



**Atlas de vulnerabilidad hídrica de México
ante el cambio climático: Impacto de
lluvias ciclónicas en México.**



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

INFORME FINAL

Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático: Impacto de lluvias ciclónicas en México.

SUBCOORDINACIÓN DE HIDROMETEOROLOGÍA
COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA

PROYECTO TH-1002.1

Dr. Ricardo Prieto González.
L.C.A. Roberto Ramírez Villa.
L.C.A. Virginia Edith Cortés Hernández.
Ing. María Eugenia Maya Magaña

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1	<i>Objetivo general</i>	4
1.2	<i>Objetivos específicos</i>	¡Error! Marcador no definido.
1.3	<i>Alcances</i>	¡Error! Marcador no definido.
1.4	<i>Actividades principales</i>	¡Error! Marcador no definido.
1.5	<i>Responsables</i>	¡Error! Marcador no definido.
	Lluvias durante la temporada ciclónica	5
	Elaboración de mapas con ejemplos de lluvia acumulada ante el ingreso al país de los huracanes Stan (2005) y Alex (2010)	6
	Riesgo actual de las entidades federativas de la República Mexicana, ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales	8
	Simulaciones de lluvia y ciclones tropicales.....	13
	El modelo japonés de alta resolución	13
	Simulación de ciclones tropicales ante el cambio climático	15
	Peligro ante futuras temporadas de lluvias y ciclones tropicales.....	16
	Medidas de prevención y mitigación	21
	Conclusiones.....	21
	Bibliografía	22
	ANEXO.....	24
3.1	Los huracanes Stan (2005) y Alex (2010)	26
3.2	Lluvias durante la temporada ciclónica.....	27
3.3	Riesgo actual de las entidades federativas de la República Mexicana, ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales.....	30
3.4	Simulaciones de lluvia y ciclones tropicales	34
	3.4.1 El modelo japonés de alta resolución	34
3.5	Simulación de ciclones tropicales ante el cambio climático.....	36
3.6	Peligro ante futuras temporadas de lluvias y ciclones tropicales.....	38
3.7	Medidas de prevención y mitigación.....	40
3.8	Conclusiones	41
3.9	Referencias	43

1 INTRODUCCIÓN

La república mexicana recibe una precipitación media anual acumulada de 770 mm ; gran parte de ella ocurre de mayo a noviembre, asociada a sistemas meteorológicos como las ondas del este, ciclones tropicales, desprendimientos de la zona de convergencia intertropical, frentes fríos, el monzón de Norteamérica, además de sistemas convectivos de menor escala que se desarrollan localmente por forzamiento orográfico.

Las lluvias provocadas por el ingreso de ciclones tropicales, en cualquiera de sus etapas (depresión, tormenta tropical o huracán), adquieren suma importancia debido a su carácter de tipo torrencial, concentrándose en pocas horas o días y generando inundaciones, deslizamientos de tierra, de lodo y de rocas, causando afectaciones a la población y a la economía. Su impacto puede ser local, regional e incluso nacional. Sin embargo, debido al cambio climático, se espera que la intensidad de dichos eventos se modifique, por lo cual es importante considerar escenarios de cambio climático que permitan estimar la magnitud y tendencia de dichas variaciones, con el fin de prevenir posibles consecuencias adversas.



Figura 3.1. Imagen de satélite del huracán Alex del 30 de junio de 2010 (cortesía NASA). Daños provocados por las lluvias de Alex en Monterrey (cortesía Comisión Nacional del Agua).



Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático: Impacto de lluvias ciclónicas en México.



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

1.1 *Objetivo general*

El objetivo general de este proyecto es identificar el riesgo actual existente en la república mexicana ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales a través de un índice numérico que va de 1 (menor riesgo) hasta 8 (mayor riesgo).

Lluvias durante la temporada ciclónica

México es afectado por sistemas meteorológicos de latitudes medias, por sistemas tropicales y por la interacción entre ellos. Adicionalmente, existen otros factores importantes como la topografía, el uso de suelo y el efecto de las condiciones oceánicas. La combinación de todos estos factores a lo largo de treinta años se conoce como clima regional. Como resultado, en México se cuenta con una gran variedad de climas, entre los que destacan: cálidos subhúmedos, templados subhúmedos, secos y muy secos.

Aunque en algunas regiones llueve prácticamente todo el año, la temporada de lluvias se considera en general de mayo a noviembre. Estas lluvias de verano están asociadas principalmente a sistemas como: la zona de convergencia intertropical, los ciclones tropicales, las ondas del este, y el monzón de Norteamérica. Es importante notar que México se ve afectado por ciclones tropicales en ambas costas: Océano Atlántico y Océano Pacífico. En esta última se presenta la mayor actividad ciclogénica por unidad de área en el mundo.

De acuerdo a lineamientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la climatología de una zona debe contar con bases de datos climatológicas continuas de 30 años (OMM, 2007). Para obtener una climatología de precipitación acumulada anual de la república mexicana, es necesario recurrir a la información del Servicio Meteorológico Nacional mediante la Red de Datos de Estaciones Climatológicas para México (CLICOM), a través del sistema de consulta Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC).

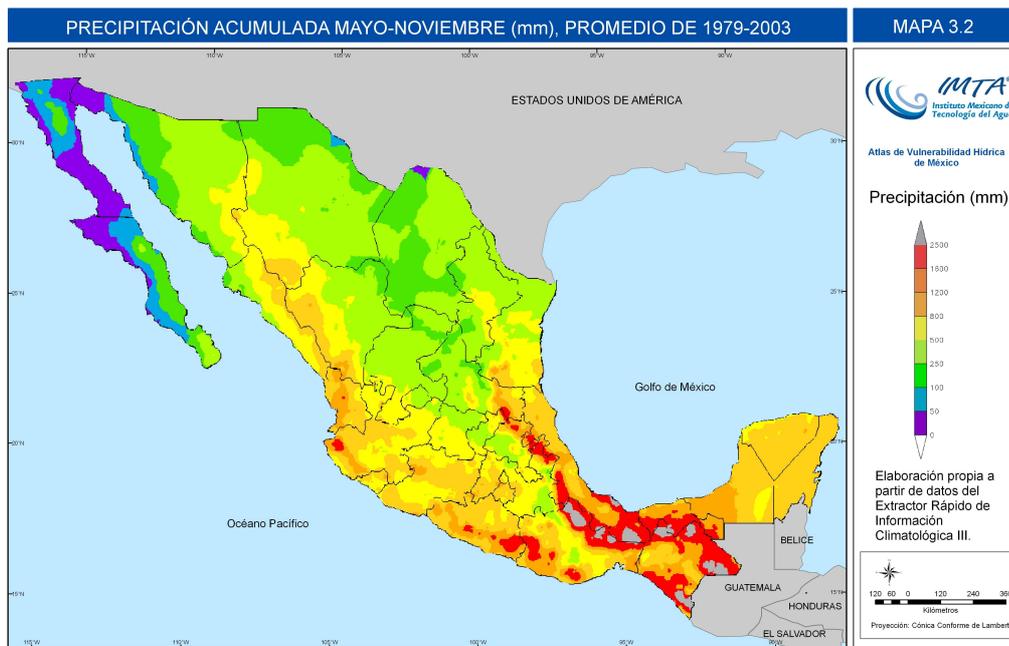
El ERIC facilita la extracción de la información del banco de datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional contenida en la base de datos CLICOM, tal como se encontraba en marzo del 2009, de acuerdo a la versión utilizada en este documento (ERIC III 2.0, 2009). El sistema ERIC, herramienta que se adapta a múltiples necesidades del usuario, contiene datos digitalizados de estaciones climatológicas de variables como precipitación, temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, evaporación, cobertura del cielo, tormentas eléctricas, granizo, niebla, etcétera. La base de datos está organizada para consultar las variables meteorológicas seleccionadas en un periodo determinado y dentro de una región o de todo el país, a fin de facilitar el uso de información climatológica para el entendimiento del clima en México.

El sistema ERIC puede obtener información de variables climatológicas en promedios, acumulados, máximos y mínimos para las regiones de interés.

Con esta herramienta se calculó el promedio correspondiente al periodo 1979-2003, descargando individualmente los datos de precipitación acumulada de cada mes y realizándose un promedio para el periodo mayo-noviembre. Como producto final se obtuvo una matriz de valores correspondientes a los datos de precipitación acumulada para el periodo de mayo a noviembre, promediado de 1979 a 2003, cuyos resultados se muestran en el mapa xx.

En el mapa xx se observa que los eventos con mayor precipitación acumulada ocurren principalmente en Veracruz, Tabasco y Chiapas, a lo largo de la Sierra Madre Oriental. También es posible observar que en el altiplano la magnitud de la precipitación es menor, mientras que los valores más bajos se presentan en la

península de Baja California. Los máximos de precipitación están parcialmente asociados a la actividad ciclónica, fenómenos que producen precipitaciones extremas en periodos cortos, sobre todo en zonas serranas cercanas a los océanos Atlántico y Pacífico.

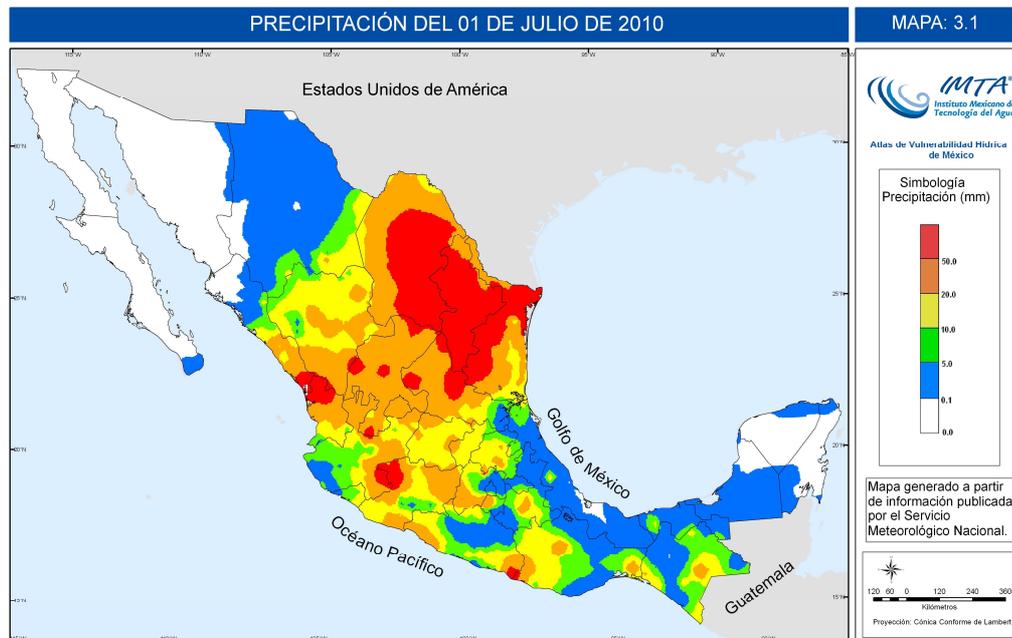


Mapa : Lámina media de lluvia (mm) para la República Mexicana calculada a partir de los reportes de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, para el período mayo a noviembre de los años 1979 a 2003.

