



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS
TEMPORALES DEL RIESGO ESTRUCTURAL DE LAS VIVIENDAS A CAUSA
DEL VIENTO DE CICLONES TROPICALES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ACT. DAVID RICARDO MENDOZA ESTRADA

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MAYO 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ordorica Mellado Manuel

Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar

Vocal: Dra. Elizondo Cortés Mayra

1er. Suplente: M. I. Reséndiz López Héctor Daniel

2do. Suplente: Dra. Sánchez Larios Hérica

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México

TUTOR DE TESIS

Dra. Elizondo Cortés Mayra

FIRMA

Agradecimientos

A Dios, por ser la razón de mi existencia.

“El cielo azul nos habla de la grandeza de Dios y de todo lo que ha hecho.” Salmo 19:1 (TLA).

A mis padres: Justino Mendoza Lira y Rosalía Estrada Hernández.

A mis hermanas: Estrella, Susana, Andrea, y a mi cuñada Adriana.

A mi hermano Emmanuel †, un día nos reuniremos otra vez.

A mis cuñados: Víctor y Benjamín.

A mis sobrinas: Diana, Leslie, Ruth y Lía.

Gracias por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque en sus aulas me forme como Actuario y hoy me permite graduarme como Maestro en Ingeniería de Sistemas. Pasé años magníficos como estudiante.

A mis amigos del posgrado, en especial a Alexei Gómez-Eguiarte por las largas horas de estudio que pasamos juntos, además de la amistad y el apoyo; no los menciono a todos porque no quiero omitir a alguno.

A mis profesores del posgrado, por enseñarme la ciencia y el arte de la Investigación de Operaciones.

A mi asesora, la Dra. Mayra Elizondo Cortés por su dedicación al apoyarme en este trabajo.

A mi tutor del IIUNAM y sinodal, Dr. Oscar A. Fuentes Mariles por su dedicación en este trabajo, y durante mi estancia como becario en el Instituto de Ingeniería. Gracias por todo su apoyo, sin el cual no hubiera podido estudiar el posgrado.

A mis sinodales, Dr. Manuel Ordorica Mellado, Dra. Hérica Sánchez Larios, y M. I. Héctor Daniel Reséndiz López; gracias por las observaciones y correcciones para culminar este proyecto.

A mis amigos y compañeros del cubículo 409 del Instituto de Ingeniería: Darío, Beto, Hipólito, Jack, Pepe, Juan, Jaime, Diego, Gabo, y al Maestro Faustino; por su compañerismo y asesoría durante mi tiempo en el Instituto y como tesista.

A Rachel por animarme a lograr mis metas.

A mis compañeros y amigos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, en especial a los miembros de la subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos por enseñarme lo relacionado a esta disciplina. Gracias por su apoyo.

Índice

Tabla de contenido

1	Daños por ciclones tropicales y atlas de riesgos	4
1.1	<i>Ciclones tropicales en México</i>	4
1.1.1	Registros de ciclones tropicales en México	4
1.1.2	Daños por ciclones tropicales	7
1.2	<i>Propuesta de modelo de estimación de daños.....</i>	14
2	Evaluación del riesgo	17
2.1	<i>Riesgo en general.....</i>	17
2.2	<i>Riesgo catastrófico por desastres naturales</i>	18
2.2.1	Estimación del riesgo catastrófico	18
2.3	<i>Riesgo en el ámbito de la protección civil en México.....</i>	19
2.3.1	Atlas de riesgos.....	19
2.4	<i>El riesgo por fenómenos naturales.....</i>	22
2.4.1	Evaluación del riesgo	23
2.4.2	Factores del riesgo por fenómenos naturales	24
3	Los ciclones tropicales	30
3.1	<i>Definición de ciclón tropical</i>	30
3.1.1	Estructura	30
3.1.2	Génesis	32
3.1.3	Trayectoria.....	33
3.1.4	Clasificación	34
3.2	<i>Efectos de los Ciclones Tropicales</i>	36
3.2.1	Lluvia.....	36
3.2.2	Intensidad de la precipitación	39
3.2.3	Viento	39
3.2.4	Oleaje.....	40
3.2.5	Marea de tormenta	41
3.2.6	Beneficios	44
3.3	<i>Estimación de daños en construcciones a causa del viento de ciclones tropicales</i>	45
3.3.1	Vulnerabilidad de las construcciones a causa del viento	45
3.3.2	Clasificación de estructuras	50

4	Simulación	55
4.1	<i>Modelación en simulación</i>	55
4.2	<i>Metodología de la simulación</i>	56
4.3	<i>Generación de números aleatorios</i>	58
4.3.1	Método de la convolución	58
4.4	<i>Muestreo a partir de funciones de distribución empíricas</i>	59
5	Modelo de simulación para la estimación de escenarios temporales de riesgo estructural de las viviendas a causa del viento de ciclones tropicales	62
5.1	<i>Formulación del problema</i>	62
5.2	<i>Conceptualización del sistema</i>	62
5.2.1	Proceso Binomial Compuesto	63
5.2.2	Modelación de daños como un Proceso Binomial Compuesto	64
5.3	<i>Desarrollo y verificación del programa de computo</i>	67
5.3.1	Simulación de la variable N (Rutina 1)	68
5.3.2	Simulación de la variable $D(i)$ (Rutina 2)	70
5.3.3	Simulación de Dp (Rutina 3)	73
5.4	<i>Validación del modelo programado</i>	74
6	Aplicación del Modelo de estimación de pérdidas en viviendas a causa del viento de ciclones tropicales	87
6.1	<i>Recolección de información</i>	87
6.1.1	Actualización del Busca Ciclones	87
6.1.2	Conteo municipal de ocurrencias	87
6.2	<i>Datos para el modelo conceptual</i>	88
6.2.1	Estadísticas obtenidas	88
6.2.2	Vulnerabilidad	89
6.3	<i>Diseño y ejecución del modelo</i>	91
6.4	<i>Presentación y documentación de los resultados</i>	92
6.4.1	Caso específico de Mazatlán	92
	Bibliografía	97
	Apéndice	Apéndice-5
	Anexo	Anexo-1

Introducción

Los ciclones tropicales son eventos que pueden transformar la vida de una sociedad en segundos, algunos de ellos en los últimos años causaron daños importantes, debido en gran medida, a la falta de planeación en el establecimiento de asentamientos humanos.

Gracias a que ciertas teorías relacionadas con el calentamiento global presuponen la ocurrencia de más ciclones por esta causa, resultará de interés conocer cómo suceden estos eventos y cuáles son sus posibles consecuencias. Cabe destacar que esta tesis no toca el tema del calentamiento global.

La ocurrencia de algunos ciclones tropicales en México tiene como una consecuencia el daño en viviendas que conlleva pérdidas económicas. De lo anterior se desprende la necesidad de estimar con anticipación los daños futuros ocasionados por estos fenómenos, para ello es necesario desarrollar métodos que permitan realizar estas estimaciones. Conocer las zonas de riesgo, es decir, las zonas en las que se sabe que ocurren ciclones tropicales y en las que además existen sistemas vulnerables, es vital para minimizar el daño de estos eventos.

El objetivo de esta tesis es desarrollar y ejemplificar un modelo para la estimación de escenarios temporales de riesgo estructural de las viviendas de bajo costo ante la acción del viento, específicamente de ciclones tropicales. Esto se hará mediante la generación, por medio de simulación, de una variable aleatoria que describa el porcentaje de daño acumulado en la estructura de una vivienda por la acción del viento durante cierto periodo. Con esta variable aleatoria se podrá obtener la distribución de los daños estructurales bajo ciertas condiciones dadas, con la cual se pueden realizar atlas temporales de riesgo, en este caso, estructural de las viviendas de bajo costo por acción del viento de ciclones tropicales. De esta forma se estará midiendo la frecuencia y la severidad de las pérdidas potenciales obteniendo la frecuencia y severidad de los daños estructurales. Se aplicará el modelo en los municipios costeros del Estado de Sinaloa.

Algo importante a notar es que este modelo no hace uso de características geológicas, detalles geográficos del territorio, ni de particularidades meteorológicas, ya que se enfoca en la simulación estocástica de la ocurrencia de ciclones y sus intensidades, añadiendo la vulnerabilidad física desarrollada por ingenieros civiles especializados, sin embargo, para tener mejores resultados en la evaluación del riesgo, estas características, detalles y particularidades, se pueden añadir con la colaboración de grupos expertos en dichas disciplinas.

Para cumplir con el objetivo, la tesis se estructura de la siguiente forma:

En el primer capítulo se da una justificación de este trabajo, antecedentes de desastres por ciclones tropicales y los daños ocasionados.

En el segundo capítulo, se muestra brevemente el estado del arte de la elaboración de atlas de riesgos y la evaluación de riesgos por fenómenos naturales. También, se menciona perspectiva de la protección civil en este ámbito

En el capítulo tercero, se expone qué son los ciclones tropicales. Su estructura, génesis, trayectoria, clasificación. Efectos de estos fenómenos tales como la lluvia, marea de tormenta, oleaje, viento, la forma en cómo se hace su seguimiento para prevenir a la población y estudios científicos. Y por último se muestran las funciones de vulnerabilidad en las estructuras de las viviendas de bajo costo por acción del viento de ciclones tropicales.

En el cuarto capítulo, se habla del modelado y la metodología de la simulación. Esto es importante ya que esta metodología será usada para realizar el modelo de escenarios temporales de riesgo estructural.

En el quinto capítulo, describe parte del proceso de la simulación a realizar: la formulación del problema, conceptualización del sistema, desarrollo y verificación del programa de cómputo, y la validación del modelo programado. Se describen las variables utilizadas y también se muestran los pseudocódigos de los procesos de simulación que usa el modelo.

Por último, en el sexto capítulo, se aplica el modelo. Se muestra la forma en cómo se recolectan los datos para alimentar el modelo conceptual descrito en el capítulo anterior. Se ven los detalles de cómo diseñar el número de simulaciones a ejecutar. Y para finalizar, se muestran los resultados generales y el análisis de un caso particular de las simulaciones hechas.

Es importante mencionar que un modelo así tal cual, no lo tiene aún integrado el Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED), el cual, tiene la coordinación ejecutiva del Sistema Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación para realizar y mantener actualizado el atlas nacional de riesgos, así como los correspondientes a las entidades federativas, municipios y delegaciones. Cabe destacar que para el desarrollo de esta tesis, se retoma el trabajo que el CENAPRED ha hecho al respecto del tema, además, se ha recibido la asesoría y el apoyo de compañeros de este Centro, específicamente de las subdirecciones de Riesgos Hidrometeorológicos, Riesgos Estructurales, y Sistemas de Información sobre Riesgos.

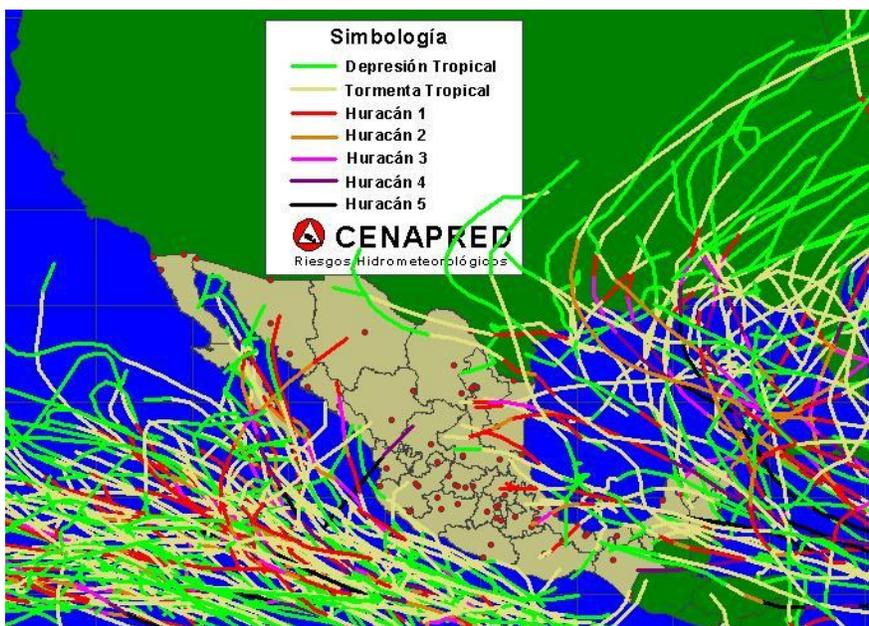
Esta tesis resultará de interés para todos aquellos que quieren conocer acerca de la estimación de pérdidas por fenómenos naturales, específicamente en estructuras de las construcciones de viviendas de bajo costo por la fuerza del viento de ciclones tropicales, también resultará de interés para los evaluadores del riesgo por fenómenos naturales y desarrolladores de atlas de riesgos estatales y municipales.

1 Daños por ciclones tropicales y atlas de riesgos

1.1 Ciclones tropicales en México

México es uno de los países más afectados por ciclones tropicales y está en una región que puede recibir efectos de ciclones provenientes de dos zonas donde se generan ciclones tropicales: la del Atlántico norte y la del Pacífico nororiental. Ninguna de las costas de México está totalmente libre de ser afectada por un ciclón tropical como se puede observar en la Figura 1.1.

Figura 1.1 Trayectorias de Ciclones Tropicales en el periodo de 2000 a 2008 en territorio de México y sus mares



Fuente: Busca Ciclones, CENAPRED

1.1.1 Registros de ciclones tropicales en México

Contar con la mayor cantidad de datos posible acerca de los desastres naturales permite conocer su potencial destructivo y en parte ayudará a la toma de decisiones para mitigarlos.

Afortunadamente, se han hecho grandes esfuerzos para registrar los eventos catastróficos que ha sufrido la humanidad. De manera internacional como nacional, los centros de investigación como las compañías aseguradoras nos permiten conocer los desastres y algunas de sus características.

Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (*National Hurricane Center*)

El Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos es una división del Centro de Predicción Tropical del Servicio Meteorológico Nacional, encargada de supervisar (monitorear) y predecir el comportamiento de depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes. Cuando se prevé

que ocurra una tormenta tropical o huracán dentro de las 36 horas siguientes, el centro emite advertencias mediante medios de noticias y la radio climatológica de la agencia (Radio del Tiempo de la *National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA por sus siglas en inglés). Aunque este centro es una agencia de los EEUU, la Organización Meteorológica Mundial lo ha designado como Centro Meteorológico Especializado Regional para el Atlántico norte y el este del Pacífico. Como tal, es el punto de confluencia de información de huracanes y tormentas tropicales que ocurran en esta área, aún si estas no tienen efecto en los EEUU.

Un registro de ciclones tropicales de México se puede encontrar depositado en forma de base de datos con fechas, trayectorias e intensidades de ciclones tropicales en este centro. Aunque el término de ciclón tropical se aplica aún a los sistemas débiles denominados depresiones tropicales, la base de datos mencionada incluye solamente a ciclones tropicales que en algún momento de su evolución alcanzaron la intensidad correspondiente a tormenta tropical o huracán. Por ello, las variables y estadísticas mostradas en dicha base de datos se refieren únicamente a este subconjunto de la totalidad de los ciclones tropicales. Esto no resulta grave pues son precisamente estos sistemas, los que son de mayor destructividad e interés. Para el caso del Océano Atlántico se tienen registros desde 1851, y para el caso del Océano Pacífico desde 1949.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Otro registro de ciclones tropicales se puede encontrar en el Servicio Meteorológico Nacional. En su sitio web publica desde 1997, el resumen anual de la temporada de ciclones, y cuenta con un historial de ciclones que han tocado tierra en México desde 1970. En la Tabla 1.1 se puede ver un fragmento del registro. El Servicio Meteorológico Nacional de México, es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo que prevalece o afecta a territorio del país. El SMN depende directamente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que a la vez forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Sus funciones principales son:

- Mantener informado a Protección Civil sobre posibles amenazas meteorológicas;
- Concientizar a la población sobre cómo protegerse y por ende evitar peligro;
- Proporcionar información meteorológica a la población en general;
- Realizar estudios sobre las condiciones atmosféricas;
- Clasificar información y capturarla en el Banco Nacional de Datos Climatológicos para consulta de la población.

Tabla 1.1 Ciclones que han tocado tierra en México. Periodo: 2005-2008

Año	Oceano	Nombre	Categoría en Imapcto	Lugar de entrada a tierra
2008	Pacifico	Odile	TT	Michoacán
	Pacifico	Norbert	H2	Sonora
	Atlantico	Marco	TT	Veracruz
	Pacifico	Lowell	DT	Sinaloa
	Pacifico	Julio	TT	BCS
	Atlantico	Dolly	TT	Tamaulipas
	Pacifico	DT 5E	DT	Michoacán
2007	Atlantico	Arthur	TT	Quintanna Roo
	Atlantico	Lorenzo	H1	Veracruz
	Pacifico	Henriette	H1	Sinaloa
	Atlantico	Dean	H5	Veracruz
2006	Pacifico	Barbara	TT	Chiapas
	Pacifico	Paul	DT	Sinaloa
	Pacifico	Norwan	DT	Colima
	Pacifico	Lane	H3	Sinaloa
2005	Pacifico	Jhon	H2	BCS
	Atlantico	Wilma	H4	Quintanna Roo
	Atlantico	Stan	TT	Veracruz
	Atlantico	José	TT	Veracruz
	Atlantico	Gert	TT	Veracruz
	Atlantico	Emily	H4	Tamaulipas
	Pacifico	Dora	TT	Guerrero
	Atlantico	Cindy	DT	Quintanna Roo
Atlantico	Bret	TT	Veracruz	

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. No se han añadido aún los de 2009.

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS).

Es un organismo público descentralizado y un Centro Público de Investigación, adscrito al Sistema de Centros CONACyT, como parte del Subsistema de Ciencias Sociales. Este Centro colabora con La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) generando la base de datos de México que se puede manipular con el software “Desconsultar” que contiene alrededor de 44,000 desastres registrados durante 30 años, incluidos los desastres por ciclones tropicales. Este software es parte de “Desinventar”, que a su vez es un sistema de inventarios de desastres. La fuente de los datos de desastres se obtiene de los siguientes periódicos mexicanos, El Universal, Excelsior y La Jornada.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

La responsabilidad principal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), consiste en apoyar al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) con los requerimientos técnicos que su operación demanda. Realiza actividades de investigación, capacitación, instrumentación y difusión acerca de fenómenos naturales y antropogénicos que pueden originar situaciones de desastre, así como acciones para reducir y mitigar los efectos negativos de tales fenómenos, para coadyuvar a una mejor preparación de la población para enfrentarlos.

1.1.2 Daños por ciclones tropicales

El CENAPRED realiza la publicación de la serie: "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana" desde el año 1999. Su recopilación ha estado a cargo del Área de Investigación del Centro en el departamento de Estudios Económicos y Sociales, y es el producto tanto de las evaluaciones, como del análisis de información documental recabada en diversas fuentes tanto del sector público como del privado. Entre las fuentes de información de gran utilidad, se encuentra la información proporcionada por la Dirección General de Protección Civil, a través del Centro Nacional de Comunicaciones (CENACOM). Las publicaciones presentan las valoraciones de los principales desastres que ocurren año con año. Las evaluaciones realizadas son el resultado tanto de visitas de campo, como de consultas directas con las autoridades locales por investigadores del CENAPRED. Contiene tanto los efectos de los fenómenos sobre la población y sus bienes afectables, así como las características físicas que dieron origen a los mismos. La metodología empleada en este informe también busca medir tanto los efectos directos como los efectos indirectos, es decir, las pérdidas en la producción de bienes y servicios como resultado de la paralización de las actividades económicas ocurridas a raíz del desastre. Para realizar la parte de la evaluación del impacto socioeconómico se empleó, en la medida de lo posible, la metodología desarrollada para estos fines por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas.

En la Tabla 1.2 se tiene el resumen de daños y afectaciones por ciclones tropicales en México en el periodo del año 2000 al 2010. Estos datos se obtuvieron del Sistema de Análisis y Visualización de Escenarios de Riesgos del CENAPRED.

Tabla 1.2 Daños y afectaciones por ciclones tropicales en México (2000-2010)

Variable	Cantidad
Muertos	245
Poblacion afectada (personas)	4998481
Viviendas dañadas	485156
Escuelas	10067
Hospitales	688
Área de cultivo dañada y/o pastizales (h)	1772984.23
Total de daños (millones de pesos)	126310.88

Fuente: CENAPRED

1.1.2.1 Eventos más significativos en los últimos años

Cabe mencionar que el año 2010 es el que más daños en millones de pesos presenta, esto debido a los ciclones Karl, Mathew y Alex. Los ciclones tropicales Karl y Matthew impactaron al estado de Veracruz en el mes de septiembre con apenas 10 días de diferencia. Estos eventos en conjunto fueron los más severos del año, causando daños y pérdidas por 26,841 millones de pesos y 23 defunciones. El huracán Alex ocasionó severas lluvias en el área metropolitana de Monterrey y en la mayor parte del estado. Las afectaciones fueron severas, sobretodo en infraestructura carretera y urbana. Desafortunadamente, nueve personas perdieron la vida. Este desastre es el más costoso de los últimos 20 años en el estado de Nuevo León.

Anteriormente al año 2010, el año 2005 había sido el que más daños había tenido. Debido a las fuertes lluvias y vientos ocasionados por el huracán "Wilma" se presentaron severas afectaciones en los diferentes sectores, se tuvieron daños por 18,258 millones de pesos. Debido a las fuertes lluvias provocadas por la presencia del huracán Stan, se reportaron severas afectaciones en varios municipios, así mismo, se reportan 5 personas desaparecidas y 86 personas fallecidas, se tuvieron daños por 15,031.5 millones de pesos.

En 2002, el ciclón tropical Isidore, entre el 20 y 24 del mes de septiembre la península de Yucatán fue afectada por uno de los huracanes más fuertes de los que se tienen registro, ya que las ráfagas de viento alcanzaron los 250 km/h, afectando los estados de Yucatán y Campeche, donde los daños registrados afectaron la economía de sendos estados. El número de viviendas dañadas así como de postes caídos no tuvo precedente alguno, se tuvieron daños por 6,535 millones de pesos. En Campeche, varios municipios resultaron incomunicados, ya que por las características del terreno y del fenómeno, se registraron diversas inundaciones que afectaron las actividades

económicas y el entorno social de la región. En este estado, los daños resultaron de gran cuantía casi comparables con los ocurridos en Yucatán, se tuvieron daños por 2,342 millones de pesos.

En 2007, en Veracruz, el ciclón tropical Dean afectó severamente la infraestructura estatal, se tuvieron daños por 3,036.24 millones de pesos.

1.1.2.2 Seguro de riesgos catastróficos y pérdidas en el sector asegurador

Las circunstancias adversas originadas por la ocurrencia de fenómenos naturales, implicaban no sólo la pérdida de bienes materiales, sino también la muerte o el debilitamiento de los afectados con el consiguiente perjuicio económico que esto involucra. Como consecuencia, se origina la idea del seguro por riesgos de carácter catastrófico.

El seguro es el mecanismo utilizado para disminuir la inseguridad de cualquier persona con respecto a algún siniestro por medio de la transferencia de ciertos riesgos a alguien más capacitado para asumirlo, como lo pueden ser las compañías de seguros, las cuales ofrecen una reposición parcial de las pérdidas económicas sufridas.

En materia de desastres naturales, las compañías aseguradoras ofrecen coberturas dentro del ramo de daños para eventos de tipo geológico e hidrometeorológico.

Dentro del ramo de cobertura por riesgos geológicos se tiene el Seguro de Terremoto, que cubre los daños materiales causados directamente a bienes por Terremoto y/o Erupción Volcánica.

Dentro del ramo de cobertura por riesgos hidrometeorológicos, se tiene el plan de Seguro de Riesgos Hidrometeorológicos, que cubre los daños materiales a bienes causados directamente por:

- a) Avalanchas de lodo. Deslizamiento de lodo provocado por inundaciones o lluvias.
- b) Granizo. Precipitación helada que cae con fuerza en forma de granos de hielo. Bajo este concepto además, se cubrirán los daños causados por la obstrucción en las bajadas de aguas pluviales.
- c) Helada. Fenómeno climático consistente en el descenso inesperado de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación del agua en el lugar de ocurrencia.
- d) Huracán. Flujo de agua y aire de gran magnitud, moviéndose en trayectoria circular alrededor de un centro de baja presión, sobre la superficie marina o terrestre con velocidad periférica de vientos igual o mayor a 118 kilómetros por hora, que haya sido identificado como tal por los organismos oficialmente autorizados para ese propósito.

e) Inundación. El cubrimiento temporal accidental del suelo por agua, a consecuencia de desviación, desbordamiento o rotura de los muros de contención de ríos, canales, lagos, presas, estanques y demás depósitos o corrientes de agua a cielo abierto, naturales o artificiales.

f) Inundación por lluvia. El cubrimiento temporal accidental del suelo por agua de lluvia a consecuencia de la inusual y rápida acumulación o desplazamiento de agua originados por lluvias extraordinarias que cumplan con cualquiera de los siguientes hechos:

- Que las lluvias alcancen por lo menos el 85% del promedio ponderado de los máximos históricos de la zona de ocurrencia en los últimos diez años, de acuerdo con el procedimiento publicado por la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS), medido en la estación meteorológica más cercana, certificada ésta por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.
- Que la inundación que dañó los bienes asegurados haya cubierto por lo menos una hectárea.

g) Marejada. Alteración del mar que se manifiesta con una sobre elevación de su nivel, debida a una perturbación meteorológica que combina una disminución de la presión atmosférica y una fuerza cortante sobre la superficie del mar producida por los vientos.

h) Golpe de mar. Agitación violenta de las aguas del mar a consecuencia de una sacudida del fondo, que se propaga hasta las costas dando lugar a inundaciones.

i) Nevada. Precipitación de cristales de hielo en forma de copos.

j) Vientos tempestuosos. Vientos que alcanzan por lo menos la categoría de depresión tropical según la escala de Beaufort¹ o superiores a 50 kilómetros por hora.

En la actualidad, prácticamente todas las aseguradoras en México venden por separado las coberturas de Terremoto y Riesgos Hidrometeorológicos, lo cual genera complicaciones innecesarias a la hora de la atención de los siniestros.

Los planes de seguros catastróficos en general cubren:

- Edificio;
- Contenidos e inventarios;
- Bienes a la intemperie;

¹ La escala de Beaufort es una medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos.

- Pérdidas consecuenciales.

Las opciones de contratación de suma asegurada son:

- Valor de reposición;
- Valor real (descontando la depreciación de los bienes).

En el mercado asegurador, coexisten varios esquemas de contratación, dependiendo de las preferencias y necesidades del Asegurado. Una de las más usadas es aquella en la que el Asegurado contrata de manera independiente sus Bienes, indicando para cada uno de ellos sus valores y coberturas contratadas. Otra opción es en la que el Asegurado contrata una suma global para todos los bienes (límite máximo de responsabilidad global en un evento), donde a veces la pérdida ocasionada por el siniestro queda por debajo del límite, en ocasiones coincide con éste y a veces, cuando se excede, se indemniza hasta el valor de la suma asegurada contratada.

Recientemente los especialistas en seguros han revelado que el crecimiento en la venta de coberturas contra desastres naturales en México es mínimo. Y aunque el territorio mexicano está sujeto a un alto riesgo por sismos y huracanes, 70% de las micros, pequeñas y medianas empresas, así como 98% de las casas habitación no cuentan con seguro de protección contra fenómenos naturales. Esto significa, que sólo las grandes empresas contratan estos seguros, quedando marginadas de la protección las personas y empresas de menores recursos que se ubican en zonas de riesgo.

Aproximadamente, 20 años atrás varias dependencias del gobierno federal no estaban aseguradas contra riesgos catastróficos, lo que en la actualidad es una obligación, por tanto, todos los bienes gubernamentales están (o deberían estar) amparados. Tan sólo 5% de las casas particulares (casa-habitación) mexicanas cuenta con un seguro contra riesgos. Tomando en cuenta que los créditos hipotecarios ya incluyen un seguro de estas características, la proporción alcanza de 10 a 12 por ciento del total de la vivienda asegurada en México. Las personas no aseguran sus hogares contra desastres naturales porque desconocen que existe gran variedad de opciones para el aseguramiento de casas habitación a precios accesibles, o porque no consideran este gasto como prioritario. Así, desconocen en la mayoría de los casos, que un seguro para cubrir una casa con valor de 600 mil pesos, cuesta alrededor de mil pesos anuales.

Cabe destacar, sin embargo, que la AMIS reportó el crecimiento de los seguros contra riesgos catastróficos el tercer trimestre del año 2005 en comparación con el de 2004, en particular como reflejo de la cultura de previsión de los riesgos hidrometeorológicos (verTabla 1.3).

**Tabla 1.3 Primas directas (millones de pesos)
tercer trimestre del año 2005. ²**

Ramo	2005	2004	Diferencia
Terremoto y Erupción Volcánica	2301	2331	-30
Hidrometeorológico	2727	2419	308
Total	5028	4750	278

Cabe recordar que el año 2005 fue el más siniestrado por ciclones tropicales, y también es en donde más aumentaron las primas por el ramo de riesgos hidrometeorológicos, por eso se realiza la comparación con el año 2004.

Durante el cuarto trimestre de 2005, los siniestros de los seguros de daños, sin incluir los de automóviles, alcanzaron el monto sin precedentes de 32,904.1 millones de pesos, en virtud de las importantes coberturas catastróficas de riesgos hidrometeorológicos.

**Tabla 1.4 Siniestros directos (millones de pesos)
cuarto trimestre del año 2005. ³**

Ramo	Monto
Vida	26311
Pensiones derivadas de la seguridad social	4268
Accidentes y enfermedades	14562
Daños sin autos	32904
Automóviles	28616
Total General	106661

Entre los grandes siniestros en el mercado mexicano de seguros, el huracán “Wilma” es el que históricamente ha promovido más la acción de las aseguradoras. En comparación con el sismo de 1985, en que la baja cobertura originó solicitudes de indemnización por la décima parte de las pérdidas totales estimadas, quedando sólo el 6% indemnizable por causa de infraseguros, coaseguros y deducibles, los siniestros producidos por el meteoro han dejado a cargo de las aseguradoras la mayor parte de los gastos, aproximándose nuestra participación a los 2 mil

² Rolando Vega Saénz . 2005. Comportamiento del seguro mexicano. Resultados al Tercer trimestre de 2005-2004. Noviembre, 2005.Pág. 5.

