distribución Poisson/exponencial.



Fuente: Elaboración a partir del software HYFRAN.

Ya que se tiene identificada la región y en qué mes hay mayor precipitación se procede a investigar que costo tuvo alguna inundación que coincida con el resultado obtenido, para poder determinar en próximas catástrofes cual será el costo y como tiene que estar preparado el gobierno y la población para este tipo de eventos-

Para esta tesis solo se obtendrá este cálculo para México ya que se optara por hacer una proyección mediante herramientas estadísticas y así poder determinar el costo de las futuras inundaciones que se presenten en el país, esto se mostrará más adelante.

3.3 Escenarios de precipitación

Para el estudio de los escenarios de precipitación, es importante tener en cuenta una variable que en los últimos años se ha vuelto importante ya que hace que estos tengan un comportamiento aleatorio más agresivo, esto se refiere a los escenarios climatológicos futuros.

Un escenario climático futuro es una representación probabilística que indica cómo posiblemente se comportará el clima en una región en una cierta cantidad de años, tomando en cuenta datos históricos y usando modelos matemáticos de proyección, generalmente para precipitación y temperatura (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

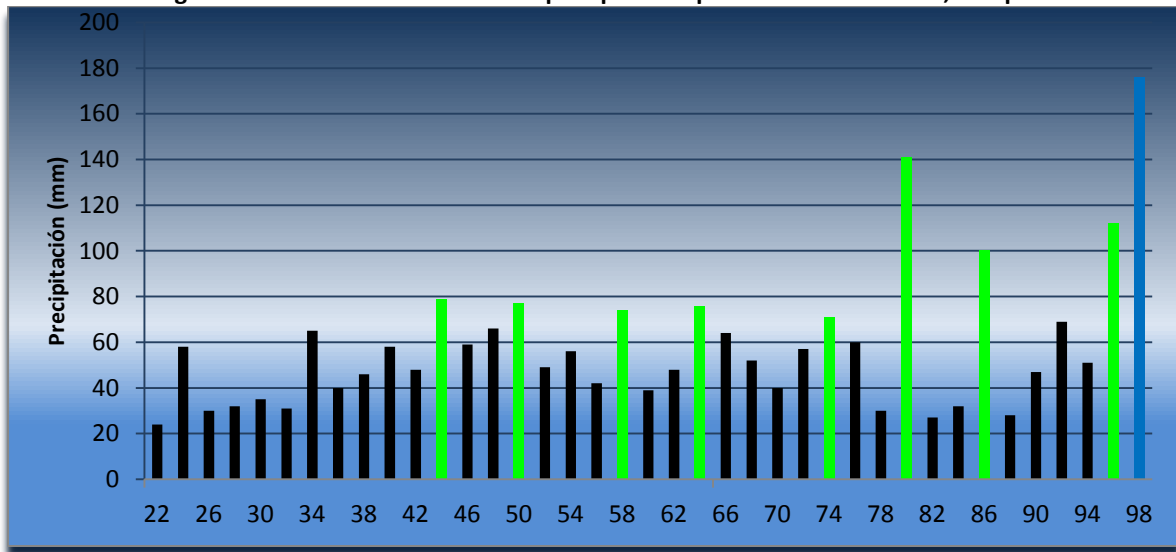
Existen muchas metodologías para la generación de escenarios climáticos y en la actualidad todas ellas indican un aumento en las temperaturas promedio de la tierra, o lo que conocemos como Calentamiento Global, causado por el acumulamiento excesivo de la concentración de Gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

Es importante aclarar que los escenarios climáticos son, como su nombre lo indica, escenarios y no debemos confundirlos con un pronóstico. Los escenarios nos indican que puede suceder si seguimos una cierta proyección de concentración de gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera, que resulta en una poderosa herramienta para los tomadores de decisiones (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

Es importante la generación de escenarios climáticos ya que da una idea de cómo se comportará el clima en un futuro, de cuánto podría aumentar la temperatura, si las lluvias aumentarán o disminuirán y si habrá más ondas de calor o eventos de lluvias fuertes. Esto se convierte en una gran herramienta cuando se conoce los posibles impactos de cambios en el clima, en la vida humana, la infraestructura, modas de vida y ecosistemas, permitiendo crear planes de adaptación de largo plazo e identificar riesgos futuros. De esta forma, se puede reducir la vulnerabilidad y riesgo ante posibles desastres que pueden resultar en la pérdida de vidas humanas, aunado a fuertes pérdidas económicas y daños a la infraestructura (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

En el caso de las precipitaciones la tendencia mundial indica que las lluvias fuertes han ido en aumento. La Figura 3.5 se muestra los datos de la estación meteorológica de Motozintla Chiapas donde se puede apreciar que a partir de los años 20's, los máximos anuales han ido en aumento, lo que conlleva a eventos cada vez más fuertes. Para este tipo de eventos, la precipitación anual total no ha ido en aumento, sin embargo se presentan menos lluvias pero más fuertes lo que lleva a condiciones climáticas más extremas que, en el caso de que la precipitación media anual aumentara, se presentarían mayores casos de inundaciones.

Gráfica 3.2
Magnitud de los eventos de máxima precipitación por año en Motozintla, Chiapas.



Fuente: Fuente extraída de (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

Los escenarios de lluvias para las zonas de México y el Caribe, no poseen tanta confianza debido a que mucha de la lluvia que se experimenta en estas zonas está regida por la actividad de los huracanes. Estos fenómenos, desafortunadamente, no se encuentran bien calibrados en los sistemas de modelación lo que conlleva a un margen de error mayor al momento de generar los escenarios de lluvias (Magaña Rueda & UNICACH, 2010).

Por lo tanto es de suma importancia contemplar esta variable para poder reducir los riesgos hidrometeorológicos, en este caso las inundaciones.