Elaboración de mapas con ejemplos de lluvia acumulada ante el ingreso al país de los huracanes Stan (2005) y Alex (2010)

El 1 de octubre de 2005 se originó Stan como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, su desplazamiento fue hacia el oeste, cruzó la península de Yucatán y, justo antes de ingresar nuevamente al territorio mexicano por el sur de Veracruz, alcanzó la categoría 1 en la escala de huracanes Saffir-Simpson para posteriormente disiparse el 5 de octubre de 2005 sobre la región del istmo de Tehuantepec. Las precipitaciones que generó a su paso fueron de tipo torrencial, en especial en Veracruz y Chiapas, por ejemplo, el 4 de octubre se registró un acumulado de 307 mm en la estación El Novillero, Chiapas y el 5 de octubre en El Tejar, Veracruz, se registraron 357.5 mm. Las consecuencias de estas precipitaciones en Chiapas fueron considerables, principalmente en la región del Soconusco, donde se desgajaron cerros, se desbordaron varios ríos, afectando seriamente a la población con pérdidas humanas, heridos y damnificados.

En el 2010 el huracán Alex presentó un desarrollo muy similar a Stan, inició también como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, cruzó la península de Yucatán e ingresó al Golfo de México, donde se fortaleció hasta alcanzar la categoría 2 en la escala Saffir-Simpson para posteriormente, ingresar a Tamaulipas durante la noche del 30 de junio. Alex se disipó sobre San Luis Potosí la noche del 1 de julio. Las precipitaciones acumuladas a su paso dejaron 316.1 mm en Valle Hermoso, Tamaulipas, para el 30 de junio, y 389.3 mm en La Boca, Nuevo León, para el 1 de julio (mapa 3.1). Durante estos dos días, las estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey registraron precipitaciones acumuladas entre 388 y 510 mm (tabla 3.1), cuya magnitud es similar a la del valor promedio de precipitación que se acumula en un año. Los daños provocados por Alex abarcaron principalmente a Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con afectaciones tanto en la población, vías de comunicación, industrias, transporte y actividades económicas.



Mapa 3.1: Reporte de precipitación de la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, para el día 1 de julio de 2010.

Tabla 1.1. Datos de precipitación acumulada (mm) desde las ocho horas del 30 de junio hasta las 22:20 horas del 1 de julio del 2010, de nueve estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey, Nuevo León.

Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey

Estación	Clave	Precipitación acumulada (mm)
San Martín	SM-01	388.50
Mitras	MI-02	394.00
Cd. Universitaria	CU-03	328.75
Fierro	FE-04	453.00
Obispo	OB-05	463.00
Arroyo Seco	AS-06	588.00
Estanzuela	EZ-07	853.00
Protección Civil	PC-08	614.50
Obispo	OB-05	510.34

Riesgo actual de las entidades federativas de la República Mexicana, ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales

Para calcular el peligro y la vulnerabilidad actual por entidad federativa en México, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Se designaron cinco categorías: dos para el peligro y tres para la vulnerabilidad documentadas en una tabla para cada una de ellas. En estas tablas se ordenaron las 32 entidades federativas: al inicio de cada tabla se encuentran las entidades federativas cuya categoría contribuye en mayor medida al peligro o a la vulnerabilidad. Posteriormente se definieron índices numéricos para las entidades federativas, estableciéndose un índice con valor de 8 para cada uno de los primeros cuatro lugares de cada categoría, un índice de 7 para los lugares que van del 5 a al 8, de 6 para los lugares 9, 10, 11 y 12 y así sucesivamente hasta el valor del índice 1 para los lugares 29, 30, 31 y 32.

El origen de los valores resultantes de los índices es estrictamente cuantitativo, sin embargo el resultado se debe considerar de modo cualitativo, al radicar su utilidad en la determinación del valor relativo del riesgo de cada una de las entidades federativas.

Para evaluar el índice de peligro se calculó un promedio del índice de precipitación durante la temporada ciclónica (acumulado de mayo a noviembre y promediado en el período 1941-2005) y el índice de impacto de ciclones tropicales entre los años 1970 y 2008, para cada entidad federativa (tabla 3.2). Ambas bases de datos han sido publicadas en el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/>):

- La precipitación acumulada de mayo a noviembre sobre la república mexicana, representa los fenómenos asociados principalmente a la entrada de humedad de los océanos Atlántico y Pacífico a través de sistemas tropicales como la zona de convergencia intertropical, las ondas del este y los ciclones tropicales.

De acuerdo a las técnicas actuales de análisis, resulta complicado asignar el origen de una lluvia determinada a un fenómeno particular, ya que éstos coexisten en fronteras espaciales y temporales que no se pueden definir, debido a la evolución constante de las condiciones atmosféricas y al carácter de fluido que tienen las masas de aire.

- El Servicio Meteorológico Nacional ha publicado el nombre de las entidades federativas afectadas durante el ingreso o paso de ciclones tropicales, determinando el nombre y la categoría del ciclón durante el impacto inicial, el lugar de entrada a tierra, el período de afectación y el océano de origen del fenómeno. Esta información ha servido para cuantificar el índice de impacto de cada entidad federativa.

Tabla 3.2. Índices de precipitación e impacto de ciclones tropicales y su contribución al peligro.

Índice	Fuente de la información	Contribución al Peligro
Precipitación durante la temporada ciclónica	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%
Impacto de ciclones 1970-2008	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%

Para estimar la vulnerabilidad de cada entidad federativa se consideraron los índices de densidad de población (con una contribución del 50%), el índice de marginación (25% de contribución) y el producto interno bruto per cápita (25% de contribución):

- La densidad de población permite identificar el grado de exposición a la que se enfrentarán los habitantes de las zonas posiblemente afectadas por la temporada de lluvias y de ciclones tropicales.
- El índice absoluto de marginación permite diferenciar a las entidades federativas de acuerdo con el nivel global de las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación primaria, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios reducidos y las derivadas de la residencia en localidades pequeñas, aisladas y dispersas, como puede ser la falta de servicios de salud, equipamientos e infraestructura adecuada, lo cual conforma una precaria estructura de oportunidades que obstruyen el pleno desarrollo de las potencialidades humanas.
- El producto interno bruto (PIB) per cápita es muy utilizado como medida de bienestar de la población ya que ha permitido comparar el bienestar entre países, ya que representa, teóricamente, el valor de los bienes y servicios producidos en promedio por cada habitante de un país. En nuestro caso, el PIB per cápita se considera una medida de la resiliencia de la población ante la posible afectación por lluvias y ciclones tropicales; pues mientras mayor sea el PIB per cápita, mayor será la capacidad de los habitantes de sobreponerse a los efectos destructivos de los fenómenos meteorológicos.

La tabla 3.3 muestra la contribución relativa de los índices de densidad de población, marginación y PIB *per cápita*.

Tabla 3.3. Índices de densidad de población, marginación y el PIB per cápita.

Categoría	Fuente de la información	Contribución a la Vulnerabilidad
Densidad de población	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	50%
Índice de marginación	Consejo Nacional de Población	25%
PIB <i>per cápita</i>	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	25%

La tabla 3.4 muestra los índices de vulnerabilidad y peligro calculados según el procedimiento descrito para cada entidad federativa, ordenados de manera descendente. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicado por un índice más alto.

Tabla 3.4. Índices de vulnerabilidad y peligro para cada identidad federativa. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicado por un índice más alto.

Entidad	Índice de Vulnerabilidad
Tlaxcala	7.25
Puebla	6.75
Chiapas	6.5
Guerrero	6.5
Hidalgo	6.5
Veracruz	6.5
Estado de México	6.25
Guanajuato	6
Morelos	6
Michoacán	5.75
Oaxaca	5.5
Querétaro	5.25

Entidad	Índice de Peligro
Veracruz	7.5
Chiapas	7
Quintana Roo	7
Colima	6.5
Guerrero	6.5
Michoacán	6.5
Campeche	6
Jalisco	6
Oaxaca	6
Sinaloa	6
Yucatán	6
Nayarit	5.5

San Luis Potosí	5
Aguascalientes	4.75
Colima	4.75
Tabasco	4.75
Yucatán	4.75
Distrito Federal	4.5
Jalisco	4.5
Nayarit	4.5
Sinaloa	4.5
Zacatecas	4.25
Nuevo León	3
Tamaulipas	3
Baja California Norte	2.75
Campeche	2.75
Durango	2.5
Quintana Roo	2.5
Sonora	2
Coahuila	1.75
Baja California Sur	1.5
Chihuahua	1.25

Tabasco	5.5
Tamaulipas	5.5
Puebla	5
San Luis Potosí	5
Baja California Sur	4.5
Hidalgo	4
Estado de México	3.5
Morelos	3.5
Nuevo León	3.5
Sonora	3.5
Coahuila	3
Distrito Federal	3
Durango	3
Chihuahua	2.5
Querétaro	2.5
Aguascalientes	2
Baja California Norte	2
Guanajuato	2
Tlaxcala	2
Zacatecas	2

El riesgo fue calculado a partir de los índices de peligro y vulnerabilidad de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = \sqrt{\text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}}$$

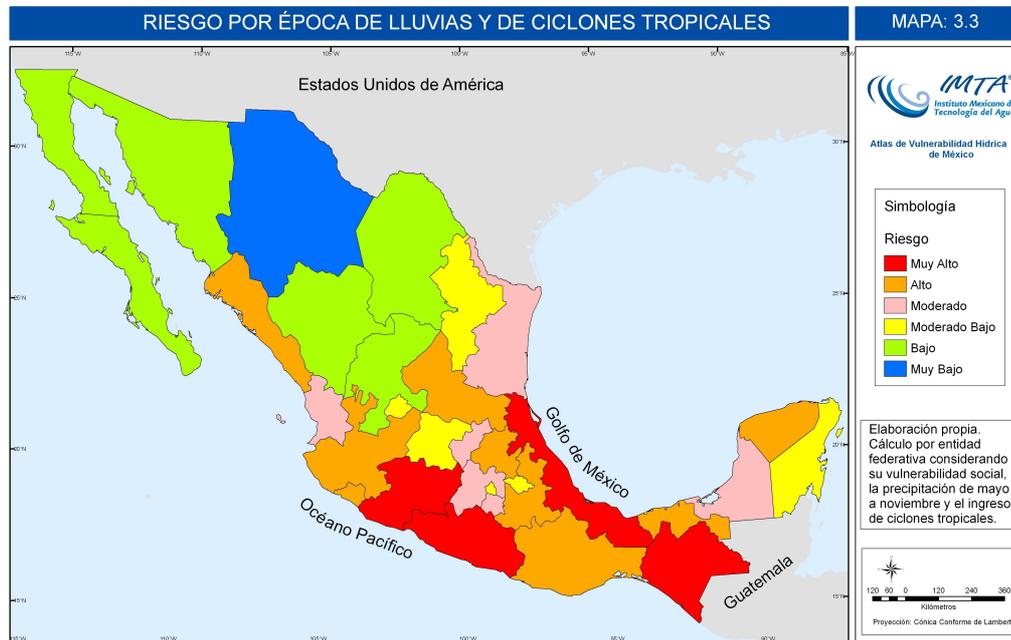
El operador raíz cuadrada se aplicó para obtener un rango de los valores del riesgo del 1 al 8, que es el rango de valores del peligro y la vulnerabilidad. El valor numérico del riesgo de cada entidad federativa se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Índices de riesgo en cada entidad federativa ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales.