³ Rolando Vega Saénz . 2006. Comportamiento del seguro mexicano. Resultados al Cuarto trimestre de 2005-2004. Febrero,.Pág. 2.

millones de dólares, 69% del costo total, de acuerdo al total de los daños estimados por la presidencia de la república.⁴

Por sí solo, el monto alcanzado por Wilma supera a la suma de los ocasionados por los Huracanes Gilberto, Isidoro, Emily, Kenna, Stan, Pauline, el sismo de 1985, el satélite Solidaridad, y la explosión en San Juanico (ver Tabla 1.5).

Para el sector asegurador, Wilma fue un evento catastrófico que dejó significativas lecciones, como la falta de un modelo que pudiera predecir todas las variantes que pueden presentarse en un evento de estas características o la dificultad que se presenta al tratar de modelar pérdidas consecuenciales.

Tabla 1.5 Grandes Siniestros en el Mercado Mexicano⁵

Evento	Monto (millones de dólares)
Huracán Wilma	1865
Huracán Gilberto	460
Huracán Isidoro	280
Sismo de 1985	260
Huracán Emily	240
Satélite Solidaridad	200
Huracán Kenna	160
Huracán Stan	160
PEMEX Cactus	133
PEMEX Pajaritos	109
Huracán Juliette	80*
Huracán Pauline	50
PEMEX San Juanico	40

*Con la estimación inicial de Fertinal

Fuente: Estimaciones AMIS, en millones de dólares corrientes

De acuerdo con Luis Álvarez, director de Daños de la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros, esta necesidad se detectó hace algunos años y se estaba trabajando en el proceso de creación del modelo. Sin embargo, Wilma se adelantó a los pronósticos. Otro factor que se evidenció con Wilma, es la poca cantidad de ajustadores profesionales capacitados para este tipo

⁴ Expansión, Edición número 928, 9 de noviembre de 2005.

⁵ Rolando Vega Saénz . 2006. Comportamiento del seguro mexicano. Resultados al Cuarto trimestre de 2005-2004. Febrero.Pág. 7.

de siniestros. Estamos hablando del mayor siniestro en la historia del seguro en México, en el que se presentaron 17 mil ubicaciones dañadas de un día para otro y no había suficientes ajustadores.

A raíz de lo costoso que pueden resultar los siniestros por riesgos catastróficos, surge la necesidad de realizar la modelación de los fenómenos naturales involucrados y las pérdidas que éstos pudieran ocasionar, para que las compañías de seguros puedan cobrar primas adecuadas que en el futuro les permitan responder satisfactoriamente a las reclamaciones por la ocurrencia de estos siniestros.

Existen modelos actuariales y probabilistas apropiados para la evaluación del riesgo catastrófico, usualmente son *proprietary*; es decir de firmas especializadas en el campo de los seguros/reaseguros y el riesgo financiero, como RMS, AIR Worldwide, EQECAT, ERN entre otras. Estos modelos están enfocados en capturar posibles situaciones de insolvencia indeseables para las compañías de seguros y reaseguros o entidades del mercado de capitales que “toman” riesgo. Por otro lado, firmas especializadas en México (ERN y IUNAM) y Colombia (INGENIAR Ltda., ITEC Ltda.) han desarrollado modelos de riesgo con los cuales se han realizado evaluaciones para algunos países de la región de América Latina y el Caribe, no sólo para la industria de seguros sino que también han sido utilizados para ayudar a los gobiernos a enmarcar los programas de gestión del riesgo de desastre. En general, en la mayoría de los países en desarrollo y en la región, ha existido una deficiencia notable en relación con la evaluación de riesgos debido a la falta de un marco instrumental metodológico adecuado para cada nivel de análisis (nacional, local). Aunque existen muchos estudios, los países no han contado con mapas de amenaza apropiados, ni con verdaderos estudios de riesgo. Ha existido una dispersión significativa de trabajos realizados sin un marco de referencia adecuado que permitan controlar la calidad y hacer de los mismos verdaderos insumos para la planificación. Asimismo, el mercado asegurador en México ha sido más pequeño que en el mundo desarrollado y los recursos no han sido adecuados para sostener los costos fijos y los gastos de funcionamiento de los modelos de riesgo, lo que impide los programas de gestión y mitigación del riesgo.

1.2 Propuesta de modelo de estimación de daños

El objetivo de esta tesis es desarrollar y ejemplificar un modelo para la estimación de escenarios temporales de riesgo estructural de las viviendas de bajo costo ante la acción del viento, específicamente de ciclones tropicales. Esto se hará mediante la generación, por medio de simulación, de una variable aleatoria que describa el porcentaje de daño acumulado en la estructura de una vivienda por la acción del viento durante cierto periodo. Con esta variable aleatoria se podrá obtener la distribución de los daños estructurales bajo ciertas condiciones dadas, con la cual se pueden realizar atlas

temporales de riesgo, en este caso, estructural de las viviendas de bajo costo por acción del viento de ciclones tropicales. De esta forma se estará midiendo la frecuencia y la severidad de las pérdidas potenciales obteniendo la frecuencia y severidad de los daños estructurales. Se aplicará el modelo en los municipios costeros del Estado de Sinaloa.

Cabe destacar que para el desarrollo de esta tesis, se retoma el trabajo que el CENAPRED ha hecho al respecto del tema, y toma el trabajo de otros investigadores expertos en las diferentes áreas que convergen con el tema, tales como:

- Ingeniería Civil, mediante el uso de funciones de vulnerabilidad por viento de las estructuras de viviendas de bajo costo;
- Meteorología, porque los ciclones tropicales son los agentes de amenaza que se está estudiando;
- Geomática, ya que el uso de sistemas de información geográfica permiten ubicar las trayectorias de los ciclones tropicales en un territorio específico;
- Gestión de riesgos, por el uso de la metodología de evaluación del riesgo por ciclones tropicales desarrollada en el CENAPRED.

Es de interés que este modelo se use para realizar atlas estatales y municipales de riesgos, por lo que debe ser incluyente de las investigaciones que el CENAPRED ha realizado.

Este modelo arrojará como resultado el costo esperado de los daños en viviendas por la ocurrencia de ciclones tropicales en un territorio y periodo determinado. Una aportación más del modelo propuesto es el factor añadido del periodo de evaluación del riesgo mediante procesos de simulación estocástica que permiten obtener el valor esperado de los daños y la pérdida máxima probable durante el periodo fijado, por lo que puede ser usado para la elaboración de atlas estatales y municipales de riesgo. También, puede ayudar a prevenir financieramente los daños en viviendas a causa del viento de los ciclones tropicales proponiendo sobre lo que el mismo gobierno federal ha hecho para modelar estos posibles daños. Por el momento, se aplicaría principalmente en viviendas de bajos recursos, que son con las que el CENAPRED ha estado trabajando, esto es así ya que ante los desastres naturales, las familias de escasos recursos siempre son las más afectadas, por lo que los daños estimados pueden ser considerados para establecer y modelar fondos de ayuda económica en caso de desastres, tales como el FONDEN (Fondo de Desastres Naturales) y el FOPREDEN (Fondo de Prevención de Desastres Naturales), que son fondos sostenidos por el gobierno federal para atender y mitigar los daños por fenómenos naturales.

El modelo solo abarcaría los daños a causa del viento de ciclones tropicales. Lo anterior debido a las siguientes razones:

- Los ciclones tropicales son fenómenos naturales que ocurren anualmente en México y ocasionan graves pérdidas económicas;
- Puesto que los daños por ciclones tropicales son ocasionados por varios factores: viento, lluvia, marea de tormenta y oleaje; se han estudiado por separado cada uno de ellos para después conjuntar los daños posibles por el efecto de cada factor, sin embargo, aun no se han hecho estudios de este tipo de manera formal en México por lo complicado que resulta modelar todos los posibles efectos. Por esta causa, se están tomando en este trabajo únicamente las causas por viento. En un futuro, se podrán modelar también los demás factores involucrados en un ciclón tropical para estimar los daños que pueden ocasionar tanto de forma separada como en conjunto, este último caso es el ideal.
- Hay datos disponibles acerca de los daños en construcciones por causa de la velocidad del viento, y hay datos disponibles y en diferentes formatos acerca del histórico de ocurrencias de ciclones tropicales en México.

Por último, se aplicará este modelo para evaluar el costo esperado de los daños en viviendas por la ocurrencia de ciclones tropicales de los municipios costeros de Sinaloa para un periodo de cinco años, ya que el atlas de riesgos estatal no cuenta con alguna evaluación del riesgo estructural en las viviendas por la acción viento de ciclones tropicales.

2 Evaluación del riesgo

2.1 Riesgo en general

Cada una de las actividades realizadas por los seres humanos implica un posible evento desfavorable que, de llevarse a cabo, puede tener consecuencias relevantes o sin importancia. La posible ocurrencia de dichos eventos, así como su naturaleza, son parámetros esenciales para determinar el grado de daño que pueden tener sobre los posibles afectados. Existen tantos tipos de eventos desfavorables como tipos de actividades puedan desarrollarse.

La modelación matemática de la ocurrencia de eventos desfavorables y del grado de daño potencial sobre los afectados, dará como resultado una medida de incertidumbre a la cual denominaremos riesgo. En algunos casos, la modelación de dichos parámetros no se puede llevar a cabo contando solamente con el conocimiento de posibles amenazas.

La diferencia entre amenaza y riesgo puede ejemplificarse en la preparación de los Estados Unidos ante el ataque terrorista a las torres gemelas el 11 de septiembre de 2001. Era un evento posible, que fueran usados aviones para impactarse a edificios o centros gubernamentales, esto era considerado una amenaza y no un riesgo, de ahí, que ningún escenario de probabilidades frecuenciales pudo haber sido preparado. Como ya se mencionó, una amenaza no puede ser considerada un riesgo, sin al menos un incidente específico donde la amenaza se haya concretado para llevar a cabo un análisis de posible ocurrencia expresado en una probabilidad, en este caso de tipo frecuencial.

La existencia del riesgo implica la del peligro. El peligro está implícito en actividades, tareas, operaciones, herramientas o agentes que se convierten en fuentes significativas de riesgo, ya sea personales o físicos, y de posibles consecuencias negativas. Algunos ejemplos de peligros son: Manejar un vehículo de tracción en terreno escabroso, manipular sustancias venenosas, deshacerse de solventes, manejar en estado de ebriedad, etcétera.

Generalmente, teniendo el conocimiento de la probabilidad de que ocurra un evento y algún parámetro que permita medir el daño que se espera de éste, la combinación de ambos proporcionará un valor esperado del daño potencial del evento. Este valor esperado es el más usado para realizar la evaluación de riesgos.

El riesgo siempre es consecuencia de las decisiones sociales, o de la falta de éstas. Esto no significa que sea producto necesariamente de la sociedad, sino que el riesgo ya puede existir, y aún así, tomar la decisión de exponerse a él, como pueden ser los asentamientos irregulares en barrancas en donde hay derrumbes o deslaves, o bien, vivir cerca de una zona propensa a las inundaciones.

Conforme las herramientas, procesos y capacidades de la sociedad se vayan modificando, los riesgos también lo harán.

Matemáticamente, el riesgo es una variable aleatoria que mapea estados futuros del mundo a valores que representan pérdidas o ganancias. Los riesgos pueden considerarse ya sea de manera individual, o como parte de un proceso estocástico en el que los riesgos actuales dependen de los riesgos previos.

2.2 Riesgo catastrófico por desastres naturales

Este tipo de riesgo es el que tiene su origen en hechos o acontecimientos de carácter extraordinario, tales como fenómenos hidrometeorológicos o geológicos, cuya elevada intensidad y cuantía de los daños que de ellos pueden derivarse, ocasionan desastres.

2.2.1 Estimación del riesgo catastrófico

Cualquier tipo de riesgo catastrófico implica un efecto financiero para los gobiernos que son responsables de asumir o retener riesgo. El hecho de no comprender el riesgo a causa de fenómenos naturales potenciales peligrosos tiene varias implicaciones importantes: la más obvia es que, al no comprender la exposición contingente ante las amenazas naturales, se limita la capacidad del país para evaluar qué tan deseables son las herramientas de planeamiento financiero para hacer frente al riesgo, así como también el desarrollo de modelos o indicadores adecuados que permitan cuantificar de alguna manera el riesgo. Los modelos de estimación de riesgo constituyen una importante y poderosa herramienta en el desarrollo de las actividades propias de las instituciones de planeación económica y financiera.

Las metodologías existentes para el cálculo del riesgo no son muchas y se basan básicamente en el mismo enfoque. La estimación del riesgo se debe basar en modelos probabilistas que permitan emplear la escasa información disponible para predecir posibles escenarios catastróficos en los cuales se considere la alta incertidumbre involucrada en el análisis. De manera general se cuenta con una limitada cantidad de datos e información histórica acerca de eventos catastróficos, debido en algunos casos a la ocurrencia de desastres de baja frecuencia de repetición, y en otros casos a desastres con una ventana temporal de atención reciente y corta. En consecuencia, la evaluación del riesgo debe seguir un enfoque prospectivo, anticipando eventos de ocurrencia científicamente probable que puedan presentarse en el futuro.

Para medir la frecuencia y la severidad de las pérdidas potenciales por amenazas naturales se utilizan métodos científicos robustos que tienen en cuenta la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos; por ejemplo sismos, huracanes, inundaciones. Adicionalmente estos modelos contienen las relaciones entre intensidad del fenómeno y los daños de los activos expuestos, también conocidas como relaciones de vulnerabilidad. A partir de estas relaciones se determina el monto de los daños que sufriría un conjunto de estructuras si un evento, en el sitio de ubicación, produjera una intensidad dada. Así pues, el objetivo general de los modelos de riesgo es calcular el nivel general de exposición de infraestructura o un grupo de edificaciones o activos, tomando como parámetros principales de evaluación la Prima Pura de Riesgo o Prima Técnica (AAL) para

cada registro y para todo el grupo de edificaciones, y la Pérdida Máxima Probable (PMP) de todo el grupo de edificaciones. La Prima Pura de Riesgo (AAL) se define como la pérdida anual esperada que tiene el inmueble en estudio. De cobrarse esta prima durante un tiempo infinito se podrían llegar a pagar todos los daños que en ese lapso se pudieran presentar en ese edificio en el sitio donde se encuentra.⁶

2.3 Riesgo en el ámbito de la protección civil en México

En el ámbito de la protección civil, se pueden conocer las definiciones relacionadas a riesgo a través de la Ley General de Protección Civil de los Estados Unidos Mexicanos. En el Artículo 2 podemos encontrar, entre otros, los siguientes conceptos:

- Riesgo: Daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador;
- Identificación de Riesgos: Reconocer y valorar las pérdidas o daños probables sobre los agentes afectables y su distribución geográfica, a través del análisis de los peligros y la vulnerabilidad;
- Peligro: Probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado;
- Vulnerabilidad: Susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales;
- Desastre: Al resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y o extremos, concatenados o no, de origen natural o de la actividad humana, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada;
- Fenómeno Natural Perturbador: Agente perturbador producido por la naturaleza;
- Fenómeno Hidrometeorológico: Agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados;
- Zona de Riesgo: Espacio territorial determinado en el que existe la probabilidad de que se produzca un daño, originado por un fenómeno perturbador.

2.3.1 Atlas de riesgos

Para un país en proceso de cambio cuyo objetivo es lograr un desarrollo humano integral, equitativo y sustentable, las cifras anuales de pérdidas provocadas por el embate de los

⁶ Sistema Económico Latinoamericano y del Caribe. 2010. “Mecanismos Financieros, Seguro y Reaseguro contra Desastres Naturales en América Latina y el Caribe: Experiencias Recientes”. Seminario Regional sobre Inversión Pública y Mecanismos Financieros, Seguros y Reaseguros Contra Desastres en América Latina y el Caribe: Experiencias Recientes. México.

fenómenos naturales, en este caso los ciclones tropicales, constituyen una condición inaceptable. Sin duda alguna se ha avanzado, sin embargo, son aún insuficientes los logros y es necesario por lo tanto, invertir mayores esfuerzos y recursos para transitar de un esquema reactivo a uno preventivo. Por ello, es indispensable establecer estrategias, políticas y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir el efecto de los fenómenos perturbadores con la coparticipación y corresponsabilidad de los diferentes niveles de gobierno, sectores social y privado.⁷

Este cambio de estrategia debe lograr que la sociedad sea capaz de afrontar los peligros naturales y generados por el hombre, asegurando al mismo tiempo que el desarrollo no incremente su vulnerabilidad y por ende el riesgo. Sólo así se podrá garantizar un país menos vulnerable y una población más preparada y segura. El punto de partida y un requisito esencial para la puesta en práctica de las acciones de protección civil y políticas de prevención y mitigación del impacto de los desastres, es contar con un diagnóstico de riesgos, es decir, conocer las características de los eventos que pueden tener consecuencias desastrosas y determinar la forma en que estos eventos inciden en los asentamientos humanos, en la infraestructura y en el entorno. Una manera efectiva para integrar esta información y hacerla disponible a un amplio número de usuarios, es a través de un Atlas. La cartografía digital y los sistemas informáticos modernos ofrecen una herramienta de gran utilidad para la representación de peligros y riesgos a diferentes escalas y detalles, así como la generación de diferentes escenarios a través de modelos y simulaciones.

Ante los diferentes peligros a los que la población puede estar expuesta, se han hecho esfuerzos para conformar atlas de riesgos en México. Entendemos por atlas de riesgos a un sistema integral de información, que permite establecer bases de datos y realizar el análisis del peligro, de la vulnerabilidad y del riesgo ante desastres a escala nacional, regional, estatal y municipal, con objeto de generar mapas y sistemas geográficos de información. Con ello se estará en posibilidad de simular escenarios de desastres, emitir recomendaciones para la oportuna toma de decisiones y establecer efectivas medidas de prevención y mitigación. Un atlas de riesgos debe comprender mapas de peligro por fenómeno, mapas de vulnerabilidad, localización y cuantificación de los sistemas afectables, costo de los desastres, costo esperado de la ocurrencia de fenómenos, sistemas de consulta por internet.⁸

Los Atlas de Riesgos están dirigidos a autoridades y dependencias de los niveles de gobierno; autoridades de protección civil; diversas instituciones relacionadas con la planeación territorial, urbana, desarrollo social, ambiental; instituciones académicas y de investigación, así como población en general. Con la implementación de Atlas de Riesgos se prevé fortalecer al Sistema Nacional de Protección Civil a través de un esquema homogéneo de valoración del riesgo como una política preventiva y de desarrollo, en suma, contar con una herramienta útil, entre otras acciones para:

⁷ Guevara Ortiz Enrique, Quass Weppen Roberto, otros (consultar hoja legal). 2006. "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos". CENAPRED, México.

⁸ Preguntas frecuentes en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

- Establecer políticas y estrategias de prevención;
- Mejorar la toma de decisiones en relación con planes de desarrollo urbano;
- Evaluar pérdidas humanas y materiales, tanto para eventos simulados como inmediatamente después de ocurrido un fenómeno natural o antropogénico;
- Atender las necesidades de una emergencia derivadas de la ocurrencia de un fenómeno natural o antropogénico, es decir, estimar los recursos que deberían ser destinados a la zona afectada;
- Contribuir a la cultura de la autoprotección a través de la orientación y concientización de la población sobre riesgo;
- Mejorar la calidad en la contratación de seguros de la infraestructura pública, tal como escuelas, hospitales, vías de comunicación, etc., ante la acción de fenómenos naturales o antropogénicos.

Algunos productos esperados de un Atlas de Riesgos:

- Mapas de peligro por fenómeno, que identifiquen las zonas en donde afectan los fenómenos con diferentes intensidades y periodos de retorno;
- Mapas de vulnerabilidad de población, escuelas, hospitales, y otros, en los cuales se señalen las zonas en donde el potencial de daño es mayor;
- Mapas que desplieguen el tamaño de los sistemas afectables;
- Mapas de riesgo que identifiquen las zonas en donde, para un fenómeno con intensidad dada, las consecuencias del daño sean máximas, medias o mínimas;
- Mapas de afectación ante la ocurrencia de algún fenómeno;
- Estadísticas sobre la ocurrencia y efecto de los fenómenos perturbadores;
- Costo de los desastres;
- Costo esperado de la ocurrencia de un fenómeno;
- Uso de sistemas de datos georreferenciados a cualquier usuario con aplicaciones web basados en GIS con funciones específicas para la generación automatizada de mapas.

Para establecer el grado de detalle de un atlas, se deberán tomar en cuenta tres criterios principales: el primero, es el nivel en que se representa la información estadística y geográfica (agregación), por ejemplo: a nivel estatal, municipal, localidad, colonia, manzana, etc., el segundo será la capacidad de análisis, procesamiento y almacenamiento de la información (no es lo mismo elaborar un diagnóstico de riesgo para una colonia que para un municipio urbano) y por último, la infraestructura en materia de recursos humanos y materiales.

En México, la elaboración de atlas de riesgos a nivel estatal y municipal se encuentra en proceso. Muchos de los atlas estatales llegan a describir ciertos peligros, sin embargo, no todos lo hacen conforme a las metodologías descritas por el CENAPRED, siendo éste el que desarrolla metodologías para la elaboración de los atlas de acuerdo con la Ley General de Protección Civil (LGPC) en su artículo 12, fracción XVI, que dice que es atribución de la Secretaría de Gobernación

desarrollar y actualizar el Atlas Nacional de Riesgos. Para tal efecto, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), como apoyo técnico del Sistema Nacional de Protección Civil, se ha dado a la tarea de emprender el desarrollo del mismo. Además, el CENAPRED evalúa los atlas de riesgos realizados por las unidades estatales o municipales de protección civil de cada Estado.

Uso de Sistemas de Información Geográfica en la realización de Atlas de Riesgos

Actualmente la representación gráfica-espacial del riesgo se ha simplificado gracias al avance de las ciencias y la tecnología. Un ejemplo de esto, es el uso extendido de los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales pueden desplegar y analizar una gran cantidad de datos como son: la caracterización del medio físico, el tipo de infraestructura, el número de habitantes y tipo de vivienda, siendo éstas algunas de las variables indispensables para el análisis y diagnóstico del riesgo. De manera parecida se utilizan cada vez con mayor frecuencia imágenes de satélites que permiten obtener información del subsuelo, superficie y la atmósfera de la tierra.

Los sistemas de información geográfica se han constituido durante los últimos diez años en una de las más importantes herramientas en la producción y el manejo de información para investigadores, analistas y planificadores. En el caso del análisis de riesgo no ha sido la excepción, ya que para llevar a cabo estudios e investigaciones donde interactúen rasgos geográficos con aspectos sociales y donde los sistemas expuestos puedan cuantificarse, se requiere de tecnologías que por un lado tengan una gran capacidad para el manejo y consulta de información y por el otro puedan realizar de manera sencilla operaciones matemáticas y estadísticas.

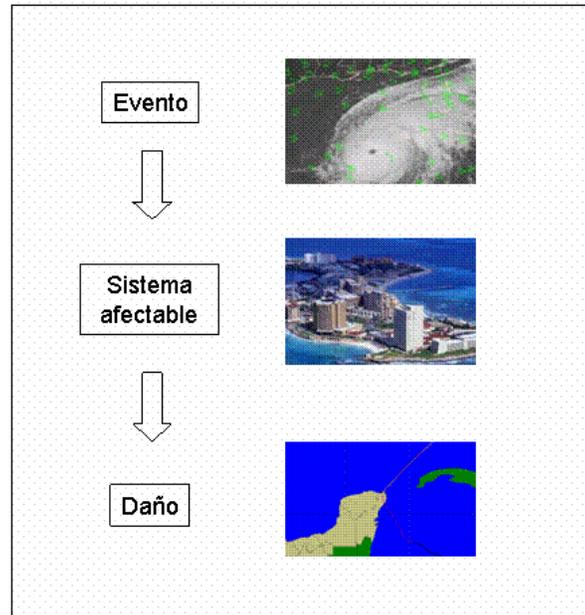
2.4 El riesgo por fenómenos naturales

Los riesgos por fenómenos naturales son aquellos originados por fenómenos de la naturaleza como inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, entre otros. Para que el riesgo pueda existir debe de haber un Sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva) por la posible ocurrencia de un evento perturbador (en este caso un fenómeno natural), si no existen ambos elementos entonces no existe el riesgo.

El riesgo por fenómenos naturales es considerado un riesgo puro, es decir sólo implica pérdida, por lo que este 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, y por la probabilidad de que el evento ocurra. El riesgo es el resultado de la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a ciertas amenazas.

Figura 2.1 Esquema de riesgos naturales

(Fuente: CENAPRED⁹)



2.4.1 Evaluación del riesgo

Cada una de las actividades realizadas por los seres humanos implica un posible evento desfavorable que, de llevarse a cabo, puede tener consecuencias relevantes o sin importancia. La posible ocurrencia de dichos eventos, así como su naturaleza, son parámetros esenciales para determinar el grado de daño que pueden tener sobre los posibles afectados. La modelación matemática de la ocurrencia de eventos desfavorables y del grado de daño potencial sobre los afectados dará como resultado una medida de incertidumbre a la cual denominaremos riesgo. El riesgo por ciclones tropicales pertenece a la categoría de los riesgos por fenómenos naturales, estos son considerados como riesgos puros, es decir sólo implican pérdida. Esta categoría puede modelarse como el movimiento de tres factores importantes entre sí: el costo o valor de los bienes expuestos a un evento, su nivel de vulnerabilidad o daño ante el evento en acción, y la probabilidad de que el evento ocurra.

De lo anterior podemos expresar al riesgo como:

⁹ Quass Weppen, otros (consultar hoja legal). 2004. “Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos”. CENAPRED, México.

$$R = CPV$$

2-1

Donde C = Valor de los bienes expuestos, P = Peligro, y V = Vulnerabilidad¹⁰

El riesgo es el resultado de la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a ciertas amenazas. La expresión, 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. En la **Figura 2.2** vemos cómo interactúan los conceptos mencionados, la coincidencia en tiempo y espacio de un sistema expuesto (C) vulnerable (vulnerabilidad) y un fenómeno (peligro) con cierta intensidad capaz de afectar dicho sistema expuesto; el primer cuadro de la Figura representa al peligro, y la siguiente a la vulnerabilidad de un sistema expuesto, ambas implican la existencia del riesgo por un fenómeno, en este caso de tipo natural.

Figura 2.2 Esquema de riesgos naturales
(Fuente: Sistema Económico Latinoamericano y del Caribe)



La expresión, 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. En la mayoría de los casos, resulta más práctico conocer el riesgo relacionado a la ocurrencia de un conjunto de eventos distribuidos a lo largo de cierto periodo de tiempo, que sólo el riesgo ante el próximo evento, de ahí la necesidad de añadir procesos que permitan esto.

2.4.2 Factores del riesgo por fenómenos naturales

2.4.2.1 Valor de los bienes expuestos

El parámetro C de la 2-1 de riesgo expresada anteriormente, representa en términos cuantitativos el valor de los bienes expuestos a uno o varios fenómenos. Por lo general, este valor C tiene unidades monetarias, es decir, se da un valor equivalente en dinero a los elementos expuestos. De esta forma, mientras tengan menos valor los bienes expuestos, el riesgo será menor, es decir hay menos pérdida monetaria. Si no existe algún valor expuesto, entonces C toma el valor de cero al igual que el riesgo en consecuencia. En el caso de un plan de seguro, se puede tomar a C como

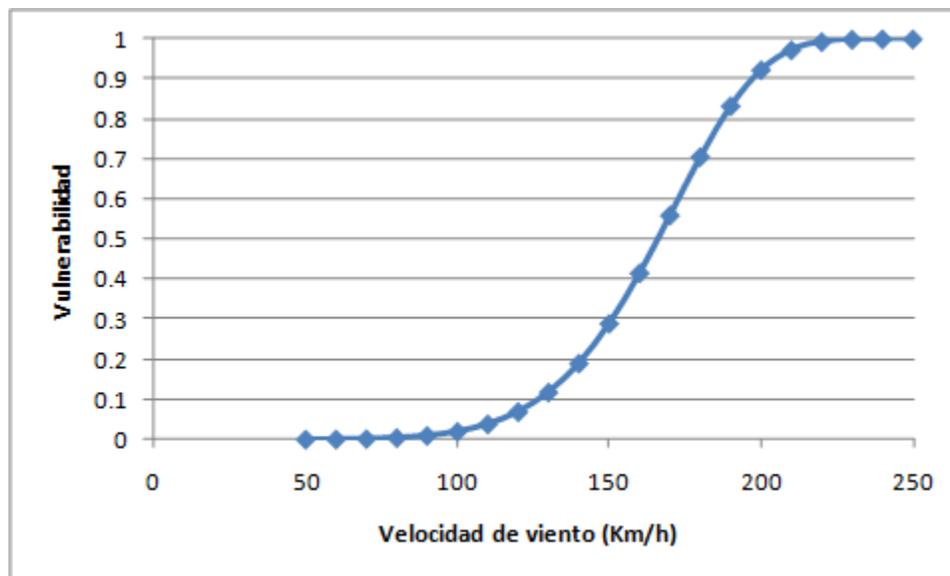
¹⁰ Ordaz Mario. 1996. Algunos conceptos del análisis de riesgos. Revista Prevención, CENAPRED, No. 14. Pág. 6.

una suma asegurada. El valor C , no necesariamente debe expresar el valor de los bienes materiales, en algunos casos los expuestos pueden ser vidas humanas.

2.4.2.2 La vulnerabilidad

Es una medida de la susceptibilidad de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por la ocurrencia de un evento perturbador. Pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La vulnerabilidad física es más factible de cuantificarse, por ejemplo, la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán. Esta vulnerabilidad se expresa como un valor entre cero y uno, que equivale al porcentaje de daño y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. Una función de vulnerabilidad es una relación matemática que asocia las consecuencias probables de un fenómeno sobre una construcción, una obra de ingeniería, o un conjunto de bienes o sistemas expuestos, con la intensidad del fenómeno que podría generarlas. En el Gráfico 2.1 se muestra la función de vulnerabilidad estructural de una vivienda de la Tabla 3.7 (esta Tabla se verá con más detalle en el capítulo 5), en el eje horizontal se muestran la intensidades en categorías de velocidad de viento (Escala Saffir Simpson), en el eje vertical se da la vulnerabilidad. Se puede observar que a una velocidad mayor a 250 kilómetros por hora, la casa tiene un daño total.

