

## Capítulo XII

# Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo, México

*Gabriel Sánchez-Rivera*<sup>1</sup>, *Oscar Frausto-Martínez*<sup>1</sup>, *Adrián Cervantes-Martínez*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> División de Desarrollo Sustentable, Universidad de Quintana Roo; Avenida Andrés Quintana Roo, S/N, frente a colonia San Gervasio, Cozumel, Quintana Roo, 77600, México. Dirección electrónica: grivera@uqroo.edu.mx.

### Resumen

Quintana Roo, uno de los tres estados que integran la península de Yucatán, sobresale por tener la mayor captación de divisas provenientes de la actividad turística, al tiempo que recibe la mayor cantidad de impactos directos de ciclones tropicales provenientes del mar Caribe. A pesar de la cantidad de estudios en la literatura científica, no se identifica información que aborde la caracterización de la actividad ciclónica en la región desde la perspectiva de la rareza de su ocurrencia, en términos de la intensidad de la velocidad de los vientos máximos sostenidos y mínima presión atmosférica. Los estudios encontrados se centran en la clasificación de los eventos en función de la escala Saffir-Simpson. El objetivo del estudio consistió en el reconocimiento de los ciclones que impactaron tierras peninsulares, en particular el estado de Quintana Roo, a partir del análisis de datos históricos comprendido entre 1851 y 2019. Los resultados obtenidos destacan que, en el periodo estudiado, se presentaron cuatro huracanes cuyos vientos máximos sostenidos y mínima presión atmosférica superan los umbrales extremos de 0.1 y 99.9 percentiles, de los cuales, los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005) provocaron las mayores afectaciones en las ciudades de Cozumel, Playa del Carmen y Cancún, localizadas en el sector nororiental de la península. La caracterización de eventos en categoría de extremos (muy raros y extremadamente raros) resulta de vital importancia para conocer las capacidades de resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas socioambientales, la infraestructura y medios de producción de los cuales depende la población de la región.

**Palabras clave:** *ciclones tropicales, eventos extremos, umbrales, vientos máximos, presión atmosférica, península de Yucatán.*

## Introducción

La península de Yucatán (PY) está sujeta al impacto recurrente de ciclones tropicales, siendo el estado de Quintana Roo (Q.Roo.) el que recibe el primer contacto de los fenómenos que ingresan a territorio nacional provenientes del Mar Caribe, por lo que, de acuerdo con Palacio-Aponte (1998) e Ihl y Frausto Martínez (2014), las zonas costeras del sector nororiental de la península son consideradas como áreas de “peligro extremo” dada la alta probabilidad de impacto. Siendo estos eventos naturales, como ningún otro, los que provocan las mayores afectaciones en la península.

De acuerdo con los registros de la base de datos conocida como “mejor trayectoria” o “*International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS, 2019a)”, para la Cuenca del Atlántico Norte (CAN), en el período 1851-2019, se registran un total de 2,220 ciclones, de los cuales 164 (7%) han impactado la península de Yucatán.

A partir de lo anterior se formularon las siguientes preguntas de investigación: *a)* ¿se ha presentado un aumento en la cantidad e intensidad de ciclones que han impactado la PY y el estado de Q. Roo., en el período 1851-2019?; *b)* ¿Cuáles de los ciclones que impactaron la PY y el estado de Q. Roo. destacan por su intensidad en términos de la velocidad máxima de vientos sostenidos y mínima presión atmosférica? y, *c)* ¿cuáles de los huracanes se pueden considerar extremos?

Para responder las preguntas se aborda el reconocimiento de los eventos extremos considerados como “raros”, “muy raros” y “extremadamente raros” desde la perspectiva de la Organización Mundial Meteorológica (WMO, 2018), analizando los eventos ciclónicos que impactaron la península en un período de 168 años.

## Ciclones tropicales

El Centro Nacional de Huracanes (NHC) define a los ciclones tropicales como fenómenos hidrometeorológicos representados por “una circulación atmosférica cerrada que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur” (NHC, 2019).

La temporada de huracanes en la CAN se presenta anualmente entre el 1 de junio y el 30 de noviembre. De acuerdo con Knapp *et al.* (2018), el Atlántico Norte ocupó el tercer lugar en actividad ciclónica entre los años 1940 y 2010, por debajo del Pacífico Oeste y Este.

Autores como Holland y Bruyère (2014); Doval, Pérez, Acosta, y Rodríguez (2013) y Vecchi y Knutson (2008) han realizado estudios tendientes a identificar patrones que permitan explicar la dinámica con relación a la ocurrencia de ciclo-

nes tropicales mediante la correlación de variables como son: temperatura de la superficie oceánica, actividad de las manchas solares, Oscilación del Sur (ENOS) y la oscilación multidecadal del océano Atlántico (AMO).

Por su parte, Lazos-Chavero, Mwampamba y García-Frapolli (2018) plantean que los escenarios del cambio climático prevén un aumento en la cantidad e intensidad de ciclones, incremento que se espera se presente de manera paulatina, por lo que para observarlos se requiere del análisis de largas series de tiempo y el reconocimiento de eventos con características singulares.

## Eventos extremos

La complejidad para la identificación de eventos perturbadores en categoría de extremos se debe a que no existe un consenso en cuanto a su definición; sin embargo, Stephenson (2008) propone que los ciclones en categoría de extremo, serían aquellos cuya ocurrencia es “rara”, con efectos “severos” y “graves”, donde “raro” queda definido como aquellos eventos con baja probabilidad de suceder. La WMO (2018) plantea que los eventos considerados como “raros”, son los que superan los percentiles 90 y 95, mientras que los considerados como “muy raros” excederían los umbrales  $< 1$  y  $> 99$  o superiores (inferiores según el caso). Décamps (2008) señala que eventos extremos son aquellos sucesos que exceden algún tipo de límite en términos de magnitud, duración y frecuencia.