3.3.1 Túnez

El estudio de las precipitaciones mensuales de Túnez, proviene del análisis diseñado por Amira Mohamed Slimani y Merzougui para el laboratorio de Ciencia y Tecnología del Agua y el Instituto Nacional Agronómico de Túnez, el cual lleva la misma metodología que se ha planteado hasta ahora.

La razón por la que se toma los resultados de dicho estudio se debe al trabajo tan profundo y tan bien estructurado que se hizo para las precipitaciones mensuales de Túnez, y esto es lo que se obtuvo:

La distribución general de las leyes estadísticas refleja que no necesariamente su distribución en el espacio refleja el impacto de los factores regionales en la distribución de las precipitaciones mensuales, por lo cual se debe realizar una regionalización con otras leyes de distribución en todo el territorio tunecino haciendo una subdivisión en cuatro partes necesarias para las zonas geográficas (Merzougui & Slimani, 2012).

En la Figura 3.6 se muestra la distribución de las leyes por mes y por región. De hecho, para todas las estaciones y todos los meses, la ley fuga es la que mejor se ajusta a las series mensuales de lluvia. Para las estaciones del Norte de Túnez para los meses de enero y febrero, la ley de valor extremo generalizada tiene el mismo peso que la Ley Fuga y para el mes de abril la ley Weibull comparte el mismo peso que la Ley Fuga (Merzougui & Slimani, 2012).

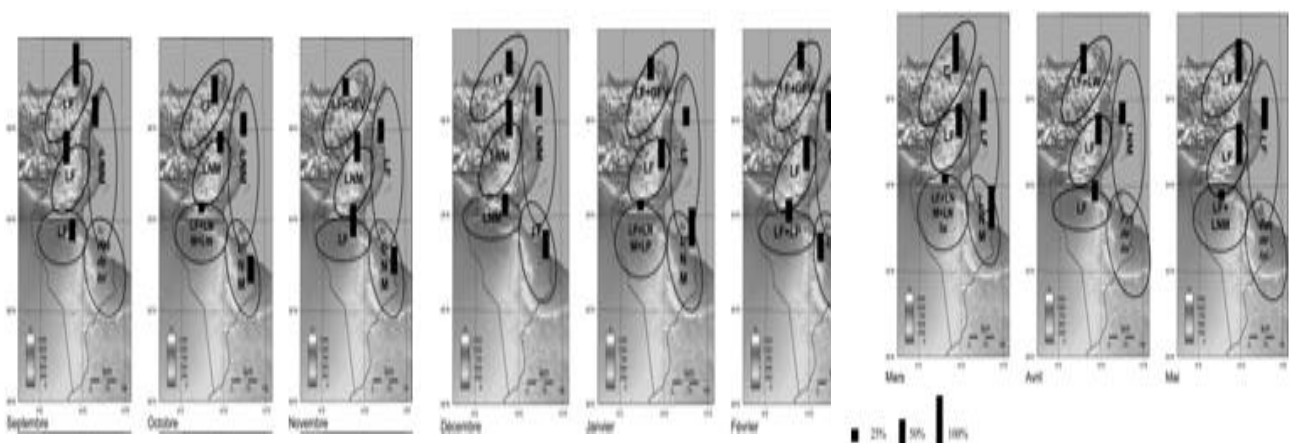
Para las estaciones del centro del país, las series pluviométricas de los meses de octubre, noviembre y diciembre, se adapta mejor la distribución log-normal. Para obtener el mayor número de estaciones, la distribución logarítmica normal mixta se ajusta a las series de los meses de septiembre, noviembre, diciembre y abril (Merzougui & Slimani, 2012).

Para las estaciones sureste, la distribución logarítmica normal mixta es la que mejor se ajusta para las series de los meses de octubre, noviembre, enero y marzo; la Ley Fuga es la que incorpora el comportamiento de las lluvias en los meses de diciembre y febrero (Merzougui & Slimani, 2012).

Por último, para las regiones de las costas, la Ley Fuga tiene el mismo peso que las leyes mixta, Weibull y log-normal para el mes de noviembre, las leyes mixta y Pareto para el mes de enero, la distribución log-normal y la ley de Pareto para el mes de febrero, y las leyes log-normal y mixta con parámetros de tres meses para marzo y mayo.

En conclusión, se puede decir que las dos leyes que mejor encajan en las series de lluvias de Túnez son la Ley Fuga y la distribución log-normal mixta y el espacio-temporal se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.7
Regionalización de Túnez.



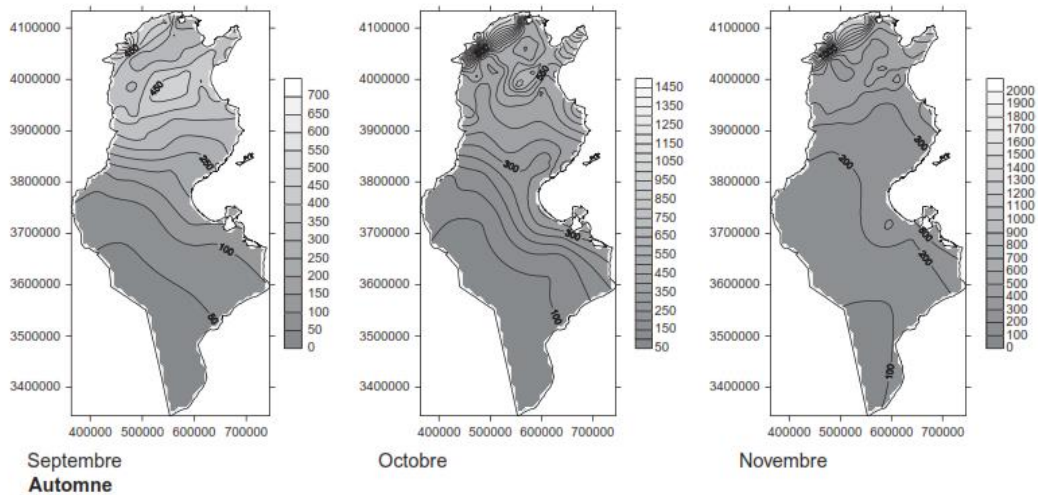
Fuente: Fuente extraída de (Merzougui & Slimani, 2012).