Gráfico 2.1 Ejemplo de función de vulnerabilidad estructural de una vivienda



Fuente: CENAPRED

La función de vulnerabilidad es creciente conforme aumenta la intensidad. Posiblemente, el ejemplo anterior pudiera corresponder a una casa realizada con materiales como madera o lámina que ofrecen poca resistencia al viento. Es necesario evaluar la vulnerabilidad ante cada fenómeno, de cada una de las obras construidas por el hombre. Realizar funciones de vulnerabilidad involucra

una categorización de los medios expuestos, en función de las consecuencias y la intensidad de un fenómeno natural determinado. Por ejemplo, en el caso de sismo, tanto los tipos de daños que pueden causar los movimientos del terreno en una construcción, en un sistema urbano o en una formación natural, como la selección de las variables del movimiento sísmico y de las propiedades del sistema o de la obra en cuestión que conduzcan a las estimaciones más confiables de las funciones de vulnerabilidad, dependen del tipo de sistema considerado.

Se pueden generar funciones de vulnerabilidad para cada aspecto que puede ser afectado por un fenómeno. Por ejemplo, se puede estudiar el caso de la vulnerabilidad de la estructura de una casa y la del menaje ante una inundación.

Cabe observar que pueden existir dos tipos de vulnerabilidad física: estática y dinámica. Por ejemplo, la estructura de una casa tiene una vulnerabilidad estática ante un huracán, mientras que un barco tendrá una vulnerabilidad dinámica ante el mismo fenómeno pues éste tiene la posibilidad de disminuir su vulnerabilidad alejándose del paso de la zona propensa a ser afectada.

Por otro lado, existe la vulnerabilidad social, ésta puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, y el grado de preparación de las personas.

2.4.2.3 Tasa de excedencia

La tasa de excedencia de intensidad $v(i)$, registra todos los niveles de intensidad i excedidos durante un evento. En el caso de los ciclones tropicales, por ejemplo, si se llegó a una intensidad máxima i , y que se denota por $M(i)$, se registran los niveles de intensidad menores rebasados durante el mismo ciclón. Entonces, si se tiene una $M(i)$ de intensidad 7, es decir $M(7)$, se registra también la ocurrencia del mismo ciclón para las intensidades inferiores, por decir si se tienen 6 eventos con intensidad $M(2)$, y 6 eventos con intensidad $M(1)$ (Tabla 2.1), entonces conforme a la tasa de excedencia se tuvieron 8 eventos de intensidad 1 y 6 eventos de intensidad 2.

Tabla 2.1 Tabla de intensidades

Intensidad i	Categoría	$M(i)$
1	DT	2
2	TT	6
3	H1	7
4	H2	1
5	H3	1
6	H4	1
7	H5	0
	Total	18

Para obtener la tasa de excedencia por medio de registros como el de la Tabla 2.1, se usará la siguiente expresión:

$$v(i) = \sum_{j=0}^{N-i} (M_{N-j}) \quad 2-2$$

Donde N es nivel máximo de intensidad i que se puede alcanzar. Conforme a la Tabla 2.1, tenemos que:

$$v(1) = \sum_{j=0}^6 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 + M_1 = 0 + 1 + 1 + 1 + 7 + 6 + 2 = 18$$

$$v(2) = \sum_{j=0}^5 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 = 0 + 1 + 1 + 1 + 7 + 6 = 16$$

.

.

.

$$v(7) = \sum_{j=0}^0 (M_{7-j}) = M_7 = 0$$

Convendrá manejar una tasa de excedencia anual, por lo que si los datos de la Tabla 2.1 corresponden a un periodo determinado de años al que denominaremos por t , se procede dividir los resultados obtenidos entre ese número de años. La tasa de excedencia queda de la siguiente manera:

$$v(i) = \frac{\sum_{j=0}^{N-i} (M_{N-j})}{t} \quad 2-3$$

2.4.2.4 El peligro

El Peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de cierta intensidad potencialmente dañino a los bienes expuestos. Para evitar imprecisiones, es importante evaluar los fenómenos naturales con parámetros cuantitativos con un sentido físico, que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con la vulnerabilidad que puede ocasionar el fenómeno sobre los bienes en exposición.

Los fenómenos naturales pueden medirse por magnitud o intensidad. El parámetro adecuado para medir los efectos de los fenómenos en los bienes expuestos es la intensidad, es una escala que depende de los daños ocasionados por los fenómenos, por lo que tiene una dependencia directa con las actividades y asentamientos humanos afectados. Como la intensidad de un fenómeno varía conforme al tipo de bien expuesto, el estudio del peligro lleva a la construcción de escenarios, es decir, a la representación de los efectos del fenómeno en la región de interés.

La caracterización del fenómeno sólo es completa si se especifica su intensidad, de lo contrario la modelación del peligro puede resultar ambigua, llevando a errores al momento de estimar posibles ocurrencias de fenómenos con cierta intensidad.

Para representar peligro, es decir, el carácter probabilístico de un fenómeno, comúnmente se usa el periodo de retorno (o de recurrencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad, este lapso es por lo regular, medido en años. El concepto de periodo de retorno, en términos probabilísticos, no implica que el proceso sea cíclico, o sea que deba siempre transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. En ocasiones, se utiliza también el inverso del periodo de retorno llamada tasa de excedencia $v(i)$, definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad i . La tasa de excedencia es decreciente conforme la intensidad aumenta, es decir, ocurren más fenómenos naturales de intensidad menor que mayor.

Para muchos de los fenómenos, no es posible representar el peligro en términos de periodos de retorno, porque no ha sido posible contar con la información suficiente para este tipo de representación. En estos casos se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones de uso más común y de más utilidad para las aplicaciones en el tema específico.

2.4.2.5 Periodo de retorno

El periodo de retorno se define como el promedio de tiempo en que vuelve a ocurrir la excedencia de cierta intensidad i . Podemos obtener este promedio a través del cálculo del recíproco de la tasa de excedencia, entonces

$$Tr(i) = \frac{1}{v(i)} \quad 2-4$$

Donde:

- $Tr(i)$ es el periodo de retorno de la intensidad i
- i es la intensidad del fenómeno
- $v(i)$ es la tasa de excedencia de la intensidad i

El periodo de retorno es una medida de peligro que se refiere a la excedencia de la intensidad i en un tiempo determinado sin que la realización del fenómeno llegue a un fin, es decir, al momento de llegar a la intensidad i no implica que esta intensidad alcanzada sea la máxima alcanzada por el evento y que pueda seguir avanzando. Por otro lado, la función de peligro nos proporciona información acerca de la intensidad máxima que puede llegar a desarrollar un fenómeno.

Por ello, para obtener una medida del peligro que nos dé información acerca del tiempo de ocurrencia del fenómeno y su máxima intensidad potencial, se deben de manejar tanto el peligro como la probabilidad de excedencia de cierta intensidad i .

A raíz de obtener el periodo de retorno, se sabe que si una excedencia $v(i)$ ocurre en promedio cada $Tr(i)$ años, entonces la probabilidad de que un evento exceda la intensidad i en cualquier año es

$$P_e = \frac{1}{Tr(i)} \quad \text{Siempre que } Tr(i) > 1. \quad \mathbf{2-5}$$

Donde:

- P_e es la probabilidad de excedencia de la intensidad i
- $Tr(i)$ es el periodo de retorno de la intensidad i

2.4.2.6 Riesgo ante el próximo evento

El riesgo ante el próximo evento, es la suma de los riesgos asociados a los diferentes niveles de intensidad. De la 2-1 sumamos los riesgos para cada intensidad:

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \quad \mathbf{2-6}$$

Donde:

C es el valor de los bienes expuestos

$P(i)$ es peligro de que ocurra un evento con intensidad i

$V(i)$ es la vulnerabilidad en la intensidad i

3 Los ciclones tropicales

3.1 Definición de ciclón tropical

Un ciclón tropical es un sistema atmosférico cuyo viento circula en dirección ciclónica, esto es, en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, y en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur. Como su nombre lo indica, el ciclón tropical se origina en las regiones tropicales de nuestro planeta. Como la circulación ciclónica y bajas presiones atmosféricas relativas normalmente coexisten, es común usar los términos ciclón y baja de forma intercambiable.

En latitudes templadas los ciclones son referidos como depresiones o ciclones extratropicales, y el término ciclón se usa sólo para referirse a los ciclones tropicales. Estos últimos, en su etapa más intensa, son conocidos por varios nombres, según las regiones en donde ocurren:

- a) En el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe son conocidos como huracanes;
- b) En el mar de Arabia y la bahía de Bengala como ciclones;
- c) En el mar de China y la costa de Japón como tifones;
- d) En el océano Índico, al este de Mauricio y Madagascar, como ciclones;
- e) En el océano Pacífico del noreste como huracanes;
- f) En el Pacífico Sur, al este de Australia y Samoa como huracanes y *willy willy*. En las Filipinas son conocidos como *baguios*.

Estos sistemas de tormenta exigen, al menos, dos requisitos básicos: calor y humedad; como consecuencia, sólo se desarrollan en los trópicos, entre las latitudes 5° y 30° norte y sur, en las regiones y temporadas en que la temperatura del mar es superior a los 26° C.

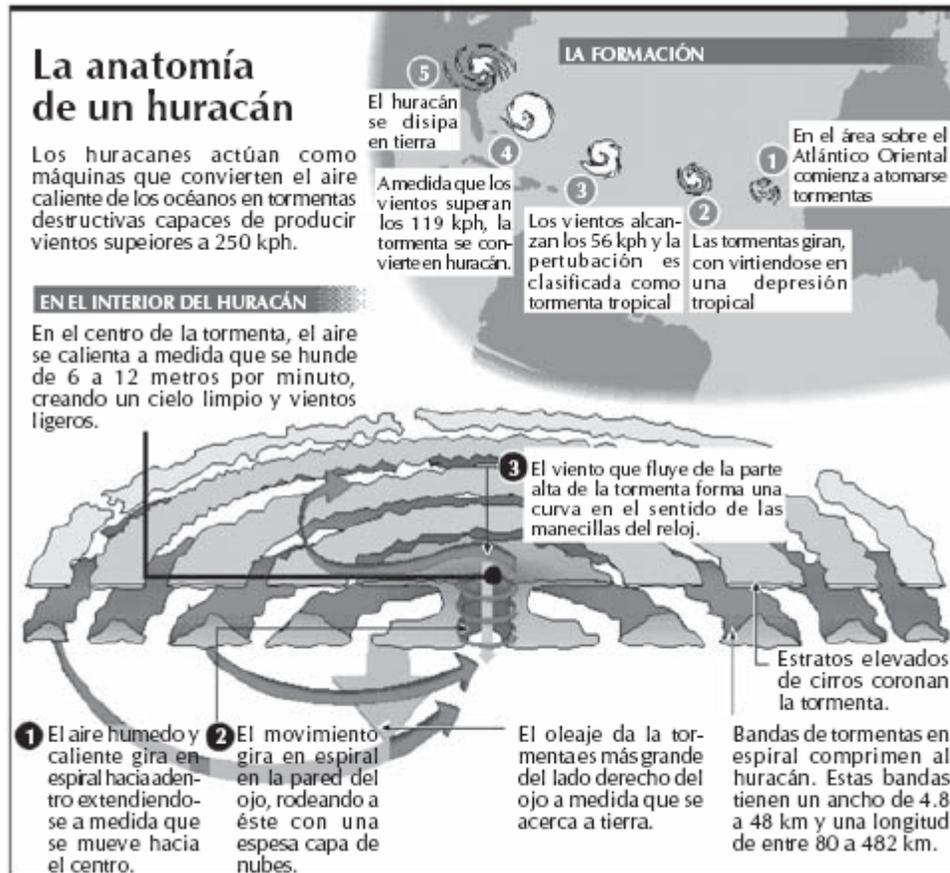
Los ciclones intensos están entre los más destructivos de los desastres naturales, capaces de causar graves daños a poblaciones costeras y ocasionar pérdidas humanas. Sin embargo, proporcionan precipitaciones esenciales para gran parte de las tierras que cruzan.

La energía de los ciclones tropicales proviene esencialmente del calor y la humedad que transfiere el océano al aire en los niveles bajos de la atmósfera. Mientras el centro del ciclón permanece sobre aguas cálidas (temperatura mayor a los 26 °C, el suministro de energía es enorme. Mientras más y más aire húmedo se dirige hacia el centro de la tormenta para reemplazar al aire caliente que asciende rápidamente en forma de nubes, mayor calor es liberado a la atmósfera por condensación del vapor de agua y la circulación del viento continúa incrementándose.

3.1.1 Estructura

Un esquema general de la estructura de un ciclón tropical es mostrado en la Figura 3.1, en donde está exagerada la escala vertical; los ciclones tropicales tienen un diámetro de varios cientos de kilómetros y una altura de alrededor de 15 km.

Figura 3.1 La anatomía de un huracán



Fuente: The Weather Book, The Ocean Atlas, Acou Weather.

Este esquema es de un ciclón tropical del hemisferio norte, ya que la circulación es en dirección contraria a las manecillas del reloj. Se nota una forma espiral marcada por bandas muy densas de nubes, de las que provienen lluvias torrenciales, y están separadas por áreas de lluvia ligera o sin lluvia; estas bandas espirales ascienden en capas de nubes llamadas cúmulos y cumulonimbus (Figura 3.2) hacia el límite vertical de formación de nubes convectivas, donde el vapor de agua condensado y en forma de cristales de hielo es arrastrado en espirales de nubes llamadas cirrus. Existe un fuerte flujo hacia adentro en los niveles inferiores, y un flujo correspondiente hacia fuera en los niveles altos. En el centro de un ciclón tropical intenso suele encontrarse un área de viento en calma y cielo relativamente claro, conocido como el "ojo" de la tormenta, delimitado por la pared del ojo, donde se dan las precipitaciones y vientos más intensos.

Figura 3.2 Nubes cúmulos y cumulonimbus



Fuente: CENAPRED.

3.1.2 Génesis

Numerosas observaciones a lo largo del tiempo han demostrado que las condiciones necesarias para el desarrollo de tormentas tropicales y huracanes son generalmente:

- a) Una superficie oceánica con temperatura mayor a los 26° C.
- b) Cambios pequeños en la dirección y rapidez del viento con la altura en la capa de la atmósfera que va de la superficie hasta unos 15 km de altura.
- c) Una distribución vertical de humedad y temperatura que permita la formación de nubes cumulonimbus.
- d) Una perturbación inicial consistente en la existencia de una concentración de rotación ciclónica en las partes bajas y medias de la troposfera.
- e) Una localización en las zonas oceánicas tropicales del planeta, en donde la fuerza de Coriolis no sea demasiado pequeña, es decir, más allá de los 4 ó 5 grados de latitud hacia el polo del hemisferio en que se encuentran. Generalmente se forman en latitudes entre los 5 y 25°.

En la Tabla 3.1 se muestra el número de ciclones tropicales por año en todos los océanos del mundo donde se presentan dichos fenómenos, en el periodo comprendido entre 1968 a 1989. Se observa que la cuenca oceánica con mayor actividad ciclónica es la del Pacífico noroeste, donde se

concentra cerca de un tercio de la “producción mundial de ciclones”; hay que recordar que el Pacífico noreste es el que rodea a México.

Tabla 3.1 Número de ciclones tropicales por año en océanos del mundo

Cuenca	Tormentas tropicales y huracanes	
	Máx/Mín	Promedio Anual
Atlántico	18/4	9.7
Pacífico NE	23/8	16.5
Pacífico NO	35/19	25.7
India N	10/1	5.4
India SO	15/6	10.4
India SE/Australia	11/1	6.9
Australia/Pacífico SO	16/2	9.0
Mundial	103/75	83.7

Fuente: CENAPRED.

La información anterior incluye, para el caso del Atlántico, tormentas subtropicales. La tabla anterior es sólo para fines comparativos. Información más actualizada se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Número promedio anual de ciclones tropicales en los mares que rodean a México

Clasificación	Media Histórica (1966-2008)	
	Pacífico	Atlántico
Depresiones tropicales	3.0	2.3
Tormentas tropicales	6.8	4.5
Huracanes categorías 1 y 2	4.0	3.6
Huracanes categorías 3, 4 y 5	4.3	2.2
Total	18.1	12.6

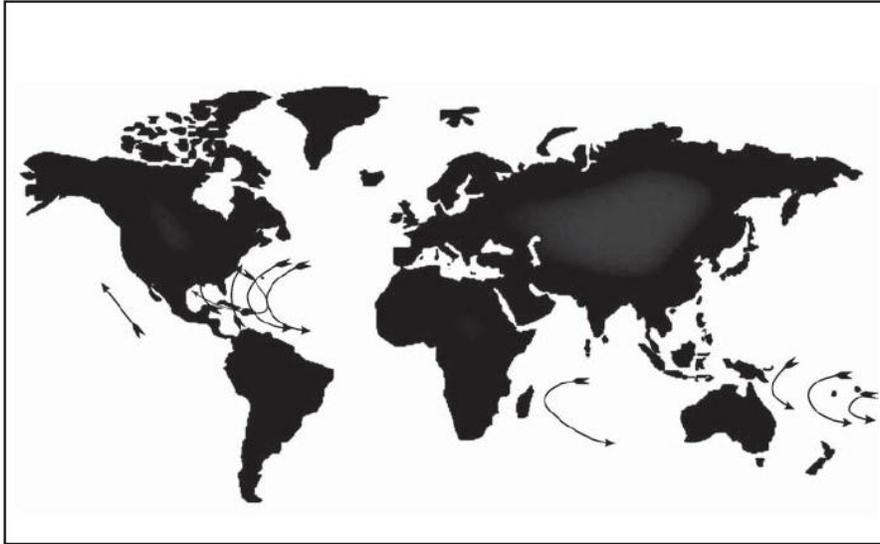
Fuente: CENAPRED.

3.1.3 Trayectoria

El movimiento de los ciclones tropicales resulta, principalmente, debido a que las tormentas están sumergidas en una región de aire en movimiento de mayor tamaño, conocida como “corriente conductora”, que tiende a mover la circulación de los niveles bajos y altos y la convección de nubes *cumulonimbus* en la dirección de dicho flujo. El ciclón por si mismo también es parte del flujo de gran escala, por lo cual es difícil definir la corriente conductora. El movimiento del ciclón también está influenciado por la fuerza de Coriolis que se origina por la rotación de nuestro planeta. Así mismo, ciclones grandes e intensos tienen la capacidad para modificar las condiciones

del flujo atmosférico a su alrededor, lo que puede aportar una fracción importante del desplazamiento total del ciclón. Las trayectorias de los ciclones se esquematizan generalmente por una línea continua; sin embargo, es muy común encontrar oscilaciones alrededor de lo que se considera su trayectoria media. Los patrones de trayectorias más comunes de los ciclones tropicales está ilustrados en la Figura 3.3 y presentan una característica en común: la tendencia a moverse hacia el polo del hemisferio en que se encuentran.

Figura 3.3 Trayectorias típicas de ciclones tropicales en el mundo



Fuente: CENAPRED.

Como se muestra en las Figura 3.3, los ciclones tropicales ocurren en las regiones del océano con aguas cálidas, excepto en el Atlántico sur. Es de hacer notar que en ambos océanos que colindan con México, existe la presencia de ciclones tropicales principalmente durante los meses de verano. La temporada de ciclones, estadísticamente hablando, es del 15 de mayo al 30 de noviembre en el océano Pacífico noreste y del 1o de junio al 30 de noviembre en el Atlántico, aunque esto no quiere decir que no se presenten ciclones tropicales fuera de temporada, incluso en meses como abril o enero.

3.1.4 Clasificación

Los ciclones tropicales están entre los sistemas meteorológicos más peligrosos y destructivos de la Tierra. Mientras la estructura y funcionamiento de una tormenta tropical madura son conocidos, su origen aún no es bien entendido. La etapa antecedente de un ciclón tropical es conocida en América como Perturbación Tropical; los ciclones tropicales se caracterizan por una circulación cerrada de sus vientos y se dividen en fases de acuerdo con la velocidad de su Viento Máximo Sostenido en superficie (VMS):

a) Depresión Tropical: VMS menor a 63 km/h.

b) Tormenta Tropical: VMS entre 63 y 118 km/h.

c) Huracán: VMS mayor a 118 km/h.

3.1.4.1 La escala Saffir-Simpson para huracanes

Esta escala ha sido utilizada por los oficiales de seguridad pública en los Estados Unidos de América como una estimación del daño potencial por viento y marea de un huracán próximo. La escala de daño potencial indica los daños materiales probables, pero debe usarse con cautela para el caso de regiones fuera de los Estados Unidos de América.

Tabla 3.3 Escala Saffir - Simpson

Intensidad	Descripción de posibles daños
OT - Onda Tropical	Una máxima curvatura ciclónica sumergida en la profunda corriente de los alisios del este; se desplaza al oeste, con tendencia a formar circulación de baja presión.
PT - Perturbación tropical	Un sistema separado de convección bien organizada, que se origina en los trópicos o subtrópicos, que tiene carácter migratorio no frontal y que conserva su identidad, por lo menos 24 h.
DT - Depresión Tropical – 63 km/h	Un ciclón tropical con circulación del viento en superficie, en sentido contrario de las manecillas del reloj, con velocidades máximas de 62 km/h.
TT - Tormenta tropical – 63 – 118 km/h	Un ciclón tropical bien organizado, de núcleo caliente, en el que el viento en máximo en superficie es de una intensidad de 63 a 117 km/h. Este tipo de ciclones son capaces de ocasionar algunos daños.
Huracán Categoría I - 118 - 153 Km/h	Sin daños en las estructuras de los edificios. Daños básicamente en casas flotantes no amarradas, arbustos y árboles. Inundaciones en zonas costeras y daños de poco alcance en puertos.
Huracán Categoría II – 153 - 177 Km/h	Daños en tejados, puertas y ventanas. Importantes daños en la vegetación, casas móviles, etc. Inundaciones en puertos así como ruptura de pequeños amarres.

Huracán Categoría III – 178 - 209 Km/h	Daños estructurales en edificios pequeños. Destrucción de casas móviles. Las inundaciones destruyen edificaciones pequeñas en zonas costeras y objetos a la deriva pueden causar daños en edificios mayores. Posibilidad de inundaciones tierra adentro.
Huracán Categoría IV - 210 - 249 Km/h	Daños generalizados en estructuras protectoras, desplome de techados en edificios pequeños. Alta erosión de bancales y playas. Inundaciones en terrenos interiores.
Huracán Categoría V - 249 Km/h + ...	Destrucción de techados completa en algunos edificios. Las inundaciones pueden llegar a las plantas bajas de los edificios cercanos a la costa. Puede ser requerida la evacuación masiva de áreas residenciales.

Fuente: CENAPRED.

3.2 Efectos de los Ciclones Tropicales

La importancia y peligro de los ciclones tropicales difiere entre tierra firme y superficie marina. Sobre los océanos las actividades humanas en riesgo son primeramente instalaciones petroleras, barcos y tráfico aéreo. En tierra, se ven amenazadas las vidas y actividades humanas en ciudades, pueblos, industrias, carreteras y cultivos que se encuentran, particularmente, a lo largo de la trayectoria del ciclón tropical.

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. Al mismo tiempo, es importante reconocer los aspectos benéficos de la lluvia provocada por los ciclones tropicales. Algunos ciclones que se mueven sobre regiones afectadas por periodos prolongados de sequía, pueden llegar a producir cantidades de lluvia de hasta unos 10 cm, que pueden ser importantes para mitigar las condiciones de aridez.

3.2.1 Lluvia

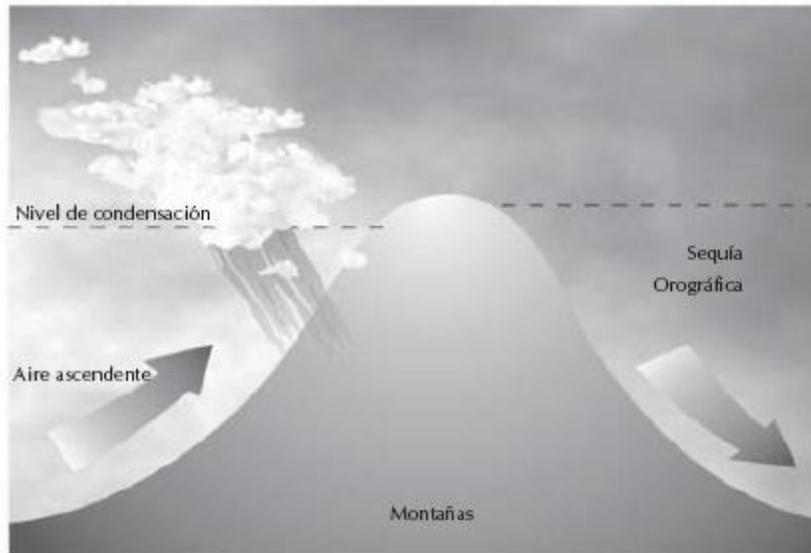
Las lluvias intensas asociadas a los ciclones tropicales en cualquiera de sus etapas, desde depresión tropical y tormenta tropical, hasta huracán, ocurren principalmente en el semicírculo

derecho y pueden extenderse a grandes distancias de su región central. En huracanes muy simétricos, la lluvia suele concentrarse cerca de su centro y en todas direcciones.

Aspectos del ciclón tropical que influyen en las lluvias torrenciales

1. Permanencia del centro del ciclón después de la llegada a tierra. Mientras más tiempo se mantenga el sistema ciclónico en tierra, se espera una mayor cantidad de lluvia. Generalmente el ciclón que presenta una larga duración en tierra, está acompañado por una fuerte divergencia de los vientos en la parte superior y una convergencia de los vientos que favorece la humedad en los niveles bajos de la Troposfera.
2. Desplazamiento. Si el ciclón tropical se estaciona o se mueve con lentitud, en la proximidad del continente o después de impactar a éste, la ocurrencia de núcleos de lluvia fuerte sobre un mismo lugar puede causar inundaciones.
3. Suministro continuo del vapor de agua. En determinadas condiciones, la cantidad de vapor de agua que ingresa en los niveles bajos del ciclón tropical es más grande, por lo que al entrar a tierra ocurren lluvias fuertes. Por ejemplo, el huracán Camille en 1969 produjo 787.5 mm en 5 horas sobre el estado de Virginia, cuando su banda nubosa interactuó con un cinturón de nubes cúmulo nimbus originada cerca del Ecuador, el cual mantuvo un flujo constante de vapor de agua.
4. Interacción de un ciclón tropical con un fenómeno de latitudes medias. Dado que la atmósfera es una capa de gases que rodea al planeta, la intensidad, el tamaño, la duración y distribución asimétrica de las bandas de lluvia o la llegada a tierra de un ciclón tropical, puede estar afectada por fenómenos térmicos y dinámicos de latitudes medias. En particular, el flujo de aire frío sobre el ciclón tropical favorece la generación de lluvias torrenciales y éste puede aumentar la intensidad del ciclón tropical.
5. Configuración del terreno. La configuración de la línea de costa, las montañas y las islas son elementos fundamentales sobre la estructura de un ciclón tropical. Ello se debe a la fricción que ejerce y reduce la velocidad de desplazamiento del ciclón. Por otra parte, los movimientos ascendentes y la diferencia de los flujos superficiales de calor y humedad, durante su paso a través de las montañas incrementan la cantidad de lluvia. (Figura 3.4).

Figura 3.4 Las lluvias se presentan sobre la barrera montañosa expuesta al mar



Fuente: CENAPRED.

En algunas ocasiones, los ciclones tropicales producen lluvias muy intensas, en cambio otros pueden pasar rápidamente y atravesar una región sin causar precipitaciones fuertes. Esto dificulta relacionar la cantidad de lluvia con la intensidad del ciclón tropical. Estos eventos son trascendentes para la economía agrícola de las regiones semiáridas de México; ya que la precipitación contribuye significativamente a los niveles de las reservas de agua que se requieren como sustento de la producción agrícola. (Figura 3.5).

Figura 3.5 Beneficios agrícolas por los ciclones tropicales



Fuente: CENAPRED.

3.2.2 Intensidad de la precipitación

Un aspecto importante de la precipitación es su intensidad. La intensidad de la lluvia se define como la precipitación acumulada en cierto intervalo de tiempo entre la duración de dicho periodo. La intensidad de lluvia ciclónica puede exceder a la ocurrida por otros fenómenos no ciclónicos. La precipitación de los ciclones tropicales se expresa, principalmente, como la intensidad máxima y la precipitación total.

La proximidad y el tamaño del ciclón son dos variables fundamentales que deben ser consideradas para determinar la lluvia asociada a un ciclón tropical. Los ciclones tropicales que se desplazan paralelos a la costa tienen el potencial para producir precipitaciones a todo lo largo de su trayectoria. Ello se debe a que la velocidad del viento converge a lo largo de la inmediación de la costa, y a la topografía asociada con el terreno montañoso de México.

Existe una gran variación en la cantidad de precipitación anual generada por los ciclones tropicales y en el número de ciclones que pasan o se acercan a cierta zona de interés. Por ejemplo, a escala nacional, la lluvia registrada por las estaciones meteorológicas debido a los ciclones excede en un 40% la precipitación ocurrida por otra clase de eventos.

La disipación de un ciclón tropical puede presentar remanentes nubosos, los cuales recorren grandes distancias y cubren extensas regiones, pudiendo descargar toda su humedad en forma de lluvia.

Finalmente, el seguimiento de la lluvia durante la ocurrencia de un ciclón puede servir para estimar el riesgo de posibles inundaciones en las zonas más susceptibles, las cuales deben identificarse con anticipación mediante mapas de riesgo (ver apartado de alertamiento de ciclones tropicales).

3.2.3 Viento

Los vientos de los ciclones tropicales son bastante fuertes a partir de que alcanzan una velocidad de alrededor de 63 km/h, lo cual es conocido como vientos con «fuerza de tormenta tropical». Por este motivo, se recomienda que todos los planes de evacuación y de aseguramiento de propiedades deban haber sido terminados antes de la llegada de ese tipo de viento. Los vientos con «fuerza de huracán» son aquellos con una velocidad mayor a los 118 km/h, que pueden destruir construcciones débiles y voltear camiones. Cualquier objeto suelto que es arrastrado por vientos de esta intensidad puede convertirse en un proyectil capaz de causar daños importantes; es común encontrarse con daños por viento tales como árboles, torres y líneas eléctricas derribadas. Los edificios altos que se encuentren expuestos a la fuerza directa del viento suelen ser dañados sobre todo en cuanto a la ruptura de vidrios y ventanas, cuyos restos salen volando y caen al suelo con gran fuerza. (Figura 3.6).