Para la caracterización de eventos extremos en calidad de “raros”, “muy raros” o “extremadamente raros” existen diversas técnicas y modelos, entre los que destacan los identificados por Stephenson (2008) y Camuffo *et al.* (2018): *a)* Pico por encima del umbral; *b)* Teoría del valor extremo; *c)* Excedente a un umbral relativo; *d)* Excedente a un umbral y un período de retorno; y *e)* Efectividad: eventos que desencadenan un desastre o emergencia y que pueden ocasionar la pérdida de vidas, lesiones, etc.

El estudio y caracterización de estos fenómenos puede ser abordado considerando diversas variables físicas y temporales como son: la intensidad del meteoro, medida en función de la velocidad máxima de vientos sostenidos y la mínima presión atmosférica, trayectoria (localización), duración (permanencia), velocidad y distancia del recorrido, entre otras (IBTrACS, 2019b). Sin embargo, la variable mayormente considerada corresponde a la velocidad media de los vientos máximos sostenidos, con la cual se desarrolló la escala de intensidad (magnitud) y capacidad de destrucción de los ciclones tropicales, conocida como “escala Saffir-Simpson” (Schott *et al.*, 2012).

La escala tiene como objetivo principal servir como una alerta a la población de los posibles tipos de daños e impactos vinculados a la intensidad de los meteoros, para lo cual se establecieron cinco clases, donde cada una de ellas describe la

magnitud de los daños que se podrían esperar en función de la magnitud de cada evento (Schott *et al.*, 2012), convirtiéndola en el principal referente para la caracterización de los eventos ciclónicos (Rosengaus-Moshinsky *et al.*, 2002).

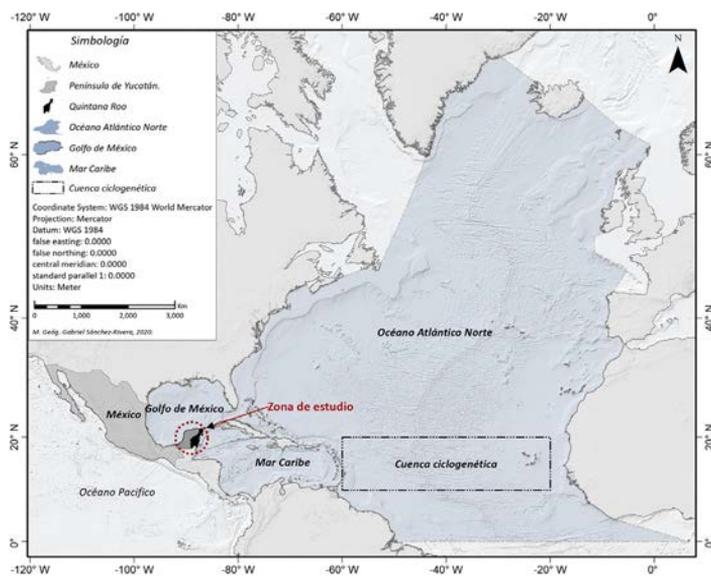
## Materiales y métodos

### *Área de estudio*

El área de estudio corresponde al estado de Quintana Roo en el extremo oeste de la cuenca del Mar Caribe (figura 1), la cual, de acuerdo con el *Flanders Marine Institute* (2018) representa 5% del total de la superficie de la CAN (59.5 millones de km<sup>2</sup>). El estado ocupa 2.2% del territorio nacional con una superficie de 43,216.25 Km<sup>2</sup>, y una extensión litoral de 1,176 km que corresponde al 10.5% nacional (SECTUR, 2008). Se caracteriza por estar conformada de una amplia plataforma de origen calizo de escaso relieve (Vidal-Zepeda, 2005).

Los ciclones de mayor intensidad que han impactado la península se han gestado en la región de la cuenca ciclogénica del Atlántico Norte, localizada entre las coordenadas: 10°N-20°N, 20°W-60°W entre las islas de Cabo Verde y las Antillas Menores del Caribe (Saunders & Lea, 2010).

Figura 1: Cuenca del Atlántico Norte



Fuente: elaborado con datos de Amante y Eakins (2009) y Flanders Marine Institute (2018).

## *Datos*

La información sobre las trayectorias y características físicas de los ciclones formados en la CAN se obtuvo de la base de datos del IBTrACS (2019a) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los registros presentan información relacionada con la latitud, longitud, vientos máximos y mínima presión atmosférica del ciclón, entre otras, en períodos de 6 h.

Los datos corresponden a una representación suavizada de la localización e intensidad de un ciclón tropical a lo largo de su trayectoria, como resultado del análisis posterior a la temporada de ciclones. La información proviene de observaciones superficiales de barcos, aeronaves e imágenes satelitales, por lo que el registro histórico no es homogéneo en su construcción (Kenneth R. Knapp & Kruk, 2010).

Los registros presentan variaciones espacio-temporales de origen, en función de las agencias que las reportan, lo que, de acuerdo con K. R. Knapp *et al.* (2018), se traduce en niveles heterogéneos de incertidumbre por cada evento en particular en función de sus características, como son: año de formación, localización geográfica, intensidad, permanencia, etc.

La información sobre las características de la PY y Q. Roo., se obtuvieron del Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2019).