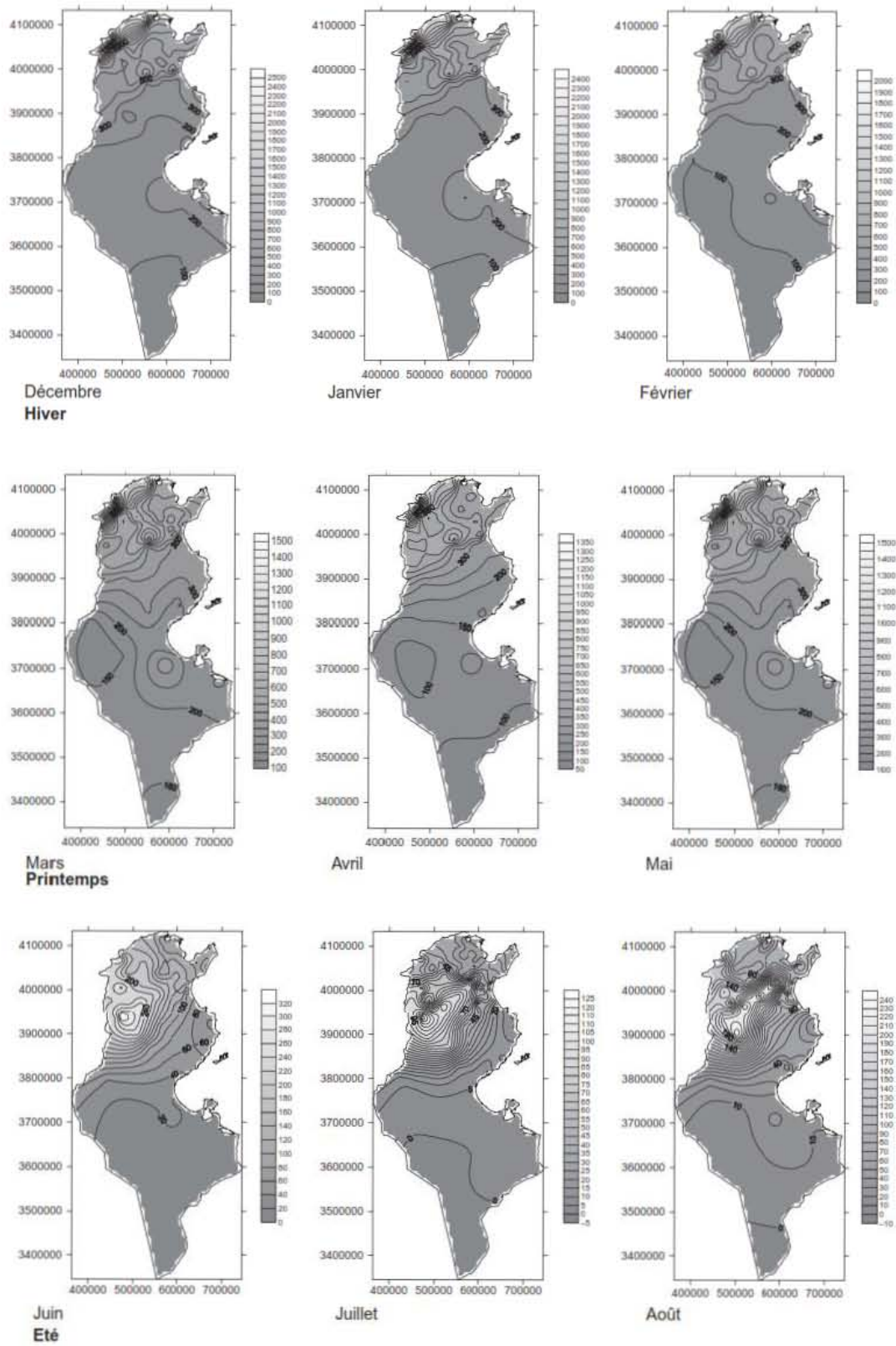
La cartografía de las precipitaciones isoyetas mensuales en todo el territorio tunecino y para los diferentes meses del año Figura 3.7, conduce a detectar un gradiente (que se define como una cantidad vectorial que indica la variación espacial de la variable de interés y representa los valores normales de las constantes) de lluvia en la característica de Túnez, limitada por la formación de las montañas del dorsal, que varía dependiendo de la temporada.

En los meses de otoño se observa que la distribución de isoyetas se ubican en el sureste / noroeste, en el centro y el sur. Estas líneas de cambio de dirección indican dónde se convierte de suroeste-noreste del valor de cresta situada en el Dorsal.

Durante los meses de invierno hay una rotación de líneas de dirección al este, que mide 20 mm cortando el territorio en dos zonas, se tiende árido al sur de la cordillera y una tendencia húmeda al norte hasta la frontera argelina, en el oeste donde se registró la precipitación máxima. Para la primavera y el verano se produce un retroceso en la dirección de lluvias, se convierte en gradiente de precipitación, se convierte en dirección suroeste-noreste, formando cubiertas en las costas durante los meses de primavera, y en la parte posterior de la cadena los meses de verano.