Entidad	Índice de Riesgo
Veracruz	6.98
Chiapas	6.75
Guerrero	6.50
Michoacán	6.11
Puebla	5.81
Oaxaca	5.74

Colima	5.56
Yucatán	5.34
Jalisco	5.20
Sinaloa	5.20
Tabasco	5.11
Hidalgo	5.10
SLP	5.00
Nayarit	4.97
Estado de México	4.68
Morelos	4.58
Querétaro	4.39
Campeche	4.06
Tamaulipas	4.06
Tlaxcala	3.81
Distrito Federal	3.67
Quintana Roo	3.54
Guanajuato	3.46
Nuevo León	3.24
Aguascalientes	3.08
Zacatecas	2.92
Durango	2.74
Sonora	2.65
BCS	2.60
BCN	2.35
Coahuila	2.29
Chihuahua	1.77

El mapa 3.3 muestra el riesgo actual de las entidades federativas de la república mexicana ante la temporada de lluvias (mayo a noviembre) y el ingreso de ciclones tropicales. Las entidades con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Mientras Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es alterado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano Pacífico, como Oaxaca, Colima, Jalisco y Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. La entidad que presenta menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.



Mapa 3.3: Riesgo actual de los estados de la República Mexicana ante la temporada de lluvias (mayo a noviembre) y el ingreso de ciclones tropicales.

Simulaciones de lluvia y ciclones tropicales

El cambio climático tiene una influencia directa en los índices que cuantifican el peligro ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Debido a la escala espacial y temporal en la que ocurren los ciclones tropicales, se escogió al modelo de clima japonés de alta resolución en sus simulaciones del escenario A1B, como el más adecuado para estudiar las modificaciones que estos fenómenos pueden tener ante el cambio climático.

El modelo japonés de alta resolución

El modelo de clima japonés de alta resolución fue creado por el Instituto de Investigaciones Meteorológicas de la Agencia Meteorológica Japonesa (Oouchi *et al.*, 2006), tiene una resolución horizontal que se conoce técnicamente como TL959, equivalente a unos 20 km. Calcula las variables meteorológicas en sesenta niveles verticales. Su origen fue un modelo de predicción numérica del tiempo atmosférico adaptado a simulaciones climáticas (Mizuta *et al.* 2006).

El modelo climático se ejecuta en la computadora conocida como *Simulador Terrestre*, fabricada por NEC. Este equipo tiene una considerable capacidad de memoria y de velocidad de procesamiento de datos, siendo en la actualidad una de las más poderosas en el mundo. La computadora se encuentra instalada en el Instituto JAMSTEC Yokohama y opera desde marzo de 2002 para el estudio de las ciencias terrestres.

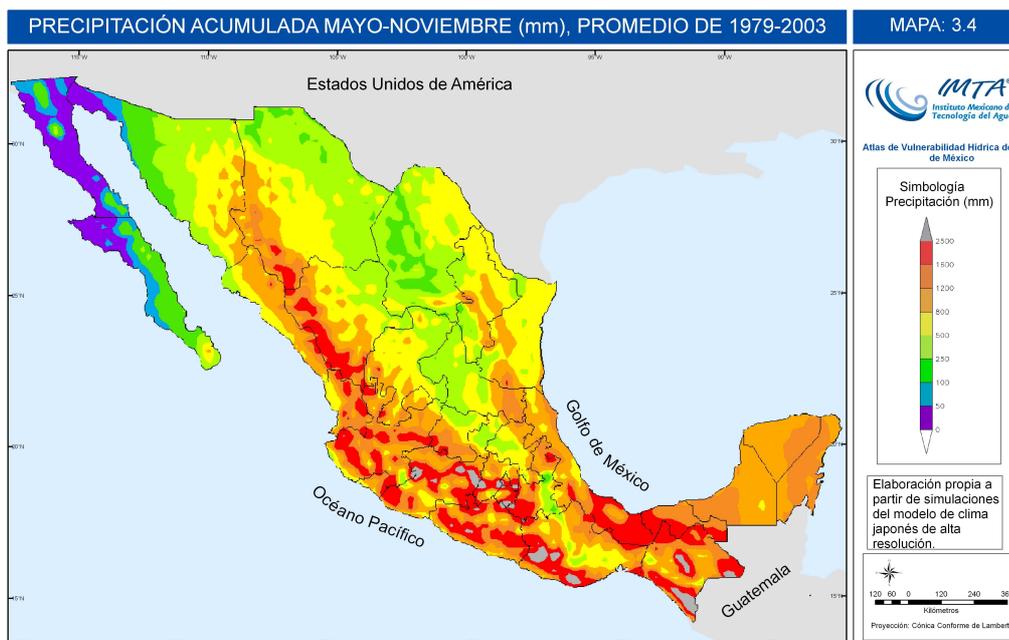
La gran ventaja de trabajar con un modelo de alta resolución radica en su capacidad de reproducción de la dinámica de los ciclones tropicales como un conjunto de

sistemas convectivos de escala media y como una perturbación de escala sinóptica. Los ciclones simulados por este modelo son el resultado de una formación espontánea (sin forzamientos artificiales) dentro del sistema climático.

Dentro de un escenario climático más cálido, debido a los gases de efecto invernadero, el uso de una malla de 20 km provee información más confiable asociada a la formación, evolución y disipación de ciclones tropicales que modelos de escala más burda.

La base de datos del modelo japonés presenta resultados para tres periodos: *actual* (1979-2003), *futuro cercano* (2015-2039) y *finales del siglo* (2075-2099). La información en cada periodo consta de variables climatológicas (temperatura, precipitación y viento) con una resolución temporal de seis horas. Se realizó el promedio de la lluvia acumulada para la temporada de lluvias y ciclones tropicales para el periodo *actual* (1979-2003), identificando los valores más elevados de precipitación acumulada sobre los ejes montañosos occidental y oriental de México, así como sobre la región central del país.

Para corroborar la calidad de la modelación resultante, se pueden analizar simultáneamente los resultados del modelo japonés para la precipitación acumulada de mayo a noviembre promediada entre 1979 a 2003 (mapa 3.4) y la misma información correspondiente a la precipitación histórica (mapa 3.2). Como resultado, se observa que el modelo es capaz de reproducir la variabilidad espacial observada, esto es, máximos a lo largo de las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, valores relativamente menores en el altiplano, y los valores mínimos en la península de Baja California; sin embargo, el modelo japonés tiende a intensificar los valores de la lluvia sobre la Sierra Madre Occidental, eje volcánico central de México y sureste del país, mientras que en la Sierra Madre Oriental, la precipitación histórica observada es mayor.



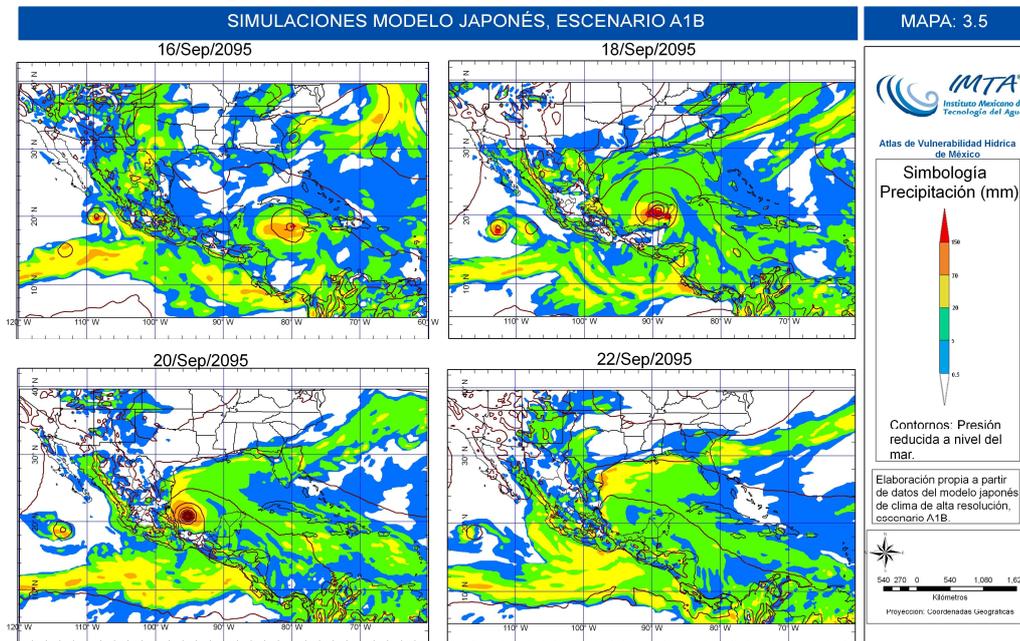
Mapa 3.4: Lámina media de lluvia (mm) para la República Mexicana calculada a partir de simulaciones del modelo japonés de alta resolución, para el período mayo a noviembre de los años 1979 a 2003.

Simulación de ciclones tropicales ante el cambio climático

La mayor parte de los modelos climáticos que han estudiado la influencia que tiene el calentamiento global sobre la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales, son de una resolución relativamente alta (de alrededor de 100 km). Estos modelos sugieren una tendencia hacia una menor frecuencia en la ocurrencia de ciclones tropicales (Sugi *et al.*, 2002). Sin embargo, la resolución de estos modelos aún es insuficiente para representar la estructura de los ciclones tropicales reales. Por ello, los modelos climáticos de más alta resolución tienen ventajas sobre modelos con menor detalle espacial. La principal desventaja es que aún es muy limitado el número de simulaciones climáticas con resoluciones comparables a las obtenidas con el modelo japonés (de alrededor de 20 km en dirección horizontal).