Los vientos más intensos generalmente ocurren cerca del centro del ciclón tropical, y pueden ser especialmente peligrosos en uno de sus cuadrantes cuando la velocidad de traslación del ciclón es alta. La velocidad de los vientos en un ciclón tropical tiende a decaer en unas pocas horas cuando éste se aparta de su fuente principal de alimentación, que son las aguas cálidas del océano.

Figura 3.6 Daños estructurales por viento



Fuente: CENAPRED.

3.2.4 Oleaje

El oleaje en el océano puede ser causado por diferentes tipos de factores, desde el paso de embarcaciones hasta fenómenos tales como terremotos submarinos. Sin embargo, la causa más común del oleaje es el viento. Cuando el viento pasa sobre la superficie del agua, la fuerza de fricción ocasiona que se formen ondas. La altura del oleaje se define como la distancia vertical que existe entre el punto más alto de la ola (cresta) y su punto más bajo (valle), Figura 3.7. Los factores que determinan la altura del oleaje son la fuerza del viento, la distancia que mantiene ese viento y su duración.

Figura 3.7 Efecto del oleaje por el ciclón tropical Kenna en Puerto Vallarta



Fuente: CENAPRED.

Existe una escala comúnmente usada por los marinos que nos permite relacionar la velocidad del viento con las condiciones de la superficie oceánica, conocida como la Escala *Beaufort*. Ésta fue desarrollada en 1805 por el Almirante Sir Francis *Beaufort* de la Marina Británica. La escala divide la fuerza del viento y las condiciones del mar en 12 “Fuerzas” que van desde la condición de calma, hasta las condiciones de vientos de fuerza de huracán. Esta descripción es de condiciones típicas lejos de la orilla de grandes cuerpos de agua, particularmente en mar abierto.

Tabla 3.4 Escala Beaufort

Nº de escala	Mts/seg	Km/h	Mll/h	Denominación
0	0-0.5	0-1	0-1	Calma
1	0.6-1.7	2-6	2-3	Ventolina
2	1.8-3.3	7-12	4-6	Suave
3	3.4-5.2	13-18	7-10	Leve
4	5.3-7.4	19-26	11-14	Moderado
5	57.5-9.8	27-35	15-19	Regular
6	9.9-10.4	36-44	20-24	Fuerte
7	12.5-15.2	45-54	25-30	Muy fuerte
8	15.3-18.2	55-65	31-35	Temporal
9	18.3-21.5	66-77	36-41	Temporal fuerte
10	21.6-25.1	78-90	42-48	Temporal muy fuerte
11	25.2-29	91-104	49-56	Tempestad
12	más de 29	más de 104	más de 56	Huracán

Fuente: CENAPRED.

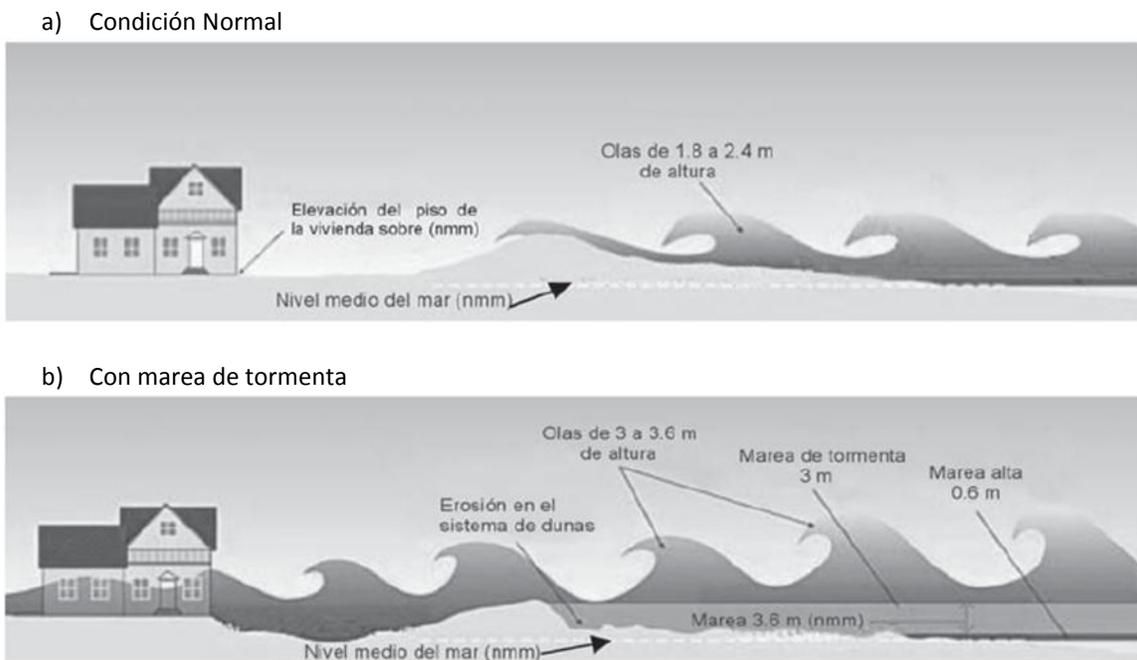
3.2.5 Marea de tormenta

La disminución de la presión atmosférica del centro del ciclón tropical y los vientos de este fenómeno sobre la superficie del mar, originan un ascenso del nivel medio del mar que es conocido como marea de tormenta. Ella puede provocar inundaciones en las zonas bajas continentales cercanas al mar y que las olas impacten sobre estructuras costeras (Figura 3.8).

Cuando al ascenso y descenso diario del nivel del mar, producto de la marea ordinaria (astronómica), se combina con la de tormenta, es mayor la sobre elevación del nivel medio del mar. Cuando el ciclón se ha alejado, el nivel del mar desciende y se restablecen las condiciones normales en el océano. La marea de tormenta es más intensa cuando los vientos se dirigen hacia la costa (Figura 3.9) y los vientos del ciclón tropical que tienen dirección de tierra al océano producen un descenso del nivel medio del mar.

La marea de tormenta se puede calcular a partir de la magnitud y dirección de los vientos que actúan en la superficie del mar. Estos vientos son casi nulos en el centro, luego aumentan radialmente hasta alcanzar un máximo (a una distancia del orden de los 50 km del ojo), para que, posteriormente, disminuyan gradualmente a medida que se alejan de dicho centro. Los vientos se dirigen hacia el centro del ciclón en dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj. Ellos forman un ángulo de aproximadamente 30° respecto a la dirección tangente de círculos concéntricos del ciclón tropical que señalen su distancia al ojo de este meteoro (Figura 3.10). Cuando la dirección de los vientos es hacia la costa y ésta tiene la forma de una bahía, es mayor la sobre-elevación del nivel medio del mar.

Figura 3.8 Efecto de incremento del nivel del mar



Fuente: CENAPRED.

Los vientos son más fuertes mientras la presión del ciclón tropical es menor. Así, en igualdad de ubicación, los huracanes categoría 5 producen una marea de tormenta mayor que los de categoría 1. Con el desplazamiento del ciclón tropical se modifican los vientos que soplan sobre la superficie del mar, por lo que el efecto de la marea de tormenta cambia a lo largo del tiempo; se estima que tienen una duración de 1 a 2 días. Para calcular la marea de tormenta es necesario conocer los vientos que genera el ciclón en el mar sobre un área extensa, así como la configuración del fondo marino y del litoral. Con base en esta información se resuelven, con la ayuda de una computadora, las ecuaciones que describen la transferencia de la energía de los vientos del ciclón al mar y del

movimiento del agua. Los resultados permiten conocer la sobreelevación del nivel medio del mar de una zona cercana a la costa y las corrientes marinas que genera.

Figura 3.9 Condición que genera la más alta marea de tormenta



Fuente: CENAPRED.

Los daños por la marea de tormenta que se presentan cerca de la línea de costa, se deben principalmente a la inundación y al impacto del oleaje. Ellos pueden reducirse, si se predice la marea de tormenta que causaría un ciclón de acuerdo con su trayectoria de desplazamiento y si se toman las medidas de protección pertinentes.

En algunos ciclones tropicales, la marea de tormenta puede ser su efecto más destructivo. Entre las mayores devastaciones que ha causado en el continente americano están la de Galveston, Texas (6,000 muertes) del año 1900, la del huracán de 1932 que provocó en Cuba la muerte de 2,700 habitantes y el huracán Audrey en Louisiana de 1957 que originó una inundación en una franja costera de 40 km, en la que fallecieron 390 personas.

Figura 3.10 Campo de vientos de un ciclón tropical. Las líneas punteadas representan circunferencias perfectas, esto para acentuar la asimetría del campo del viento



Fuente: CENAPRED.

3.2.6 Beneficios

A pesar de que los ciclones tropicales pueden causar muchos daños por efecto del viento, oleaje, lluvia y marea de tormenta, gracias a la precipitación producida, es factible que las presas se llenen y los acuíferos se recarguen, facilitando con ello el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la generación hidroeléctrica. Los beneficios obtenidos pueden durar varios años. Por ejemplo, una sequía grave en Texas terminó por las lluvias del Huracán Allen y la Tempestad Tropical Danielle en el verano de 1980. Otros ejemplos son, que los ciclones tropicales pueden desalojar contaminantes de bahías y también que en ocasiones, la arena pueda ser llevada de la plataforma continental a las playas. En México, el huracán Gilbert de 1988, ayudó a incrementar el almacenamiento de algunas presas del noreste del país, de modo que se mitigaron los riesgos por falta de abastecimiento de agua potable en años posteriores, principalmente a la ciudad de Monterrey. De manera parecida, Juliette, del 2001, ayudó a la recarga de acuíferos tales como los de Baja California Sur y de Sonora. Como se ha podido leer, los ciclones tropicales son sistemas meteorológicos bastante complejos, y el esfuerzo por conocerlos es enorme por los efectos que tienen en muchos ámbitos de la sociedad. Con la teoría descrita, se puede proporcionar una mejor idea de cómo modelar un fenómeno de esta naturaleza, en el caso de este trabajo con fines de prevención financiera en el caso específico del viento.

3.3 Estimación de daños en construcciones a causa del viento de ciclones tropicales

En los últimos años se han realizado algunos estudios acerca de cómo estimar daños por causa de diferentes fenómenos naturales. Hablando específicamente de los daños ocasionados por el viento, este trabajo se enfoca en los estudios hechos por el Centro Nacional de Desastres para evaluar daños en construcciones.

3.3.1 Vulnerabilidad de las construcciones a causa del viento

El viento, junto con las inundaciones que se producen por las lluvias intensas, son los dos efectos que caracterizan a los fenómenos que operan en la atmósfera terrestre, producto de las diferencias de presiones que, como se mencionó, surgen de la diferencia de temperatura entre masas de aire calentadas de manera diferente por los rayos del Sol. Aunque los niveles de daño y pérdidas económicas generados por estos fenómenos meteorológicos ocuparon en conjunto aproximadamente el 55% de los daños generados en el planeta en la década de los años noventas, nos ocuparemos en este trabajo únicamente del fenómeno de los vientos intensos, el cual generó el 34% de muertes no naturales (incluyendo desastres no naturales) y el 24% de las pérdidas económicas en la misma década señalada¹¹.

Para estudiar el comportamiento de las estructuras, en este caso de edificaciones de vivienda, ante la incidencia de viento, resulta necesario determinar si la velocidad de viento medida o determinada en un cierto punto de la biósfera, a una altura determinada sobre la superficie del terreno, será la misma para cualquier otro punto ubicado en la misma capa de la atmósfera terrestre. De estudios en laboratorio y de mediciones controladas en campo, se ha podido determinar que la distribución de las velocidades de viento en la altura resulta variable. Este hecho se menciona en la parte de la Física que estudia a los fluidos en movimiento, donde se indica que un fluido que está en contacto con un cuerpo o superficie fija, también se encontrará inmóvil, y que paulatinamente el nivel de inmovilidad variará hasta, a una cierta altura sobre el nivel del terreno, donde se podrá aceptar que la velocidad del viento es uniforme y, por lo tanto, el flujo se considerará como libre. A esta característica de la distribución de la velocidad de viento en la altura se le conoce como capa límite.¹² La altura a la que se alcanza esta capa límite, dependerá de las características de rugosidad del terreno. Así, para un terreno relativamente liso, como un campo abierto con vegetación baja o como los frentes de costa, a alturas bajas, el viento alcanzará velocidades muy altas; y viceversa, para terrenos con gran rugosidad, las altas velocidades del viento se tendrán a grandes alturas.

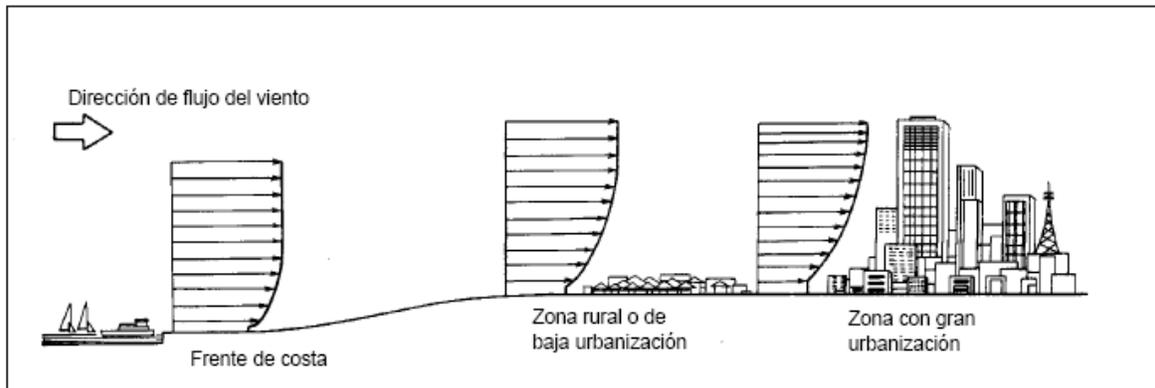
Desde la altura donde se presenta la capa límite, hasta la superficie del terreno, se acepta que la velocidad del viento disminuye rápidamente; de estudios en túnel de viento se ha podido determinar una expresión exponencial que permite determinar una aproximación adecuada de esta variación de la velocidad del viento respecto la altura. En la Figura 3.11 se muestra la

¹¹ Universidad de Luvaina, Bélgica

¹² Rosengaus, M. M. 1998. Efectos destructivos de los ciclones tropicales. MAPFRE RE, ITSEMAP, IMTA. Ed. MAPFRE, S.A. México, D. F.

variación de la velocidad del viento respecto la altura para distintas condiciones del terreno. Se puede esperar que la capa límite se presente aproximadamente a 250 m en campo abierto o frente de costa, entre 350 y 400 m para zona rural, y para una altura sobre el nivel del terreno del orden de 500 m para zonas urbanizadas.

Figura 3.11 Ilustración del efecto de la capa límite o velocidad gradiente

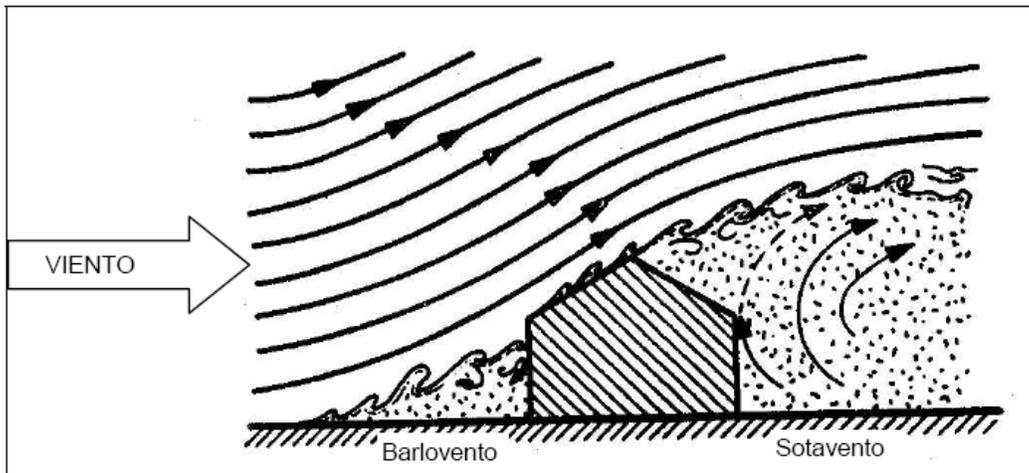


Fuente: CENAPRED.

Al igual que cualquier otro flujo, el viento atmosférico se ajusta para pasar alrededor de obstáculos, y este ajuste produce zonas con vientos de menor velocidad y otras con vientos de mayor velocidad que los que se esperarían en una zona completamente plana sin obstáculos. Algo similar ocurre a nivel local con las edificaciones, como se muestra en la Figura 3.12. En este caso, tanto las zonas de barlovento como de sotavento de la edificación, presentan velocidades de viento menores al flujo libre y pueden ser utilizadas como refugio emergente para personas que fueron sorprendidas en exteriores por vientos severos. Sin embargo, es necesario recordar que este tipo de refugio opera sólo con edificaciones que, en principio, sí resistirán las fuerzas del viento sobre ellas. Lo anterior no puede aplicarse a bardas o muros aislados, pues por su natural esbeltez no son muy resistentes al viento.

Cuando el viento incide sobre cualquier superficie provoca en éste cierta presión adicional a la de la atmósfera. Si se desea evaluar la fuerza total que un cierto viento ejerce sobre una estructura, se deben sumar las fuerzas individuales sobre cada una de sus superficies. Estas fuerzas que actúan como presión sobre las superficies se denominan fuerzas de arrastre. Además, por efecto de la turbulencia que se genera al pasar el viento librando la superficie de barlovento, se generan efectos de succión en la superficie de sotavento, que ejercen una fuerza en la misma dirección y sentido que las fuerzas que se generan por la presión en la cara de barlovento¹³ (ver Figura 3.12).

Figura 3.12 Representación esquemática del efecto del viento sobre una vivienda

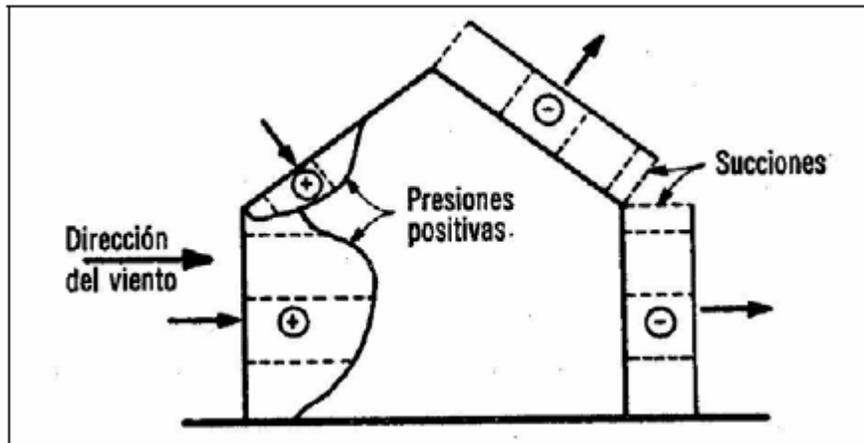


Fuente: CENAPRED.

Una vez determinados los efectos del viento sobre los objetos que obstaculizan su libre flujo, se puede comentar sobre algunos de los mecanismos generadores de daño más comunes. El mecanismo más común es el que se presenta en las superficies planas, que son un obstáculo para el flujo del viento, como pueden ser las bardas y los anuncios publicitarios, por ejemplo. Como ya se explicó en párrafos anteriores, estas fuerzas denominadas de arrastre, que son la conjunción de las presiones en las caras de barlovento y las succiones en la de sotavento, generarán momentos de volteo en la base de las estructuras de soporte.

¹³ Diseño por Viento, Diseño de Obras Civiles. 1993 Comisión Federal de Electricidad.

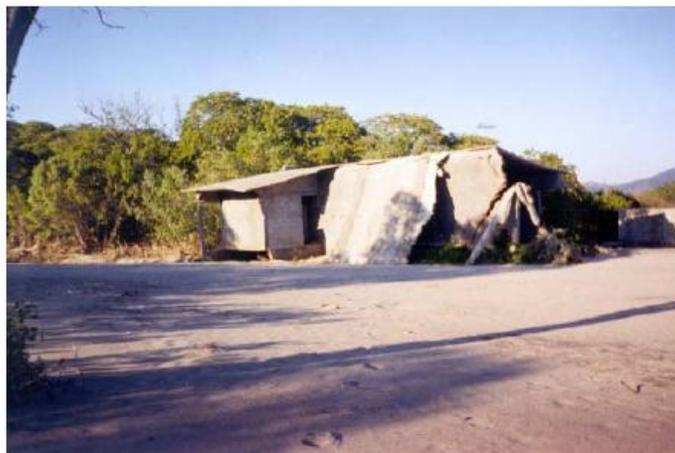
Figura 3.13 Ilustración de la distribución de presión producto del viento en una estructura¹⁴



Fuente: CENAPRED.

En la Figura 3.13 se observa el tipo de presiones a las que estaría sujeta una estructura como la mostrada en la Figura 3.12 inmersa en un viento intenso. Ante este tipo de solicitaciones generalmente no se considera que estructuras de mampostería, y sobre todo de mampostería confinada, pudieran presentar una falla porque las fuerzas resultantes por presión de viento son generalmente menores que las fuerzas estáticas equivalentes que se consideran para diseño por sismo. Sin embargo, producto del huracán Pauline, en el estado de Oaxaca, se pudieron observar daños de importancia en este tipo de estructuras, tanto en muros como en techos; un ejemplo se puede observar en la Figura 3.14.

Figura 3.14 Falla de una estructura de mampostería confinada por efecto del viento en las costas del estado de Oaxaca¹⁵



Fuente: CENAPRED

¹⁴ Sotelo, Ávila, G. 1979. Hidráulica general. México D.F.: Limusa.

¹⁵ H. Toledo; 1999. Oaxaca, México,

La clasificación de las fallas provocadas por el efecto del viento sobre las estructuras en general es similar a la clasificación del tipo de fallas totales, parciales o locales, ante otro tipo de fenómenos naturales como sismo. Las fallas totales, generalmente tienden a ser frágiles y abruptas, se presentan en estructuras con pocas líneas de defensa o redundantes, como las bardas de colindancia y los anuncios espectaculares apoyados en un solo poste. Las fallas locales están asociadas a problemas en sitios específicos de la estructura, generalmente asociadas al deterioro de la misma por falta de mantenimiento o por haber sido sujeta de un uso inadecuado. En este tipo de falla pueden estar incluidas las fallas de sujetadores de láminas en las cubiertas de bodegas y naves industriales; resulta difícil afirmar que las fallas locales se deben a una concentración de fuerzas de viento en sitios específicos. Finalmente, las fallas parciales están asociadas a un conjunto de fallas locales; por ejemplo, se tendrá una falla parcial en el techo cuando se presenten un número suficiente de fallas locales en los dispositivos de fijación de las láminas de cubierta.

Las fallas provocadas por el efecto del viento sobre las estructuras se pueden clasificar como totales, parciales o locales. Las fallas totales producen el colapso completo de la estructura debido a que las fuerzas del viento que actúan sobre ella rebasan su resistencia. Las fallas parciales se presentan cuando partes específicas de la estructura (la techumbre, por ejemplo) son separadas de la estructura debido a que la resistencia del anclaje a la misma fue rebasada por las fuerzas que actuaban sobre dicha parte. Las fallas locales son fallas de menor magnitud que ocurren en lugares específicos donde se concentran altas velocidades de viento. No siempre es obvio determinar *a posteriori* cuál fue el tipo de falla provocada por viento, ni el mecanismo que la originó. Una estructura que se observa completamente fallada al final del paso de un evento natural pudo haber presentado fallas locales al principio, mismas que pudieron haberse propagado hasta crear una falla parcial y eventualmente, bajo otra dirección del viento, pudo haber ocurrido la falla total. Es factible que de no haber existido la falla local inicial, la estructura como un todo hubiese sobrevivido. En el diseño de estructuras contra vientos, la calidad de los detalles es tan importante como la calidad de las componentes principales o la estructura en sí. Así, la falla de un simple conector puede acabar con el colapso total de la estructura.

Otro tipo de falla común durante fenómenos meteorológicos es la de las cimentaciones de vivienda; o bien la falla por flexión en la base de los muros de estructuras de mampostería.

Probablemente debido al hecho de que sean edificaciones de autoconstrucción, las cimentaciones llegan a ser muy simples y se encuentran dimensionadas tan sólo para soportar su peso propio, en ocasiones sin ningún tipo de empotramiento. Las fuerzas del viento sobre la estructura, que llegan a ser significativamente distintas a las de peso propio, hacen que las edificaciones se volteen, que los muros fallen por flexión fuera de su plano (Figura 3.15) o que las edificaciones sean arrastradas.

Figura 3.15 Falla por flexión del muro debido al giro de la cimentación en una estructura de mampostería confinada¹⁶



Fuente: CENAPRED

Los vientos que determinan la mayor parte de nuestro tiempo atmosférico, obedecen a grandes remolinos de aire, que los meteorólogos llaman ciclones tropicales. El ciclón tropical es una inmensa rueda de aire que gira y avanza a velocidades tan bajas, que en algunas ocasiones no se puede siquiera advertir su movimiento traslacional. Generalmente, se mueve con un movimiento tan regular que permite a los meteorólogos establecer adónde irá y cuánto tardará en llegar y, por lo tanto, pronosticar con bastante antelación el tiempo que tomará en llegar a las distintas zonas situadas en su ámbito de acción. Desde el punto de vista de la definición de peligro para este tipo de agente perturbador, los eventos meteorológicos se denominan de diferente manera en función de la intensidad que alcanzan; intensidad que se relaciona, entre otros parámetros, con el nivel de velocidad del viento y, por lo tanto, con el efecto destructivo que llegase a tener sobre las estructuras construidas por el hombre. Así, si un evento definido como tormenta llega a intensificarse lo suficiente como para tener vientos que rebasen los 119 km/h, entonces se le clasifica como huracán. Ya en la categoría de huracán, los ciclones se siguen clasificando de acuerdo con su intensidad en cinco categorías de acuerdo con la escala denominada de Saffir-Simpson. Esta escala también permite establecer una relación entre velocidades de viento y nivel de daño probable esperado en las edificaciones. Esta escala se presenta en forma resumida en la Tabla 3.3.

3.3.2 Clasificación de estructuras

Para nuestro estudio, se usarán estructuras de viviendas de bajo costo. Con base en los puntos débiles de una vivienda ante la acción del viento, se propone la siguiente clasificación para varios tipos de vivienda según sus aspectos estructurales. Para la aplicación de este criterio se requiere de una inspección en campo, vivienda por vivienda o bien un muestreo. Los diferentes tipos de piezas de mampostería que comúnmente son empleados en la construcción de vivienda son los siguientes:

¹⁶ H. Toledo. 1999. Huracán Pauline. Oaxaca, México.

- Tabique de barro recocido;
- Tabique multiperforado de barro recocido;
- Tabique hueco de barro recocido;
- Piezas macizas de cemento arena (Tabicón);
- Bloque hueco de concreto;
- Mampostería de piedras naturales;

En la Tabla 3.5 se puede observar la clasificación de estructuras de vivienda con base en información técnica.

Tabla 3.5 Tipos de vivienda con base en información técnica¹⁷

Tipo	Características de la vivienda	Foto representativa
1	Muros: Mampostería reforzada con castillos y dalas. Mampostería reforzada con astillos y dalas con malla y mortero. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior. Techo: techo y entrepisos rígidos. Cimentación: zapata corrida de concreto o mampostería. Altura: uno a cinco niveles.	
2	Muros: Mampostería reforzada con castillos y dalas. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior. Techo: Flexibles. Cimentación: zapata corrida de mampostería. Altura: un nivel.	
3	Muros: Mampostería deficientemente reforzada con dalas y castillos. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior insuficiente. Techo: techo y entrepisos rígidos. Cimentación: zapata corrida de mampostería. Altura: uno a cinco niveles.	
4	Muros: Mampostería deficientemente reforzada con dalas y castillos. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior insuficiente. Techo: Flexible. Cimentación: zapata corrida de mampostería. Altura: un nivel.	

Fuente: CENAPRED

¹⁷ CENAPRED

Tipo	Características de la vivienda	Foto representativa
5	Muros: Mampostería simple. Techo: techo y entrepisos rígidos. Cimentación: zapata de mampostería. Altura: uno a tres niveles.	
6	Muros: Mampostería simple. Techo: Flexible. Cimentación: zapata de mampostería. Altura: un nivel.	
7	Muros: Adobe. Techo: Rígido. Cimentación: Cuando existe, de mampostería. Altura: uno a dos niveles.	
8	Muros: Adobe. Techo: Flexible. Cimentación: Cuando existe, de mampostería. Altura: un nivel.	
9	Muros: De madera con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera), Estructura metálica con cubierta de lámina (asbesto, metálica o madera). Techo: Flexible. Cimentación: Cuando existe, zapata de mampostería. Altura: un nivel.	
10	Muros: Flexibles: material de desecho, lámina de cartón, lámina de asbesto y metálica, palma, tejamanil, bajareque (enramado cubierto de arcilla). Techo: Flexible. Cimentación: Cuando existe, zapata de mampostería. Altura: un nivel.	

Fuente: CENAPRED

El CENAPRED, realizó funciones de vulnerabilidad en función a la velocidad del viento y el porcentaje de daño de la estructura. También, se han realizado clasificaciones por casos para determinar funciones de vulnerabilidad dependiendo del lugar donde se encuentre ubicada la vivienda.

Tabla 3.6 Ubicaciones de las viviendas en estudio¹⁸

Caso	Área urbana o suburbana	Planicie o campo abierto	Litoral o promontorio
1	x		
2	x		
3	x	x	
4	x	x	x
5		x	x
6	x	x	x
7	x	x	x
8		x	x
9			x

A continuación, se tiene la Tabla 3.7 que indica el porcentaje de daño por viento, es decir, la vulnerabilidad, en este caso de una vivienda hecha con muros de tabique con refuerzo tradicional de varilla. Su ubicación es en un litoral o un promontorio.