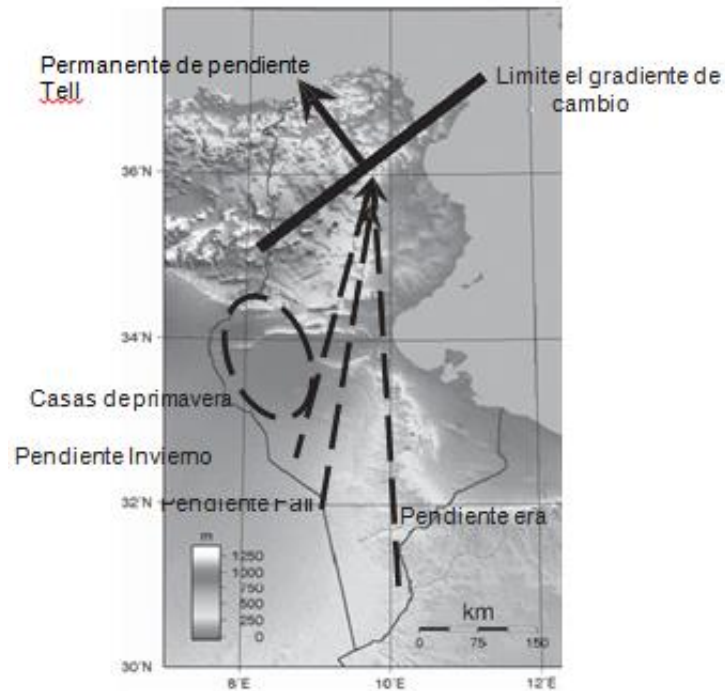
Figura 3.8
Leyes de regionalización de la distribución de las precipitaciones mensuales en Túnez.





Fuente: Fuente extraída de (Merzougui & Slimani, 2012).

Figura 3.9
Mapas de precipitación mensual de isoyetas en Túnez.



Fuente: Fuente extraída de (Merzougui & Slimani, 2012).

En conclusión, para las series de ajustes estadísticos mensuales, se encontró que la Ley de fuga es la más adecuada para la mayoría de las regiones y para cada mes.

3.3.2 México

En México, el CENAPRED en el área de análisis y gestión de riesgo enfocado a riesgos hidrometeorológicos, cuenta con los estadísticos informáticos de este tipo de fenómenos tratados en el presente estudio, sin embargo la información que presenta es a nivel muy general, la cual no está parametrizada de acuerdo a los requerimientos necesarios para ser evaluados en la versión libre del software HIFRAN, así como la información pública que presenta la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT), dado a que el módulo de información dinámica que ofrece está en construcción y con respecto a la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) que en los reportes que presenta solo arroja totales, siendo de poca utilidad para el estudio de precipitaciones. Es por ello y a pesar de este inconveniente se muestra los siguientes resultados parametrizados contruidos a partir de los reportes emitidos por la SEMARNAT y la CONAGUA.

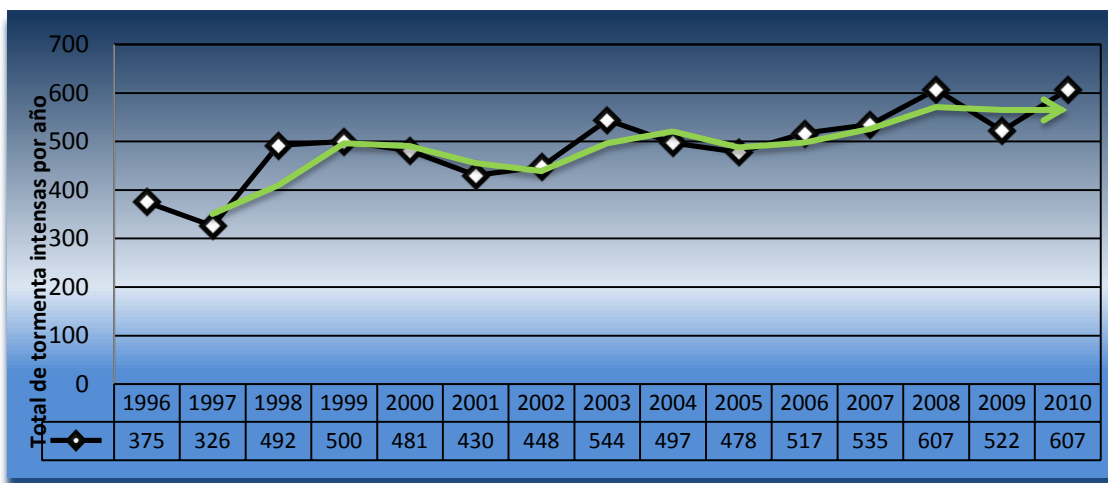
Es importante para este estudio saber qué carácter geográfico y fisiográfico tiene México, este frecuentemente es afectado por precipitaciones producidas por actividad ciclónica y tormentas

tropicales, durante el verano y otoño, y por los frentes polares en invierno, esto ocasiona lluvias abundantes en diferentes estados, tales como Chiapas, Puebla, Tabasco, Veracruz, Yucatán, entre otros (Garnica Peña & Alcántara Aya, 2004).

Este tipo se caracteriza porque la temperatura media de todos los meses es superior a 18° C y por la gran magnitud de la lluvia media anual, aproximadamente superior a 750 milímetros. En nuestro país se localiza en las regiones llanas con una altitud inferior a los 1 000 metros sobre el nivel del mar, y al sur del trópico de Cáncer y de acuerdo con el régimen de lluvias se divide en los siguientes tipos:

- Tropical lluvioso con lluvias todo el año (Af), localizado al sureste de Veracruz, el norte de Chiapas y Tabasco (Becerril Díaz, 2003).
- Tropical lluvioso con intensas lluvias monzónicas en verano (Am), donde el régimen de lluvias es muy abundante contribuyendo a la presencia de los ciclones tropicales; se localiza en el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en la llanura costera de Veracruz, en el declive norte de la Sierra Septentrional de Chiapas, en el sur de Campeche y en el Estado de Quintana Roo (Becerril Díaz, 2003).
- Tropical lluvioso con lluvias en verano (Aw), se localiza en las llanuras costeras del Golfo de México desde el sur de Tamaulipas, oriente de San Luis Potosí, y gran parte del estado de Veracruz, a excepción del sureste de esta entidad. En la Península de Yucatán, excepto en el extremo noroeste, y en el norte del estado de Campeche y el estado de Quintana Roo. En las llanuras costeras del Océano Pacífico, desde el sur de Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, en la depresión Austral, en las cuencas de los ríos Balsas y Tepalcatepec (Becerril Díaz, 2003).