A manera de ejemplo, a continuación se describe la evolución de uno de los ciclones tropicales generados por el modelo japonés en el escenario A1B, del 12 al 21 de septiembre de 2095:

El ciclón se genera a partir de una onda del este que cruza el arco de las Antillas menores el 12 de septiembre. Dicha onda genera una circulación ciclónica el día 14 de septiembre al sur de la República Dominicana. Para el 16 de septiembre (mapa 3.5), el ciclón se intensifica sobre aguas del mar Caribe, continuando con un movimiento hacia el oeste. Una medida de la intensificación del ciclón es el grado de concentración de los contornos de presión reducida a nivel del mar, mientras mayor sea su concentración, mayor es la velocidad del viento del fenómeno. Para el día 17 ingresan las primeras bandas de lluvia a Quintana Roo y Yucatán. La mayor parte del ciclón se encuentra, durante el 18 de septiembre, sobre la península de Yucatán, dejando precipitaciones acumuladas en 24 horas de tipo torrencial (superiores a los 150 mm). Para el 19 de septiembre el ciclón se intensifica de manera considerable sobre las aguas de la Sonda de Campeche mientras se forman grandes bandas que cruzan el Golfo de México y el istmo de Tehuantepec. El 20 de septiembre, el ciclón se intensifica de modo considerable y sus bandas externas tocan la costa norte de Veracruz. El 21 de septiembre el ciclón ha ingresado por segunda ocasión a la república mexicana, dejando lluvias torrenciales sobre Hidalgo y el norte de Veracruz. Posteriormente el 22 de septiembre, los remanentes del fenómeno se han movido a la frontera entre Texas y Tamaulipas, pasando a formar parte de un sistema frontal, mientras que al mismo tiempo dejan lluvias entre moderadas a fuertes sobre la mayor parte del país.



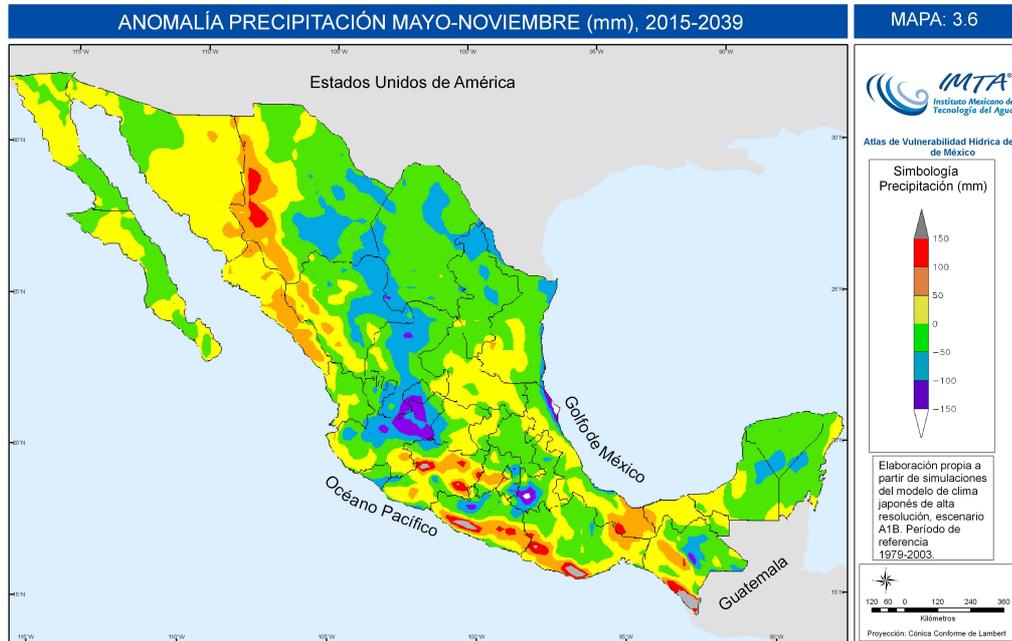
Mapa 3.5: Simulaciones de la precipitación acumulada (colores sólidos) y de la presión a nivel del mar (contornos) ejecutadas por el modelo japonés de alta resolución, para los días: 16, 18, 20 y 22 de septiembre de 2099 respectivamente, escenario A1B.

Las simulaciones de este huracán en particular sugieren que el modelo es capaz de capturar los campos de precipitación y presión atmosférica con una resolución adecuada para el análisis del impacto de estos eventos.

Peligro ante futuras temporadas de lluvias y ciclones tropicales

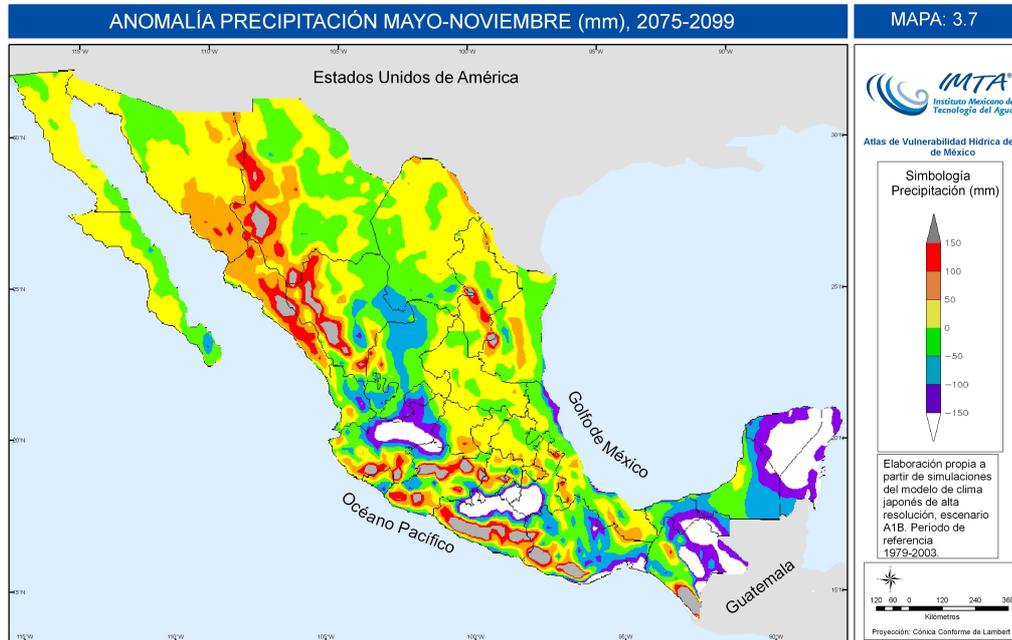
Una estimación de los peligros futuros ante lluvias y ciclones tropicales para el escenario de cambio climático A1B, se ha realizado con la ayuda de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución, además se calcularon las anomalías de precipitación sobre la república mexicana durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales, para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 con respecto al periodo de referencia (1979-2003). El procedimiento consiste en estimar el valor promedio y su desviación con respecto a lo que el mismo modelo simula en el periodo 1979-2003, para lo cual se calculan las anomalías, que son una estimación de los cambios que se esperan en el futuro.

En el mapa 3.6 se muestra la anomalía de precipitación del período 2015-2039; observándose anomalías mayormente positivas para las zonas costeras de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, así como para el centro de Michoacán, el norte de la Sierra Madre Occidental y el istmo de Tehuantepec. Las anomalías negativas más significativas se encuentran sobre Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y el sur de Puebla. La zona noreste de la república, la península de Yucatán, el norte de Chiapas y sur de Tabasco también muestra anomalías negativas.



Mapas 3.6: Anomalía de precipitación acumulada (mm) para la República Mexicana calculada a partir de simulaciones del modelo japonés de alta resolución, para el período mayo a noviembre de 2015-2039, escenario A2.

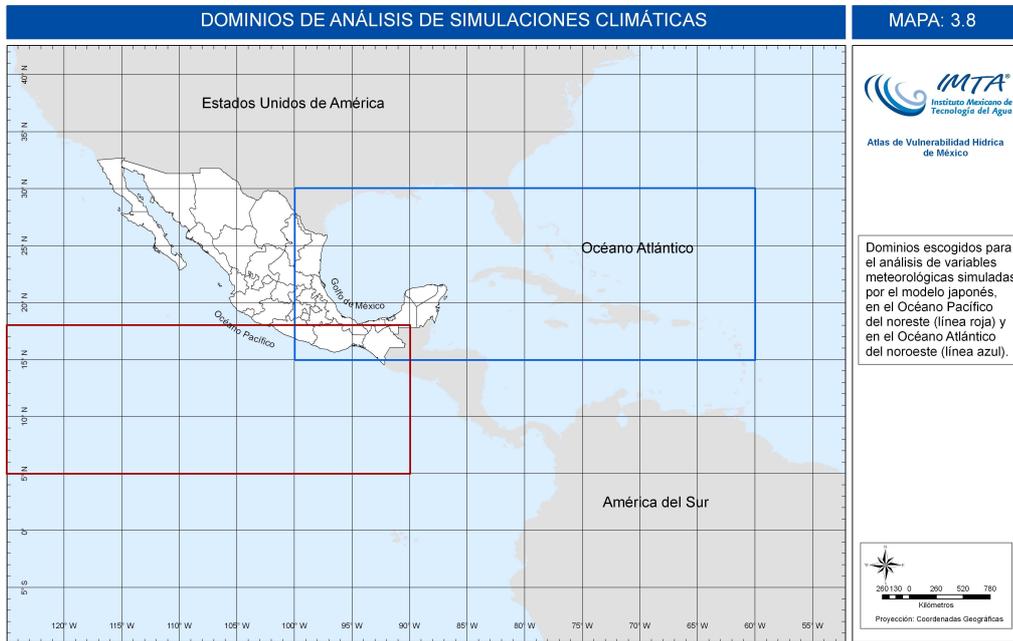
La anomalía de precipitación para el período 2075-2099 se muestra en el mapa 3.7, donde los patrones son similares al período 2015-3039 (mapa 3.6), sin embargo la magnitud ha incrementado considerablemente. Anomalías positivas superiores a los 150 mm se encuentran sobre buena parte de la Sierra Madre del Sur y sobre el norte de la Sierra Madre Occidental. Anomalías menores a -150 mm se observan sobre amplias regiones de Jalisco, la península de Yucatán, el norte de Chiapas, Morelos, sur de Puebla y norte de Guerrero. Por otra parte, la anomalía de precipitación sobre la región fronteriza del noreste ha pasado de negativa a positiva.



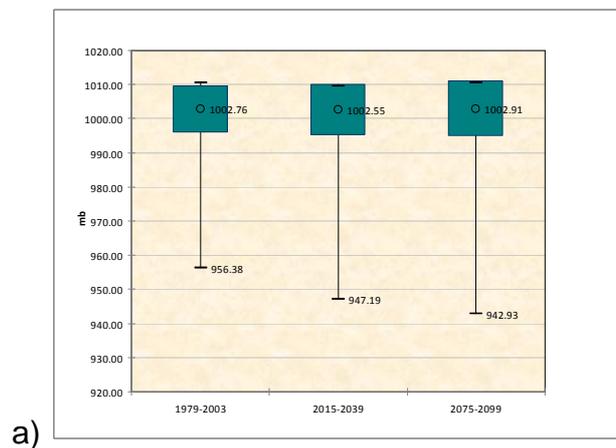
Mapas 3.7: Anomalía de precipitación acumulada (mm) para la República Mexicana calculada a partir de simulaciones del modelo japonés de alta resolución, para el período mayo a noviembre de 2075-2099, escenario A2; respecto a 1979-2003.