## **Métodos**

Para cumplir con los objetivos del estudio se agruparon los procesos en dos fases principales:

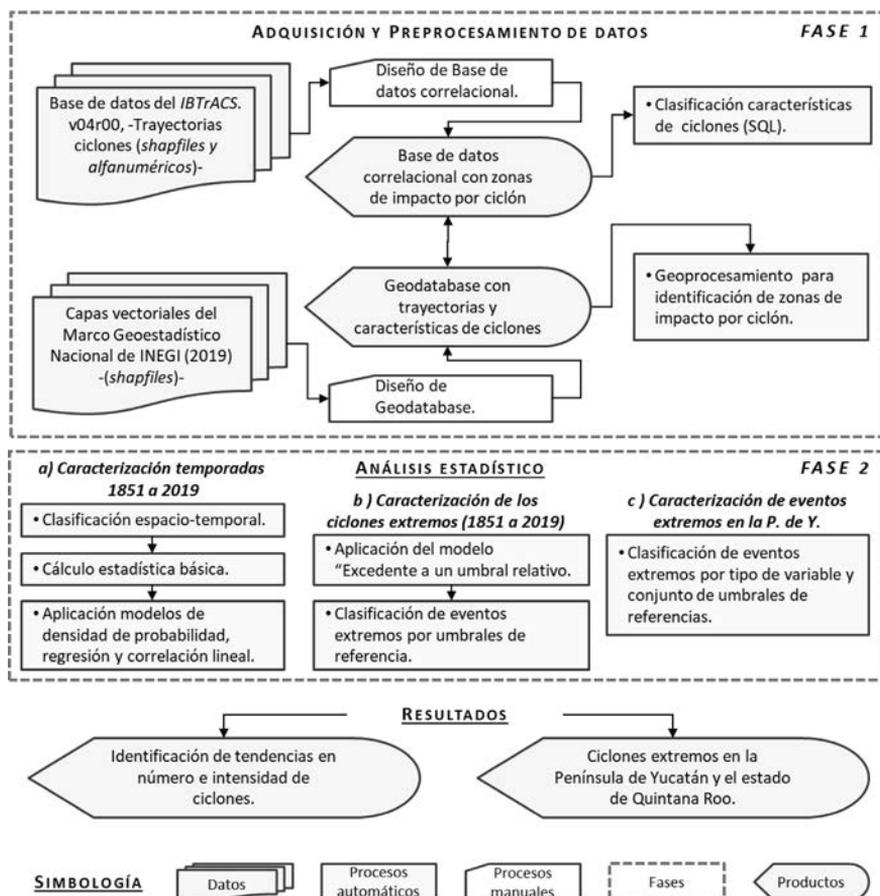
*Fase 1: Adquisición y Preprocesamiento de datos.* Homologación de capas vectoriales a la proyección cartográfica UTM-GCS\_WGS\_1984 y conversión de unidades al sistema métrico decimal (según el caso). Diseño de una base de datos correlacional en el programa MS-Access, y una Geodatabase para la generación de consultas e identificación de las trayectorias de los ciclones que impactarán la PY y el estado de Quintana Roo mediante geoprocesamientos en el programa ArcGis 10.3.

*Fase 2: Análisis estadístico.* Identificación del número e intensidad de eventos ciclónicos a través de consultas en la base de datos correlacional. Clasificación espacio-temporal por décadas y grupos, basados en las categorías Saffir-Simpson: a) depresiones y tormentas tropicales; b) huracanes de baja y mediana intensidad, categorías H1, H2 y H3; y c) ciclones de alta intensidad, categorías H4 y H5. Estimación de variaciones a nivel decadal, mediante el cálculo de tasas de cambio del número de ciclones por década y por grupos de categorías con respecto al total de eventos ocurridos por década. Estimación de la distribución anual del número de

ciclones vs. intensidad y velocidad máxima de vientos sostenidos vs. mínima presión atmosférica, mediante los modelos: regresión lineal (basado en el método de mínimos cuadrados), correlación lineal de *Pearson* y *Spearman*, y función de densidad de probabilidad. Finalmente, el reconocimiento de huracanes en categoría de extremos a través del modelo “excedente a un umbral relativo”, con umbrales de referencia 0.1 y 99.9 percentiles, para los casos considerados “extremadamente raros” y, 1.0 y 99.0 para “muy raros”. Como apoyo para la aplicación de los modelos se utilizó el programa estadístico *Minitab 17*.

El diagrama metodológico general utilizado se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Diagrama metodológico



## Resultados

### Caracterización de las temporadas 1851 a 2019

La base de datos del IBTrACS registra 164 ciclones que impactaron la PY (7% de los formados en la CAN), de los cuales 137 (84%) cruzaron Quintana Roo (tabla 1).

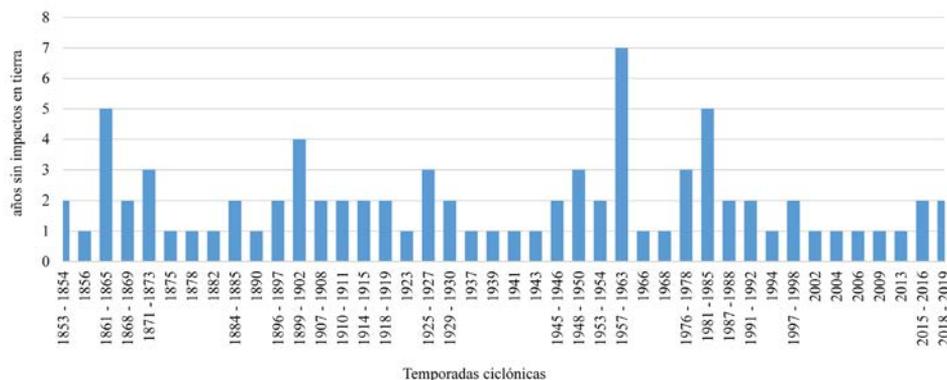
Tabla 1: Ciclones que impactaron Q. Roo. por categoría

En escala Saffir-Simpson (SS)							Total
DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5	
30	47	23	31	16	8	9	164

Donde: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categoría 1 a 5.