Gráfica 3.3
Estadísticas de tormentas intensas a nivel nacional de 1996 a 2011.

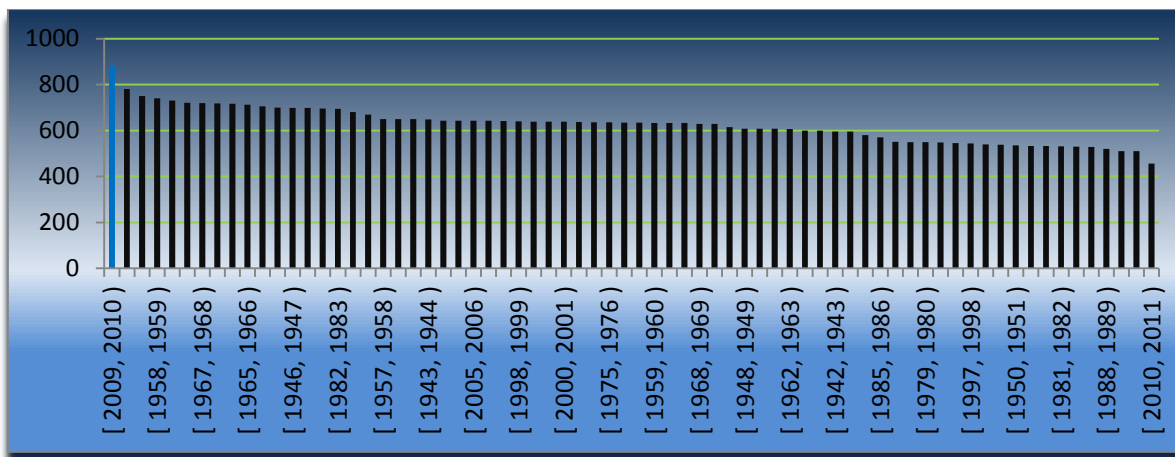


Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

Como se aprecia en la gráfica las tormentas intensas han ido en aumento y la línea de tendencia que es una media móvil la cual promedia dos pasos adelante, esta muestra que lleva el mismo comportamiento debida a varios factores entre ellos se encuentran el cambio climático, lo cual hace que sea más difícil poder proyectar su comportamiento ya que este se vuelve estocástico.

En la siguiente gráfica se presentan las precipitaciones acumuladas de la república mexicana en el periodo comprendido de octubre a agosto de 1941 – 1942 a 2010 - 2011, donde el registro histórico muestra que las precipitaciones de 2009 - 2010 fueron de 833 mm, el promedio histórico es de 633 mm y en el periodo de 2010 – 2011 es de 456mm siendo esta la precipitación más baja registrada en este periodo histórico.

Gráfica 3.4
Precipitación acumulada histórica de mayor a menor.



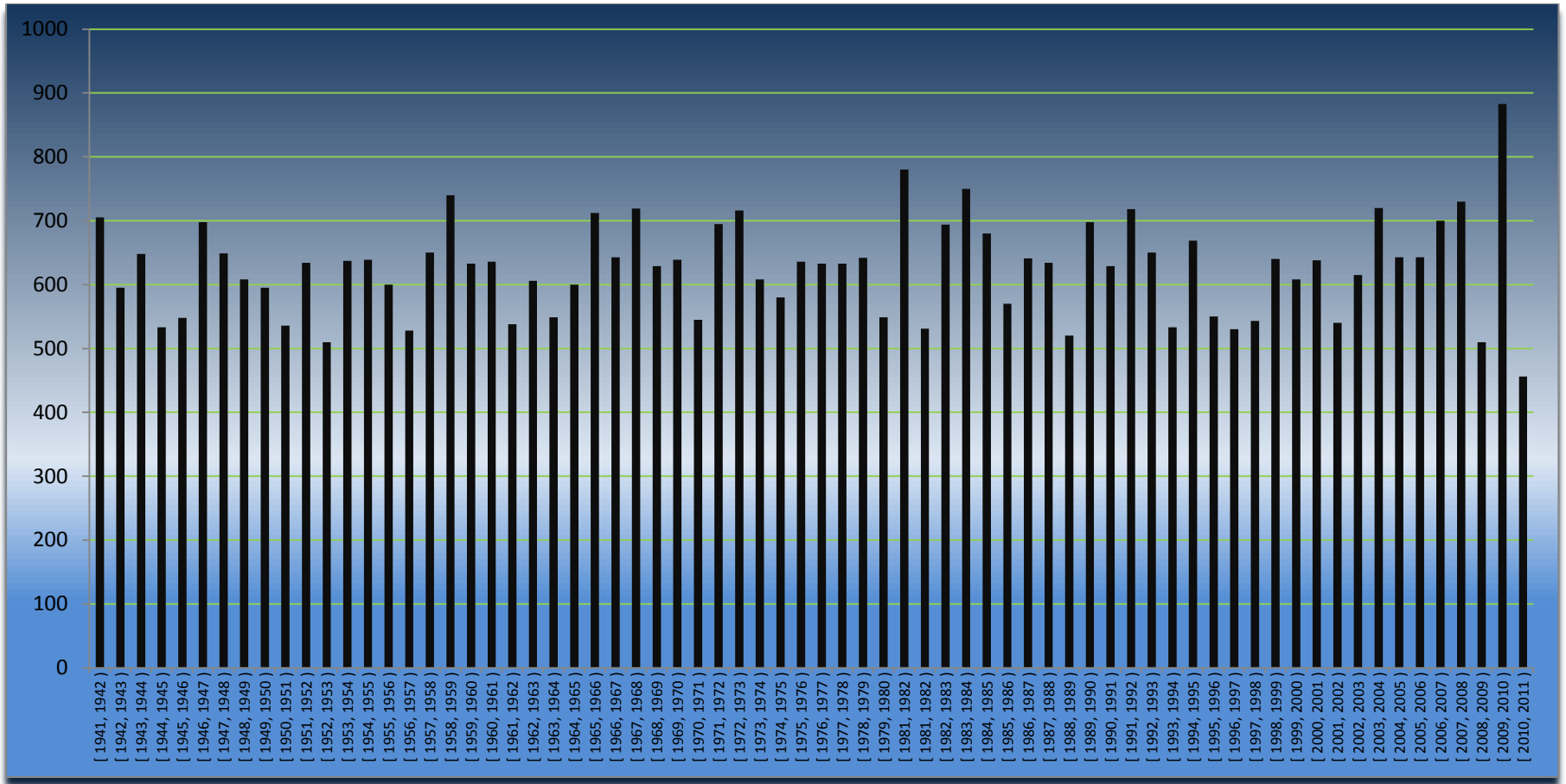
Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

