



## SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELADO DE HURACANES EN SEGUROS PARAMÉTRICOS EN MÉXICO Y SIMULACIÓN DE EVENTOS DE HURACÁN Y SU VALIDACIÓN CON EVENTOS HISTÓRICOS

*Oswaldo Garay Hernández<sup>(1)</sup>, Benjamín Huerta Garnica<sup>(1)</sup>, Mario Ordaz Schroeder<sup>(1,2)</sup>, Mario Salgado Gálvez<sup>(1,3)</sup>, Octavio Hinojoza Gabriel<sup>(1)</sup>, Gianbattista Bussi<sup>(4)</sup>*

<sup>1</sup> ERN Evaluación de Riesgos Naturales, Vito Alessio Robles 179, Col. Hda. Gpe. Chimalistac, 01050, Ciudad de México, México, [osvaldo.garay@ern.com.mx](mailto:osvaldo.garay@ern.com.mx), [benjamin.huerta@ern.com.mx](mailto:benjamin.huerta@ern.com.mx), [mario.salgado@ern.com.mx](mailto:mario.salgado@ern.com.mx), [octavio.hinojoza@ern.com.mx](mailto:octavio.hinojoza@ern.com.mx).

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería UNAM. Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México, [MOrdazS@iingen.unam.mx](mailto:MOrdazS@iingen.unam.mx).

<sup>3</sup> CIMNE. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, [mario.sal.gal@gmail.com](mailto:mario.sal.gal@gmail.com)

<sup>4</sup> RED Risk Engineering + Development, Via Giuseppe Frank 38, 27100, Pavia, Italia, [gianbattista.bussi@redrisk.com](mailto:gianbattista.bussi@redrisk.com)

### XI. Impacto socio económico de fenómenos naturales

#### RESUMEN

El presente trabajo muestra una comparación de las velocidades de viento que se obtienen en el modelado de huracanes, utilizando tres diferentes fuentes de datos provistas por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA por sus siglas en inglés): Avisos en tiempo real (adv, XML), *Best Track* preliminar (GZ) y HURDAT2.

Lo anterior se realiza con datos de huracanes para la temporada 2020, donde se cuenta con los tres tipos de archivos de entrada, mostrando las variaciones que hay tanto en la información inicial proporcionada de velocidad, ubicación y presión central, como en el resultado en los campos de viento modelados con cada entrada.

Esta comparación se presenta en gráficas que muestran las diferencias en intensidad entre cada fuente de información, así como comparaciones de la velocidad de viento modelada en diferentes puntos de las costas mexicanas y se señala la importancia que esto tiene en la implementación de seguros paramétricos, ya que son instrumentos que amortizan el impacto económico y permiten aumentar la resiliencia de la población afectada y de las construcciones en las zonas dañadas continuamente por estos fenómenos naturales.

Finalmente, se muestran algunas mejoras desarrolladas en la generación de catálogos de eventos simulados, haciendo consideraciones en el modelado de velocidades tierra adentro, obteniendo curvas de tasas de excedencia para distintos periodos de retorno y comparándolas con las tasas producidas por los eventos históricos y con datos de investigaciones previas.

## 1 INTRODUCCIÓN

Debido a su ubicación geográfica México es un país que está expuesto continuamente a diferentes tipos de amenazas naturales, tanto de origen geológico (sismos y actividad volcánica) como de origen hidrometeorológico (lluvias intensas, inundaciones, sequías y huracanes). Estos últimos, se presentan con gran frecuencia, ya que, en los últimos 19 años, en promedio ocho de cada diez desastres naturales en México tienen este origen (CENAPRED, 2021).

Año con año, las costas del país se ven afectadas por una gran cantidad de huracanes, solamente durante la temporada 2020 se presentaron 10 eventos en el Atlántico, de los cuales, cuatro eventos alcanzaron la categoría 3 en la escala Saffir-Simpson: Laura, Eta y Delta. En la Figura 1 se pueden ver las trayectorias de los huracanes de la temporada 2020 en el océano Atlántico.