En los 168 años analizados se identificó que en el 49% (n=82) de las temporadas no se presentaron impactos en el estado, destacándose las temporadas: 1957-1963 con el máximo de 7 años consecutivos, 1861- 1865 y 1981-1985 con 5 años, y 1899-1902 con 4 (figura 3).

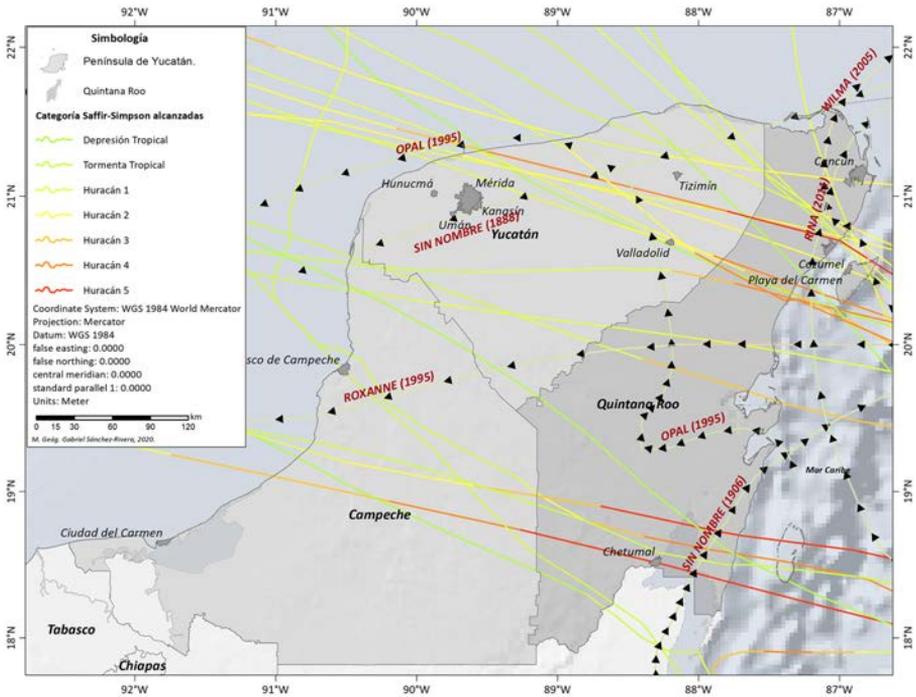
Figura 3: Temporadas ciclónicas sin impactos directos sobre Q. Roo.



La distribución espacial de los impactos en tierra de huracanes intensos, que alcanzaron categorías H3 a H5, se concentra en las zonas norte y sur del estado. De ellos, el 83% (n=25) cruzaron transversalmente, con trayectorias uniformes con rumbo aproximado SE-NO. Del 17% (n=5) restante, los huracanes *Sin nombre* (1906, H3), *Wilma* (2005, H5) y *Rina* (2011, H3) presentaron trayectorias con rumbo SE-NE; *Sin nombre* (1888, H3) NE-SO y *Roxanne* (1995, H3) con rumbo E-SO.

La trayectoria más errática corresponde al huracán Opal (1995, H4), el cual realiza un zigzag durante su paso por tierra cruzando el estado por la zona centro (figura 4).

Figura 4. Huracanes que alcanzaron categorías H3 a H5 que impactaron Q. Roo.



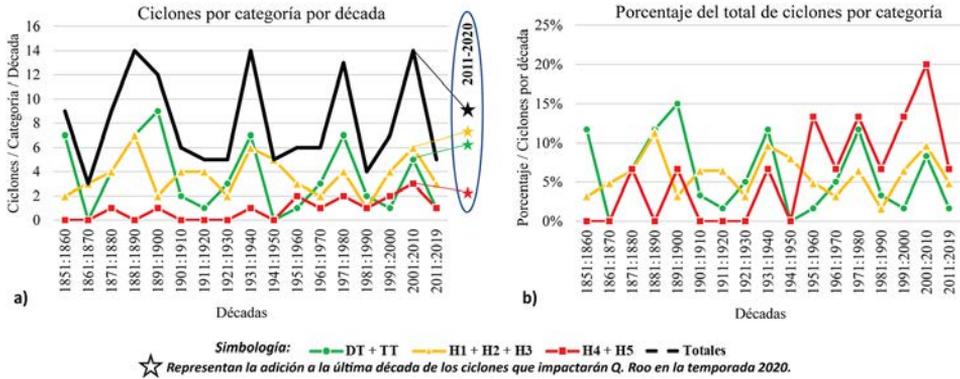
Un primer análisis del comportamiento de la actividad ciclónica a partir del conteo de eventos, agrupados por décadas y categorías Saffir-Simpson, permite observar que no existe una distribución homogénea en la cantidad e intensidad de los ciclones que han tocado tierra; no obstante, a partir de la última década del siglo xx y la primera del presente se aprecia un aumento, con máximos de 3 huracanes intensos en categorías H4 y H5 en cada una de ellas (tabla 2 y figura 5).