Tabla 3.7 Porcentaje de daño por viento¹⁹

Velocidad (Km/h)	Porcentaje
50	0.0002
60	0.0006
70	0.0016
80	0.0042
90	0.0095
100	0.0198
110	0.0382
120	0.0692
130	0.1179
140	0.1901
150	0.2895
160	0.4154
170	0.5599
180	0.7061
190	0.8327
200	0.9227
210	0.9727
220	0.9932
230	0.9989
240	0.9999
250	1
Mayor a 250	1

¹⁸ CENAPRED

¹⁹ Corona Flores Leonardo, otros. 2006. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social). CENAPRED. México.. Pág. 67, Caso 8.

Gracias al desarrollo de estas funciones de vulnerabilidad, es posible conocer el daño que el viento ocasiona a ciertas estructuras. Con este desarrollo se puede obtener el riesgo por viento, ya que la vulnerabilidad es una variable vital para poder estimar pérdidas, en el siguiente capítulo se abordará este tema.

4 Simulación

En términos simples, la simulación estocástica consiste en reproducir en forma de experimento controlado las características esenciales de una situación aleatoria de tal modo que sea posible, mediante el uso adecuado de algún mecanismo aleatorio, simular la realización de dicha situación.

La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, haciendo uso de gráficos, animación y otros dispositivos tecnológicos; lo cual involucra ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos, que describen el comportamiento de un sistema (o algún componente de éste) durante un cierto tiempo.²⁰

La simulación consistirá en construir un programa de computadora que describa el comportamiento del sistema en interés, o refleje el modelo que lo representa y proceder a experimentar con el programa para llegar a conclusiones que apoyen la toma de decisiones.

Por ejemplo, todas las computadoras personales disponen de un mecanismo que simula la generación de números con características que esencialmente son indistinguibles del que produciría el efecto natural del azar. Así, si se quisiera simular lo que pasaría al arrojar una moneda al aire (esto es, al tirar un volado), se le solicitaría a la computadora que generara un número que fuera 0 ó 1, con la misma probabilidad, y entonces se asignaría el resultado “sol” cuando se produjera un 0, y el resultado “águila” cuando se produjera un 1. Entonces, la repetición de este procedimiento en un número grande de ocasiones daría lugar a una serie de sucesiones que se comportarían esencialmente, en cuanto a sus propiedades probabilísticas, de la misma manera que si el experimento se hubiera realizado físicamente, es decir, si se hubieran tirado igual número de volados y se hubieran registrado los resultados sucesivamente. Esta explicación simplificada resume la idea básica de las técnicas de simulación.

En el caso de los Atlas de Riesgo, es posible simular la ocurrencia de fenómenos con diferentes intensidades en determinado lugar, y si se conoce la vulnerabilidad del sistema expuesto, entonces se puede obtener el riesgo, o bien, el daño ante diferentes escenarios de un fenómeno.

4.1 Modelación en simulación

Un modelo es la representación simplificada de un problema o situación real. Esta representación puede hacerse en diferentes maneras y utilizando distintos recursos. Independientemente de cómo y con qué se haga el modelo, en cualquier caso involucra un proceso de abstracción que consiste básicamente en:

1. Seleccionar de la realidad, los elementos más importantes que intervienen en el problema y desechar aquellos que se considera que no juegan un papel determinante en el mismo.

²⁰ Flores de la Mota Idalia, Elizondo Cortés Mayra. 2006. "Apuntes de simulación". México, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

2. Establecer con precisión las distintas relaciones que guardan entre si dichos elementos.

Una vez realizado el proceso de abstracción se estará en condiciones de elaborar un modelo. Dependiendo de cómo y con qué se haga, tomará distintas características.

4.2 Metodología de la simulación

Un estudio de simulación es una actividad que depende de varios aspectos de análisis para un sistema. La metodología de la simulación comprende: actividades de modelación de sistemas, así como validación del modelo, selección de distribuciones de probabilidad, y diseño y análisis de experimentos de simulación. Todo esto tiene como fondo la teoría probabilidad, estadística, administración de proyectos y el conocimiento detallado de las operaciones del sistema a estudiar.

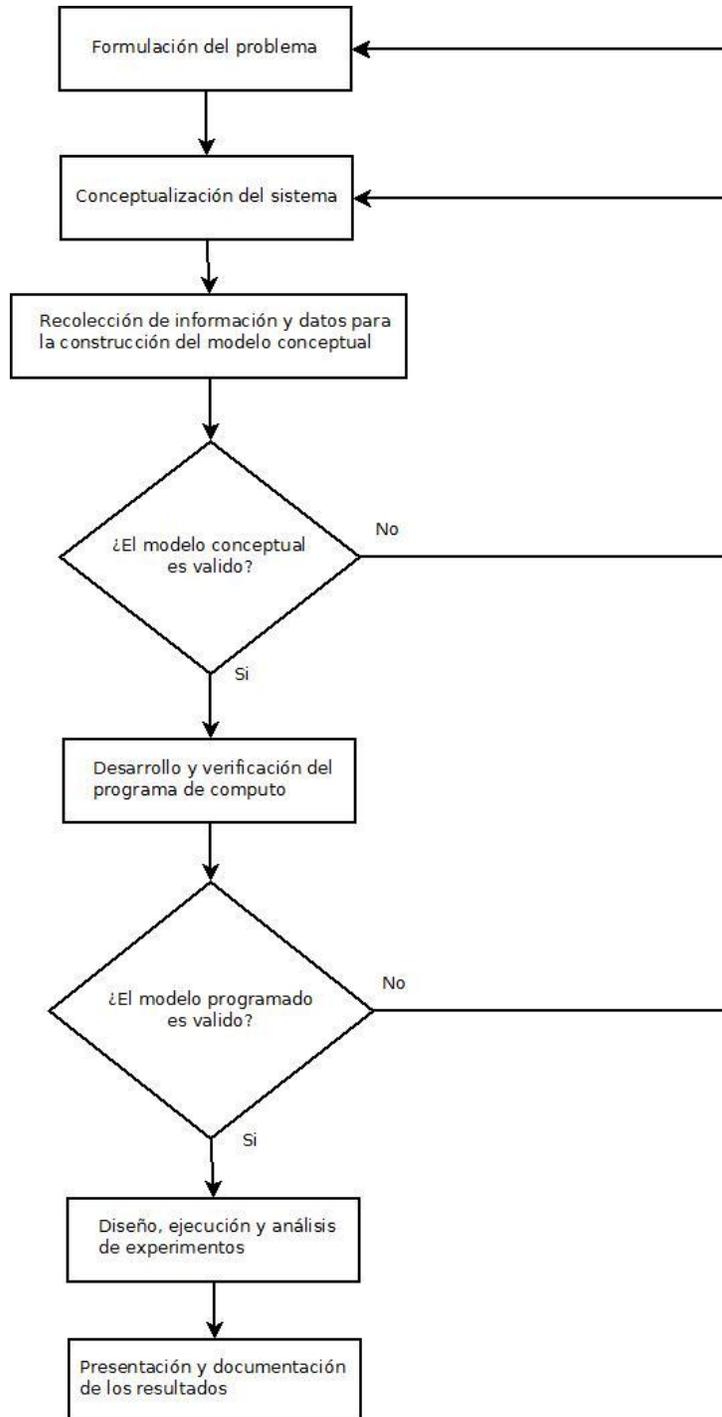
Resultaría limitante dar una serie de pasos a seguir al resolver problemas de simulación, y decir que son los únicos. Los distintos autores que escriben al respecto, proponen de acuerdo con su experiencia personal el proceso siguiente:

1. Formulación del problema;
2. Conceptualización del sistema;
3. Recolección de información y datos para la construcción del modelo conceptual;
4. Validación del modelo conceptual;
5. Desarrollo y verificación del programa de computo;
6. Validación del modelo;
7. Diseño, ejecución y análisis de experimentos;
8. Presentación y documentación de los resultados de la simulación.

Es importante al aplicar la metodología, considerar que en varias ocasiones será necesario regresar a alguno de los pasos previos, para un proceso de retroalimentación y mejora.²¹

²¹ IDEM.

Figura 4.1 Pasos de la metodología de simulación²²



²² Flores de la Mota Idalia, Elizondo Cortés Mayra. 2006. "Apuntes de simulación". México, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

4.3 Generación de números aleatorios

Los métodos de simulación aleatoria fueron inicialmente aplicados por matemáticos y físicos, para la solución de ciertos problemas determinísticos que podían expresarse en forma de ecuaciones matemáticas, cuyas soluciones no eran sencillas de obtener por los métodos numéricos o analíticos usuales.

Otro tipo de problema que conduce a la simulación de variables aleatorias, surge en aquellas situaciones en las que se presenta un comportamiento estocástico, que requieren de algún tipo de muestreo, que en la práctica resulta imposible o inconveniente, como es el caso de los datos futuros. Aunque no puedan obtenerse los datos, se tiene cierto conocimiento sobre la población de la cual se originan. Para la simulación estocástica, será entonces necesario construir el modelo probabilístico adecuado al estudio. Esto significa que será indispensable identificar una distribución (o varias) de probabilidad adecuada a cada caso, la cual permita generar valores que se comporten de manera semejante al fenómeno en cuestión.

A continuación, se describe una técnica de generación de números aleatorios que se usará más adelante para medir la frecuencia y la severidad de los daños estructurales en las viviendas por acción del viento de ciclones tropicales.

4.3.1 Método de la convolución

La distribución de probabilidad de la suma de dos o más variables aleatorias independientes es llamada la convolución de las distribuciones de las variables originales. El método de convolución es entonces la suma de dos o más variables aleatorias para obtener una variable aleatoria con la distribución de probabilidad deseada. Puede ser usada para obtener variables con distribuciones Erlang y Binomiales.

Además, muchas variables aleatorias incluyendo la Normal, Binomial, Poisson, Gamma, Erlang, etc., se pueden expresar de forma exacta o aproximada mediante la suma lineal de otras variables aleatorias. El método de convolución se puede usar siempre y cuando la variable aleatoria X se pueda expresar como una combinación lineal de k variables aleatorias:

$$X = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

En este método, se necesita generar k números aleatorios (u_1, u_2, \dots, u_k) para generar (x_1, x_2, \dots, x_k) variables aleatorias para obtener un valor de la variable X que se desea obtener por convolución.

A continuación se dan unos ejemplos de aplicación de esta técnica:

- Una variable Erlang- k es la suma de k exponenciales;
- Una variable Binomial de parámetros n y p es la suma de n variable Bernoulli con probabilidad de éxito p ;
- La *Chi-cuadrado* con v grados de libertad es la suma de cuadrados de v normales $N(0,1)$;
- La suma de un gran número de variables de determinada distribución tiene una distribución normal. Este hecho es usado para generar variables normales a partir de la suma de números $U(0,1)$; adecuados;
- Una variable Pascal es la suma de m geométricas;
- La suma de dos uniformes tiene una densidad triangular.

Además, este método permite la interacción de variables aleatorias para realizar algún otro tipo de distribución.²³

4.4 Muestreo a partir de funciones de distribución empíricas

Para realizar el muestreo, se recurre al uso de distribuciones empíricas cuando no se conoce la forma exacta de la función de distribución en un proceso aleatorio. Para la simulación por computadora, es preciso contar con una distribución original para obtener las muestras, y entonces el primer paso será suponer que la Función de de Distribución Empírica (FDE) obtenida de los datos reales es una buena aproximación a la distribución de probabilidad que rige en el desarrollo del fenómeno. El objetivo es utilizar un modelo experimental de la situación en el que se puedan modificar con facilidad los valores de los diferentes parámetros para examinar diferentes escenarios, buscar el más conveniente, y prever las consecuencias futuras de dicha elección.²⁴

La simulación estocástica es una técnica muy socorrida para obtener muestras a partir de funciones empíricas, con la cual, un modelo se calcula muchas veces con valores diferentes de entrada, con el interés de obtener una representación completa de escenarios que pueden ocurrir en una cierta situación.

A continuación se muestran los supuestos de convergencia y los teoremas fundamentales del muestreo a partir de distribuciones empíricas.

²³ García Raffi, L.M. Sánchez Pérez Enrique A. 2001. “Matemáticas asistidas por ordenador MAO”. Universidad Politécnica de Valencia.

²⁴ Garza Tomás. 1998. “Técnicas Modernas para el actuario”. FCE. México.

4.4.1 Convergencia de variables aleatorias

La convergencia de sucesiones de variables aleatorias es muy importante en el muestreo a partir de funciones de distribución empíricas. Cuando tratamos sucesiones de variables aleatorias, $\{\xi_n\}$, es imprescindible tener en cuenta su comportamiento aleatorio, por lo cual, lo más que podemos decir es que tendremos una probabilidad alta o baja de que la convergencia tenga lugar.

Convergencia casi segura de variables aleatorias²⁵

Una sucesión de variables aleatorias $\{\xi_n\}$ converge casi seguro (c.s.) a la variable aleatoria ξ cuando se verifica

$$P\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n = \xi\right) = 1$$

Designaremos este tipo de convergencia como

$$\xi_n \xrightarrow{cs} \xi$$

Convergencia en probabilidad²⁶

La sucesión $\{\xi_n\}$ converge en probabilidad a la variable aleatoria ξ ($\xi_n \xrightarrow{P} \xi$) si para todo $\varepsilon > 0$, se verifica la relación

$$P(\xi_n - \xi) > \varepsilon \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$$

La convergencia en probabilidad implica la convergencia en distribución. El recíproco es cierto si y sólo si $\xi = c$ para cierta constante c .

Teorema de la Ley débil de los grandes números²⁷

La Ley débil de los grandes números es una de las aplicaciones más importantes de la convergencia en probabilidad.

²⁵ Martín-Pliego Fco. Javier, Ruiz-Maya Pérez Luis. 2006. "Fundamentos de probabilidad". Editorial Thomson. 2a. Edición. España.

²⁶ Martínez Barbeito Josefina, Villalón Julio G. 2003. "Introducción al Cálculo Estocástico aplicado a la modelación económico-financiero-actuarial". Editorial Netbiblo S.L., España.

²⁷ Evans Michael J., Rosenthal Jeffrey S. 2004. "Probabilidad y estadística. La ciencia de la incertidumbre". Editorial Reverté, S.A., España.

Sea X_1, X_2, \dots una secuencia de variables aleatorias independientes, cada una de ellas con la misma media μ y con varianza menor o igual a $\nu < \infty$. Entonces para todo $\varepsilon < 0$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|M_n - \mu| \geq \varepsilon) = 0$$

Es decir, las medias convergen en probabilidad a la media común μ , o $M_n \xrightarrow{p} \mu$.

Teorema de la Ley fuerte de los grandes números

La convergencia en probabilidad, en la ley débil de los números grandes, se puede fácilmente transformar en convergencia casi segura, si se exigimos más a la sucesión de variables aleatorias.

Sea $\{X_n: n \geq 1\}$ una sucesión de variables aleatorias *i.i.d* (independientes e idénticamente distribuidas), con momentos de cuarto orden finitos. Luego:

$$P\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k = E(X_1)\right)$$

Teorema de Glivenko - Cantelli

Sea x_n una sucesión de variables aleatorias *i.i.d*. Luego la función de distribución empírica (FDE) de los primeros n términos converge de forma *casi segura* (c.s.) a la función de distribución de x_1 .

Demostración: Por la ley fuerte de los números grandes es obvio que para cada x tenemos que c.s.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |F_n(x) - F_{X_1}(x)| = 0$$

Luego, podemos elegir una colección finita de puntos X_1, \dots, X_N tales que $F(X_1) \leq \varepsilon$, $F(X_N) \geq 1 - \varepsilon$, $F(X_{j+1}) - F(X_j) \leq \varepsilon$ y c.s.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{1 \leq j \leq N} |F_n(x_j) - F_{X_1}(x_j)| = 0$$

Es fácil ver ocupando la monotonía de F_{X_1} y F_n que esto implica el teorema.

Este teorema, establecido por el matemático ucraniano Glivenko, en términos simples afirma que la FDE construida a partir de una muestra de tamaño N , obtenida de una función de probabilidad original cualquiera, converge a la función de probabilidad original a medida que N crece indefinidamente.

5 Modelo de simulación para la estimación de escenarios temporales de riesgo estructural de las viviendas a causa del viento de ciclones tropicales

5.1 Formulación del problema

Como ya se ha mencionado antes, la idea consiste en reproducir en forma de experimento controlado las características esenciales de una situación aleatoria, de tal modo que sea posible, mediante el uso adecuado de algún mecanismo aleatorio, simular la realización de dicho fenómeno. Vale recordar que un modelo es una representación simplificada de la realidad.

La intención de este modelo es replicar de forma estocástica el comportamiento de una o varias temporadas hipotéticas de ciclones tropicales, para obtener una variable aleatoria que describa el porcentaje de daño acumulado en la estructura de una vivienda por la acción del viento durante cierto periodo. Cada una de estas replicas representa un escenario de riesgo. De esta forma, como se mencionó en la descripción del objetivo de esta tesis, se estará midiendo la frecuencia y la severidad de las pérdidas potenciales obteniendo la frecuencia y severidad de los daños estructurales.

Se ejemplificará en los municipios costeros de Sinaloa, para evaluar el impacto que pueden tener en el futuro estos fenómenos en estructuras de viviendas de bajo costo a causa del viento.

De ninguna forma se pretende usar este modelo con fines de pronóstico meteorológico.

Una vez que se han identificado y cuantificado el peligro, la vulnerabilidad y el grado de exposición para los diferentes fenómenos perturbadores y sus diferentes manifestaciones, es necesario completar el análisis a través de escenarios de riesgo, o sea, representaciones geográficas de las intensidades o de los efectos de eventos extremos.²⁸

5.2 Conceptualización del sistema

La pregunta que el siguiente modelo contesta, se refiere al daño probable que se tendrá por concepto de la vulnerabilidad por viento de ciclones tropicales en las estructuras (construcciones) en un periodo determinado. Este modelo contiene las relaciones entre la frecuencia con la que ocurren los ciclones tropicales, y la severidad de éstos. A partir de estas relaciones, se determina el monto de los daños que sufriría un grupo de estructuras si un ciclón tropical, en el sitio de ubicación, produjera una intensidad dada. Para lograrlo, se obtiene una función de probabilidad que nos permitirá estimar daños esperados y daños máximos probables. A continuación se describe una técnica de muestreo en funciones de distribución empíricas muy utilizado en el

²⁸ Quass Weppen, otros (consultar hoja legal). 2004. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. CENAPRED, México.. Pag. 17.

cálculo de estimaciones de montos totales por siniestros²⁹, y que usaremos en el planteamiento del modelo de estimación de daños.

5.2.1 Proceso Binomial Compuesto

Distribución Binomial

Si $n \in \mathbb{N}$ y $p \in [0,1]$, se dice que una variable aleatoria X tiene distribución binomial con parámetros n y p si su función de densidad está dada por la formula:

$$f_X(x) = \begin{cases} \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} & \text{si } x \in \{0, \dots, n\} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \mathbf{5-1}$$

El nombre binomial obedece a que los términos $\binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$ son los del desarrollo de $(p+q)^n$, en donde $q = 1-p$. La distribución binomial es una de las distribuciones más importantes de la teoría de la probabilidad pues su estudio ha conducido a resultados fundamentales.

Si p es la probabilidad de ocurrencia de un evento A en un determinado experimento aleatorio, entonces llamando X_n al número de veces que ocurre A al realizar n repeticiones independientes del experimento, X_n tiene distribución binomial con parámetros n y p

Ahora bien, $\frac{X_n}{n}$ es la frecuencia relativa de ocurrencia de A en las n repeticiones del experimento. Bernoulli³⁰ demostró entonces que dado cualquier número $\varepsilon > 0$, se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left[\left| \frac{X_n}{n} - p \right| > \varepsilon \right] = 0 \quad \mathbf{5-2}$$

Este resultado, cuya demostración llevó a Bernoulli 20 años, se conoce como el teorema de Bernoulli y constituye el primero de los llamados teoremas límite de la teoría de la probabilidad.

Proceso Binomial Compuesto

Un proceso estocástico $\{X(t), t \geq 0\}$ es un Proceso Binomial Compuesto si se puede representar como

$$X(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i \quad \mathbf{5-3}$$

Donde $\{N(t), t \geq 0\}$ tiene una distribución Binomial y $\{Y_i, i \geq 1\}$ es una familia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas que son independientes de $\{N(t), t \geq 0\}$.

²⁹ Garza Tomás. 1998. Técnicas Modernas para el actuario. FCE. México.

³⁰ Jakob Bernoulli (Basilea, 27 de diciembre de 1654 - ibíd. 16 de agosto de 1705), también conocido como Jacob, Jacques o James Bernoulli, fue un genial matemático y científico suizo.

El proceso descrito es una herramienta básica en la evaluación de carteras de riesgo individual muy usada en el ámbito actuarial para la evaluación de riesgos.³¹ Se usará este modelo para la estimación de daños por viento de ciclones tropicales.

5.2.2 Modelación de daños como un Proceso Binomial Compuesto

Si N es el número de ciclones tropicales que ocurren en un periodo, y el daño ocasionado por la ocurrencia de cada ciclón j con intensidad i es representado por la variable aleatoria $D(i)_j$, donde las $D(i)_j$ son mutuamente independientes, entonces el daño total que se tendría en el periodo esta dado por Dp :

$$Dp = \sum_j^N D(i)_j \quad 5-4$$

Donde

Dp representa la severidad. Es el daño en un periodo determinado

N representa la frecuencia. Es el número de ciclones en un periodo, por lo regular un determinado número de años

$D(i)_j$ es el daño ocasionado por el viento de un ciclón j con intensidad i

El número de ciclones que ocurren en un determinado tiempo, N , es una variable discreta, por lo general Binomial (también es muy común el uso de una distribución de Poisson³²), de aquí, que a este proceso se le conozca como Proceso Binomial Compuesto. La serie generada de operar varias veces la 5-4 produce una muestra aleatoria de daños totales en construcciones a causa del viento por ciclones tropicales en un periodo determinado, con esta muestra se puede conocer la pérdida máxima probable y demás estadísticos en el periodo.

La variable Dp se obtiene utilizando la técnica de simulación por convolución descrita en el apartado de título Método de la convolución, página 58.

³¹ Kass R., Goovaerts Marc, Dhaene Jan, Denuit Michel. 2001. "Modern Actuarial Risk Theory". Klumer Academic Publishers. Holanda.

³² Garza Tomás. 1998. Técnicas Modernas para el actuario. FCE. México.

5.2.2.1 Distribuciones de las variables del modelo

Variable N del número de ciclones tropicales

La variable N describe la frecuencia con que se presentan los ciclones tropicales en un determinado periodo. Esta variable es del tipo discreto, por lo regular se usan la Poisson o la Binomial. En este caso, se escogió la distribución Binomial. Se usará el periodo de retorno cuyo recíproco es la probabilidad p_e de que un evento se presente en determinado año. Se está usando esta distribución de probabilidad ya que p_e describe conceptualmente a la probabilidad de éxito que tiene una variable aleatoria Bernoulli.

$$N \sim \text{Bin}(n, p_e)$$

Donde:

n es el periodo representado en años a simular

p_e es la probabilidad de que se presente un ciclón en un año

Variable D del daño ocasionado

La variable D describe la severidad con que se presenta un ciclón tropical.

$$D(i)_j \sim p(i)$$

Donde $p(i)$ es la distribución de probabilidad de la intensidad i de los ciclones tropicales.

El daño ocasionado a una construcción dependerá de la vulnerabilidad de ésta ante un ciclón tropical con cierta intensidad i .

5.2.2.2 Probabilidad $P(i)$

La distribución de la intensidad de los ciclones tropicales se obtiene de los registros de estos eventos. Esta función es de peligro, mencionada en el capítulo 3. La distribución se puede obtener mediante pruebas de bondad de ajuste, y en caso de no conseguir una buena aproximación a una función de probabilidad conocida, se usará la distribución empírica. La representación de la probabilidad $p(i)$ de que se presente un ciclón de intensidad i se observa en la siguiente tabla en la columna 4 (Probabilidad) construida con los datos históricos de ciclones en Mazatlán:

Tabla 5.1 Probabilidad $P(i)$

Mazatlán	Años					
Intensidad	61					
	Categoría	Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
1	Depresión Tropical	2	0.154	0.154	0.213	4.692
2	Tormenta Tropical	5	0.385	0.538	0.180	5.545
3	Huracán 1	3	0.231	0.769	0.098	10.167
4	Huracán 2	1	0.077	0.846	0.049	20.333
5	Huracán 3	1	0.077	0.923	0.033	30.500
6	Huracán 4	1	0.077	1.000	0.016	61.000
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

La primera columna asigna la Intensidad de un ciclón tropical a un número que va de 1 a 7 conforme a la escala Saffir – Simpson. En la segunda columna se encuentra la descripción del ciclón tropical a través de la categoría. La tercera columna indica el número de ciclones por intensidad. La siguiente columna da la probabilidad $P(i)$ de que se presente un ciclón con cierta intensidad. La quinta columna presenta la probabilidad acumulada de $P(i)$. La sexta columna tiene la tasa de excedencia anual $v(i)$, y por último, la séptima columna tiene el periodo de retorno $Tr(i)$ para cada intensidad.

5.3 Desarrollo y verificación del programa de cómputo

Cabe recordar, que el modelo propuesto simula la estimación de pérdidas, mediante la evaluación del peligro y vulnerabilidad de estructuras (construcciones) ante el viento de ciclones tropicales, y hará uso del Proceso Binomial Compuesto con muestreo en funciones de distribuciones empíricas, expresado en la 5-4 mostrada a continuación:

$$Dp = \sum_j^N D(i)_j$$

Donde

Dp es el daño en un periodo

N es el número de ciclones en un periodo, por lo regular un determinado número de años

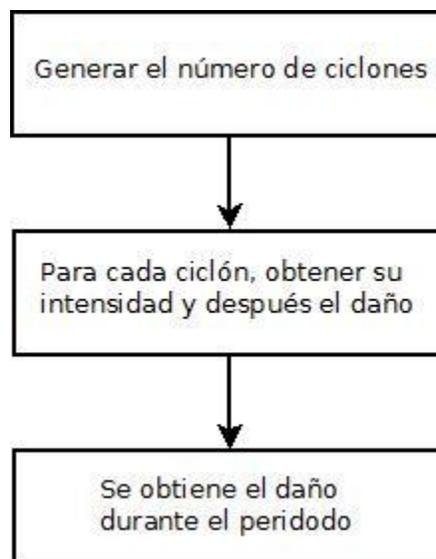
$D(i)_j$ es el daño ocasionado por el viento de un ciclón j con intensidad i

Para obtener Dp , se seguirán los siguientes pasos:

1. Generar el N número de ciclones durante un periodo determinado;
2. Para cada ciclón obtener su intensidad y después el daño $D(i)_j$ mediante la evaluación de la vulnerabilidad;
3. Se obtiene Dp , el daño total durante el periodo.

En la Figura 5.1 se ilustra el proceso general del sistema que se programará.

Figura 5.1



A continuación se realizan las subrutinas para cada paso descrito.