Para realizar el análisis de los posibles cambios futuros en la actividad ciclónica se utilizan dos indicadores de magnitud de los ciclones tropicales: presión atmosférica y viento máximo en superficie, ambos del modelo japonés.

Los ciclones tropicales están asociados a centros de baja presión atmosférica a nivel del mar, alrededor de los cuales giran vientos que pueden llegar a tener más de 100 km/h de intensidad. Para determinar la variabilidad de la presión mínima a nivel del mar y del viento máximo en superficie que se asocia directamente a la actividad de ciclones tropicales, se escogieron dos regiones: el Océano Pacífico del noreste y el Atlántico del noroeste. Las coordenadas geográficas de la región Pacífico del noreste van desde 5° a 18° de latitud norte y desde 90° hasta 125° de longitud oeste; las coordenadas de la región del Atlántico noroeste van desde 15° a 30° de latitud norte y de 60° a 100° de longitud oeste (mapa 3.8). Las figuras 3.2 y 3.3 muestran diagramas de caja que representan la variabilidad del valor mínimo de presión atmosférica y del valor máximo del viento en superficie, respectivamente. Para ambas regiones oceánicas y para los periodos 1979-2003, 2015-2039 y 2075-2099 se indican los valores máximos, mínimos y promedios de cada periodo, el tamaño de la caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.



Mapa 3.8: Dominius escogidos para el análisis de variables meteorológicas simuladas por el modelo japonés: Pacífico del noreste, Golfo de México y Mar Caribe.



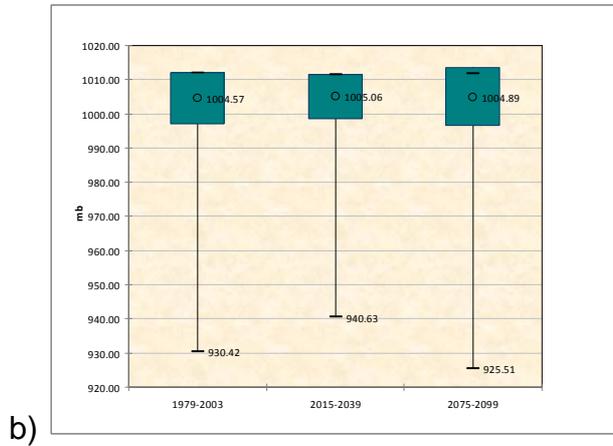


Figura 3.2. Variabilidad de la presión mínima en superficie para los tres periodos de estudio en los dominios del Pacífico del noreste (a) y Atlántico del noroeste (b). Se muestran los valores máximos y mínimos extremos (líneas) y valores promedio (círculos). La caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

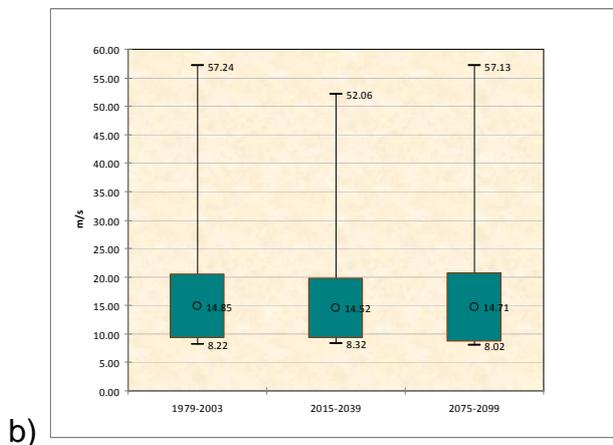
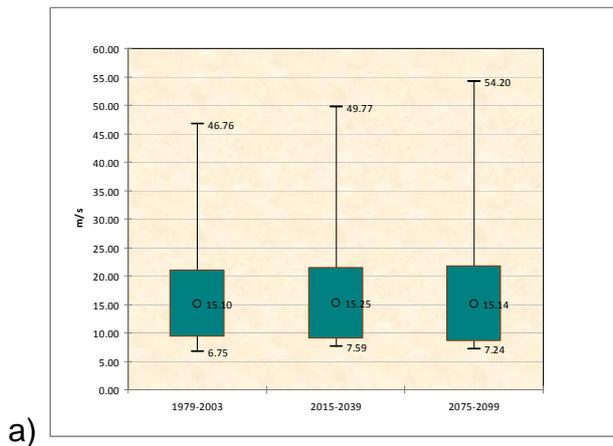


Figura 3.3. Variabilidad del viento máximo a dos metros de la superficie para los tres periodos de estudio en los dominios del Pacífico del noreste (a) y Atlántico del noroeste (b). Se muestran

los valores máximos y mínimos extremos (líneas) y valores promedio (círculos). La caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

La variabilidad de la presión mínima en superficie sobre el Océano Pacífico del noreste se muestra en la figura 3.2a, la cual presenta una tendencia de disminución en los mínimos extremos, mientras que la figura 3.3a muestra una intensificación de los eventos extremos de viento, sugiriendo un incremento en la magnitud de los huracanes más intensos. Por otra parte se observa que en el Océano Atlántico del noroeste las intensidades se mantienen dentro de los rangos del período de referencia (figuras 3.2b y 3.3b).

Medidas de prevención y mitigación

Existen diversas medidas que se pueden tomar antes de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Se debe contar con mapas de riesgo suficientemente detallados que permitan dirigir los recursos necesarios para una mejor preparación, como es la educación, identificación de rutas de evacuación, etcétera. El análisis de riesgos también permite decidir sobre el tipo de esquema financiero que es conveniente para enfrentar posibles eventos como puede ser aseguramiento de bienes y estructuras.

Ante un escenario de aumento en la magnitud de huracanes más intensos en el Océano Pacífico se sugiere implementar medidas de prevención y mitigación como las siguientes: operar sistemas de pronóstico estacional del clima, sistemas de pronóstico meteorológico de mediano y corto plazo, actualización y continuidad de atlas de riesgos hidrometeorológicos, implementar sistemas de alerta temprana, esquemas financieros de administración de riesgo, planes de respuesta, así como realizar una adecuada planeación del uso del suelo para el establecimiento futuro de asentamientos humanos, zonas agrícolas, áreas recreativas y centros de desarrollo industrial.

Conclusiones

En este trabajo se ha estimado de forma cuantitativa que los estados de la república mexicana con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, mientras que Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es afectado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano Pacífico, como son Oaxaca, Colima, Jalisco y Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. El estado de menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.

A través de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución se estima que el cambio climático ocasionará modificaciones considerables a los regímenes de

precipitación sobre el país, así como a la intensidad y variabilidad con que se presentan los ciclones tropicales en los océanos que rodean a México. Por estos motivos, se hace necesario el comenzar a tomar medidas de adaptación que permitan afrontar de manera adecuada, las amenazas de fenómenos extremos de precipitación. La mayor parte de las medidas que se pueden tomar para este fin, consisten en reducir la vulnerabilidad de la población ante tales eventos, valiéndonos de una mayor y mejor preparación, incluyendo la construcción de infraestructura hidráulica de protección.

El análisis de riesgos debe ser un proceso dinámico el cual actualice los índices de acuerdo a la información más reciente. Asimismo, el riesgo debe ser calculado de manera consistente a largo, mediano y corto plazos, e inclusive en tiempo real para situaciones con necesidad de atención inmediata.

Como una posibilidad de trabajo a futuro, se sugiere extender los estudios de evaluación de riesgo ante lluvias y ciclones tropicales considerando los aspectos siguientes:

Hacer la evaluación a escala municipal.

Incorporar nuevas componentes para el cálculo de la vulnerabilidad y el peligro, algunas de las que pueden ser de mayor importancia son los aspectos hidrológicos, por ejemplo, definiendo la parte de la población que se encuentra asentada en zonas inundables; la estimación de zonas de alta exposición a vientos extremos; la determinación de las regiones que sean susceptibles de deslaves o desgajamientos aún cuando sean zonas relativamente libres de inundación.

Realizar estimaciones detalladas de las condiciones socioeconómicas futuras que ayuden a determinar la vulnerabilidad de la población ante los distintos peligros asociados al cambio climático.

Bibliografía

- HUBP J. H., MOSHE I., *Desastres Naturales en América Latina*. Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 2002.
- IMTA, *Extractor Rápido de Información Climatológica III 2.0*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2009.
- IPCC. 2007. *Fourth Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat. Geneva, Switzerland. <http://www.ipcc.ch/>
- MIZUTA, R., OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., NODA, A., KATAYAMA, K., YUKIMOTO, S., HOSAKA M., KUSUNOKI, S., KAWAI, H., AND NAKAGAWA, M., 20-Km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165-185, 2006.
- OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., YOSHIMURA, J., MIZUTA, R., KUSUNOKI, S., AND NODA, A., Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 84, 2, 259-276, 2006.
- SUGI, M., NODA, A., & SATO, N., Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 249-272, 2002.



**Atlas de vulnerabilidad hídrica de México
ante el cambio climático: Impacto de
lluvias ciclónicas en México.**



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

YUSUF, A. A., & FRANCISCO, H., Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia, EEPSEA Special and Technical Paper tp200901s1, Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), 2009.

Agradecimientos

Al Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara, por sus valiosos comentarios sobre la elaboración de este trabajo. Al M. en C. Alberto Balancán Soberanis, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su participación en el trabajo de coordinación del Proyecto.

ANEXO

Capítulo 3. Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México

Ricardo Prieto González, Roberto Ramírez Villa, Virginia Edith Cortés Hernández, María Eugenia Maya Magaña

Resumen

Con el propósito de identificar el riesgo actual que existe ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales en cada uno de los estados de la república mexicana, se calculó un índice de riesgo numérico que combina factores de amenaza y vulnerabilidad. El rango del índice de riesgo va desde 1 hasta 8, y se ha identificado al estado de Chihuahua como el de menor riesgo con un índice de 1.77, mientras que los estados con mayor riesgo son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán con índices de 6.98, 6.75, 6.50 y 6.11, respectivamente.

Con la ayuda de resultados del modelo japonés de clima de alta resolución, se calculó la precipitación sobre la república mexicana para el periodo de referencia (1979-2003) y para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 en el escenario climático A1B, determinando las anomalías de precipitación sobre el país durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Los resultados muestran que regiones costeras de México (especialmente las que colindan con el Océano Pacífico) son susceptibles de un aumento en la precipitación

durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales, mientras que amplias zonas del interior muestran una disminución.

Para determinar la variabilidad de la presión mínima y del viento máximo en superficie que se asocia a la actividad de ciclones tropicales, se escogieron dos regiones: el Océano Pacífico del noreste y el Océano Atlántico del noroeste. Los resultados muestran que sobre la primera región existe una intensificación de los eventos extremos de viento, mientras que en la segunda las intensidades se mantienen dentro de los rangos del período de referencia.