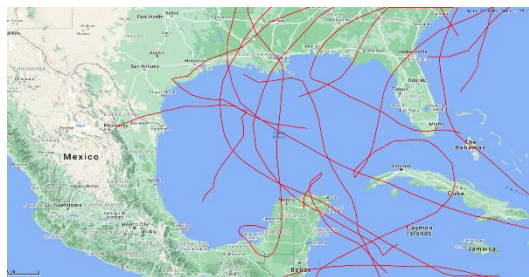


Figura 1. Trayectorias de los huracanes de la temporada 2020 en el océano Atlántico.

En 2019 se estima que los daños provocados por fenómenos hidrometeorológicos ascendieron a 9,069 millones de pesos, de los cuales más del 53% se debieron a huracanes (CENAPRED, 2020), mientras que en 2020 el 84% de las pérdidas económicas totales fueron provocadas por fenómenos de origen hidrometeorológico (CENAPRED, 2021), considerando que en estos años no se presentaron eventos sísmicos importantes como en 2017.

Debido a lo anterior, es primordial contar con herramientas que ayuden a contrarrestar los efectos de las pérdidas provocadas por estos fenómenos naturales, papel que juegan de forma importante los seguros tradicionales y más recientemente los seguros paramétricos, estos últimos son instrumentos que se encuentran ligados a un índice de intensidad y que permiten a los afectados obtener de forma rápida recursos económicos para hacer frente a los daños, ya que estos representan una menor carga administrativa en comparación con los seguros tradicionales y el pago de las primas contratadas se da de forma casi inmediata al no depender de la valuación de las pérdidas (IRI, 2010).

Sin embargo, para que los seguros paramétricos sean viables se debe de contar con modelos que puedan reproducir con precisión la intensidad del índice elegido para activar las coberturas contratadas por los asegurados, a fin de garantizar un funcionamiento óptimo, tal como se presenta en Hinojoza et al. (2022). Con esto en mente se han desarrollado mejoras tanto en el cálculo de los campos de viento que genera un huracán utilizando parámetros más robustos y con menor margen de error, como también en la simulación de catálogos de eventos sintéticos que permiten tener un panorama más amplio del comportamiento futuro de los huracanes y una mejor estimación del peligro al que está expuesta la población.

## 2 SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELADO DE HURACANES

La modelación de los campos de viento de un huracán requiere diferentes parámetros de entrada que están disponibles en las bases de datos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América, (NOAA por sus siglas en inglés). Los conjuntos de datos más utilizados son los siguientes:

- Avisos en tiempo real – adv (XML)
- *Best track* preliminar – CARQ (GZ)
- HURDAT2

Los avisos en tiempo real (adv) contienen información oficial emitida por los centros de alerta en intervalos de seis horas, mientras que los archivos *Best track* preliminares (GZ) contienen información basada en una evaluación posterior de cada tormenta, publicados horas después de su paso (3h después de los adv) y también en intervalos de seis horas por lo general, aunque pueden ser más cortos cuando la tormenta se encuentra por tocar tierra.

Por último, los archivos HURDAT2 (Landsea y Franklin, 2012) se publican varios meses después de haber finalizado la temporada de huracanes e incluyen consideraciones acerca de las incertidumbres de los datos de velocidad, posición y presión central, por lo que se considera la fuente de información más confiable y es la que se utiliza para la generación de los catálogos históricos y estocásticos.

Durante el diseño de un instrumento paramétrico para la transferencia de riesgo catastrófico, se busca la mayor consistencia entre los datos utilizados para la estimación de largo plazo y la estimación en tiempo real del índice del producto. Al no estar los datos con los que se generan los catálogos estocásticos (HURDAT2) disponibles hasta varios meses después de finalizada la tormenta, se ha realizado una comparación en México para la temporada 2020 en el Atlántico Norte, entre el dataset de HURDAT2, y los publicados en tiempo real (adv y GZ) para identificar cuáles deben utilizarse con preferencia en la operación de los productos paramétricos. En este sentido, a continuación, se presentan las comparaciones realizadas tanto para los datos en bruto de los tipos de entrada como el resultado de la modelación de los campos de viento, la Tabla 1 muestra los nombres de todos los huracanes del Atlántico que afectaron al país durante 2020.