Tabla 2. Número de ciclones agrupados por categoría en el período 1851-2019

Décadas	Ciclones por categoría			Totales	Porcentaje por categoría		
	DT + TT	H1 + H2 + H3	H4 + H5		DT + TT	H1 + H2 + H3	H4 + H5
1851:1860	7	2	0	9	12 %	3 %	0 %
1861:1870	0	3	0	3	0 %	5 %	0 %
1871:1880	4	4	1	9	7 %	6 %	7 %
1881:1890	7	7	0	14	12 %	11 %	0 %
1891:1900	9	2	1	12	15 %	3 %	7 %
1901:1910	2	4	0	6	3 %	6 %	0 %
1911:1920	1	4	0	5	2 %	6 %	0 %
1921:1930	3	2	0	5	5 %	3 %	0 %
1931:1940	7	6	1	14	12 %	10 %	7 %
1941:1950	0	5	0	5	0 %	8 %	0 %
1951:1960	1	3	2	6	2 %	5 %	13 %
1961:1970	3	2	1	6	5 %	3 %	7 %
1971:1980	7	4	2	13	12 %	6 %	13 %
1981:1990	2	1	1	4	3 %	2 %	7 %
1991:2000	1	4	2	7	2 %	6 %	13 %
2001:2010	5	6	3	14	8 %	10 %	20 %
2011:2019	1	3	1	5	2 %	5 %	7 %
<i>Totales</i>	<b>60</b>	<b>62</b>	<b>15</b>	<b>137</b>	<b>100 %</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Donde: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5.

Figura 5. Intensidad de ciclones agrupados por categorías (Saffir-Simpson) por décadas (1851-2019), donde: a) línea color verde, representa la suma de los ciclones en categoría de DT y TT; línea amarilla, suma de los huracanes categorías 1, 2 y 3; línea roja suma de huracanes categorías 4 y 5; y línea negra punteada, suma total de ciclones. b) equivalente a a)-, pero mostrando el porcentaje por década con respecto al total de ciclones reportados en el período estudiado



Nota: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5.

Fuente: adaptada de Webster (2005), actualizada con datos del IBTrACS (2019a) a septiembre del 2019. Datos del 2020 del IBTrACS (2020).

De las 9 ocasiones en que la PY ha sido impactada por ciclones en categoría H5, en 8 (89%) los meteoros cruzaron Q.Roo. (tabla 3). Destaca 2005 por ser el único año en que se presentaron dos ciclones categoría H5 (*Emily* y *Wilma*) y dos H4 (*Katrina* y *Rita*).

Tabla 3. Ciclones que alcanzaron categoría H5 que impactaron Q. Roo. en el período 1851-2019

Clave	Año	Nombre	Longitud [km]	Vientos Máx. [km/h]	Mín. Pres [mb]	Influencia estatal		
						Q. Roo.	Yuc.	Camp.
1933259N11302	1933	Sin nombre	365,018.56	259.28	929	*	*	*
1955265N13307	1955	<i>Janet</i>	404,701.00	277.80	914	*		*
1967249N14303	1967	<i>Beulah</i>	779,991.90	259.28	923	*	*	
1971249N11302	1971	<i>Edith</i>	684,475.46	259.28	943	*		*
1988253N12306	1988	<i>Gilbert</i>	823,013.13	296.32	888	*	*	

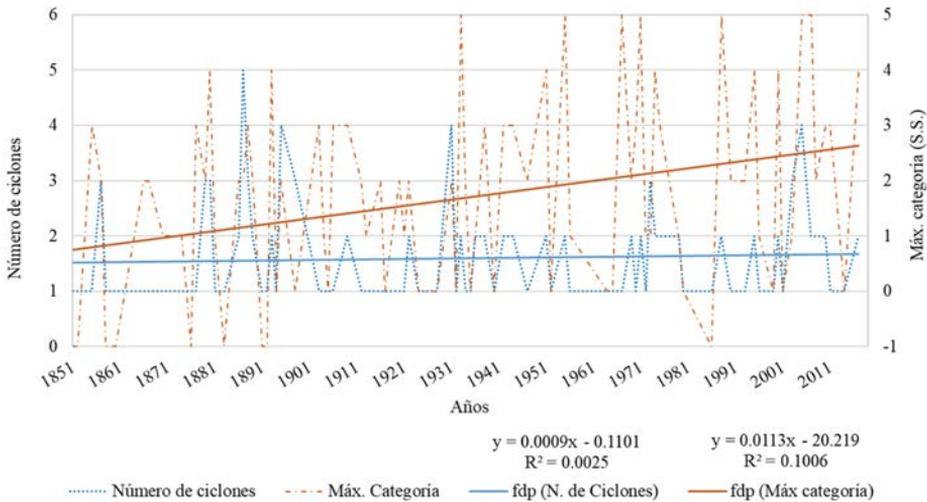
1998295N12284	1998	<i>Mitch</i>	2,372,431.54	287.06	905		*	*
2005289N18282	2005	<i>Wilma</i>	601,455.61	296.32	882	*		
2005192N11318	2005	<i>Emily</i>	588,786.00	259.28	929	*	*	
2007225N12331	2007	<i>Dean</i>	632,435.40	277.80	905	*		*

Donde: influencia estatal = estados impactados; Q. Roo. = Quintana Roo; Yuc. = Yucatán; y Camp. = Campeche.

La máxima velocidad de vientos sostenidos reportada es de 296.3 km/h para los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005), y la mínima presión de 882 mb del huracán *Wilma* (2005). Ambos sistemas causaron grandes afectaciones a las ciudades de Cancún y Playa del Carmen.

Del cálculo de la función de probabilidad, los valores de  $R^2$  obtenidos indican que la línea de tendencia no se ajusta dada la dispersión de los datos (figura 6), lo que se refuerza al analizar las tasas de cambio, las cuales dan valores de 0.09% para la cantidad de ciclones (incremento prácticamente nulo) y 1.13% para la intensidad, lo que representa un incremento mínimamente significativo.