Ahora si estos datos se acomodan de forma ordenada por fecha se obtiene el siguiente comportamiento:

La aleatoriedad que rige la incertidumbre de este tipo de fenómenos meteorológicos en cuanto la estimación matemática aproximada, dada las condiciones y variables involucradas dentro del proceso físico geográfico que producen los resultados aleatorios finales de dichos fenómenos, hace caer en la necesidad y como punto de partida tomar en consideración a la media de los eventos transcurridos a partir de 1941 y hasta 2011; para generar con esta media la aleatoriedad con tendencia a la baja o a la alta un escenario pronóstico al 2030 como se muestra en la gráfica siguiente.³

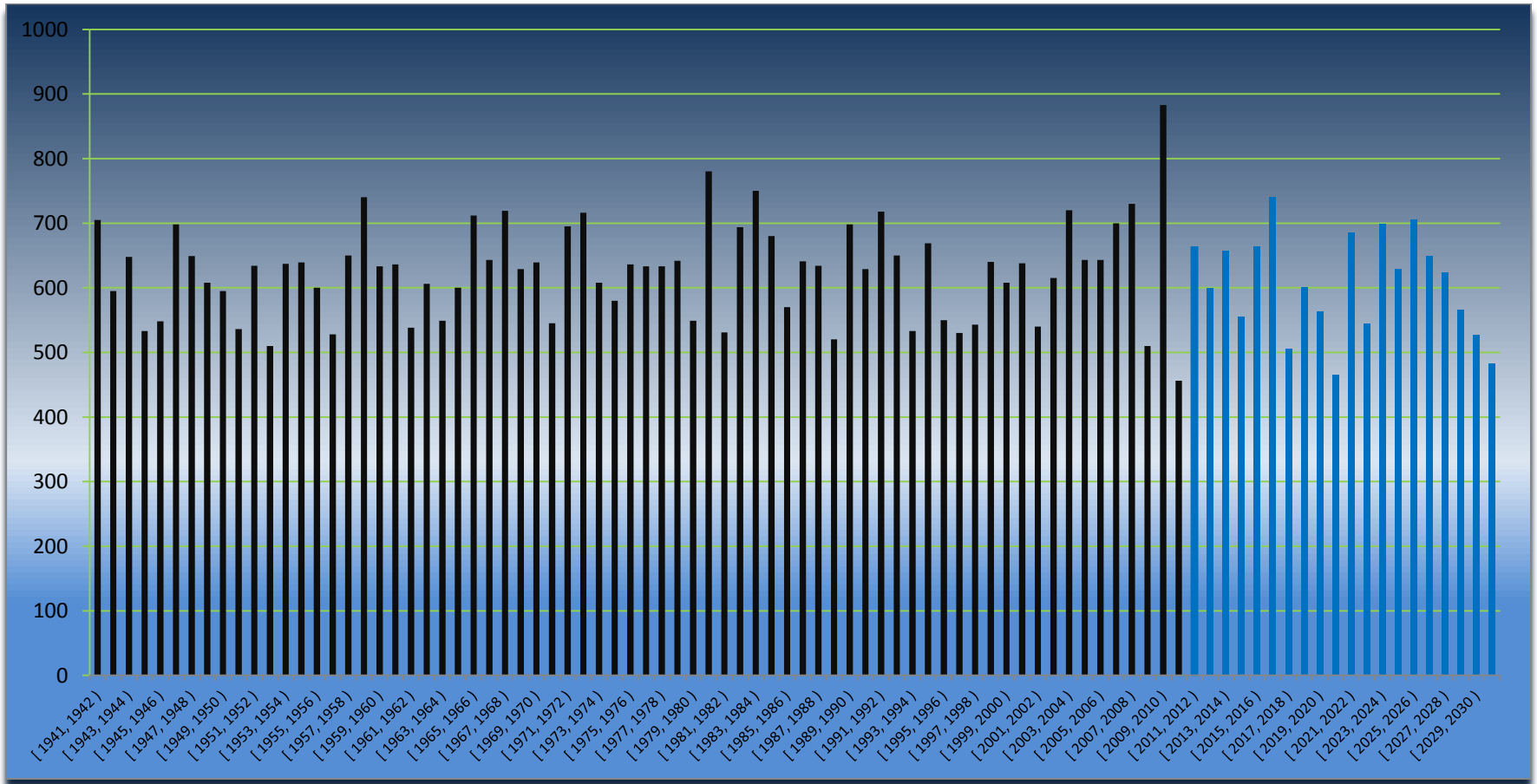
³ Pronóstico realizado de manera aleatoria utilizando el software estadístico SPSS.