Tabla 1. Huracanes que afectaron México durante la temporada 2020.

Atlántico		
Nombre	Categoría	Fecha
Cristobal	T.T.	01 jun - 10 jun
Hanna	H1	22 jul - 27 jul
Laura	H4	19 ago - 29 ago
Marco	H1	20 ago - 25 ago
Nana	H1	01 sep - 03 sep

Tabla 1. Huracanes que afectaron México durante la temporada 2020 (continuación).

Atlántico		
Nombre	Categoría	Fecha
Beta	T.T.	17 sep - 25 sep
Gamma	T.T.	02 oct - 05 oct
Delta	H4	04 oct - 11 oct
Zeta	H2	24 oct - 29 oct
Eta	H4	31 oct - 13 nov

## 2.1 Comparación de datos en bruto

### 2.1.1 Trayectorias

Las trayectorias de los huracanes están dadas con las coordenadas de latitud y longitud del ojo del huracán, en la Figura 2 se pueden observar las diferencias que hay entre estas dependiendo del archivo de datos, en el punto donde tocan tierra, tanto HURDAT2 como *Best Track* (GZ) están muy cercanos, sin embargo, el punto donde toca tierra el aviso en tiempo real (XML) está alejada 5 km al noreste.

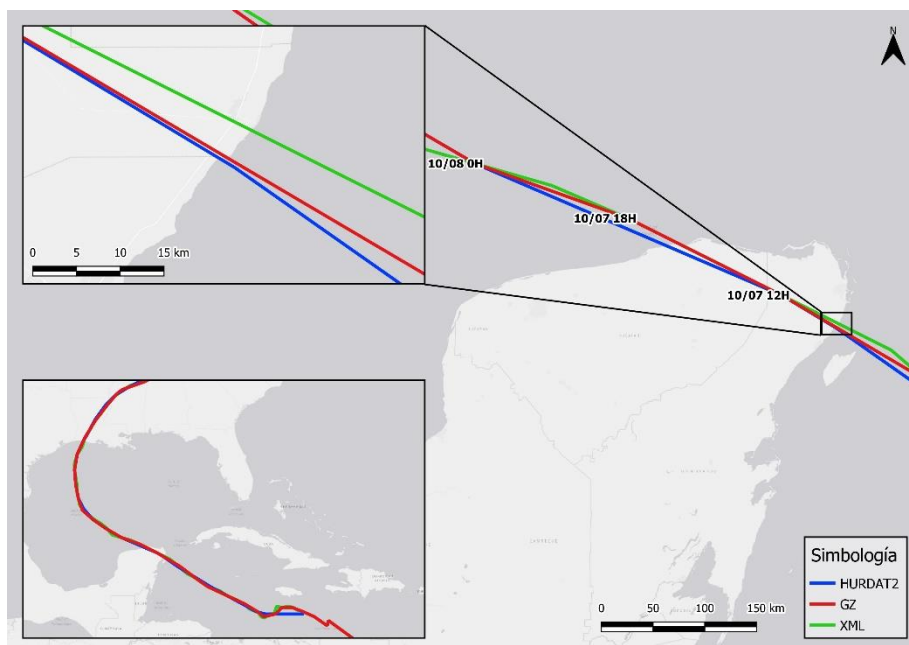


Figura 2. Trayectorias del huracán Delta 2020 para HURDAT2 (azul), *Best Track* preliminar (rojo) y aviso en tiempo real (verde).