Figura 6. Distribución anual del número e intensidad (categoría) de ciclones que impactaron la península en el período 1851-2019. Donde: -1 = Depresión tropical; 0 = Tormenta tropical; 1 a 5 huracanes en categorías H1 a H5 en la escala Saffir-Simpson; y fdp = función de densidad de probabilidad

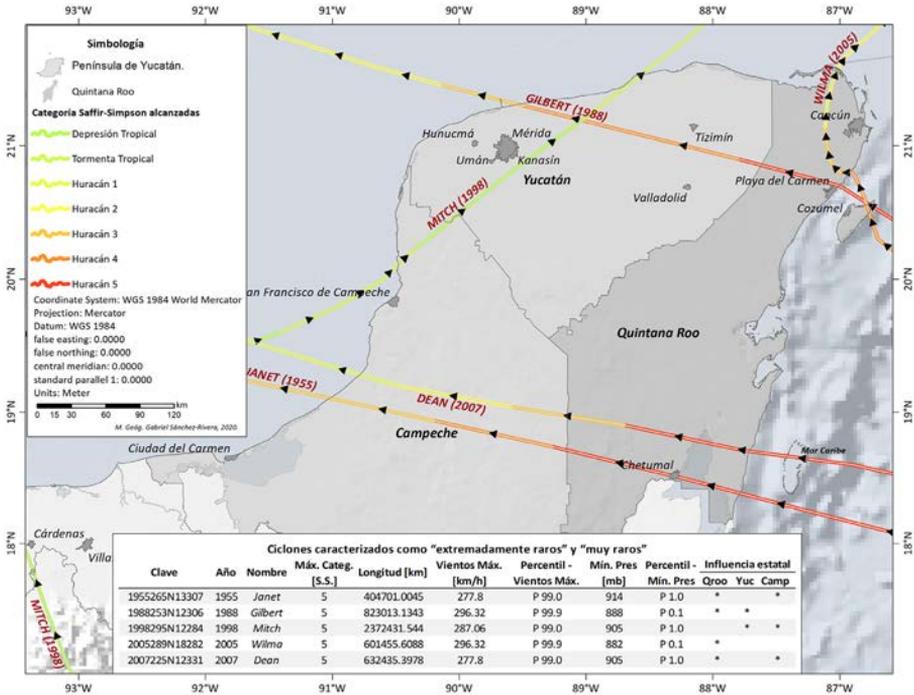


## Ciclones categorizados como eventos “muy raros” y “extremadamente raros”.

Los resultados del modelo “Excedente a un umbral relativo”, considerando el total de ciclones formados en la CAN, caracterizan a los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005) como “extremadamente raros” y a los huracanes *Janet* (1955), *Mitch* (1998) y *Dean* (2007) como “muy raros”, donde *Mitch* es el único que no cruza Q. Roo. (figura 7).

Con relación a la temporalidad de la ocurrencia de eventos de tales características, se observa que, si bien las diferencias en años entre uno y otro no son equidistantes (33; 10; 7; y 2 años), sí se presenta en el lapso de 52 años una reducción significativa entre el primero reconocido (*Janet*) y el más reciente (*Dean*), ello da indicios del aumento en la frecuencia del impacto en el estado y la PY de ciclones intensos en categoría de eventos extremos.

Figura 7. Trayectorias de los ciclones que impactaron Q. Roo. y la PY caracterizados como “muy raros” y “extremadamente raros”



## Temporada 2020

Derivado de la intensa actividad ciclónica registrada en el Atlántico durante la temporada 2020, al cierre oficial de la misma (30 de noviembre), se registró en la península el impacto directo de 4 ciclones: *Amanda-Cristóbal* (TT); *Gamma* (TT); *Delta* (H4) y *Zeta* (H2), hecho que no había vuelto a ocurrir desde el año 2005 cuando 4 ciclones ingresaron a la PY. Con excepción de *Cristóbal*, los 3 ciclones restantes ingresaron por la zona noreste de Quintana Roo, con trayectorias uniformes con rumbo aproximado SE-NO.

El huracán *Zeta* fue el que alcanzó la mayor intensidad, registrando vientos máximos sostenidos del orden de 222.24 km/h y mínima presión atmosférica de 953 mb, lo que lo ubicaría en la categoría de evento extremo considerado como “raro” al exceder el umbral del percentil 90.

## Discusión y conclusiones

Los hallazgos no muestran una tendencia al incremento del número de ciclones que han tocado tierra firme, caso contrario es lo observado con la intensidad en las últimas dos décadas, donde las tasas de cambio revelan un ligero incremento en la ocurrencia de huracanes intensos en categorías H4 y H5, y el aumento en la frecuencia del impacto de meteoros en categorías de eventos extremos, hecho que se acentúa al considerar los ciclones ocurridos en la temporada 2020. Lo anterior coincide con lo reportado por Walsh (2004) y Walsh *et al.* (2016) quienes concuerdan que, debido al calentamiento global, los escenarios del cambio climático prevén un aumento en el número de ciclones, siendo hacia los años cincuenta del presente siglo cuando se manifieste un incremento en la intensidad máxima entre un 5 y 10%. Elsner, Kossin, y Jagger (2008), Emanuel (2005) y Webster (2005) reportaron también en sus estudios un incremento de huracanes en categoría H4 y H5, lo que resulta coincidente con nuestros resultados.

Se constata en la revisión de la literatura que no existe un consenso para una definición única para la caracterización de los ciclones como eventos extremos, dada la diversidad de disciplinas desde la que se aborda, como son la meteorología, ciencias biológicas y sociales (Stephenson, 2008; WMO, 2015).