Introducción

La república mexicana recibe una media anual de precipitación acumulada de 770 mm; gran parte de ella ocurre, de mayo a noviembre, asociada a sistemas meteorológicos como las ondas del este, ciclones tropicales, desprendimientos de la zona de convergencia intertropical, frentes fríos, el monzón de Norteamérica, además de sistemas convectivos de menor escala que se desarrollan localmente por forzamiento orográfico.

Las lluvias provocadas por el ingreso de ciclones tropicales, en cualquiera de sus etapas (depresión, tormenta tropical o huracán), adquieren suma importancia debido a su carácter de tipo torrencial, concentrándose en pocas horas o días y generando inundaciones, deslizamientos de tierra, de lodo y de rocas, causando afectaciones a la población y a la economía. Su impacto puede ser local, regional e incluso nacional. Sin embargo, debido al cambio climático, se espera que la intensidad de dichos eventos se modifique, por lo

cual es importante considerar escenarios de cambio climático que permitan estimar la magnitud y tendencia de dichas variaciones, con el fin de prevenir posibles consecuencias adversas.

Figura 3.1

3.1 Los huracanes Stan (2005) y Alex (2010)

El 1 de octubre de 2005 se originó Stan como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, su desplazamiento fue hacia el oeste, cruzó la península de Yucatán y, justo antes de ingresar nuevamente al territorio mexicano por el sur de Veracruz, alcanzó la categoría 1 en la escala de huracanes Saffir-Simpson; posteriormente se disipó el 5 de octubre de 2005 sobre la región del istmo de Tehuantepec. Las precipitaciones que generó a su paso fueron de tipo torrencial, en especial en Veracruz y Chiapas, por ejemplo, el 4 de octubre se registró un acumulado de 307 mm en la estación El Novillero, Chiapas y el 5 de octubre en El Tejar, Veracruz, se registraron 357.5 mm. Las consecuencias de estas precipitaciones en Chiapas fueron considerables, principalmente en la región del Soconusco, donde se desgajaron cerros, se desbordaron varios ríos afectando seriamente a la población con pérdidas humanas, heridos y damnificados.

En el 2010 el huracán Alex presentó un desarrollo muy similar a Stan. Se inició también como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, cruzó la

península de Yucatán e ingresó al Golfo de México, donde se fortaleció hasta alcanzar la categoría 2 en la escala Saffir-Simpson para, posteriormente, ingresar a Tamaulipas durante la noche del 30 de junio. Alex se disipó sobre San Luis Potosí la noche del 1 de julio. Las precipitaciones acumuladas a su paso dejaron 316.1 mm en Valle Hermoso, Tamaulipas, para el 30 de junio, y 389.3 mm en La Boca, Nuevo León, para el 1 de julio (mapa 3.1). En esos dos días, las estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey registraron precipitaciones acumuladas entre 388 y 510 mm (tabla 3.1), cuya magnitud es similar a la del valor promedio de precipitación que se acumula en un año. Los daños provocados por Alex abarcaron principalmente a Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con afectaciones tanto en la población, vías de comunicación, industrias, transporte y actividades económicas.

Mapa 3.1

Tabla 3.1

3.2 Lluvias durante la temporada ciclónica

Por la latitud en que se encuentra, México es afectado por sistemas meteorológicos de latitudes medias, por sistemas tropicales y por la interacción entre ellos. Adicionalmente, existen otros factores importantes como la topografía, el uso de suelo y el efecto de las condiciones oceánicas. La combinación de todos estos factores a lo largo de treinta años se conoce como clima regional. Como resultado, en México se cuenta con una gran variedad de

climas, entre otros: cálidos subhúmedos, templados subhúmedos, secos y muy secos.

Aunque en algunas regiones llueve prácticamente todo el año, la temporada de lluvias se considera de mayo a noviembre. Estas lluvias de verano están principalmente asociadas a los siguientes sistemas: zona de convergencia intertropical, ciclones tropicales, ondas del este, y monzón de Norteamérica. Es importante notar que México se ve afectado por ciclones tropicales por ambas costas: la del Océano Atlántico y la del Océano Pacífico. En esta última se presenta la mayor actividad ciclogénica por unidad de área en el mundo.

Para estudiar la precipitación registrada sobre la república mexicana, es necesario recurrir a la información del Servicio Meteorológico Nacional mediante la Red de Datos de Estaciones Climatológicas para México (CLICOM), a través del sistema de consulta Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC).

El ERIC facilita la extracción de la información del banco de datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional contenida en la base de datos CLICOM, tal como se encontraba en marzo del 2009, de acuerdo a la versión utilizada para este documento (ERIC III 2.0, 2009). El sistema ERIC, herramienta que se adapta a múltiples necesidades del usuario, contiene datos digitalizados de estaciones climatológicas de variables como precipitación, temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, evaporación, cobertura del cielo, tormentas eléctricas, granizo, niebla, etcétera. La base de datos está organizada para consultar las variables meteorológicas seleccionadas en un

periodo determinado y dentro de una región o de todo el país, a fin de facilitar el uso de información climatológica para el entendimiento del clima en México.

El sistema ERIC puede obtener información de variables climatológicas a manera de promedios, acumulados, máximos y mínimos para las regiones de interés. Con esta herramienta se calculó el promedio correspondiente al periodo 1979-2003, descargando individualmente los datos de precipitación acumulada de cada mes y realizándose un promedio para el periodo mayo-noviembre. Como producto final se obtuvo una matriz de valores correspondientes a los datos de precipitación acumulada para el periodo de mayo a noviembre, promediado de 1979 a 2003, y a partir de estos resultados se elaboró el mapa 3.2.

En el mapa 3.2 es posible notar que los eventos de mayor precipitación acumulada ocurren principalmente en Veracruz, Tabasco y Chiapas, a lo largo de la Sierra Madre Oriental. También es posible observar que en el altiplano la magnitud de la precipitación es menor, mientras que los valores más bajos se presentan en la península de Baja California. Los máximos de precipitación están parcialmente asociados a la actividad ciclónica, fenómenos que producen precipitaciones extremas en periodos cortos, sobre todo en zonas serranas cercanas a los océanos Atlántico y Pacífico.

3.3 Riesgo actual de las entidades federativas de la República Mexicana, ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales

Para calcular el peligro y la vulnerabilidad actual por entidad federativa en México, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Se designaron cinco categorías: dos para el peligro y tres para la vulnerabilidad documentadas en una tabla para cada una de ellas. En estas tablas se ordenaron las 32 entidades federativas: al inicio de cada tabla se encuentran las entidades federativas cuya categoría contribuye en mayor medida al peligro o a la vulnerabilidad. Posteriormente se definieron índices numéricos para las entidades federativas, estableciéndose un índice con valor de 8 para cada uno de los primeros cuatro lugares de cada categoría, un índice de 7 para los lugares que van del 5 a al 8, de 6 para los lugares 9, 10, 11 y 12 y así sucesivamente hasta el valor del índice 1 para los lugares 29, 30, 31 y 32.

El origen de los valores resultantes de los índices es estrictamente cuantitativo, sin embargo el resultado se debe considerar de modo cualitativo, al radicar su utilidad en la determinación del valor relativo del riesgo de cada una de las entidades federativas.

Para evaluar el índice de peligro se calculó un promedio del índice de precipitación durante la temporada ciclónica (acumulado de mayo a noviembre y promediado en el período 1941-2005) y el índice de impacto de ciclones tropicales entre los años 1970 y 2008, para cada entidad federativa (tabla 3.2). Ambas bases de datos han sido publicadas en el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/>):

- La precipitación acumulada de mayo a noviembre sobre la república mexicana, representa los fenómenos asociados principalmente a la entrada de humedad de los océanos Atlántico y Pacífico a través de sistemas tropicales como la zona de convergencia intertropical, las ondas del este y los ciclones tropicales. De acuerdo a las técnicas actuales de análisis, resulta complicado asignar el origen de una lluvia determinada a un fenómeno particular, ya que éstos coexisten en fronteras espaciales y temporales que no se pueden definir, debido a la evolución constante de las condiciones atmosféricas y al carácter de fluido que tienen las masas de aire.
- El Servicio Meteorológico Nacional ha publicado el nombre de las entidades federativas afectadas durante el ingreso o paso de ciclones tropicales, determinando el nombre y la categoría del ciclón durante el impacto inicial, el lugar de entrada a tierra, el período de afectación y el océano de origen del fenómeno. Esta información ha servido para cuantificar el índice de impacto de cada entidad federativa.

Tabla 3.2

Para estimar la vulnerabilidad de cada entidad federativa se consideraron los índices de densidad de población (con una contribución del 50%), el índice de marginación (25% de contribución) y el producto interno bruto per cápita (25% de contribución):

- La densidad de población permite identificar el grado de exposición a la que se enfrentarán los habitantes de las zonas posiblemente afectadas por la temporada de lluvias y de ciclones tropicales.
- El índice absoluto de marginación permite diferenciar a las entidades federativas de acuerdo con el nivel global de las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación primaria, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios reducidos y las derivadas de la residencia en localidades pequeñas, aisladas y dispersas, como puede ser la falta de servicios de salud, equipamientos e infraestructura adecuada, lo cual conforma una precaria estructura de oportunidades que obstruyen el pleno desarrollo de las potencialidades humanas.
- El producto interno bruto (PIB) per cápita es muy utilizado como medida de bienestar de la población ya que ha permitido comparar el bienestar entre países, dado que representa, teóricamente, el valor de los bienes y servicios producidos en promedio por cada habitante de un país. En nuestro caso, el PIB per cápita se considera una medida de la resiliencia de la población ante la posible afectación por lluvias y ciclones tropicales; pues mientras mayor sea el PIB per cápita, mayor será la capacidad de los habitantes de sobreponerse a los efectos destructivos de los fenómenos meteorológicos.

La tabla 3.3 muestra la contribución relativa de los índices de densidad de población, marginación y PIB *per cápita*.

Tabla 3.3

La tabla 3.4 muestra los índices de vulnerabilidad y peligro calculados según el procedimiento descrito para cada entidad federativa, ordenados de manera descendente. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicado por un índice más alto.

Tabla 3.4

El riesgo fue calculado a partir de los índices de peligro y vulnerabilidad de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = \sqrt{\text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}}$$

El operador raíz cuadrada se aplicó para obtener un rango de los valores del riesgo del 1 al 8, que es el rango de valores del peligro y la vulnerabilidad. El valor numérico del riesgo de cada entidad federativa se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

El mapa 3.3 muestra el riesgo actual de las entidades federativas de la república mexicana ante la temporada de lluvias (mayo a noviembre) y el ingreso de ciclones tropicales. Las entidades con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Mientras Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es alterado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano

Pacífico, como Oaxaca, Colima, Jalisco y Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. La entidad que presenta menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.

Mapa 3.3

3.4 Simulaciones de lluvia y ciclones tropicales

El cambio climático tiene una influencia directa en los índices que cuantifican el peligro ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Debido a la escala espacial y temporal en la que ocurren los ciclones tropicales, se escogió al modelo de clima japonés de alta resolución en sus simulaciones del escenario A1B, como el más adecuado para estudiar las modificaciones que estos fenómenos pueden tener ante el cambio climático.