## 2.1.2 Presión central y Velocidad en el ojo

Evidentemente existen diferencias entre las trayectorias reportadas, pero no son las únicas. La Figura 3 muestra la comparación de los valores de presión central y velocidad máxima entre los tres conjuntos de datos para el mismo huracán Delta, especialmente se puede apreciar que los valores reportados el 7 de octubre, fecha en que tocó tierra en la península de Yucatán, el valor reportado de velocidad en el formato HURDAT2 es hasta un 20% menor que el inicialmente reportado en los avisos en tiempo real, mientras que la presión en esa misma fecha presenta una diferencia de hasta 6 bares entre el aviso en tiempo real adv y lo reportado en HURDAT 2.

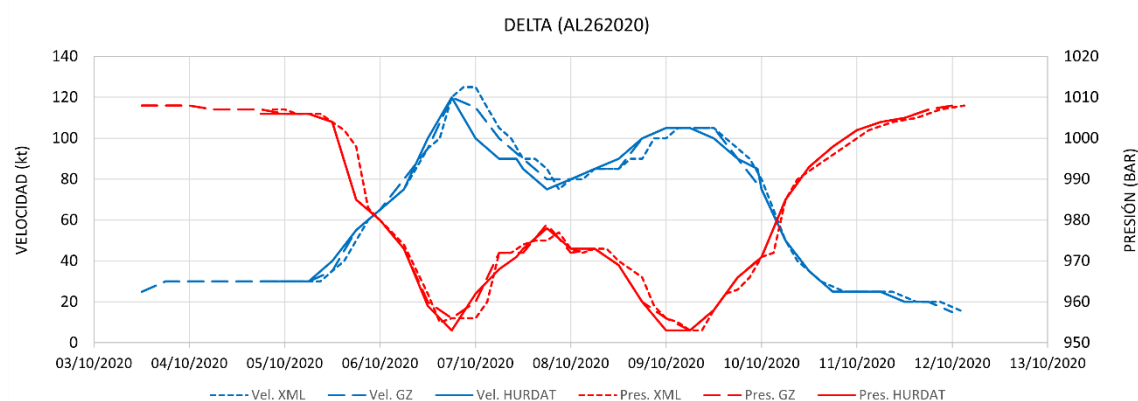


Figura 3. Comparación de los datos de presión central (rojo) y velocidad del ojo (azul) para el huracán Delta 2020.

## 2.2 Comparación de campos de viento

### 2.2.1 Modelo implementado

Para el cálculo de los campos de viento producidos por un huracán en cualquier punto de su trayectoria se sigue la metodología propuesta por Silva et al. (2002) para lo cual se requiere de cierta información meteorológica: Presión central mínima, velocidad de traslación, radio de vientos máximos (RMW) y ubicación geográfica (latitud y longitud). La mayoría de esta información está disponible en los archivos HURDAT2 de la NOAA, o se puede calcular a partir de los datos que contiene este archivo (Reinoso et al., 2006), como el radio de vientos máximos, el cual se obtiene usando la ecuación 1 propuesta por Vickery y Wadhwa (2008).

$$\ln(RMW) = 3.015 - 6.291 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 0.0337 \Psi \quad (1)$$

Donde  $RMW$  es el radio de vientos máximos (km),  $\Delta p$  es la diferencia entre la presión ambiental y la presión mínima a nivel del mar (mb) y  $\Psi$  es la latitud (grados).

De acuerdo con Silva, la presión atmosférica a cualquier distancia del ojo del huracán se define por la ecuación 2:

$$Pr = P_0 + (P_N - P_0)^{-RMW/r} \quad (2)$$

Donde  $Pr$  es la presión a una distancia  $r$  del ojo del huracán,  $P_N$  es la presión periférica (1013 mb) y  $P_0$  es la presión en el ojo del huracán.

Por otro lado, se menciona que el gradiente máximo de viento,  $U_R$  (km/h), de un huracán puede obtenerse a través de la ecuación 3:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fRMW \quad (3)$$

Donde  $f$  representa la fuerza de Coriolis como  $f = 2\omega \sin\phi$ , donde  $\omega$  es la velocidad orbital de la Tierra ( $\omega \approx 0.2618 \text{ rad/h}$ ) y  $\phi$  la latitud.