Gráfica 3.5
Precipitación acumulada de 1941 a 2011.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

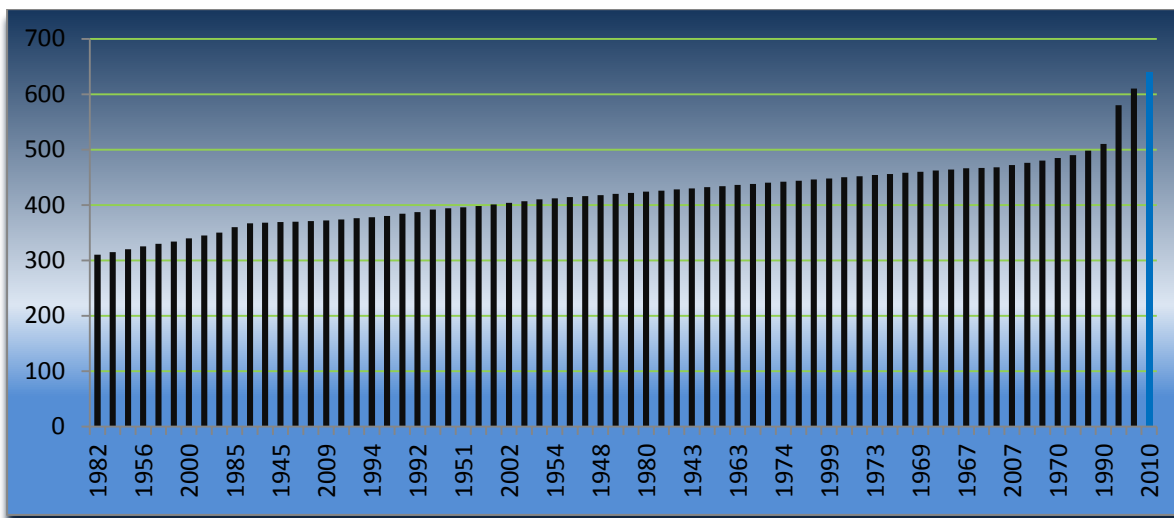
Gráfica 3.6
Proyección de precipitaciones acumuladas de 2011 a 2030.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

Durante el trimestre julio-septiembre de 2010, se aprecia una acumulación de 639.9 mm, que representa el 51% por arriba del promedio histórico, siendo el periodo más lluvioso en 70 años, esto supera al ocurrido en 1955 que alcanzó 620.8 mm

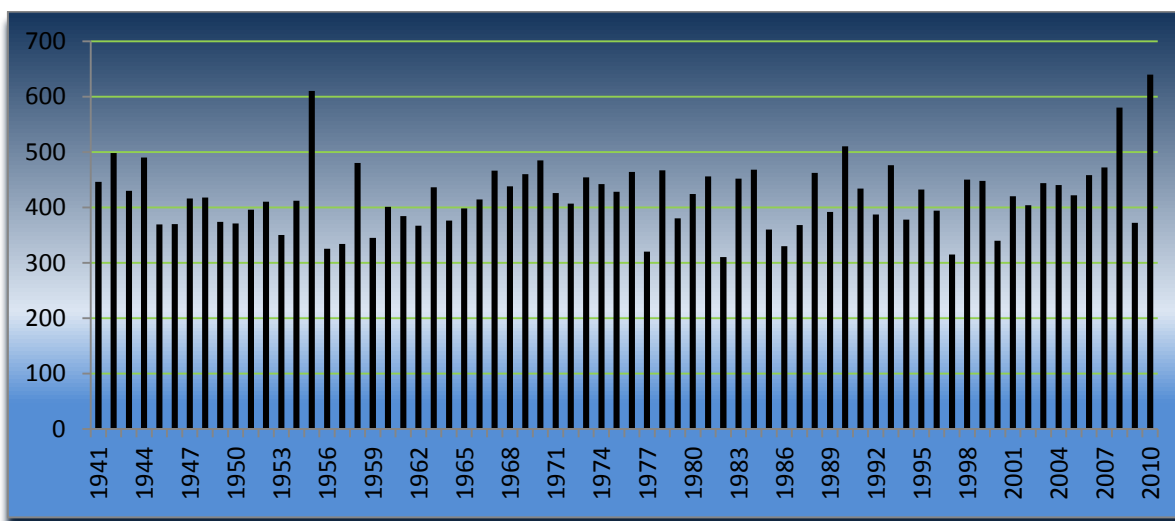
Gráfica 3.7
Precipitaciones acumuladas de menor a mayor en el trimestre julio-septiembre de 1941 a 2010.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

Esta serie de datos se ordena de manera cronológica para obtener un comportamiento aleatorio para un mejor estudio.

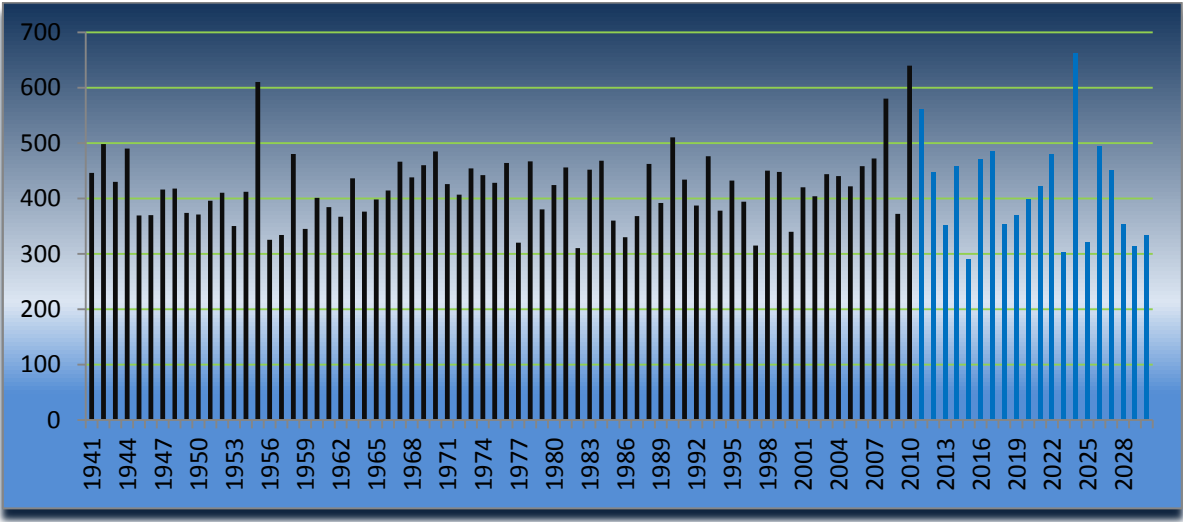
Gráfica 3.8
Precipitaciones acumuladas en el trimestre julio – septiembre de 1941 a 2010.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