3.4.1 El modelo japonés de alta resolución

El modelo de clima japonés de alta resolución fue creado por el Instituto de Investigaciones Meteorológicas de la Agencia Meteorológica Japonesa (Oouchi *et al.*, 2006), tiene una resolución horizontal que se conoce técnicamente como TL959, equivalente a unos 20 km. Calcula las variables meteorológicas en sesenta niveles verticales. Su origen fue un modelo de predicción numérica del tiempo atmosférico adaptado para simulaciones climáticas (Mizuta *et al.* 2006).

El modelo climático se ejecuta en la computadora conocida como *Simulador Terrestre*, fabricada por NEC. Este equipo tiene una considerable capacidad de memoria y de velocidad de procesamiento de datos, siendo en la actualidad una de los más poderosos en el mundo. La computadora se encuentra

instalada en el Instituto JAMSTEC Yokohama y opera desde marzo de 2002 para el estudio de las ciencias terrestres.

La gran ventaja de trabajar con un modelo de alta resolución radica en su capacidad de reproducción de la dinámica de los ciclones tropicales como un conjunto de sistemas convectivos de escala media y como una perturbación de escala sinóptica. Los ciclones simulados por este modelo son el resultado de una formación espontánea (sin forzamientos artificiales) dentro del sistema climático. Dentro de un escenario climático más cálido, debido a los gases de efecto invernadero, el uso de una malla de 20 km provee información más confiable asociada a la formación, evolución y disipación de ciclones tropicales que modelos de escala más burda.

La base de datos del modelo japonés presenta resultados para tres periodos: *actual* (1979-2003), *futuro cercano* (2015-2039) y *finales del siglo* (2075-2099).

La información en cada periodo consta de variables climatológicas (temperatura, precipitación y viento) con una resolución temporal de seis horas.

Se realizó el promedio de la lluvia acumulada para la temporada de lluvias y ciclones tropicales para el periodo *actual* (1979-2003), identificando los valores más elevados de precipitación acumulada sobre los ejes montañosos occidental y oriental de México, así como sobre la región central del país.

Para corroborar la calidad de la modelación resultante, se pueden analizar simultáneamente los resultados del modelo japonés para la precipitación acumulada de mayo a noviembre promediada entre 1979 a 2003 (mapa 3.4) y la misma información correspondiente a la precipitación histórica (mapa 3.2).

Como resultado, se observa que el modelo es capaz de reproducir la variabilidad espacial observada, esto es, máximos a lo largo de las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, valores relativamente menores en el altiplano, y los valores mínimos en la península de Baja California; sin embargo, el modelo japonés tiende a intensificar los valores de la lluvia sobre la Sierra Madre Occidental, eje volcánico central de México y sureste del país, mientras que en la Sierra Madre Oriental, la precipitación histórica observada es mayor.

Mapa 3.4

3.5 Simulación de ciclones tropicales ante el cambio climático

La mayor parte de los modelos climáticos que han estudiado la influencia que tiene el calentamiento global sobre la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales, son de una resolución relativamente alta (de alrededor de 100 km). Estos modelos sugieren una tendencia hacia una menor frecuencia en la ocurrencia de ciclones tropicales (Sugi *et al.*, 2002). Sin embargo, la resolución de estos modelos aún es insuficiente para representar la estructura de los ciclones tropicales reales. Por ello, los modelos climáticos de más alta resolución tienen ventajas sobre modelos con menor detalle espacial. La principal desventaja es que aún es muy limitado el número de simulaciones climáticas con resoluciones comparables a las obtenidas con el modelo japonés (de alrededor de 20 km en dirección horizontal).

A manera de ejemplo, a continuación se describe la evolución de uno de los ciclones tropicales generados por el modelo japonés en el escenario A1B, del 12 al 21 de septiembre de 2095:

El ciclón se genera a partir de una onda del este que cruza el arco de las Antillas menores el 12 de septiembre. Dicha onda genera una circulación ciclónica el 14 de septiembre al sur de la República Dominicana. Para el día 16 de septiembre (mapa 3.5), el ciclón se intensifica sobre aguas del mar Caribe, continuando con un movimiento hacia el oeste. Una medida de la intensificación del ciclón es el grado de concentración de los contornos de presión reducida a nivel del mar, mientras mayor sea su concentración, mayor es la velocidad del viento del fenómeno. Para el día 17 ingresan las primeras bandas de lluvia a Quintana Roo y Yucatán. La mayor parte del ciclón se encuentra, para el 18 de septiembre, sobre la península de Yucatán, dejando precipitaciones acumuladas de tipo torrencial (superiores a los 150 mm) en 24 horas. Para el 19 de septiembre el ciclón se intensifica de manera considerable sobre las aguas de la Sonda de Campeche mientras se forman grandes bandas que cruzan el Golfo de México y el istmo de Tehuantepec. El 20 de septiembre, el ciclón se intensifica de modo considerable y sus bandas externas tocan la costa norte de Veracruz. El 21 de septiembre el ciclón ha ingresado por segunda ocasión a la república mexicana, dejando lluvias torrenciales sobre Hidalgo y el norte de Veracruz. Posteriormente el 22 de septiembre, los remanentes del fenómeno se han movido a la frontera entre Texas y Tamaulipas, pasando a formar parte de un sistema frontal, mientras

que al mismo tiempo dejan lluvias entre moderadas a fuertes sobre la mayor parte del país.

Mapa 3.5

Las simulaciones de este huracán en particular sugieren que el modelo es capaz de capturar los campos de precipitación y presión atmosférica con una resolución adecuada para el análisis del impacto de estos eventos.

3.6 Peligro ante futuras temporadas de lluvias y ciclones tropicales

Para tener una estimación de los peligros futuros ante lluvias y ciclones tropicales en el escenario de cambio climático A1B, con la ayuda de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución, se calcularon las anomalías de precipitación sobre la república mexicana durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales, para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 con respecto al periodo de referencia (1979-2003). El procedimiento consiste en estimar el valor promedio y su desviación con respecto a lo que el mismo modelo simula en el periodo 1979-2003, para lo cual se calculan las anomalías, que son una estimación de los cambios que se esperan en el futuro.

En el mapa 3.6 se muestra la anomalía de precipitación del período 2015-2039, observándose anomalías mayormente positivas para las zonas costeras de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, así como para el centro de Michoacán, el norte de la Sierra Madre Occidental y el istmo de Tehuantepec. Las anomalías negativas más significativas se encuentran sobre Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y el sur de Puebla. La zona noreste de la república, la

península de Yucatán, el norte de Chiapas y sur de Tabasco también muestra anomalías negativas.

Mapa 3.6

La anomalía de precipitación para el período 2075-2099 se muestra en el mapa 3.7, donde los patrones son similares al período 2015-3039 (mapa 3.6), sin embargo la magnitud se ha incrementado considerablemente. Anomalías positivas superiores a los 150 mm se encuentran sobre buena parte de la Sierra Madre del Sur y sobre el norte de la Sierra Madre Occidental. Anomalías menores a -150 mm se observan sobre amplias regiones de Jalisco, la península de Yucatán, el norte de Chiapas, Morelos, sur de Puebla y norte de Guerrero. Por otra parte, la anomalía de precipitación sobre la región fronteriza del noreste ha pasado de negativa a positiva.

Mapa 3.7

Para realizar el análisis de los posibles cambios futuros en la actividad ciclónica se utilizan dos indicadores de magnitud de los ciclones tropicales: presión atmosférica y viento máximo en superficie, ambos del modelo japonés.

Los ciclones tropicales están asociados a centros de baja presión atmosférica a nivel del mar, alrededor de los cuales giran vientos que pueden llegar a tener más de 100 km/h de intensidad. Para determinar la variabilidad de la presión mínima a nivel del mar y del viento máximo en superficie que se asocia directamente a la actividad de ciclones tropicales, se escogieron dos regiones: el Océano Pacífico del noreste y el Atlántico del noroeste. Las coordenadas geográficas de la región Pacífico del noreste van desde 5° a 18° de latitud norte

y desde 90° hasta 125° de longitud oeste; las coordenadas de la región del Atlántico noroeste van desde 15° a 30° de latitud norte y de 60° a 100° de longitud oeste (mapa 3.8). Las figuras 3.2 y 3.3 muestran diagramas de caja que representan la variabilidad del valor mínimo de presión atmosférica y del valor máximo del viento en superficie, respectivamente. Para ambas regiones oceánicas y para los periodos 1979-2003, 2015-2039 y 2075-2099 se indican los valores máximos, mínimos y promedios de cada periodo, el tamaño de la caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

Mapa 3.8

Figura 3.2

Figura 3.3

La variabilidad de la presión mínima en superficie sobre el Océano Pacífico del noreste está indicada en la figura 3.2a, la cual presenta una tendencia de disminución en los mínimos extremos, mientras que la figura 3.3a muestra una intensificación de los eventos extremos de viento, sugiriendo un incremento en la magnitud de los huracanes más intensos. Por otra parte se observa que en el Océano Atlántico del noroeste las intensidades se mantienen dentro de los rangos del período de referencia (figuras 3.2b y 3.3b).

3.7 Medidas de prevención y mitigación

Existen diversas medidas que se pueden tomar antes de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Se debe contar con mapas de riesgo suficientemente detallados que permitan dirigir los recursos necesarios para una mejor preparación, como es la educación, identificación de rutas de

evacuación, etcétera. El análisis de riesgos también permite decidir sobre el tipo de esquema financiero que es conveniente para enfrentar posibles eventos como puede ser aseguramiento de bienes y estructuras.

Ante un escenario de aumento en la magnitud de huracanes más intensos en el Océano Pacífico se sugiere implementar medidas de prevención y mitigación como las siguientes: operar sistemas de pronóstico estacional del clima, sistemas de pronóstico meteorológico de mediano y corto plazo, actualización y continuidad de atlas de riesgos hidrometeorológicos, implementar sistemas de alerta temprana, esquemas financieros de administración de riesgo, planes de respuesta, así como realizar una adecuada planeación del uso del suelo para el establecimiento futuro de asentamientos humanos, zonas agrícolas, áreas recreativas y centros de desarrollo industrial.

3.8 Conclusiones

En este trabajo se ha estimado de forma cuantitativa que los estados de la república mexicana con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, mientras que Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es afectado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano Pacífico, como son Oaxaca, Colima, Jalisco y Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis

Potosí. El estado de menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.

A través de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución se estima que el cambio climático ocasionará modificaciones considerables a los regímenes de precipitación sobre el país, así como a la intensidad y variabilidad con que se presentan los ciclones tropicales en los océanos que rodean a México. Por estos motivos, se hace necesario el comenzar a tomar medidas de adaptación que permitan afrontar de manera adecuada, las amenazas de fenómenos extremos de precipitación. La mayor parte de las medidas que se pueden tomar para este fin, consisten en reducir la vulnerabilidad de la población ante tales eventos, valiéndonos de una mayor y mejor preparación, incluyendo la construcción de infraestructura hidráulica de protección.