Finalmente, el modelo original de Silva menciona que la velocidad del viento (en intervalos de 1 minutos a una altura de 10 m) para un huracán en movimiento a una distancia  $r$  desde el centro del huracán está dada por la ecuación 4.

$$W = 0.886(F_V U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)) \quad (4)$$

Donde:

$W$  = Velocidad sostenida del viento a una altura de 10 m.

$F_V = U_r/U_R$  es un factor de amortiguación calculado como la relación de la velocidad del viento en  $r$ ,  $U_r$ , y el gradiente máximo de viento,  $U_R$ . La estimación de este factor se describe en Silva et al. (2002).

$(\theta + \beta)$  = ángulo entre la velocidad de traslación ( $V_F$ ) y la velocidad del viento  $U_R$ , a una distancia radial  $r$ , desde el centro del ciclón tropical, y es positivo en el lado derecho y negativo en el lado izquierdo.

$V_F$  = Velocidad de traslación del huracán.

Como puede verse, la presión mínima a nivel del mar es la principal variable independiente, lo cual es conveniente ya que es una medición más fiable debido a que los barómetros son instrumentos que tienden a sufrir menor daño cuando son golpeados por un huracán a diferencia de los medidores de viento. Sin embargo, la principal desventaja de esta metodología es que los daños a edificios e infraestructura durante un huracán están directamente relacionados a la velocidad máxima del viento, y el calcularla a partir de la presión introduce necesariamente un error en el proceso de modelado.

Para evitar este error, se puede tomar la velocidad máxima del viento proporcionada por la NOAA tanto en el formato HURDAT2 como en los reportes *Best track* preliminares y avisos en tiempo real para el cálculo del campo eólico, es decir  $U_R$ , como se describe en los siguientes párrafos.

Considerando el modelo original de Silva de la ecuación 4, tenemos que la velocidad máxima del viento ( $MWS$ ), modelada a una distancia igual al radio de vientos máximos  $RMW$  (es decir con  $F_V = 1$ ) y una ubicación tal que  $\cos(\theta + \beta) = 0$  se puede calcular como:

$$MWS = 0.886(U_R + 0.5V_F) \quad (5)$$

Despejando  $U_R$  queda:

$$U_R = \frac{MWS}{0.886} - 0.5V_F \quad (6)$$

Lo que finalmente permite usar el valor reportado de  $MWS$  para calcular  $U_R$ , eliminando la incertidumbre producida por el cálculo de la velocidad de viento a través de la presión atmosférica.

## 2.2.2 Comparación de velocidades de viento modeladas con diferentes datos de entrada

Como vimos en la sección 2.1, los diferentes conjuntos de datos disponibles presentan diferencias entre sí, y modelar las intensidades de los huracanes con cada uno de estos conjuntos lleva en varias ocasiones a resultados considerablemente diferentes. Por ejemplo, la figura 4 muestra las velocidades máximas de viento modeladas en diferentes ubicaciones a lo largo de la costa de la península de Yucatán para el huracán Delta, donde se aprecian variaciones importantes entre las velocidades máximas modeladas con HURDAT2 y los dos datasets de tiempo real. La figura 5 muestra el factor promedio de la relación entre los archivos GZ y XML con respecto a HURDAT2 en las siete ubicaciones para algunas tormentas de la temporada 2020 en el Atlántico.

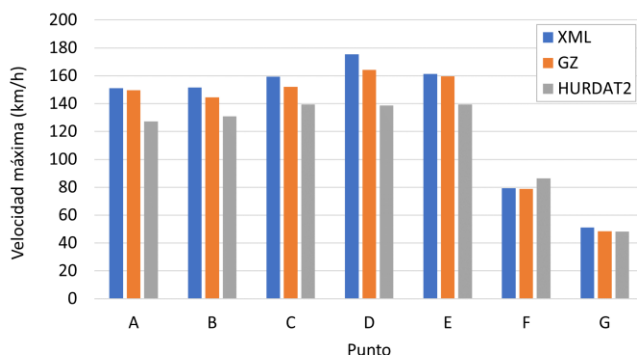


Figura 4. Velocidad del viento modelada para el huracán Delta 2020 en distintas ubicaciones.