5.3.1 Simulación de la variable N (Rutina 1)

Genera el número de ciclones durante un periodo determinado. Teniendo p_e conocida mediante las estadísticas de los registros de ciclones tropicales, asignando a un periodo de simulación, y generando α_1 como número aleatorio, se tiene el siguiente pseudocódigo:

Proporcionar tr

n veces hacer

 Generar a_1

 numeroCiclones=0, $i=0$

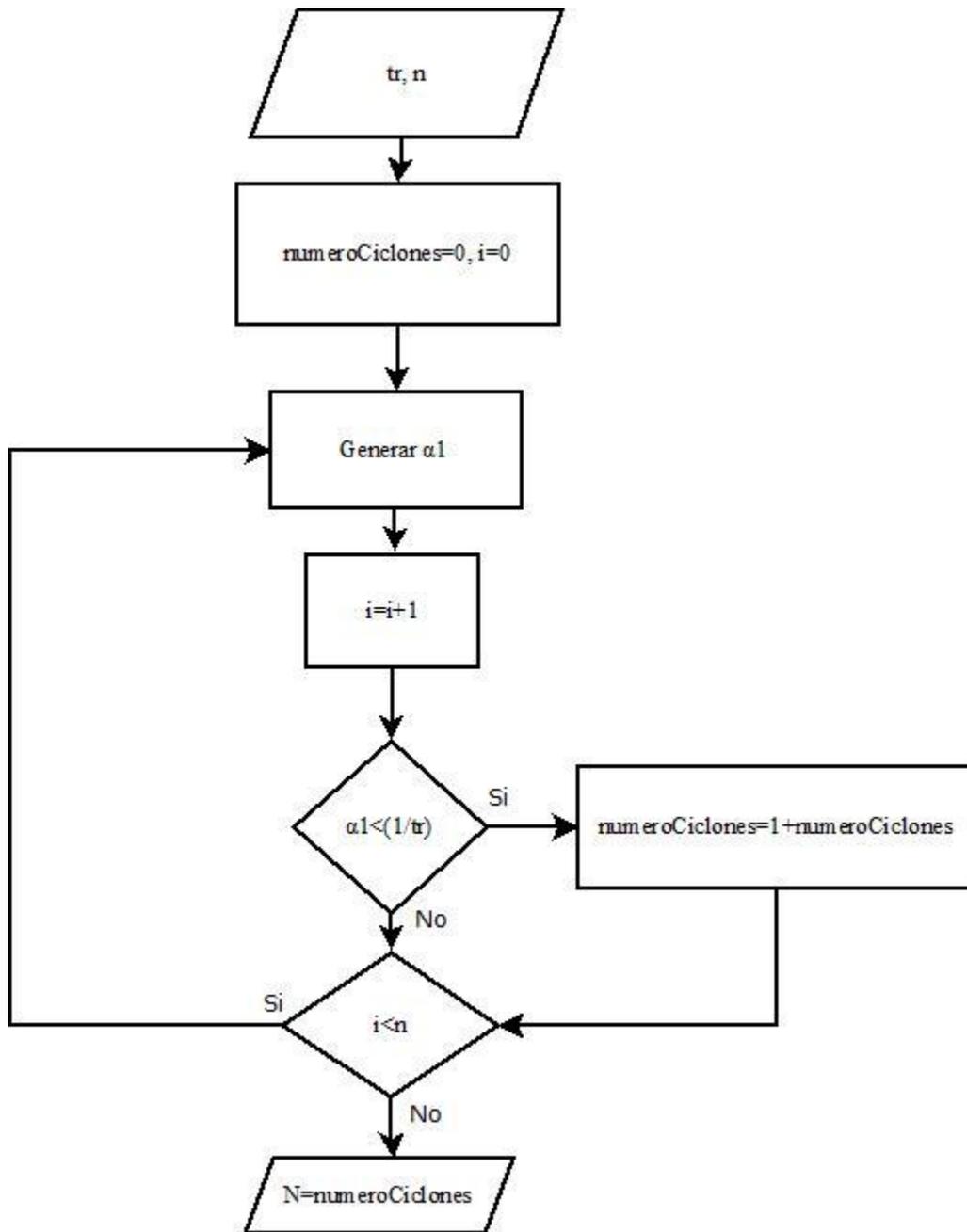
 Si $a_1 < (1/tr)$

 Hacer numeroCiclones=numeroCiclones+1

 Salida: $N=numeroCiclones$

A continuación se muestra el diagrama de flujo de esta rutina:

Figura 5.2 Diagrama de flujo de la Simulación de la Rutina 1



5.3.2 Simulación de la variable $D(i)$ (Rutina 2)

Obtiene la intensidad y después el daño. Una vez que se tiene la función de intensidades de ciclones tropicales conocida, se usará el siguiente pseudocódigo en rutina para obtener la intensidad del ciclón y el daño que conforme a la función de vulnerabilidad estaría ocasionando:

Generar α_2

Si $\alpha_2 \leq P(1)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por una DT

Si $P(1) < \alpha_2 \leq P(2)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por una TT

Si $P(2) < \alpha_2 \leq P(3)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por un H1

Si $P(3) < \alpha_2 \leq P(4)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por un H2

Si $P(4) < \alpha_2 \leq P(5)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por un H3

Si $P(5) < \alpha_2 \leq P(6)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por un H4

Si $P(6) < \alpha_2 \leq P(7)$

$D(i)$ =Evaluación del daño por un H5

A continuación se muestra el diagrama de flujo de esta rutina:

Figura 5.3 Diagrama de flujo de la Simulación de la Rutina 2

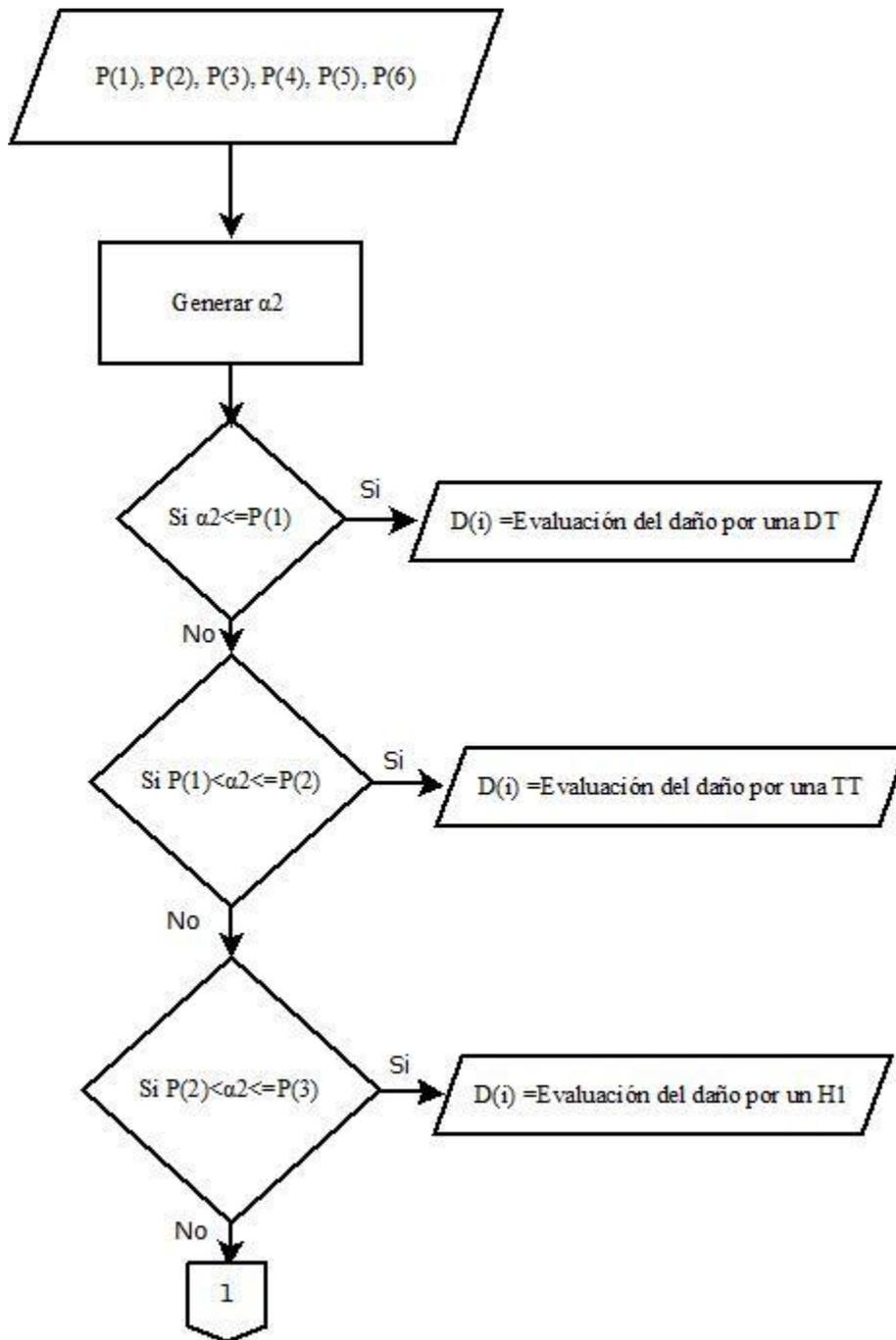
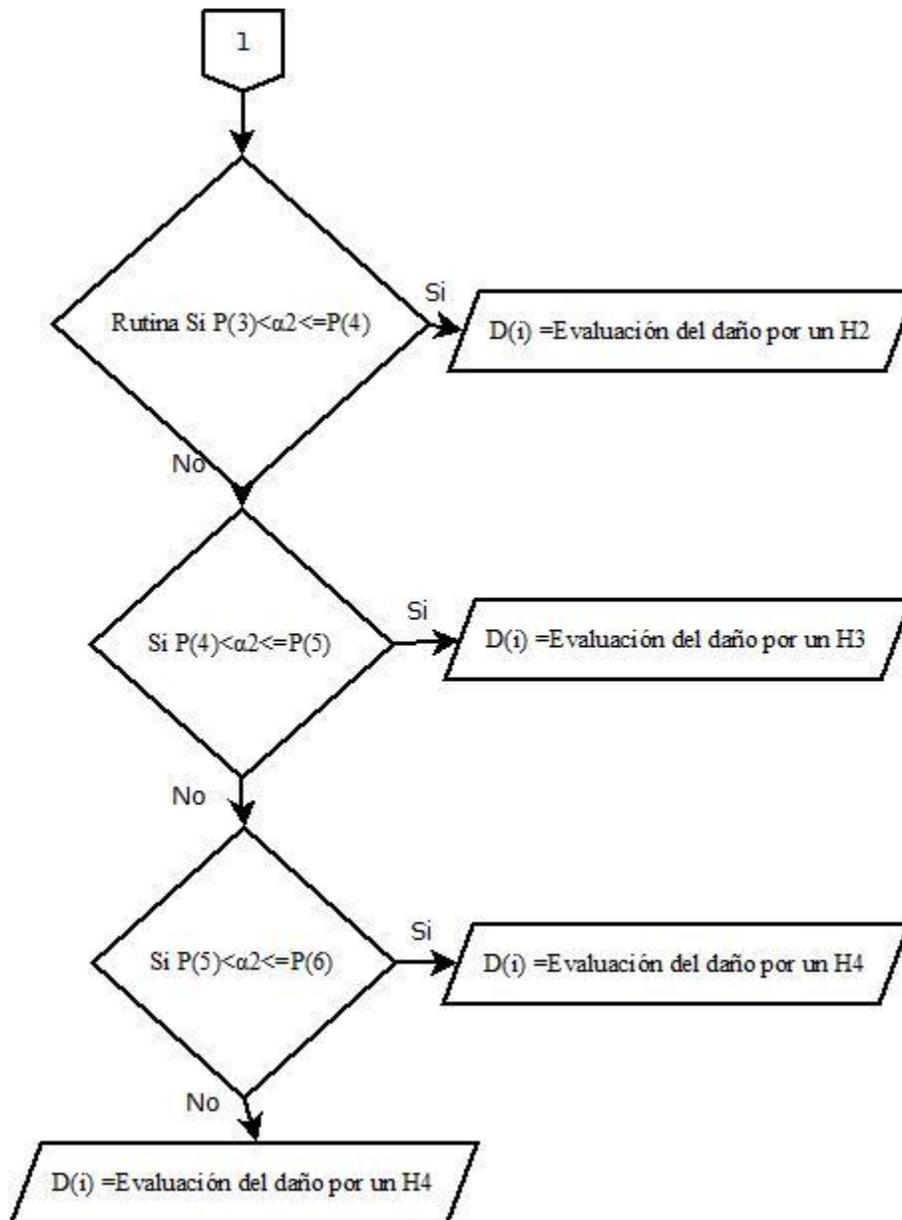


Diagrama de flujo de la Simulación de la Rutina 2 (Continuación)



5.3.3 Simulación de D_p (Rutina 3)

Obtiene el daño durante el periodo. Ya que se obtuvieron las rutinas para simular N y $D(i)$, el pseudocódigo para obtener el daño D_p es:

$D_p=0$

Llamar Rutina 1 (Se obtiene N)

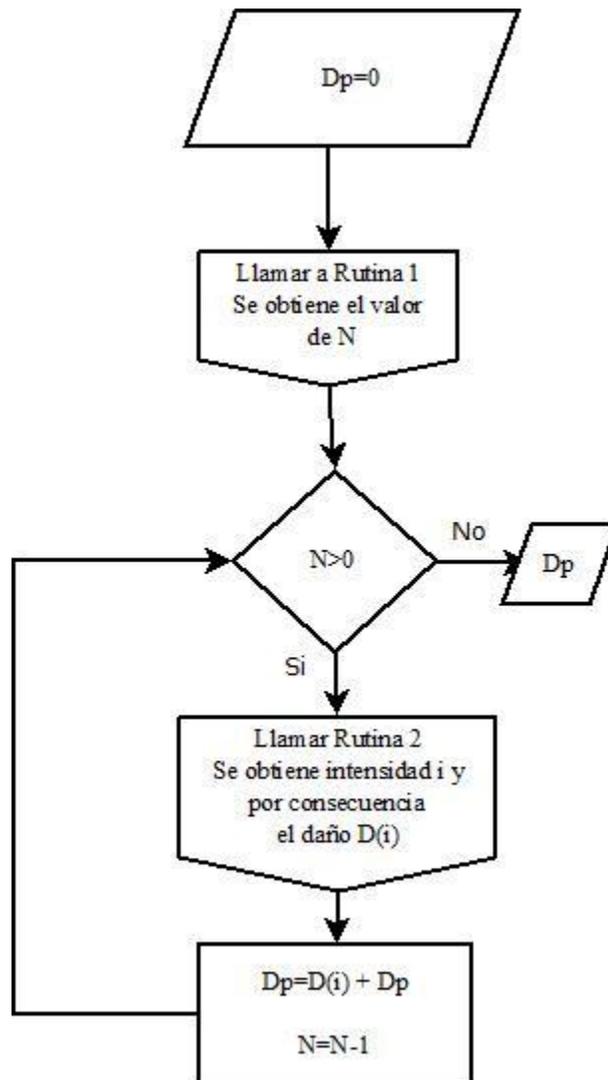
Hacer N veces:

Llamar Rutina 2 (Se obtiene intensidad y por consecuencia el daño)

$$D_p = D(i) + D_p$$

A continuación se muestra el diagrama de flujo de esta rutina:

Figura 5.4 Diagrama de flujo de la Simulación de la Rutina 3



Así, uniendo estas tres rutinas se logra tener el algoritmo completo del modelo.

5.4 Validación del modelo programado

Una de las tareas más importantes y difíciles en la simulación es la verificación y validación del modelo. Las salidas del modelo se van a utilizar para obtener conclusiones para el sistema real, por lo que es muy importante que se confíe en el modelo para garantizar que éste va a ser utilizado.

Dado que el modelo es una abstracción del sistema se debe preguntar si existe una correspondencia entre el sistema real y el modelo. Ya que se están haciendo estimaciones de escenarios temporales de riesgo, no de forma cronológica tipo pronóstico, la validación consistirá en conocer el número total, de ciclones y sus intensidades obtenidas

5.4.1 Validación de la variable $D(i)$

La variable $D(i)$ obtiene la intensidad y después el daño. Realmente, el valor del daño se obtiene directamente del valor de intensidad, por lo que se validará este último valor.

El modelo se alimenta de datos históricos mediante las frecuencias de intensidades de los ciclones tropicales. De este punto, se puede deducir fácilmente que si las frecuencias generadas mediante simulación coinciden con las históricas, entonces se está reproduciendo la realidad a través de este modelo.

Para llevar a cabo la comparación entre ambas frecuencias, la histórica y la simulada, se realizó una corrida del modelo que dé como resultado las estadísticas originales. Un ejemplo de estas estadísticas se puede ver en la Tabla 5.1. Se corrió el modelo solamente hacia un año de proyección, es decir con $t=1$, y modificando la Simulación de la variable $D(i)$ (Rutina 2) para que en lugar de devolver el daño ocasionado por un ciclón de cierta intensidad, devuelva la intensidad del ciclón. Este proceso hecho por la computadora devuelve una función de peligro modificada por la tasa de excedencia $v(1)$ de la primera intensidad ya que el factor de proyección a un año está vinculado con esta tasa, a esta función de peligro arrojada por la simulación la denotaremos por $P_m(i)$, donde i denota el número de intensidad. En teoría, esta función devuelta por la simulación deberá tender a la función de peligro $P(i)$ original, por lo que suponemos que

$$P_m(i) \sim P(i)$$

Si

$$|P_m(i) - P(i)| < \varepsilon \quad 5-5$$

para una ε pequeña, entonces se puede decir que $P_m(i) \sim P(i)$, por lo que se estaría comprobando que la simulación si reproduce la realidad.

Para poder obtener $P_m(i)$, se deben de regresar los resultados como a los mostrados en la Tabla 5.1, esto se logra dividiendo entre el número de simulaciones n , y eliminando el factor de probabilidad de que se presente un ciclón, este último factor se elimina mediante la división de la tasa de excedencia $v(1)$. La expresión queda de la siguiente forma:

$$P_m(i) = \frac{x(i)}{n} / v(1) \quad 5-6$$

Con $x(i)$ como la frecuencia de ciclones a intensidad i que resulto de la modelación.

Tomando en cuenta la 5-5 con una $\varepsilon=0.075$, la 5-6 con $n=1000$, se realizó el proceso de validación para cada una de las $P_m(i)$ generadas por municipio.

A continuación se presentan los resultados:

Tabla 5.2 Diferencias entre funciones de probabilidad $P_m(i)$ y $P(i)$

Ahome				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.000	0.000	0.000
2	Tormenta Tropical	0.573	0.500	0.073
3	Huracán 1	0.305	0.300	0.005
4	Huracán 2	0.116	0.100	0.016
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.104	0.100	0.004
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	1.098	1.000	

Diferencia máxima en $i=2$ menor a $0.075 = \varepsilon$

Angostura				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.256	0.200	0.056
2	Tormenta Tropical	0.589	0.600	0.011
3	Huracán 1	0.171	0.200	0.029
4	Huracán 2	0.000	0.000	0.000
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	1.016	1.000	

Diferencia máxima en $i=1$ menor a $0.057 < \varepsilon$

Culiacán				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.000	0.000	0.000
2	Tormenta Tropical	0.325	0.333	0.008
3	Huracán 1	0.000	0.000	0.000
4	Huracán 2	0.498	0.500	0.002
5	Huracán 3	0.172	0.167	0.006
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
Suma		0.995	1.000	

Diferencia máxima en $i=2$ menor a $0.01 < \varepsilon$

Elota				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.157	0.143	0.014
2	Tormenta Tropical	0.314	0.286	0.028
3	Huracán 1	0.279	0.286	0.007
4	Huracán 2	0.200	0.143	0.058
5	Huracán 3	0.139	0.143	0.003
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
Suma		1.089	1.000	

Diferencia máxima en $i=4$ menor a $0.06 < \varepsilon$

Escuinapa				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.000	0.000	0.000
2	Tormenta Tropical	0.670	0.667	0.003
3	Huracán 1	0.000	0.000	0.000
4	Huracán 2	0.335	0.333	0.002
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
Suma		1.005	1.000	

Diferencia máxima en $i=2$ menor a $0.005 < \varepsilon$

Guasave				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.000	0.000	0.000
2	Tormenta Tropical	0.373	0.375	0.002
3	Huracán 1	0.498	0.500	0.002
4	Huracán 2	0.122	0.125	0.003
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	0.993	1.000	

Diferencia máxima en $i=4$ menor a $0.005 < \varepsilon$

Mazatlán				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.136	0.154	0.018
2	Tormenta Tropical	0.394	0.385	0.010
3	Huracán 1	0.267	0.231	0.037
4	Huracán 2	0.061	0.077	0.016
5	Huracán 3	0.066	0.077	0.011
6	Huracán 4	0.075	0.077	0.002
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	0.999	1.000	

Diferencia máxima en $i=3$ menor a $0.04 < \varepsilon$

Novolato				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.427	0.500	0.073
2	Tormenta Tropical	0.560	0.500	0.060
3	Huracán 1	0.000	0.000	0.000
4	Huracán 2	0.000	0.000	0.000
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	1.007	1.000	

Diferencia máxima en $i=1$ menor a $0.075 = \varepsilon$

Rosario				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.183	0.143	0.040
2	Tormenta Tropical	0.423	0.429	0.006
3	Huracán 1	0.000	0.000	0.000
4	Huracán 2	0.139	0.143	0.004
5	Huracán 3	0.258	0.286	0.028
6	Huracán 4	0.000	0.000	0.000
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	1.003	1.000	

Diferencia máxima en $i=1$ menor a $0.05 < \varepsilon$

San Ignacio				
Intensidad	Categoría	$P_m(i)$	$P(i)$	Diferencia
1	Depresión Tropical	0.250	0.273	0.023
2	Tormenta Tropical	0.280	0.273	0.007
3	Huracán 1	0.316	0.273	0.043
4	Huracán 2	0.082	0.091	0.009
5	Huracán 3	0.000	0.000	0.000
6	Huracán 4	0.083	0.091	0.008
7	Huracán 5	0.000	0.000	0.000
	Suma	1.011	1.000	

Diferencia máxima en $i=3$ menor a $0.05 < \varepsilon$

Como se puede observar, las diferencias tienden a ser pequeñas.

5.4.2 Validación de la serie de escenarios de ciclones

Ahora, se procederá a simular una serie de ocurrencias anuales de ciclones, indicando la intensidad de los mismos. Dado que la simulación consistió en obtener sumas de valores de vulnerabilidad, en función de la ocurrencia e intensidad de ciclones durante cierto periodo, se replicarán esos datos con base en el modelo de simulación propuesto. Para esto, primero se obtuvo la serie de ocurrencias cronológicas de ciclones, indicando su intensidad, para cada uno de los municipios costeros de Sinaloa. A continuación, se muestra la tabla cronológica de la serie del municipio de Culiacán, ver Tabla 5.3, las demás series se pueden ver en el Anexo.

Cabe recordar, que el modelo propuesto no tiene como objetivo realizar un pronóstico cronológico de ciclones tropicales, sino obtener la vulnerabilidad acumulada durante un cierto número de años, por lo que, al final se toman periodos y no resulta relevante el orden en que se dan los eventos.

Tabla 5.3 Serie cronológica de ciclones tropicales. Culiacán, Sin.

Año	Culiacán
1949	0
1950	0
1951	0
1952	0
1953	0
1954	0
1955	0
1956	0
1957	0
1958	0
1959	Tormenta Tropical
1960	0
1961	0
1962	0
1963	0
1964	Tormenta Tropical
1965	0
1966	0
1967	0
1968	0
1969	0
1970	0
1971	0
1972	0
1973	0
1974	Huracán 2
1975	0
1976	0
1977	0
1978	0
1979	0
1980	0

Año	Culiacán
1981	0
1982	0
1983	0
1984	0
1985	Huracán 2
1986	0
1987	0
1988	0
1989	0
1990	0
1991	0
1992	0
1993	Huracán 2
1994	0
1995	0
1996	0
1997	0
1998	0
1999	0
2000	0
2001	0
2002	0
2003	0
2004	0
2005	0
2006	Huracán 3
2007	0
2008	0
2009	0
2010	0

A continuación, se diseñó un algoritmo para obtener las series obtenidas con simulación para cada municipio, tal cual se presentan en la TABLA. Se hará tomando n número de años menor a los 61 correspondientes al periodo entre 1949 y 2010, en este caso será hasta el año 2000, es decir, 52 años. De esta forma, se hicieron 1000 series para cada municipio, para después, realizar una prueba de hipótesis sobre la media obtenida de cada una de las intensidades y el conteo original de intensidades obtenida de los históricos. A continuación, se pueden ver los algoritmos realizados.

Serie cronológica de ciclones (Rutina V1)

Indica si en un año en específico ocurre un ciclón o no. el número de ciclones durante un periodo determinado. Teniendo p_e conocida mediante las estadísticas de los registros de ciclones tropicales, asignando a un periodo de simulación, y generando α_1 como número aleatorio, se tiene el siguiente pseudocódigo:

n veces hacer

Generar α_1

Si $\alpha_1 \leq (1/tr)$

ct= Rutina V2

Si $\alpha_1 > (1/tr)$

ct=0

Simulación de la serie de ciclones (Rutina V2)

Obtiene la intensidad. Una vez que se tiene la función de intensidades de ciclones tropicales conocida, se usará el siguiente pseudocódigo en rutina para obtener la intensidad del ciclón:

Generar α_2

Si $\alpha_2 \leq P(1)$

intensidad = "Depresion Tropical"

Si $P(1) < \alpha_2 \leq P(2)$

intensidad = "Tormenta Tropical"

Si $P(2) < \alpha_2 \leq P(3)$

intensidad = "Huracan 1"

Si $P(3) < \alpha_2 \leq P(4)$

intensidad = "Huracan 2"

Si $P(4) < \alpha_2 \leq P(5)$

intensidad = "Huracan 3"

Si $P(5) < \alpha_2 \leq P(6)$

intensidad = "Huracan 4"

Si $P(6) < \alpha_2 \leq P(7)$

intensidad = "Huracan 5"

Retornar intensidad

Una vez que se obtuvieron las series, se hicieron tablas donde se pudieran obtener las estadísticas para cada una de ellas, y para la Suma de ocurrencias. En las Tabla 5.4 y Tabla 5.5 se pueden observar los resultados de las series simuladas para Culiacán, Sinaloa. Con el objeto de simplificar, sólo se presentan los resultados para 5 de las 1000 series simuladas. Las demás series se pueden ver en el Anexo.

**Tabla 5.4 Series simuladas de ocurrencias por intensidades de ciclones.
Culiacán, Sinaloa.**

Culiacán Intensidad	No. Serie													Estadísticos	
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	2	1	3	2	3	1	.	.	.	1	1	1	1	2.000	1.00
Huracan 1	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 2	3	2	3	4	3	4	.	.	.	3	4	3	3	3.200	0.84
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00

**Tabla 5.5 Sumas de ocurrencias simuladas por intensidades de ciclones.
Culiacán, Sinaloa.**

Culiacán																
Suma de ocurrencias																
Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar		
5	3	6	6	6	5	.	.	.	4	5	4	4	5.161	1.30384048		
Sumas por cada serie																

Con estos resultados, se obtuvieron las diferencias entre las simulaciones y los datos históricos del periodo. Estos resultados se analizaron en dos aspectos: Resultados por intensidades y Total de ciclones en el periodo.

A continuación, se agregan las tablas de los resultados.

Tabla 5.6 Resultados por intensidades

San Ignacio		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
2	2.200	0.20
2	2.400	0.40
3	3.200	0.20
1	0.800	0.20
0	0.000	0.00
1	0.800	0.20
0	0.000	0.00

Rosario		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
1	0.400	0.60
2	2.200	0.20
0	0.000	0.00
1	1.200	0.20
2	2.200	0.20
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Novolato		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
1	1.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Mazatlán		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
2	2.600	0.60
2	2.400	0.40
3	2.600	0.40
1	0.800	0.20
1	1.200	0.20
1	0.600	0.40
0	0.000	0.00

Guasave		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
3	3.200	0.20
4	4.600	0.60
1	1.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Escuinapa		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
2	2.400	0.40
0	0.000	0.00
1	1.200	0.20
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Resultados por intensidades (Continuación)

Elota		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
2	2.000	0.00
2	2.000	0.00
1	1.400	0.40
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Culiacán		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
2	2.200	0.20
0	0.000	0.00
3	3.200	0.20
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Angostura		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
3	3.000	0.00
1	1.600	0.60
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00
0	0.000	0.00

Ahome		
Simulación de frecuencias		
Resultados por intensidades		
Histórico	Promedio	Diferencia
0	0.000	0.00
5	4.600	0.40
3	3.200	0.20
1	0.800	0.20
0	0.000	0.00
1	0.800	0.20
0	0.000	0.00

Usando el mismo criterio utilizado con la **Ecuación 5-7** se observa que hay gran similitud en la mayoría de cada uno de los valores Históricos y el Promedio obtenido mediante simulación, esta afirmación se basa con lo obtenido en la columna Diferencia.

Otro factor importante a tomar en cuenta, es la cantidad de ciclones que se produjeron durante el periodo, para esto, se obtuvieron los totales de ocurrencias para cada municipio. También se calculó el Promedio y la Diferencia. En la Tabla 5.7 se observan los resultados.

Tabla 5.7 Total de ciclones en el periodo

San Ignacio			Rosario		
Simulación de frecuencias			Simulación de frecuencias		
Total de ciclones en el periodo			Total de ciclones en el periodo		
Histórico	Promedio	Diferencia	Histórico	Promedio	Diferencia
9	9.130	0.13	6	6.000	0.00

Novolato			Mazatlán		
Simulación de frecuencias			Simulación de frecuencias		
Total de ciclones en el periodo			Total de ciclones en el periodo		
Histórico	Promedio	Diferencia	Histórico	Promedio	Diferencia
1	1.000	0.00	10	10.200	0.20

Guasave			Escuinapa		
Simulación de frecuencias			Simulación de frecuencias		
Total de ciclones en el periodo			Total de ciclones en el periodo		
Histórico	Promedio	Diferencia	Histórico	Promedio	Diferencia
8	8.170	0.17	3	2.970	0.03

Elota			Culiacán		
Simulación de frecuencias			Simulación de frecuencias		
Total de ciclones en el periodo			Total de ciclones en el periodo		
Histórico	Promedio	Diferencia	Histórico	Promedio	Diferencia
5	5.020	0.02	5	5.370	0.37

Angostura			Ahome		
Simulación de frecuencias			Simulación de frecuencias		
Total de ciclones en el periodo			Total de ciclones en el periodo		
Histórico	Promedio	Diferencia	Histórico	Promedio	Diferencia
4	4.100	0.10	10	9.900	0.10

Nuevamente, usando el mismo criterio utilizado con la **Ecuación 5-8** se observa que hay gran similitud en la mayoría de cada uno de los valores Históricos y el Promedio del total de ciclones obtenido mediante simulación, esta afirmación se basa con lo obtenido en la columna Diferencia.

5.4.3 Validación por prueba de hipótesis

Con el objetivo de dar mayor formalidad a la validación de la simulación, se realizarán pruebas de hipótesis sobre la media de los datos históricos *versus* la media obtenida por simulación. Para esto, se usará la Prueba T para una sola muestra.

La prueba T para una muestra permite contrastar hipótesis referidas a una media poblacional, es decir, se emplea para comprobar si la media de una muestra pertenece a una población con cierta media.

El objetivo con este contraste es determinar si la media muestral obtenida por simulación es significativamente igual al valor de conteo histórico, o que la media muestral es significativamente diferente al valor de conteo histórico. La prueba quedará planteada de la siguiente forma:

$$H_0: \mu = \text{valor de conteo histórico} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu \neq \text{valor de conteo histórico}$$

Donde μ es la media muestral obtenida por simulación

Se usará una significancia del 95% para todas las pruebas. Se usará el estadístico Sig. (bilateral) para rechazar o aceptar la hipótesis nula.

Prueba de la media muestral del número total de ciclones

Para esta prueba, el planteamiento es el siguiente:

$$H_0: \mu = \text{valor histórico del total de ciclones} \quad \text{vs} \quad H_a: \mu \neq \text{valor histórico del total de ciclones}$$

Donde μ es la media muestral del número total de ciclones obtenidos por simulación.

A continuación, se muestra el resultado de la prueba de hipótesis para el número total de ciclones del municipio de Mazatlán.

Tabla 5.8 Prueba T-Student para el total de ciclones en Mazatlán

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Mazatlán	10.2	1.2	10

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	10.2	1.2	0.038

	Valor de prueba= 10		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	5.32608809	999	0.290

Se puede llegar a la conclusión de que no se rechaza la hipótesis nula con la probabilidad que nos presenta el apartado Sig. (bilateral), es decir, que si el resultado es significativo ($p \leq 0.05$), se dice que la muestra no representa a la población, en este caso, que la media muestral no es significativamente igual a la media histórica. En nuestro caso como la $t(1000) = 5.3226$ tiene probabilidad ≤ 0.290 (es decir, mayor que 0.05), se concluye que la muestra (de media 10.2) sí pertenece al histórica de ciclones.

Se hizo la misma prueba para los demás municipios, sin rechazarse la hipótesis nula en ninguno de los casos. En el Anexo se pueden ver las demás pruebas realizadas.

Prueba de la media muestral de la intensidad de ciclones tropicales

Para esta prueba, el planteamiento es el siguiente:

$$H_0: \mu = \text{valor histórico de los ciclones a cierta intensidad}$$

vs

$$H_a: \mu \neq \text{valor histórico de los ciclones a cierta intensidad}$$

Donde μ es la media muestral del número de ciclones de cierta intensidad obtenidos por simulación.