El análisis de riesgos debe ser un proceso dinámico el cual actualice los índices de acuerdo a la información más reciente. Asimismo, el riesgo debe ser calculado de manera consistente a largo, mediano y corto plazos, e inclusive en tiempo real para situaciones con necesidad de atención inmediata.

Como una posibilidad de trabajo a futuro, se sugiere extender los estudios de evaluación de riesgo ante lluvias y ciclones tropicales considerando los aspectos siguientes:

- 1) Hacer la evaluación a escala municipal.
- 2) Incorporar nuevas componentes para el cálculo de la vulnerabilidad y el peligro, algunas de las que pueden ser de mayor importancia son los

aspectos hidrológicos, por ejemplo, definiendo la parte de la población que se encuentra asentada en zonas inundables; la estimación de zonas de alta exposición a vientos extremos; la determinación de las regiones que sean susceptibles de deslaves o desgajamientos aún cuando sean zonas relativamente libres de inundación.

- 3) Realizar estimaciones detalladas de las condiciones socioeconómicas futuras que ayuden a determinar la vulnerabilidad de la población ante los distintos peligros asociados al cambio climático.

3.9 Referencias

HUBP J. H., MOSHE I., Desastres Naturales en América Latina. Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 2002.

IMTA, Extractor Rápido de Información Climatológica III 2.0. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2009.

IPCC. 2007. Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat. Geneva, Switzerland. <http://www.ipcc.ch/>

MIZUTA, R., OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., NODA, A., KATAYAMA, K., YUKIMOTO, S., HOSAKA M., KUSUNOKI, S., KAWAI, H., AND NAKAGAWA, M., 20-Km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, J. Meteor. Soc. Japan, 84, 165-185, 2006.

OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., YOSHIMURA, J., MIZUTA, R., KUSUNOKI, S., AND NODA, A., Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model:

Frequency and Wind Intensity Analyses. Journal of the Meteorological Society of Japan. 84, 2, 259-276, 2006.

SUGI, M., NODA, A., & SATO, N., Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. J. Meteor. Soc. Japan, 80, 249–272, 2002.

YUSUF, A. A., & FRANCISCO, H., Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia, EEPSEA Special and Technical Paper tp200901s1, Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), 2009.

Agradecimientos

Al Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara, por sus valiosos comentarios sobre la elaboración de este trabajo. Al M. en C. Alberto Balancán Soberanis, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su participación en el trabajo de coordinación del Proyecto.



Figura 3.1. Imagen de satélite del huracán Alex del 30 de junio de 2010 (cortesía NASA). Daños provocados por las lluvias de Alex en Monterrey (cortesía Comisión Nacional del Agua).

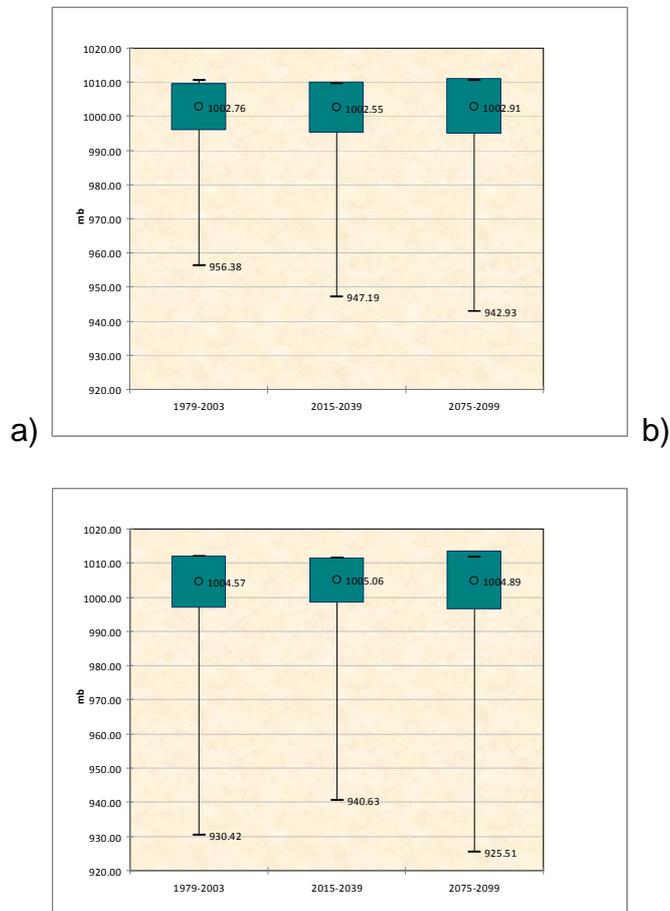


Figura 3.2. Variabilidad de la presión mínima en superficie para los tres periodos de estudio en los dominios del Pacífico del noreste (a) y Atlántico del noroeste (b). Se muestran los valores máximos y mínimos extremos (líneas) y valores promedio (círculos). La caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

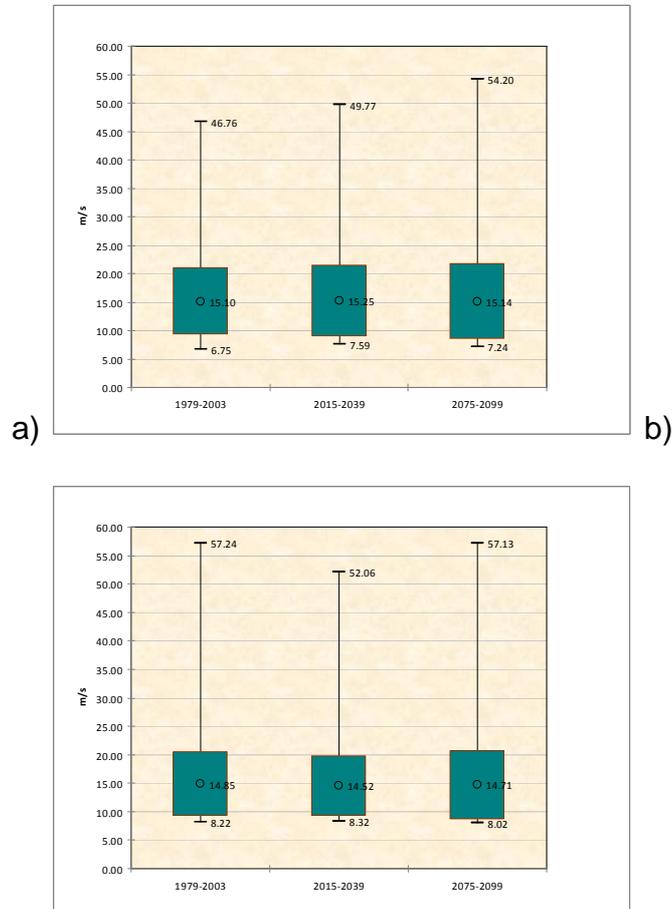


Figura 3.3. Variabilidad del viento máximo a dos metros de la superficie para los tres periodos de estudio en los dominios del Pacífico del noreste (a) y Atlántico del noroeste (b). Se muestran los valores máximos y mínimos extremos (líneas) y valores promedio (círculos). La caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

Tabla 3.1. Datos de precipitación acumulada (mm) desde las ocho horas del 30 de junio hasta las 22:20 horas del 1 de julio del 2010, de nueve estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey, Nuevo León.

Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey		
Estación	Clave	Precipitación acumulada (mm)

San Martín	SM-01	388.50
Mitras	MI-02	394.00
Cd. Universitaria	CU-03	328.75
Fierro	FE-04	453.00
Obispo	OB-05	463.00
Arroyo Seco	AS-06	588.00
Estanzuela	EZ-07	853.00
Protección Civil	PC-08	614.50
Obispo	OB-05	510.34

Tabla 3.2. Índices de precipitación e impacto de ciclones tropicales y su contribución al peligro.

Índice	Fuente de la información	Contribución al Peligro
Precipitación durante la temporada ciclónica	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%
Impacto de ciclones 1970-2008	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%

Tabla 3.3. Índices de densidad de población, marginación y el PIB per cápita.

Categoría	Fuente de la información	Contribución a la Vulnerabilidad
Densidad de población	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	50%
Índice de marginación	Consejo Nacional de Población	25%

PIB <i>per cápita</i>	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	25%
-----------------------	--	-----

Tabla 3.4. Índices de vulnerabilidad y peligro para cada entidad federativa. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicado por un índice más alto.

Entidad	Índice de Vulnerabilidad	Entidad	Índice de Peligro
Tlaxcala	7.25	Veracruz	7.5
Puebla	6.75	Chiapas	7
Chiapas	6.5	Quintana Roo	7
Guerrero	6.5	Colima	6.5
Hidalgo	6.5	Guerrero	6.5
Veracruz	6.5	Michoacán	6.5
Estado de México	6.25	Campeche	6
Guanajuato	6	Jalisco	6
Morelos	6	Oaxaca	6
Michoacán	5.75	Sinaloa	6
Oaxaca	5.5	Yucatán	6
Querétaro	5.25	Nayarit	5.5
San Luis Potosí	5	Tabasco	5.5
Aguascalientes	4.75	Tamaulipas	5.5
Colima	4.75	Puebla	5

Tabasco	4.75
Yucatán	4.75
Distrito Federal	4.5
Jalisco	4.5
Nayarit	4.5
Sinaloa	4.5
Zacatecas	4.25
Nuevo León	3
Tamaulipas	3
Baja California Norte	2.75
Campeche	2.75
Durango	2.5
Quintana Roo	2.5
Sonora	2
Coahuila	1.75
Baja California Sur	1.5
Chihuahua	1.25

San Luis Potosí	5
Baja California Sur	4.5
Hidalgo	4
Estado de México	3.5
Morelos	3.5
Nuevo León	3.5
Sonora	3.5
Coahuila	3
Distrito Federal	3
Durango	3
Chihuahua	2.5
Querétaro	2.5
Aguascalientes	2
Baja California Norte	2
Guanajuato	2
Tlaxcala	2
Zacatecas	2

Tabla 3.5. Índices de riesgo en cada entidad federativa ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales.

Entidad	Índice de Riesgo
Veracruz	6.98
Chiapas	6.75
Guerrero	6.50
Michoacán	6.11
Puebla	5.81
Oaxaca	5.74
Colima	5.56
Yucatán	5.34
Jalisco	5.20
Sinaloa	5.20
Tabasco	5.11
Hidalgo	5.10
SLP	5.00
Nayarit	4.97
Estado de México	4.68
Morelos	4.58
Querétaro	4.39
Campeche	4.06

Tamaulipas	4.06
Tlaxcala	3.81
Distrito Federal	3.67
Quintana Roo	3.54
Guanajuato	3.46
Nuevo León	3.24
Aguascalientes	3.08
Zacatecas	2.92
Durango	2.74
Sonora	2.65
BCS	2.60
BCN	2.35
Coahuila	2.29
Chihuahua	1.77