La proyección de precipitaciones acumuladas durante el periodo de 1941 a 2010 en el trimestre comprendido por los meses julio, agosto y septiembre, donde se puede apreciar que en el 2023 se presenta una precipitación mayor a la producida en el 2010, debido a su comportamiento aleatorio hace caer en la necesidad y como punto de partida tomar en consideración a la media de los eventos transcurridos a partir de 1941 y hasta 2010; para generar con esta media la aleatoriedad con tendencia a la baja o a la alta un escenario pronóstico al 2030 como se muestra en la gráfica siguiente

Gráfica 3.9
Proyección de precipitaciones acumuladas de 2010 a 2030.



Fuente: Elaboración a partir de la extracción de datos de (Arreguín Cortés F. I., 2011) .

De acuerdo a los resultados que se obtienen se procede a identificar las zonas donde ocurrieron las mayores precipitaciones para observar las consecuencias que estas trajeron consigo a nivel monetario para que en el futuro se pueda contar con un fondo de capital que pueda cubrir el costo de los daños que provocaran las inundaciones siguientes. Por falta de información es difícil identificar las catástrofes por medio de las precipitaciones, por tal motivo se deja abierta la investigación.

Conclusiones

Las inundaciones representan a nivel mundial uno de los desastres naturales que ocasiona mayor número de pérdidas económicas, materiales y de vidas humanas; esto a causa de no hacer un cálculo óptimo del riesgo, donde se pueda prevenir a la población y a los gobiernos para resarcir el daño que provocan estas, implementando modelos actuariales para un mejor control y manejo.

Aunque las diversas instituciones del país tengan sus propias metodologías, es importante innovar en otro tipo de soluciones donde se tenga contemplado a un equipo especializado de diferentes profesiones entre geógrafos, ingenieros, meteorólogos, actuarios que en conjunto logren una institución especializada en este tipo de fenómeno para un mejor estudio y para bien de la sociedad.

Un factor que es importante contemplar es una variable sumamente significativa para el tema que es el cambio climático, ya que representa un elemento el cual no se puede controlar fácilmente, si bien se han implementado medidas de control para disminuir las emisiones de gases que ocasionan el efecto invernadero, es este un factor que altera de forma agresiva, tanto al clima como a las precipitaciones, provocando el empleo de un análisis estocástico para un mejor manejo de la información.

De acuerdo a la investigación que se realizó se puede concluir que debido a la poca información que se tiene sobre las precipitaciones en México es difícil poder hacer un estudio a profundidad utilizando el modelo de Ley Fuga, ya que a diferencia de otros países donde sí existe una cultura de recolección de datos a lo largo de periodos de tiempo considerables, facilitando a los especialistas e investigadores el poder hacer aportaciones científicas que impacten de forma benéfica a las regiones donde se necesite una solución para poder frenar o prevenir los desastres hidrometeorológicos para bien de la población y la economía del país donde se haga el estudio.

Es importante el cálculo de daños que estos desastres pueden provocar a nivel país, ya que afectan de forma considerable a la economía, debido a que si una región afectada dedicada a la agricultura y a la ganadería, esto impacta de forma que el ingreso que deja este tipo de actividad al país deja de producir este ingreso pegando con fuerza a la inflación y al producto interno bruto, no obstante que existen fondos para apoyar a las poblaciones, es insuficiente debido al mal manejo de estos recursos o por que el impacto supera las expectativas contempladas.

Por tal motivo se debe proponer un organismo que se encargue de recolectar la información de las precipitaciones del país generando históricos que puedan ser utilizados por los investigadores científicos para poder estar al nivel de los demás países y crear soluciones óptimas e innovadoras para México.

Bibliografía

1. Arreguín Cortés Dr. Felipe I. Riesgos de inundación en México Tercer Seminario Internacional de Potamología
2. CENAPRED Fascículo inundaciones
3. CENAPRED. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos.
4. De la Cruz, J. Formulación del riesgo conjunto inundación-sequia, bajo un esquema probabilístico, aplicado en la región hidrológica nazas-aguanaval (RH-36). Tesis Maestría y doctorado en ingeniería, facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 183pp.
5. Hernández, J.A. 2011. Inundaciones y Precariedad: Adaptación y respuesta en la zona Peri-Urbana de la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis Doctorado (Doctorado en Geografía)-UNAM, Facultad de Filosofía y Letras Universidad Nacional Autónoma de México. 292pp.
6. Ortiz, .A 2010. Implementación del modelo Hidrológico SWAT: Modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. 83pp.
7. Reygadas, Y. 201. Cambio en la amenaza de inundación en cuatro subcuencas del sur de la ciudad de Morelia. Tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. 134pp.

Páginas web

8. 20:04 pm, domingo 03 de marzo de 2013, CENAPRED, www.CENAPRED.unam.mx
9. 22:00 pm, domingo 03 de marzo de 2013, Documentos de Emergencia: Inundaciones y deslizamiento en Mexico - octubre/noviembre 2007 (Redhum), www.redhum.org
10. 22:10 pm, domingo 03 de marzo de 2013, Documentos de Emergencia: Deslizamientos e inundaciones en México y América Central por fuertes lluvias -octubre 2010 (Redhum), www.redhum.org