Puesto que son siete intensidades para diez municipios a los que realizar la prueba, se ha simplificado la presentación de los resultados, ya que en total son 70 pruebas. A continuación, se muestra el resultado de la prueba de hipótesis para el número de ciclones por cada intensidad del municipio de Mazatlán.

Tabla 5.9 T-Student para el número de ciclones por intensidad en Mazatlán

Mazatlán				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
2	2.600	0.55	0.40	0.02
2	2.400	0.89	0.74	0.03
3	2.600	0.89	0.80	0.03
1	0.800	0.84	0.81	0.03
1	1.200	0.84	0.26	0.03
1	0.600	0.55	0.77	0.02
0	0.000	0.00	-	0.00

Se puede llegar a la conclusión de que no se rechaza la hipótesis nula con la probabilidad que nos presenta el apartado Sig. (bilateral), es decir, que si el resultado es significativo ($p \leq 0.05$), se dice que la muestra no representa a la población, en este caso, que la media muestral no es significativamente igual a la media histórica. En nuestro caso se tiene probabilidad mayor a 0.05 en todos los casos, se concluye que la muestra del número de ciclones por intensidad sí pertenece al histórico de intensidades.

Donde se encontró un Error típico de la media igual a cero, no se realizó prueba de hipótesis ya que no hay variabilidad, esto debido a que no se hay registros de ciclones en esa intensidad, por lo tanto la simulación no dio ningún resultado en ese caso.

Se hizo la misma prueba para los demás municipios, sin rechazarse la hipótesis nula en ninguno de los casos. En el Anexo se pueden ver las demás pruebas realizadas.

Dados estos resultados se puede concluir que el sistema simula la realidad.

6 Aplicación del Modelo de estimación de pérdidas en viviendas a causa del viento de ciclones tropicales

La aplicación consiste, en estimar el valor esperado del porcentaje de pérdida en las estructuras de una vivienda de bajo costo a causa de los ciclones tropicales, para cada municipio costero de Sinaloa en los próximos cinco años.

6.1 Recolección de información

Para llevar a cabo la recolección de información, se utilizó el sistema de información geográfico *Busca Ciclones* desarrollado por el CENAPRED, que está disponible para descarga gratuita en el sitio web del atlas nacional de riesgos (www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx).

6.1.1 Actualización del Busca Ciclones

Desafortunadamente, el *Busca Ciclones* sólo cuenta con registros hasta el año 2006, por lo que se actualizó con los datos disponibles de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) en su sitio web (www.noaa.gov), la NOAA sólo deja disponible al público los datos de ciclones hasta el año 2010. Para realizar este proceso, se trataron los datos disponibles y se anexaron a la base de datos en *MS ACCESS* del *Busca Ciclones*.

Figura 6.1 Busca Ciclones. Registros de los años 2007 y 2008

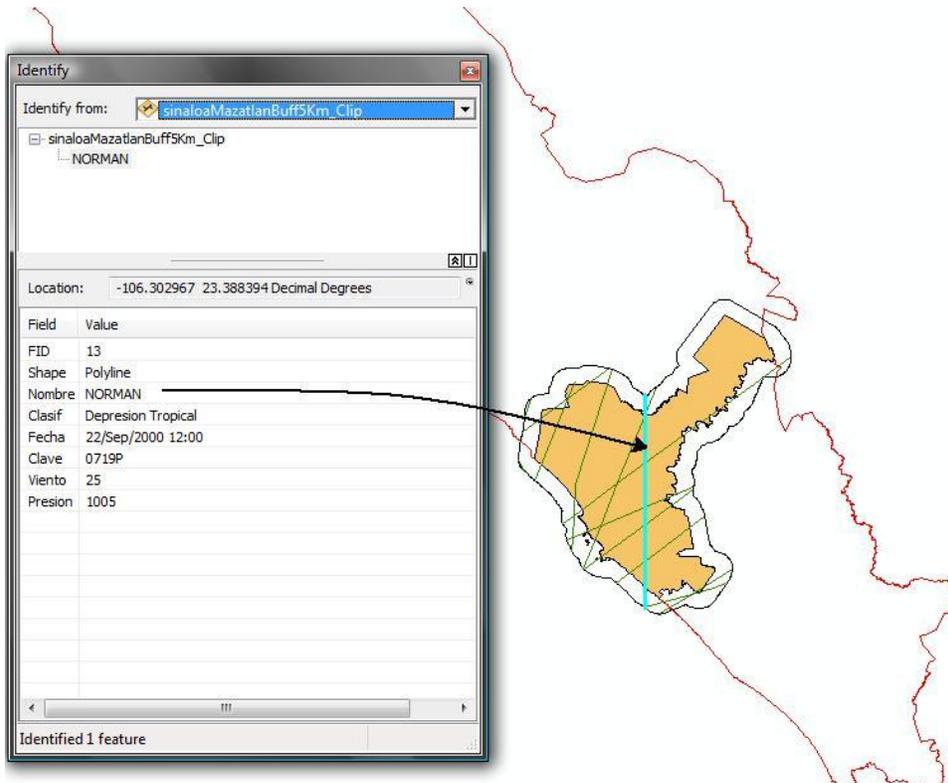


Fuente: CENAPRED

6.1.2 Conteo municipal de ocurrencias

Para realizar el conteo de forma estatal, se obtuvieron las intersecciones de las trayectorias con el límite territorial de cada municipio costero de Sinaloa, aumentando un contorno de 5 Km para incluir aquellos municipios que también alcanzan afectaciones por viento a pesar de que la trayectoria del ciclón no pasó directamente por ellos; en el ámbito de los sistemas de información geográfico, este proceso es conocido como *buffering*. Se escogió la distancia de 5 Km como contorno ya que alrededor de este promedio se presentan afectaciones por viento. Con el objeto de agilizar el proceso anterior, se utilizó el sistema de información geográfico *ArcGIS* versión 10.0. Las trayectorias de los ciclones tropicales se procesaron en el sistema *Busca Ciclones* para más tarde ser importados a *ArcGIS* para construir los contornos estatales y contar las intersecciones con las trayectorias de los ciclones tropicales, ver Figura 6.2.

Figura 6.2 Contorno de 5 Km para el municipio de Mazatlán y trayectorias de ciclones tropicales desde 1949



Fuente: Elaboración propia

De esta forma, municipio por municipio se fueron obteniendo los datos de los ciclones tropicales que les intersectaron. Los resultados del conteo se pueden ver en el Anexo de este trabajo. Para cada uno de los municipios, se registro únicamente la intensidad máxima del ciclón tropical dentro de su territorio o en su contorno, por ejemplo, si un ciclón tropical tuvo cierta intensidad máxima en Mazatlán, pero llegó con menor intensidad a Mocorito, para este último solo se tomó la intensidad máxima alcanzada en su territorio o contorno.

Es importante mencionar que esta misma técnica es la que se utilizó para la realización de Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos, y que se presentó como informe preparado por parte de la Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos del mismo CENAPRED; este informe y las nociones de su elaboración se pueden descargar gratuitamente en el sitio web del atlas nacional de riesgos (www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx).

6.2 Datos para el modelo conceptual

6.2.1 Estadísticas obtenidas

Una vez obtenido el conteo, se obtuvieron los resultados de la probabilidad de ocurrencia por intensidad, es decir, la función de peligro, para cada municipio. En la Tabla 6.1 podemos observar el ejemplo del municipio de Mazatlán, Sin.

**Tabla 6.1 Probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales por intensidad.
Mazatlán, Sin.**

Mazatlán Intensidad	Años 61 Categoría	Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
1	Depresión Tropical	2	0.154	0.154	0.213	4.692
2	Tormenta Tropical	5	0.385	0.538	0.180	5.545
3	Huracán 1	3	0.231	0.769	0.098	10.167
4	Huracán 2	1	0.077	0.846	0.049	20.333
5	Huracán 3	1	0.077	0.923	0.033	30.500
6	Huracán 4	1	0.077	1.000	0.016	61.000
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

Para el municipio de Mazatlán, sólo se tiene registro conocido de trayectorias de ciclones desde 1949. Las demás tablas municipales, se pueden consultar en el Anexo.

De lo anterior se obtuvieron los valores para realizar el modelo:

- $p_e = \frac{1}{Tr(1)}$ es la probabilidad de que se presente un ciclón de cualquier intensidad en un año.
- La columna de probabilidad acumulada contiene los valores para modelar la intensidad en un proceso Monte Carlo descrito en 5.3.2 Simulación de la variable $D(i)$ (Rutina 2).
- $n=5$ será el número de años a modelar.

6.2.2 Vulnerabilidad

Para nuestro caso, y por cuestiones de únicamente mostrar cómo funciona el modelo, analizaremos solamente uno de los 68 casos de vulnerabilidad por viento desarrollados por el CENAPRED: la vulnerabilidad de una vivienda hecha con muros de tabique con refuerzo tradicional de varilla. Su ubicación es en un litoral o un promontorio³³; este ejercicio resultará suficiente para ejemplificar un caso de uso del modelo. Los porcentajes de vulnerabilidad se obtuvieron de “La guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social” desarrollada por el CENAPRED. En la tabla 1.B.6 Caso 8, pag. 67 se tiene la vulnerabilidad, y se muestra en la Tabla 6.2.

³³ Corona Flores Leonardo, Oscar López Bátiz, otros. 2006. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social). CENAPRED. México. Pág. 60. Simbología para las tablas 1.B.5 a 1.B.7.

Tabla 6.2 Porcentaje de daño por viento. (Fuente: CENAPRED³⁴)

Velocidad (Km/h)	Vulnerabilidad	Intensidad Saffir Simpson
100	0.0002	Tormenta Tropical
110	0.0006	
120	0.0016	Huracán 1
130	0.0042	
140	0.0095	
150	0.0198	
160	0.0382	Huracán 2
170	0.0692	
180	0.1179	
190	0.1901	Huracán 3
200	0.2895	
210	0.4154	
220	0.5599	Huracán 4
230	0.7061	
240	0.8327	
250	0.9227	
260	0.9727	Huracán 5
270	0.9932	
280	0.9989	
290	0.9999	
300	1	

Puesto que es necesario contar con el mismo número de categorías por intensidad que las que se usaron para calcular el peligro, entonces se han obtenido los promedios de vulnerabilidad por velocidades de viento contenidas en cada intensidad Saffir-Simpson, ver Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Función de vulnerabilidad promedio. (Fuente: Elaboración propia)

Intensidad	Saffir Simpson	Vulnerabilidad
1	Depresión Tropical	0
2	Tormenta Tropical	0.0004
3	Huracán 1	0.00878
4	Huracán 2	0.0751
5	Huracán 3	0.29833
6	Huracán 4	0.75535
7	Huracán 5	0.99294

Como se puede observar, la intensidad 1 refleja cero vulnerabilidad, y la intensidad 2 refleja una vulnerabilidad casi nula.

³⁴ Ibid Pág. 67, Caso 8.

6.3 Diseño y ejecución del modelo

La simulación fue programada en el lenguaje de programación Python. Su sintaxis es simple, clara y sencilla; es dinámico al gestionar la memoria, y tiene una buena cantidad de librerías disponibles. Algunos casos de éxito en el uso de Python son Google, Yahoo, la NASA, y todas las distribuciones Linux. Un caso particular de uso de Python es en el Sistema de Información Geográfico ArcGIS de la empresa ESRI para diferentes tipos de geoprocесamientos. Para conocer más acerca de este lenguaje se puede visitar www.python.org.

A continuación, se iteró el modelo con fundamento en el teorema de Glivenko (Ver sección 4.4), se realizaron 1000 iteraciones para cada uno de los 10 municipios costeros de Sinaloa, generando así, la serie de la cual se obtendrá la distribución de daños en construcciones con las características mencionadas.

Es importante señalar, que el modelo supone que una vez que la vivienda es afectada, se repara a su estado original. Lo ideal, es que la reparación implique una “adaptación” a las condiciones meteorológicas para disminuir daños, sin embargo, es difícil agregar este factor al modelo ya que se ven involucrados aspectos socioeconómicos.

Con 1000 iteraciones se puede asegurar una convergencia aceptable a la función de distribución simulada; esto se puede comprobar fácilmente ya que el modelo se corrió para 100, 1000, 5000, 10000, 20000, 30000 y 40000, observándose muy poca diferencia entre los resultados de los estadísticos de las series obtenidas de 1000 en adelante. En la Tabla 6.4 se tienen las diferencias entre las series generadas de 1000 contra 40000 iteraciones, viéndose una diferencia menor a centésimas en la mayoría de los casos, por lo que se optó por dejar los resultados de 1000 iteraciones como resultado final.

Es muy importante recordar que conforme a la expresión 2-1 si el valor de C es igual a cero, implica que nuestro riesgo no existe, es decir, no hay ningún bien expuesto al peligro. Para este análisis, veremos que el estudio solo puede resultar válido para los municipios costeros, ya que estamos usando una función de vulnerabilidad de cierto tipo de viviendas ubicadas en un litoral o un promontorio, los municipios de Sinaloa que tienen estas características son Ahome, Angostura, Culiacán, Elota, Guasave, San Ignacio, Mazatlán, Rosario, Escuinapa y Novolato.

Tabla 6.4 diferencia entre los resultados de los estadísticos de las series obtenidas de 1000 contra 40000 iteraciones

	Municipio				
Diferencias	Ahome	Angostura	Culiacán	Elota	Guasave
Promedio	0.0008389	0.0000131	0.0032310	0.0022868	0.0007508
Máximo	0.0095100	0.0087800	0.0059626	0.0029833	0.0066320
Mínimo	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
Desv. Est.	0.0027354	0.0000351	0.0073852	0.0026290	0.0011538

	Municipio				
Diferencias	San Ignacio	Mazatlán	Rosario	Escuinapa	Novolato
Promedio	0.0011360	0.0038232	0.0010327	0.0005854	0.0000037
Máximo	0.0076413	0.0045702	0.0000000	0.0151000	0.0004000
Mínimo	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
Desv. Est.	0.0056275	0.0023683	0.0074232	0.0009472	0.0000035

6.4 Presentación y documentación de los resultados

A continuación se presentan los datos obtenidos de las series por cada estado en la Tabla 6.5:

Tabla 6.5 Estadísticos resultados de la simulación para cada estado (%)

	Municipio				
Estadísticos	Ahome	Angostura	Culiacán	Elota	Guasave
Promedio	6.912%	0.083%	3.994%	3.375%	0.993%
Máximo	151.070%	1.756%	37.383%	59.666%	15.898%
Mínimo	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Desv. Est.	21.552%	0.246%	8.468%	8.840%	2.295%

	Municipio				
Estadísticos	San Ignacio	Mazatlán	Rosario	Escuinapa	Novolato
Promedio	6.955%	9.914%	5.570%	0.690%	0.004%
Máximo	151.070%	180.903%	89.499%	15.020%	0.080%
Mínimo	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Desv. Est.	21.795%	23.221%	12.694%	2.237%	0.012%

El promedio equivale a la estimación del daño esperado que tendrá una construcción durante 5 años, describe el Índice de Riesgo de vivienda ubicada en un litoral o un promontorio hecho con muros de tabique con refuerzo tradicional de varilla.

La pérdida máxima probable (PML) por cada municipio está indicada como el estadístico denominado “Máximo” de la Tabla 6.5.

Si se agrega el valor C tendríamos el costo esperado de la ocurrencia de ciclones tropicales en cada municipio en los próximos 5 años.

6.4.1 Caso específico de Mazatlán, Sin.

Analizaremos a fondo solamente un municipio para mostrar los resultados y conclusiones de la simulación. Se tomará caso específico de Mazatlán, esto dado que puede resultar más familiar ubicarlo por ser una zona turística. Se puede observar, que la estimación del promedio de daños en 5 años es de 9.914%, esto quiere decir que una construcción con el valor hipotético de 1 peso

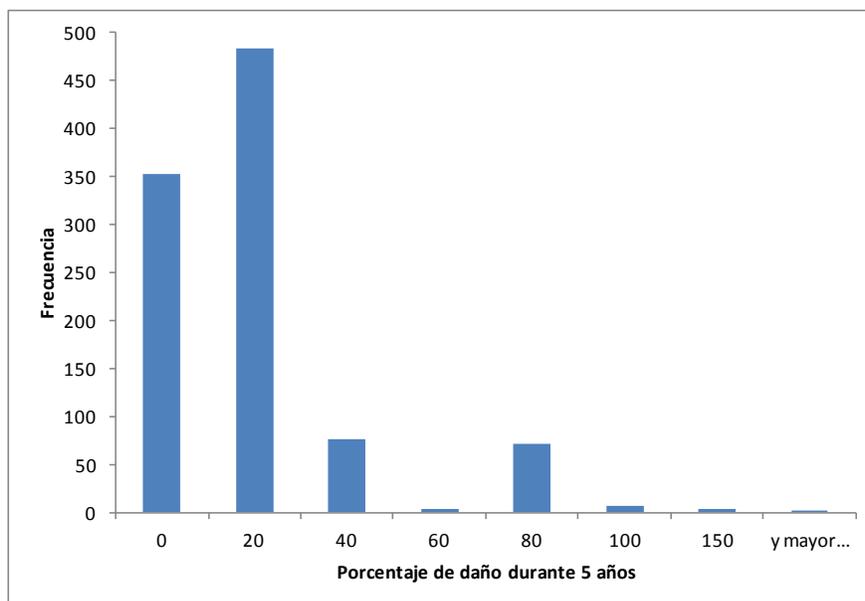
tendrá una pérdida promedio durante 5 años de 0.09914 pesos. En el caso extremo, se nota un daño máximo probable del 180.903% lo cual implica la pérdida total del inmueble por lo menos una vez durante 5 años.

Con las serie obtenida mediante simulación, se puede conocer la frecuencia y por lo tanto las probabilidades de daños en una vivienda para los próximos 5 años en Mazatlán. En la Tabla 6.6 y en el Gráfico 6.1 se pueden ver los resultados.

**Tabla 6.6 Probabilidades de daños en una vivienda para los próximos 5 años.
Base de 1000 datos muestrales.**

Mazatlán		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	353	0.353
20	484	0.484
40	77	0.077
60	3	0.003
80	71	0.071
100	6	0.006
150	4	0.004
y mayor...	2	0.002

**Gráfico 6.1 Histograma de daños en una vivienda para los próximos 5 años.
Base de 1000 datos muestrales.**



De la Tabla 6.6 se puede notar que el daño máximo probable de 180.903% que se ha obtenido de los estadísticos, ver Tabla 6.5, tiene una probabilidad de 0.002 de ocurrir durante 5 años. También se observa que la probabilidad más alta pertenece al intervalo de 20 y 40 por ciento de daño.

Los resultados para los demás municipio se pueden ver en el Anexo.

Conclusiones

Se cumplió el objetivo de la tesis ya que se ha diseñado, mostrado y ejemplificado un modelo para la estimación de escenarios temporales de riesgo estructural de las viviendas de bajo costo ante la acción del viento, específicamente de ciclones tropicales.

Se obtuvo la distribución de los daños estructurales bajo ciertas condiciones dadas, con la cual se pueden realizar Atlas temporales de riesgo, en este caso, estructural de las viviendas de bajo costo por acción del viento de ciclones tropicales. De esta forma se está midiendo la frecuencia y la severidad de las pérdidas potenciales pues se obtuvo frecuencia y severidad de los daños estructurales.

Se aplicó el modelo en los municipios costeros del Estado de Sinaloa. Además, el modelo utiliza las metodologías del CENAPRED y puede ser propuesto como parte de las metodologías de realización de Atlas de Riesgos.

El sistema de modelación es eficiente porque permite adaptar las simulaciones a diferentes tipos de estructuras gracias al conocimiento de las funciones de vulnerabilidad. De la misma forma, se puede ampliar el rango de estudio aumentando el largo del contorno del límite territorial de cada municipio costero.

También, se pueden aumentar el número de cálculos a generar ya que el lenguaje de programación Python es eficiente.

La metodología desarrollada es de acceso público, es decir, colabora con la iniciativa surgida en 2008 de crear una plataforma de información de código y arquitectura abierta para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo ante desastres naturales. También, puede ser usada en el establecimiento de fondos para resarcir daños que puedan ocasionar los ciclones tropicales en estructuras de viviendas de bajo costo.

Estos resultados pueden añadirse a los Atlas de riesgos de cada municipio costero de Sinaloa, y por lo tanto al Atlas de riesgo estatal, así como de cualquier otro estado con costa.

Se ha obtenido el Índice de Riesgo durante 5 años de vivienda hecha con muros de tabique con refuerzo tradicional de varilla ubicada en un litoral o un promontorio en los

municipios costeros de Sinaloa. Si se agrega el valor C, del costo de la vivienda, tendríamos el costo esperado de la ocurrencia de ciclones tropicales en cada municipio costero en los próximos 5 años.

Con estos datos obtenidos, añadiendo el número de viviendas del mismo tipo utilizado en la evaluación de la vulnerabilidad que se encuentren en promontorios o litorales, y multiplicando el Índice de Riesgo por el valor C, del costo de cada vivienda, se puede hacer una reserva de riesgo a 5 años para este tipo de viviendas en específico. Para obtener una reserva de riesgo más amplia, se deben añadir los demás tipos de casas y construcciones.

Como se puede observar, aún hay muchos esfuerzos por realizar para llevar a cabo una estimación de pérdidas en estructuras de viviendas de bajo costo que sea amplio e incluyente de otras consecuencias de los ciclones tropicales como lo son la lluvia, marea de tormenta, oleaje, y por tanto las inundaciones subsecuentes a las lluvias en regiones distantes a la trayectoria de un ciclón tropical.

A pesar de lo anterior, el esfuerzo realizado por concretar parte de un rompecabezas de pérdidas por ciclones tropicales, es interesante como parte de un todo que deberá concretarse con trabajos siguientes a éste. A este modelo deberán agregarse más variables y parámetros que puedan ampliar la visión acerca del total de causas que ocasionan pérdidas económicas directas e indirectas por los ciclones tropicales.

También es bueno mencionar, que el hecho de tomar el trabajo de otros investigadores expertos en la ingeniería civil y meteorología para aplicarlo en un producto de utilidad de estimación de pérdidas y evaluación del riesgo, es signo de que sus esfuerzos han sido tomados en cuenta y que tienen un gran valor no solo en su área primaria sino para otros interesados en áreas con diferente visión acerca de los fenómenos en estudio.

Bibliografía

- Bitrán Daniel. 2001. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2000". CENAPRED. México.
- Bitrán Daniel, Martín Jiménez Espinosa, otros. 2002. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2001". CENAPRED. México.
- Bitrán Bitrán Daniel, et al. 2003. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2002". CENAPRED. México.
- Bitrán Bitrán Daniel, et al. 2004. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2003". CENAPRED. México.
- Bitrán Bitrán Daniel, Norlang García Arróliga, Rafael Marín Cambranis y Karla Méndez Estrada. 2005. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2004. CENAPRED". México.
- Corona Flores Leonardo, Oscar López Bátiz, otros. 2006. "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social)". CENAPRED. México.
- "Diseño por Viento, Diseño de Obras Civiles". 1993 Comisión Federal de Electricidad.
- Eslava Morales Héctor, Lucía Guadalupe Matías Ramírez, otros. 2006. "Implementación de la Metodología para la Elaboración de Mapas de Riesgo por Inundaciones Costeras por Marea de Tormenta: Caso Isla Arena, Municipio de Calkiní, Campeche". CENAPRED
- Espinosa Jiménez Martín, Héctor Eslava Morales, otros. 2006. "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos)". CENAPRED. México.
- Espinosa Jiménez, Martín. Lucía Guadalupe Matías Ramírez. 2003. "Ciclones Tropicales". Serie Fascículos. CENAPRED.
- Evans Michael J., Rosenthal Jeffrey S. 2004. "Probabilidad y estadística. La ciencia de la incertidumbre". Editorial Reverté, S.A., España.
- Flores de la Mota Idalia, Elizondo Cortés Mayra. 2006. "Apuntes de simulación". México, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- García Álvarez Miguel Ángel. 2005. "Introducción a la teoría de la probabilidad. Primer curso". Fondo de Cultura Económica. México.

- García Arróliga Norlang, Rafael Marín Cambranis y Karla Méndez Estrada. 2006. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2005". CENAPRED. México.
- García Arróliga Norlang, et al. 2007. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2006". CENAPRED. México.
- García Arróliga Norlang, et al. 2008. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2007". CENAPRED. México.
- García Arróliga Norlang, et al. 2009. "Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2008". CENAPRED. México.
- García Raffi, L.M. Sánchez Pérez Enrique A. 2001. "Matemáticas asistidas por ordenador MAO". Universidad Politécnica de Valencia.
- Garza Tomás. 1998. "Técnicas Modernas para el actuario". FCE. México.
- Guevara Ortiz Enrique, Quass Weppen Roberto, otros (consultar hoja legal). 2006. "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos". CENAPRED, México.
- H. Toledo. 1999. "Huracán Pauline". Oaxaca, México.
- Hernández Cerda María Engracia, Enrique Azpra Romero. 2001. "Los ciclones tropicales de México". Volumen 1 de Temas selectos de geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM. Edición Ilustrada.
- Kass R., Goovaerts Marc, Dhaene Jan, Denuit Michel. 2001. "Modern Actuarial Risk Theory". Klumer Academic Publishers. Holanda.
- Law, Averill M. y Kelton, W. David. 2002. "Simulation Modeling and Analysis", 3ª edición, Mc Graw-Hill.
- Martínez Barbeito Josefina, Villalón Julio G. 2003. "Introducción al Cálculo Estocástico aplicado a la modelación económico-financiero-actuarial". Editorial Netbiblo S.L., España.
- Martín-Pliego Fco. Javier, Ruiz-Maya Pérez Luis. 2006. "Fundamentos de probabilidad". Editorial Thomson. 2a. Edición. España.
- Moreno Jiménez Antonio, Varios. 2008. "Sistemas y Análisis de la Información Geográfica". Segunda edición. Alfaomega Grupo Editor. México.
- Ordaz Mario. 1996. "Algunos conceptos del análisis de riesgos". Revista Prevención, CENAPRED
- Quass Weppen Roberto, otros (consultar hoja legal). 2004. "Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos". CENAPRED, México.

- Ríos Insúa David, Sixto Ríos Insúa, otros. 2009. "Simulación, Métodos y Aplicaciones". Ed. Alfaomega. México. Segunda Edición.
- Rosengaus Moshinsky, Michel. 2002. "Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México". CENAPRED, IMTA.
- Rosengaus, M. M. 1998. "Efectos destructivos de los ciclones tropicales". MAPFRE RE, ITSEMAP, IMTA. Ed. MAPFRE , S.A. México, D. F.
- Ross, Sheldon M. 1999. "Simulación", Segunda edición, Prentice Hall.
- Sistema Económico Latinoamericano y del Caribe. 2010. "Mecanismos Financieros, Seguro y Reaseguro contra Desastres Naturales en América Latina y el Caribe: Experiencias Recientes". Seminario Regional sobre Inversión Pública y Mecanismos Financieros, Seguros y Reaseguros Contra Desastres en América Latina y el Caribe: Experiencias Recientes. México.
- Sotelo, Ávila, G. 1979. "Hidráulica general". México D.F.: Limusa.
- Winston, W.L.1997. "Practical Management Science", Duxbury.

Sitios de Internet

Atlas Nacional de Riesgos www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx
 AMIS www.amis.com.mx
 Centro Nacional de Prevención de Desastres www.cenapred.gob.mx
 Colegio Nacional de Actuarios www.conac.org.mx
 El Asegurador: www.elasegurador.com.mx
 Servicio Meteorológico Nacional: smn.conagua.gob.mx
 The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): www.noaa.gov

Apéndice

Los sistemas de información geográfica

Dado que para desarrollar el modelo de estimación de escenarios temporales de riesgo de las viviendas a causa del viento de ciclones tropicales se usó un sistema de información geográfica, es importante conocer qué son estos sistemas.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o *GIS*, en su acrónimo inglés *Geographic Information System*) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

Con ello, el sistema está capacitado para ofrecernos unas prestaciones muy variadas, pero que han sido clasificadas atinadamente en seis categorías generales. Se enunciarán a modo de preguntas directas:

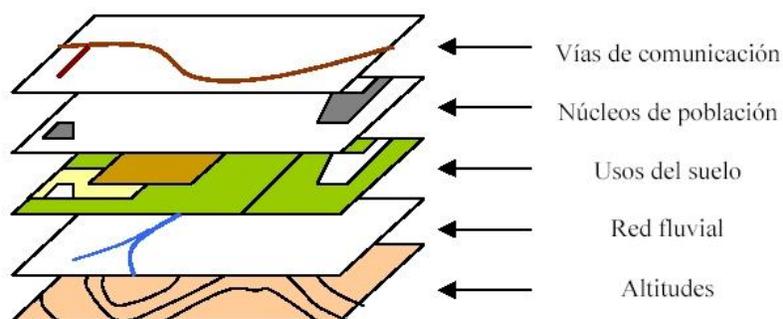
- Qué hay en un lugar del territorio o qué rasgos posee el mismo: qué cultivos, qué tipo de vegetación, qué temperatura, qué pendiente, cuánta población, cuántos clientes de una empresa, cuántos competidores, cuántas escuelas, etc.
- Dónde hay un hecho concreto (por ejemplo, un parque, una patrulla policial, una farmacia, un museo de arte moderno, una parcela), u ocurre tal o cuál fenómeno (dónde ha nevado, dónde se ha superado el nivel de contaminación admisible, dónde hay pendientes bajas, dónde hay más delincuencia, etc.).
- Qué distribución espacial tiene tal fenómeno, por ejemplo, la contaminación por ozono, el riesgo por incendio, centros comerciales, trayectoria de un ciclón tropical.
- Qué tendencias o cambios temporales han ocurrido en el territorio: cómo ha cambiado el espacio urbano en un municipio entre dos fechas, cómo ha evolucionado una vertiente, cómo se ha incrementado la cifra de inmigrantes por municipios, etc.
- Qué ruta seguir para un desplazamiento: qué itinerario es más eficiente para una ruta de pedidos comerciales, qué trayecto es más corto para evacuar a la población en caso de emergencia volcánica, etc.
- Qué pasaría en el territorio si ocurre tal condición. Se trata de la lógica de la simulación o modelado, que avista a elaborar escenarios plausibles ante condiciones o supuestos predefinidos. Por ejemplo, qué zonas urbanas se inundarían si llueve más de ciertos milímetros de lluvia, qué zonas se afectarían más ante el paso de un ciclón tropical, etc.