Nuestros resultados coinciden con los de Palacio-Aponte (1998) e Ihl y Frausto-Martínez (2014), quienes observaron que la mayor concentración de eventos ciclónicos se presenta en la zona norte y noreste de la península de Yucatán. No obstante, por la ocurrencia de eventos en categoría de extremos, se identifican dos: la zona sur —en la frontera con Belice— y la zona norte, en el canal de Yucatán.

La caracterización de eventos en categoría de extremos (muy raros y extremadamente raros) resulta de vital importancia para conocer las capacidades de

resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas socioambientales, la infraestructura y medios de producción de los cuales depende la población de la región.

Los hallazgos del presente estudio pueden coadyuvar con información necesaria para la definición y delimitación de zonas prioritarias de atención ante el impacto de fenómenos de alta intensidad y rara probabilidad de ocurrencia.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Cozumel, y a los Laboratorios de Observación e Investigación Espacial y de Limnología y Ecología Tropical, por la oportunidad para colaborar con el presente estudio. Gabriel Sánchez Rivera agradece el apoyo de la beca otorgada por el CONACYT (597620) para la realización de los estudios de doctorado y el presente escrito, que forma parte de los resultados de la tesis doctoral.

## Referencias bibliográficas

- Amante, C., & Eakins, B. W. (2009). *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- Camuffo, D., della Valle, A., & Becherini, F. (2018). A critical analysis of the definitions of climate and hydrological extreme events. *Quaternary International*, September. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.008>
- Décamps, H. (2008). Ecosystems and extreme climatic events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9–10), 553–563. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.004>
- Doval, J. P., Pérez, M. B., Acosta, J. O., & Rodríguez, E. (2013). Caracterización de las trayectorias de los Ciclones Tropicales en la Cuenca Atlántica en relación con la actividad solar y otras variables. *XI Congreso Cubano de Informática y Geociencias (GEOINFO'2013)*, 18.
- Elsner, J. B., Kossin, J. P., & Jagger, T. H. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455(7209), 92–95. <https://doi.org/10.1038/nature07234>
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Flanders Marine Institute. (2018). *IHO Sea Areas, version 3*. <https://doi.org/10.14284/323>
- Holland, G., & Bruyère, C. L. (2014). Recent intense hurricane response to global climate change. *Climate Dynamics*, 42(3–4), 617–627. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1713-0>
- IBTrACS. (2019a). *IBTrACS v04r00 - Online browsing*. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php>
- IBTrACS. (2019b). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). Technical Documentation. En *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center*. [https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/pdf/IBTrACS\\_version4\\_Technical\\_Details.pdf](https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/pdf/IBTrACS_version4_Technical_Details.pdf)
- IBTrACS. (2020). *Browse IBTrACS*. <http://ibtracs.unca.edu/index.php?name=browse-year-basin>
- Ihl, T., & Frausto-Martínez, O. (2014). El Cambio Climático y los huracanes en la Península de Yucatán. En *Frausto Martínez, Oscar (Coord). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*. (pp. 42–49). Universidad de Quintana Roo - REDESClim - CONACYT. <https://www.mendeley.com/catalogue/monitoreo-riesgo-y-desastre-asociados-fenomenos-hidrometeorologicos-y-cambio-climatico/>

- INEGI. (2019). *Marco Geoestadístico*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck III, C. J. (2018, marzo). *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IB-TrACS) Project, Version 4. Subset: NA - North Atlantic*. NOAA National Centers for Environmental Information. non-govemment domain. <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01552>
- Knapp, Kenneth R., & Kruk, M. C. (2010). Quantifying Interagency Differences in Tropical Cyclone Best-Track Wind Speed Estimates. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1459–1473. <https://doi.org/10.1175/2009MWR3123.1>
- Lazos-Chavero, E., Mwampamba, T. H., & García-Frapolli, E. (2018). Uncovering links between livelihoods, land-use practices, vulnerability and forests after hurricane Jova in Jalisco, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426 (Junio 2017), 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.009>
- NHC. (2019). *Glossary of NHC Terms*. Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos de América. <https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>
- Palacio-Aponte, A. G. (1998). Susceptibilidad regional del terreno y riesgos por huracanes en la zona costera del Golfo de México. *JAINA. EPOMEX*, 9(2), 2.
- Rosengaus-Moshinsky, M., Jiménez-Espinosa, M., & Vázquez-Conde, M. T. (2002). *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México*. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- Saunders, M., & Lea, A. (2010). Extended Range Forecast for Atlantic Hurricane Activity in 2011. *Tropical Storm Risk (TSR)*, 6th December 2010, 4. <http://www.tropicalstormrisk.com/docs/TSRATLForecastDec2011.pdf>
- Schott, T., Landsea, C., Hafele, G., Lorens, J., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2012). The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. *National Hurricane Center, February*, 1–4. <http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>
- SECTUR. (2008). *Programa Rector de Desarrollo Costero del Estado de Quintana Roo. Programa de Gran Visión de Desarrollo del Litoral*. <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/PNDP2008/doc/pred/pqroo.pdf>
- Stephenson, D. B. (2008). Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. En H. F. Diaz & R. J. Murnane (Eds.), *Diaz, H.F., Murnane, R.J. (Eds.), Climate Extremes and Society*. Cambridge University Press, Cambridge. (pp. 11–23). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535840.004>
- Vecchi, G. A., & Knutson, T. R. (2008). On Estimates of Historical North Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, 21(14), 3580–3600. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2178.1>

- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Las regiones climáticas de México*. 213. <http://132.247.70.148/index.php/rig/article/view/30041>
- Walsh, K. J. E. (2004). Tropical cyclones and climate change: unresolved issues. *Climate Research*, 27(1), 77–83. <https://doi.org/10.3354/cr027077>
- Walsh, K. J. E., McBride, J. L., Klotzbach, P. J., Balachandran, S., Camargo, S. J., Holland, G., Knutson, T. R., Kossin, J. P., Lee, T., Sobel, A., & Sugi, M. (2016). Tropical cyclones and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 65–89. <https://doi.org/10.1002/wcc.371>
- Webster, P. J. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742), 1844–1846. <https://doi.org/10.1126/science.1116448>
- WMO. (2015). *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events. Draft version – First review by TT-DEWCE* (Número December). World Meteorological Organization.
- WMO. (2018). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Final Version*. World Meteorological Organization.

*Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos  
en sistemas socio-ecológicos*

Elaborado en junio de 2021.

Tiraje: 5 ejemplares

# Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

Julio Cesar Morales Hernández  
Enrique González Sosa  
Carlos Manuel Welsh Rodríguez  
Oscar Frausto Martínez



# **Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos**

**Coordinadores**

Julio Cesar Morales Hernández  
Enrique González Sosa  
Carlos Manuel Welsh Rodríguez  
Oscar Frausto Martínez





CONACYT  
Registro Nacional de Instituciones  
y Empresas Científicas y Tecnológicas  
Registro: 1900555

## Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

© Julio Cesar Morales Hernández  
© Enrique González Sosa  
© Carlos Manuel Welsh Rodríguez  
© Oscar Frausto Martínez

### Dirección del Proyecto

Eduardo Licea Sánchez  
Esther Castillo Aguilar  
José Eduardo Salinas de la Luz

### Arte

Paulina Cordero Mote  
Vanesa Alejandra Vázquez Fuentes  
Livia Rocco Sarmina

### Formación de Interiores

Paulina Cordero Mote

1a. edición

© 2021 Fernando de Haro y Omar Fuentes

ISBN 978-607-437-561-9

D.R. © CLAVE Editorial

Paseo de Tamarindos 400 B, Suite 109.

Col. Bosques de las Lomas, Ciudad de México, México. C.P. 05120

Tel. 52 (55) 5258 0279/80/81

ame@ameditores.mx

ecastillo@ameditores.mx

www.ameditores.com

Las opiniones y puntos de vista expresados en la presente obra, son responsabilidad única y exclusiva de su autor y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la editorial, y las de sus integrantes.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, archivada o transmitida en forma alguna o mediante cualquier sistema, ya sea electrónico, mecánico o de fotorreproducción, sin la previa autorización de los editores.

Elaborado en México.

# Índice

Presentación	11
Prólogo	13
Dedicatoria	15
Agradecimientos	17
Lista de dictaminadores	19
Introducción	21
<b>Capítulo I.</b> La gestión integral del riesgo hidrometeorológico en México: avances y limitaciones	25
<b>Capítulo II.</b> Desafíos de los sistemas locales de la gestión integral del riesgo de desastre, sistemas socioecológicos y cambio climático	39
<b>Capítulo III.</b> Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México	71
<b>Capítulo IV.</b> Variación del clima para Veracruz en los últimos 10 años enfocado a actividades agropecuario-ecológicas	97
<b>Capítulo V.</b> Potencial de desastres por inundación en la zona limítrofe entre Quintana Roo y Campeche, México	117
<b>Capítulo VI.</b> Análisis de degradación de la tierra en las cuencas hidrográficas de los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, Jalisco, México	135

<b>Capítulo VII.</b> Percepción y conocimiento sobre cambio climático de cafecultores en dos regiones de Veracruz, México: bases para la gestión integral de riesgos y la adaptación	155
<b>Capítulo VIII.</b> Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático	165
<b>Capítulo IX.</b> Variabilidad climática de las precipitaciones extremas en el estado de Jalisco para el período 1981-2018	179
<b>Capítulo X.</b> Propuesta metodológica para el estudio y detección de granizos en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco	197
<b>Capítulo XI.</b> Eventos meteorológicos extremos en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco	221
<b>Capítulo XII.</b> Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo, México	233
<b>Capítulo XIII.</b> Encuentros y desencuentros en la evaluación de la sequía en Veracruz	251
<b>Capítulo XIV.</b> Análisis de los datos de precipitación en el municipio de Xalapa, Veracruz, calidad y disponibilidad de la información	261
<b>Capítulo XV.</b> Compendio de datos bioclimáticos para la ciudad de Puerto Vallarta	275
Conclusiones	289
CVU Coordinadores	291

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), del CONACYT, tiene una trayectoria de 10 años de trabajo. Con más de un centenar de integrantes (investigadores, estudiantes, actores gubernamentales, privados y sociales), la REDESClim desarrolla iniciativas de colaboración, con el fin de prevenir desastres a través de la generación de conocimiento y apoyo técnico a nivel local, regional y nacional.

Por medio del proyecto “gestión de riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socioecológicos”, el CONACYT y la Universidad de Guadalajara firmaron el convenio de cooperación para el desarrollo de acciones locales de fortalecimiento a las capacidades locales para la prevención de desastres. El resultado de esta acción se muestra en las experiencias compartidas de 55 autores de 25 instituciones, quienes resaltan el papel del conocimiento y saberes comunitarios en el estudio de los desastres.

Finalmente, se destaca el rigor académico que los investigadores Dr. Julio Cesar Morales Hernández, Dr. Carlos Manuel Welsh Rodríguez, Dr. Enrique Gonzáles Sosa y Dr. Oscar Frausto Martínez coordinarán en bien de la calidad científica de esta publicación y que sirve de referencia para los encargados en prevenir los desastres en México.

Dr. Oscar Frausto Martínez  
Representante de la REDESClim – CONACYT  
2021 - 2023



ISBN 978-607-437-561-9



9 786074 375619