El anterior conjunto de preguntas y los ejemplos reseñados pueden ser ilustrativos de la extensa gama de utilidades que la información geográfica, gestionada y analizada ágil y diestramente, puede proporcionar a la sociedad.

Un SIG encierra un modelo de la realidad sobre el territorio, esto es, se trata de una auténtica representación que pretende reproducir el mundo en el ordenador, con vistas a unas finalidades concretas, y por tanto, de acuerdo con unas reglas o criterios definidos. Como en todo modelo, la información recogida es parcial, o más exactamente selectiva, buscando retener los aspectos que resultan de interés y desechando otros. En tanto que modelo geográfico de la realidad un SIG se caracteriza por el hecho de que rompe la íntima y esencial conexión de las cosas y seres que hay en el territorio, descomponiéndolo en partes. Esas partes son el resultado de una disección lógica y consistente de la realidad de suerte que, al segregar, retenemos solamente algunos hechos o aspectos. Así, por ejemplo, como si de un filtro ocular se tratase, podríamos imaginar que “vemos” sólo las vías terrestres o los ríos o los bosques. En conjunto, ello significa concebir un modelo de la realidad y diseñar una base de datos geográficos para contenerlo.

En cualquier caso y de forma general, conviene avanzar que los aspectos seleccionados, o lo que es lo mismo, la información relativa a los mismos se ha de almacenar en un SIG a modo de capas (*layers*). Para una determinada porción del territorio los datos se habrán de organizar, de manera inteligente en diversas capas, cada una conteniendo un aspecto o parte de la realidad, por ejemplo vías de comunicación, núcleos de población, uso de suelo, red fluvial, altitudes, etc. Aunque parezca contradictorio, esa desmembración de la realidad nos permite superar algunas de las limitaciones mentales, y posteriormente, muchas operaciones que el SIG realiza, por orden del experto, implican relacionar y combinar de nuevo varias capas entre sí para hacer aflorar, de manera más nítida, hechos que la realidad nos impide percibir.

Figura 6.3 Capas en un SIG



Como se ha visto, se puede asegurar que los sistemas de información geográfica, los cuales pueden desplegar y analizar una gran cantidad de datos como son: la caracterización del medio físico, el tipo de infraestructura, el número de habitantes y tipo de vivienda, siendo éstas algunas de las variables indispensables para el análisis y diagnóstico del riesgo.

Anexo

Resultados estadísticos del conteo municipal

Ahome Intensidad	Años 61			Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría	Número	Probabilidad			
1	Depresión Tropical	0	0.000	0.000	0.164	6.100
2	Tormenta Tropical	5	0.500	0.500	0.164	6.100
3	Huracán 1	3	0.300	0.800	0.082	12.200
4	Huracán 2	1	0.100	0.900	0.033	30.500
5	Huracán 3	0	0.000	0.900	0.016	61.000
6	Huracán 4	1	0.100	1.000	0.016	61.000
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

Angostura Intensidad	Años 61			Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría	Número	Probabilidad			
1	Depresión Tropical	1	0.200	0.200	0.082	12.200
2	Tormenta Tropical	3	0.600	0.800	0.066	15.250
3	Huracán 1	1	0.200	1.000	0.016	61.000
4	Huracán 2	0	0.000	1.000	0.000	No hay
5	Huracán 3	0	0.000	1.000	0.000	No hay
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

Culiacán Intensidad	Años 61			Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría	Número	Probabilidad			
1	Depresión Tropical	0	0.000	0.000	0.098	10.167
2	Tormenta Tropical	2	0.333	0.333	0.098	10.167
3	Huracán 1	0	0.000	0.333	0.066	15.250
4	Huracán 2	3	0.500	0.833	0.066	15.250
5	Huracán 3	1	0.167	1.000	0.016	61.000
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

Elota Intensidad	Años 61			Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría	Número	Probabilidad			
1	Depresión Tropical	1	0.143	0.143	0.115	8.714
2	Tormenta Tropical	2	0.286	0.429	0.098	10.167
3	Huracán 1	2	0.286	0.714	0.066	15.250
4	Huracán 2	1	0.143	0.857	0.033	30.500
5	Huracán 3	1	0.143	1.000	0.016	61.000
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay

Guasave Intensidad	Años 61		Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría						
1	Depresión Tropical	0	0.000	0.000	0.131	7.625	
2	Tormenta Tropical	3	0.375	0.375	0.131	7.625	
3	Huracán 1	4	0.500	0.875	0.082	12.200	
4	Huracán 2	1	0.125	1.000	0.016	61.000	
5	Huracán 3	0	0.000	1.000	0.000	No hay	
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay	
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay	

San Ignacio Intensidad	Años 61		Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría						
1	Depresión Tropical	3	0.273	0.273	0.180	5.545	
2	Tormenta Tropical	3	0.273	0.545	0.131	7.625	
3	Huracán 1	3	0.273	0.818	0.082	12.200	
4	Huracán 2	1	0.091	0.909	0.033	30.500	
5	Huracán 3	0	0.000	0.909	0.016	61.000	
6	Huracán 4	1	0.091	1.000	0.016	61.000	
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay	

Mazatlán Intensidad	Años 61		Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría						
1	Depresión Tropical	2	0.154	0.154	0.213	4.692	
2	Tormenta Tropical	5	0.385	0.538	0.180	5.545	
3	Huracán 1	3	0.231	0.769	0.098	10.167	
4	Huracán 2	1	0.077	0.846	0.049	20.333	
5	Huracán 3	1	0.077	0.923	0.033	30.500	
6	Huracán 4	1	0.077	1.000	0.016	61.000	
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay	

Rosario Intensidad	Años 61		Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Perido de retorno (Tr)
	Categoría						
1	Depresión Tropical	1	0.143	0.143	0.115	8.714	
2	Tormenta Tropical	3	0.429	0.571	0.098	10.167	
3	Huracán 1	0	0.000	0.571	0.049	20.333	
4	Huracán 2	1	0.143	0.714	0.049	20.333	
5	Huracán 3	2	0.286	1.000	0.033	30.500	
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay	
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay	

Escuinapa Intensidad	Años 61		Número	Probabilidad	Proba Acum	Tasa Excedencia anual	Tr
	Categoría						
1	Depresión Tropical	0	0.000	0.000	0.049	20.333	
2	Tormenta Tropical	2	0.667	0.667	0.049	20.333	
3	Huracán 1	0	0.000	0.667	0.016	61.000	
4	Huracán 2	1	0.333	1.000	0.016	61.000	
5	Huracán 3	0	0.000	1.000	0.000	No hay	
6	Huracán 4	0	0.000	1.000	0.000	No hay	
7	Huracán 5	0	0.000	1.000	0.000	No hay	

Tabla cronológica de ciclones tropicales (1949-2010)

Año	San Ignacio	Rosario	Novolato	Mazatlán
1949	0	0	0	0
1950	0	0	0	0
1951	0	0	0	0
1952	0	0	0	0
1953	0	0	0	0
1954	0	0	0	0
1955	0	0	0	0
1956	0	0	0	0
1957	Huracan 4	0	0	Huracan 4
1958	0	0	0	0
1959	0	0	Tormenta Tropical	0
1960	0	0	0	0
1961	0	0	0	0
1962	Huracan 1	0	0	Huracan 1
1963	Tormenta Tropical	0	0	Huracan 1
1964	Tormenta Tropical	0	0	0
1965	0	Tormenta Tropical	0	Tormenta Tropical
1966	0	0	0	0
1967	0	0	0	0
1968	Huracan 1	0	0	0
1969	Huracan 1	0	0	0
1970	0	Tormenta Tropical	0	0
1971	0	0	0	0
1972	0	0	0	0
1973	Depresion Tropical	0	0	Depresion Tropical
1974	0	0	0	0
1975	0	Huracan 3	0	Huracan 3
1976	0	0	0	Tormenta Tropical
1977	0	0	0	0
1978	0	0	0	0
1979	0	0	0	0
1980	0	0	0	0

Año	San Ignacio	Rosario	Novolato	Mazatlán
1981	Huracan 2	0	0	Huracan 2
1982	0	0	0	0
1983	0	Huracan 3	0	0
1984	0	0	0	0
1985	0	0	0	0
1986	0	0	0	Huracan 1
1987	0	0	0	0
1988	0	0	0	0
1989	0	0	0	0
1990	0	0	0	0
1991	0	0	0	0
1992	0	0	0	0
1993	0	0	0	0
1994	0	Huracan 2	0	0
1995	0	0	0	0
1996	0	0	0	0
1997	0	0	0	0
1998	0	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	Depresion Tropical	Depresion Tropical	0	Depresion Tropical
2001	0	0	0	0
2002	0	0	0	0
2003	Depresion Tropical	0	0	0
2004	0	0	0	0
2005	0	0	0	0
2006	0	0	Depresion Tropical	0
2007	0	0	0	0
2008	0	0	0	0
2009	0	0	0	Tormenta Tropical
2010	0	0	0	0

Año	Guasave	Escuinapa	Elota	Culiacán
1949	0	0	0	0
1950	0	0	0	0
1951	0	0	0	0
1952	0	0	0	0
1953	0	0	0	0
1954	0	0	0	0
1955	0	0	0	0
1956	0	0	0	0
1957	0	0	0	0
1958	0	0	0	0
1959	Tormenta Tropical	0	0	Tormenta Tropical
1960	0	0	0	0
1961	0	0	0	0
1962	Huracan 1	0	0	0
1963	0	0	Tormenta Tropical	0
1964	0	0	Tormenta Tropical	Tormenta Tropical
1965	0	0	0	0
1966	0	0	0	0
1967	0	0	0	0
1968	0	0	Huracan 1	0
1969	0	0	Huracan 1	0
1970	0	Tormenta Tropical	0	0
1971	Tormenta Tropical	0	0	0
1972	0	0	0	0
1973	0	0	0	0
1974	0	0	Huracan 2	Huracan 2
1975	0	0	0	0
1976	0	0	0	0
1977	0	0	0	0
1978	0	0	0	0
1979	0	0	0	0
1980	0	0	0	0

Año	Guasave	Escuinapa	Elota	Culiacán
1981	0	0	0	0
1982	Huracan 2	0	0	0
1983	0	Tormenta Tropical	0	0
1984	0	0	0	0
1985	0	0	0	Huracan 2
1986	Huracan 1	0	0	0
1987	0	0	0	0
1988	0	0	0	0
1989	0	0	0	0
1990	Tormenta Tropical	0	0	0
1991	0	0	0	0
1992	0	0	0	0
1993	0	0	0	Huracan 2
1994	0	Huracan 2	0	0
1995	Huracan 1	0	0	0
1996	0	0	0	0
1997	0	0	0	0
1998	Huracan 1	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	0	0	0	0
2001	0	0	0	0
2002	0	0	0	0
2003	0	0	Depresion Tropical	0
2004	0	0	0	0
2005	0	0	0	0
2006	0	0	Huracan 3	Huracan 3
2007	0	0	0	0
2008	0	0	0	0
2009	0	0	0	0
2010	0	0	0	0

Año	Angostura	Ahome
1949	0	0
1950	0	0
1951	0	0
1952	0	0
1953	0	0
1954	0	0
1955	0	0
1956	0	0
1957	0	0
1958	0	0
1959	Tormenta Tropical	Tormenta Tropical
1960	0	0
1961	0	0
1962	Huracan 1	0
1963	0	0
1964	0	0
1965	0	0
1966	0	Tormenta Tropical
1967	0	0
1968	0	0
1969	0	0
1970	0	0
1971	0	Tormenta Tropical
1972	0	0
1973	0	Tormenta Tropical
1974	0	0
1975	0	0
1976	0	Huracan 4
1977	0	0
1978	Tormenta Tropical	0
1979	0	0
1980	0	0

Año	Angostura	Ahome
1981	0	Tormenta Tropical
1982	0	Huracan 2
1983	0	0
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	0
1988	0	0
1989	0	0
1990	Tormenta Tropical	0
1991	0	0
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	Huracan 1
1996	0	Huracan 1
1997	0	0
1998	0	Huracan 1
1999	0	0
2000	0	0
2001	0	0
2002	0	0
2003	0	0
2004	0	0
2005	0	0
2006	Depresion Tropical	0
2007	0	0
2008	0	0
2009	0	0
2010	0	0

Para el caso de San Ignacio, en el año de 1981 se presentaron más de un ciclón, de hecho fueron 2 ciclones tropicales: Tormenta Tropical KNUT y Huracán NORMA de intensidad 2. Dado que la vulnerabilidad por Tormenta Tropical es casi cero, se dejó únicamente al Huracán NORMA como dato de ocurrencia.

Para el caso de Rosario, en el año de 1983 se presentaron más de un ciclón, de hecho fueron 2 ciclones tropicales: Tormenta Tropical ADOLPH y Huracán TICO de intensidad 3. Dado que la vulnerabilidad por Tormenta Tropical es casi cero, se dejó únicamente al Huracán TICO como dato de ocurrencia.

Para el caso de Mazatlán, en el año de 1963 se presentaron más de un ciclón, de hecho fueron 2 ciclones tropicales: Tormenta Tropical LILLIAN y Huracán MONA de intensidad 1. Dado que la

vulnerabilidad por Tormenta Tropical es casi cero, se dejó únicamente al Huracán MONA como dato de ocurrencia.

También, para el caso de Mazatlán, en el año de 1981 se presentaron más de un ciclón, de hecho fueron 2 ciclones tropicales: Tormenta Tropical KNUT y Huracán NORMA de intensidad 2. Dado que la vulnerabilidad por Tormenta Tropical es casi cero, se dejó únicamente al Huracán NORMA como dato de ocurrencia.

Series simuladas de ocurrencias y sumas de ocurrencias por intensidades de ciclones

San Ignacio	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	2	3	2	3	1	2	.	.	.	1	1	1	3	2.200	0.84
Tormenta Tropical	2	2	2	2	3	3	.	.	.	3	2	2	3	2.400	0.55
Huracan 1	3	3	3	3	4	3	.	.	.	3	2	2	4	3.200	0.45
Huracan 2	1	0	0	0	2	2	.	.	.	0	0	1	0	0.800	1.10
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	1	0	0	2	2	0	.	.	.	2	1	2	0	0.800	1.10
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
San Ignacio		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	9	8	7	10	12	10	.	.	.	9	6	8	10	9.130	1.94935887
	Sumas por cada serie														

Rosario	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	1	0	1	0	0	1	.	.	.	0	1	1	2	0.400	0.55
Tormenta Tropical	2	2	3	2	1	3	.	.	.	2	3	3	3	2.200	0.84
Huracan 1	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 2	1	2	0	0	2	2	.	.	.	1	1	0	0	1.200	1.10
Huracan 3	2	3	3	1	1	3	.	.	.	3	2	3	1	2.200	1.10
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Rosario		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	6	7	7	3	4	9	.	.	.	6	7	7	6	6.000	1.24948974
	Sumas por cada serie														

Novolato	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	1	1	1	2	1	0	.	.	.	2	0	1	2	1.000	0.71
Huracan 1	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 2	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Novolato		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	1	1	1	2	1	0	.	.	.	2	0	1	2	1.000	0.70710678
		Sumas por cada serie													

Mazatlán	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	2	3	3	3	2	2	.	.	.	2	2	3	2	2.600	0.55
Tormenta Tropical	2	3	2	3	3	1	.	.	.	1	2	3	1	2.400	0.89
Huracan 1	3	2	2	3	4	2	.	.	.	4	2	3	3	2.600	0.89
Huracan 2	1	1	2	1	0	0	.	.	.	1	1	0	2	0.800	0.84
Huracan 3	1	1	2	0	2	1	.	.	.	1	2	0	0	1.200	0.84
Huracan 4	1	1	0	1	1	0	.	.	.	0	2	1	0	0.600	0.55
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Mazatlán		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	10	11	11	11	12	6	.	.	.	9	11	10	8	10.200	1.18746728
		Sumas por cada serie													

Guasave	Intensidad	No. Serie												Estadísticos	
		Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	3	3	3	3	4	3	.	.	.	4	4	4	2	3.200	0.45
Huracan 1	4	5	5	5	5	3	.	.	.	5	3	3	5	4.600	0.89
Huracan 2	1	0	2	0	2	1	.	.	.	1	2	2	1	1.000	1.00
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Guasave		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	8	8	10	8	11	7	.	.	.	10	9	9	8	8.170	1.64316767
		Sumas por cada serie													

Escuinapa	Intensidad	No. Serie												Estadísticos	
		Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	2	3	3	3	1	2	.	.	.	2	3	1	3	2.400	0.89
Huracan 1	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 2	1	2	0	2	2	0	.	.	.	2	0	1	1	1.200	1.10
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Escuinapa		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	3	5	3	5	3	2	.	.	.	4	3	2	4	2.970	1.34164079
		Sumas por cada serie													

Elota	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	2	3	2	1	3	1	.	.	.	2	1	2	2	2.000	1.00
Huracan 1	2	3	3	1	2	1	.	.	.	1	3	2	1	2.000	1.00
Huracan 2	1	2	0	2	1	2	.	.	.	0	1	2	1	1.400	0.89
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Elota		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	5	8	5	4	6	4	.	.	.	3	5	6	4	5.020	1.67332005
		Sumas por cada serie													

Culiacán	Historico	No. Serie												Estadísticos	
		1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	2	2	1	2	3	3	.	.	.	1	2	2	3	2.200	0.84
Huracan 1	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 2	3	4	2	4	2	4	.	.	.	4	4	2	4	3.200	1.10
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Culiacán		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	5	6	3	6	5	7	.	.	.	5	6	4	7	5.370	1.51657509
		Sumas por cada serie													

Angostura		No. Serie												Estadísticos	
Intensidad	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	3	2	3	4	4	2	.	.	.	3	4	2	2	3.000	1.00
Huracan 1	1	2	2	2	1	1	.	.	.	2	0	2	2	1.600	0.55
Huracan 2	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Angostura		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	4	4	5	6	5	3	.	.	.	5	4	4	4	4.100	1.14017543
		Sumas por cada serie													

Ahome		No. Serie												Estadísticos	
Intensidad	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
Depresion Tropical	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Tormenta Tropical	5	5	4	5	5	4	.	.	.	4	4	5	6	4.600	0.55
Huracan 1	3	3	3	4	3	3	.	.	.	4	4	2	2	3.200	0.45
Huracan 2	1	2	1	0	1	0	.	.	.	1	0	1	2	0.800	0.84
Huracan 3	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Huracan 4	1	0	1	0	2	1	.	.	.	0	0	0	0	0.800	0.84
Huracan 5	0	0	0	0	0	0	.	.	.	0	0	0	0	0.000	0.00
Ahome		Suma de ocurrencias													
	Historico	1	2	3	4	5	.	.	.	997	998	999	1000	Promedio	Desviación Estándar
	10	10	9	9	11	8	.	.	.	9	8	8	10	9.900	1.14017543
		Sumas por cada serie													

Prueba de hipótesis acerca de la media muestral del número total de ciclones

San Ignacio

	Promedio	Desviación Estándar S	Valor histórico
San Ignacio	9.13	1.9	9

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	9.13	1.9	0.062

	Valor de prueba= 9		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	2.10887847	999	0.560

Rosario

	Promedio	Desviación Estándar S	Valor histórico
Rosario	6	1.2	6

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	6	1.2	0.040

	Valor de prueba= 6		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	0	999	0.140

Novolato

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Novolato	1	0.7	1

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	1	0.7	0.022

	Valor de prueba= 1		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	0	999	0.740

Mazatlán

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Mazatlán	10.2	1.2	10

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	10.2	1.2	0.038

	Valor de prueba= 10		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	5.32608809	999	0.290

Guasave

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Guasave	8.17	1.6	8

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	8.17	1.6	0.052

	Valor de prueba= 8		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	3.27165153	999	0.820

Escuinapa

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Escuinapa	2.97	1.3	3

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	2.97	1.3	0.042

	Valor de prueba= 3		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	0.70710678	999	0.480

Elota

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Elota	5.02	1.7	5

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	5.02	1.7	0.053

	Valor de prueba= 5		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	0.37796447	999	0.570

Culiacán

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Culiacán	5.37	1.5	5

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	5.37	1.5	0.048

	Valor de prueba= 5		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	7.71503332	999	0.410

Angostura

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Angostura	4.1	1.1	4

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	4.1	1.1	0.036

	Valor de prueba= 4		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	2.77350098	999	0.070

Ahome

	Media muestral	Desviación Estándar S	Valor histórico
Ahome	9.9	1.1	10

	N	Media	Desviación Tip.	Error típ. de la media
No. Ciclones	1000	9.9	1.1	0.036

	Valor de prueba= 10		
	t	gl	Sig. (bilateral)
No. Ciclones	2.77350098	999	0.082

Prueba de hipótesis acerca de la media muestral del número de ciclones por intensidad

San Ignacio				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
2	2.200	0.84	0.92	0.03
2	2.400	0.55	0.71	0.02
3	3.200	0.45	0.76	0.01
1	0.800	1.10	0.56	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
1	0.800	1.10	0.24	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00

Rosario				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
1	0.400	0.55	0.11	0.02
2	2.200	0.84	0.32	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
1	1.200	1.10	0.20	0.03
2	2.200	1.10	0.75	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Novolato				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
1	1.000	0.71	0.55	0.02
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Mazatlán				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
2	2.600	0.55	0.40	0.02
2	2.400	0.89	0.74	0.03
3	2.600	0.89	0.80	0.03
1	0.800	0.84	0.81	0.03
1	1.200	0.84	0.26	0.03
1	0.600	0.55	0.77	0.02
0	0.000	0.00	-	0.00

Guasave				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
3	3.200	0.45	0.51	0.01
4	4.600	0.89	0.10	0.03
1	1.000	1.00	0.12	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Escuinapa				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
2	2.400	0.89	0.45	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
1	1.200	1.10	0.65	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Elota				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
2	2.000	1.00	0.32	0.03
2	2.000	1.00	0.61	0.03
1	1.400	0.89	0.70	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Culiacán				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
2	2.200	0.84	0.48	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
3	3.200	1.10	0.31	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Angostura				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
3	3.000	1.00	0.09	0.03
1	1.600	0.55	0.63	0.02
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00
0	0.000	0.00	-	0.00

Ahome				
Valor histórico	Media muestral	Desviación Estándar	Sig. (bilateral)	Error típico de la media
0	0.000	0.00	-	0.00
5	4.600	0.55	0.83	0.02
3	3.200	0.45	0.82	0.01
1	0.800	0.84	0.40	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00
1	0.800	0.84	0.06	0.03
0	0.000	0.00	-	0.00

Códigos en Python para realizar la simulación

Principal

```
# Archivo: intensidadCiclon.py
# Autor: David Ricardo Mendoza Estrada
# Fecha: 10 de enero de 2013
# Descripcion: Archivo principal
import intensidadCiclon
import vulnerabilidad
import csv_matriz
import numeroCiclonesBinomial
import escribeMatrizEnCSV
numeroSimulaciones=1000
numeroDeAnios=5
#obtiene las medias de los 10 municipios en un vector
lamdas=csv_matriz.csvMatrizFila('RUTA')

#obtiene las 10 funciones de peligro y las guarda en una matriz de 7X10
peligro=csv_matriz.csvMatrizColumnas('RUTA')
estadosPais=len(peligro) #numero de columnas de la matriz de peligro
intensidadesCiclones=len(peligro[1]) #numero de filas de la matriz de peligro

vectorVulnerabilidad=[[0.0 for i in range(numeroSimulaciones)] for i in range(10)] #vector que guardara
lavulnerabilidad acumulada
vectorSerieBinomial=[[0.0 for i in range(numeroSimulaciones)] for i in range(10)] #vector que guardara
lavulnerabilidad acumulada

for estados in range(0,estadosPais):
    print(estados)
    for corrida in range(0,numeroSimulaciones):
        #obtiene el numero de ciclones con Distribucion Binomial en 5 anios para un tr dado
        #N=numeroCiclonesBinomial.numeroCiclonesBinomial(tr[estados],5)
        N=0
        for i in range(numeroDeAnios):
            N=N+modPoisson.poisson(lamdas[estados])
        vectorSeriePoisson[estados][corrida]=N

        for ciclones in range(0,N):
            #obtiene la intensidad de un ciclon para una funcion de peligro dada como argumento
            ciclon=intensidadCiclon.intensidadCiclon(peligro[estados])
            #obtiene la vulnerabilidad de un archivo de vulnerabilidad dado de un ciclon dado como argumento
            valorVulnerabilidad=vulnerabilidad.vulnerabilidad(ciclon, 'RUTA')
            #guarda la vulnerabilidad acumulada para cada estado
            vectorVulnerabilidad[estados][corrida]=vectorVulnerabilidad[estados][corrida]+valorVulnerabilidad
vectorVulnerabilidadT=list(zip(*vectorVulnerabilidad))
vectorSerieBinomialT=list(zip(*vectorSeriePoisson))
escribeMatrizEnCSV.escribeMatrizEnCSV(vectorVulnerabilidadT, 'RUTA')
escribeMatrizEnCSV.escribeMatrizEnCSV(vectorSeriePoissonT, 'RUTA')
```

Modulo: Importa los datos de un archivo CSV a una matriz

```
# Archivo: intensidadCiclón.py
# Autor: David Ricardo Mendoza Estrada
# Fecha: 27 de dic de 2012
# Descripción: Importa los datos de un archivo CSV a una matriz
import csv
def csvMatrizFila(archivoCsv):
    archivo=open(archivoCsv,'r')
    csvArchivo=csv.reader(archivo)
    for row in csvArchivo:
        vector=row
    archivo.close()
    for i in range(0,len(vector)):
        vector[i]=float(vector[i])
    return(vector)
def csvMatrizColumnas(archivoCsv):
    archivo=open(archivoCsv,'r')
    csvArchivo=csv.reader(archivo)
    filas=0
    for row in csvArchivo:
        filas=filas+1
    columnas=len(row)
    matriz=[[ '0' for i in range(0,filas)] for j in range(0,columnas)]
    for columna in range(0,columnas):
        fila=0
        archivo.seek(0)
        for row in csvArchivo:
            matriz[columna][fila]=float(row[columna])
            fila=fila+1
    archivo.close()
    return(matriz)
```

Modulo: Escribe una matriz en un archivo CSV

```
# Archivo: intensidadCiclon.py
# Autor: David Ricardo Mendoza Estrada
# Fecha: 27 de dic de 2012
# Descripcion: Escribe una matriz en un archivo CSV
def escribeMatrizEnCSV(matriz, archivoSalida):
    import csv
    archivo=open(archivoSalida,'w')
    archivoCSV=csv.writer(archivo)
    for row in matriz:
        archivoCSV.writerow(row)
```

Modulo: Devuelve la intensidad de un ciclón tropical

```
# Archivo: intensidadCiclon.py
# Autor: David Ricardo Mendoza Estrada
# Fecha: 27 de dic de 2012
# Descripcion: Devuelve la intensidad de un ciclon tropical
def intensidadCiclon(peligro):
    import random
    x=random.random()
    #print(x)
    if x<peligro[0]:
        ciclon='dt'
    elif x<peligro[1]:
        ciclon='tt'
    elif x<peligro[2]:
        ciclon='h1'
    elif x<peligro[3]:
        ciclon='h2'
    elif x<peligro[4]:
        ciclon='h3'
    elif x<peligro[5]:
        ciclon='h4'
    else:
        ciclon='h5'
    return ciclon
```

Modulo: Genera el número de ciclones a ocurrir conforme a una distribución Binomial

```
def numeroCiclonesBinomial(tr, numeroAnios):
    import random
    numeroCiclones=0
    for i in range(0,numeroAnios):
        aleatorio=random.random()
        if aleatorio<(1/tr):
            numeroCiclones=1+numeroCiclones
    return numeroCiclones
```

Modulo: Devuelve la vulnerabilidad de una estructura a causa del viento

```
# Archivo: intensidadCiclon.py
# Autor: David Ricardo Mendoza Estrada
# Fecha: 27 de dic de 2012
# Descripcion: Devuelve la vulnerabilidad de una estructura a causa del viento
def vulnerabilidad(ciclon, archivoV):
    import csv_matriz
    vulnerabilidad=csv_matriz.csvMatrizFila(archivoV)
    if ciclon=='dt':
        return vulnerabilidad[0]
    if ciclon=='tt':
        return vulnerabilidad[1]
    if ciclon=='h1':
        return vulnerabilidad[2]
    if ciclon=='h2':
        return vulnerabilidad[3]
    if ciclon=='h3':
        return vulnerabilidad[4]
    if ciclon=='h4':
        return vulnerabilidad[5]
    if ciclon=='h5':
        return vulnerabilidad[6]
```

**Probabilidades de daños estructurales de una vivienda
para los próximos 5 años. Municipios de Sinaloa.
Base de 1000 datos muestrales.**

Mazatlán		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	353	0.353
20	484	0.484
40	77	0.077
60	3	0.003
80	71	0.071
100	6	0.006
150	4	0.004
y mayor...	2	0.002

Ahome		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	401	0.401
20	523	0.523
40	0	0
60	0	0
80	70	0.07
100	2	0.002
150	0	0
y mayor...	4	0.004

Angostura		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	711	0.711
20	289	0.289
40	0	0
60	0	0
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Culiacán		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	616	0.616
20	309	0.309
40	75	0.075
60	0	0
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Elota		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	590	0.59
20	329	0.329
40	77	0.077
60	4	0.004
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Escuinapa		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	772	0.772
20	228	0.228
40	0	0
60	0	0
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Guasave		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	464	0.464
20	536	0.536
40	0	0
60	0	0
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Novolato		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	910	0.91
20	90	0.09
40	0	0
60	0	0
80	0	0
100	0	0
150	0	0
y mayor...	0	0

Rosario		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	602	0.602
20	246	0.246
40	138	0.138
60	11	0.011
80	0	0
100	3	0.003
150	0	0
y mayor...	0	0

San Ignacio		
Porcentaje de daño	Frecuencia	Probabilidad de daño
0	493	0.493
20	430	0.43
40	0	0
60	0	0
80	66	0.066
100	7	0.007
150	0	0
y mayor...	4	0.004