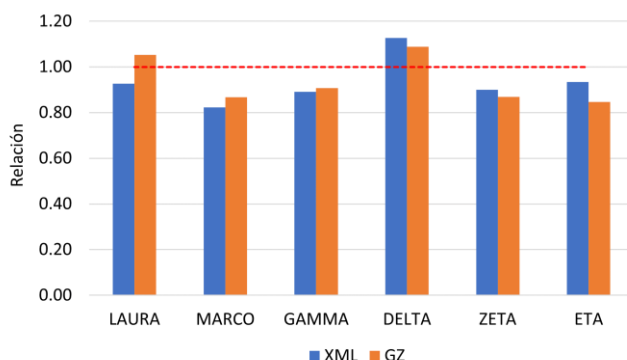


Figura 5. Relación promedio de velocidad modelada de los archivos GZ y XML con HURDAT2 en distintas ubicaciones para huracanes de la temporada 2020.

### 3 SIMULACIÓN DE TRAYECTORIAS

El registro de huracanes que han afectado nuestro país data de finales del siglo XIX. Sin embargo, no es sino hasta mediados del siglo XX que se dispone de registros de sus trayectorias completas y de parámetros indicativos de su severidad. En estas condiciones, la base de datos útiles de huracanes es limitada. Por tal razón, es necesario extenderla, por la vía de la generación de huracanes artificiales o estocásticos.

Para generar huracanes estocásticos, utilizaremos la estrategia de perturbar las trayectorias y los valores de presión mínima a nivel del mar, de huracanes reales que hayan sido correctamente registrados. A continuación, se describen estos procesos de perturbación.

#### 3.1 Perturbación de trayectorias

Supongamos que la trayectoria de un huracán real queda definida por la posición de su ojo en diferentes instantes. Denotaremos a la latitud y longitud geográficas de esta posición, que cambia con el tiempo, con  $x_s(t_k)$  y  $y_s(t_k)$ , respectivamente. Hemos introducido el subíndice k para hacer notar que, puesto que los parámetros del huracán son conocidos sólo para instantes discretos, los huracanes artificiales se construirán también para instantes discretos.

Sean  $x_s(t_k)$  y  $y_s(t_k)$  los valores de longitud y latitud del huracán artificial. Nuestro proceso de simulación, que ilustraremos solo con la longitud, consiste en perturbar aleatoriamente las posiciones sucesivas del ojo del huracán de acuerdo con el siguiente esquema. Para el tiempo  $t_1$ :

$$x_s(t_1) = x(t_1) + e_1 \quad (7)$$

donde  $e_1$  es una variable aleatoria con distribución normal de media cero y desviación estándar  $\sigma$ . Para el instante  $t_2$ :

$$x_s(t_2) = x_s(t_1) + \Delta x_1 + e_2 = x_s(t_1) + (x(t_2) - x(t_1)) + e_2 \quad (8)$$



Donde  $e_2$  es también una variable aleatoria con distribución normal de media cero y desviación estándar  $\sigma$  independiente de  $e_1$ . Nótese que para este instante, y todos los sucesivos, lo que se está perturbando en realidad no es la posición, sino el “salto” que dio el huracán entre un instante y otro. Sustituyendo la ecuación 7 en la 8, puede llegarse a que:

$$x_s(t_2) = x(t_2) + e_1 + e_2 \quad (9)$$

Procediendo de manera similar para los instantes sucesivos, puede llegarse a la conclusión de que, para el instante  $k$ :

$$x_s(t_k) = x(t_k) + \sum_{i=1}^k e_i \quad (10)$$

Puesto que todas las variables aleatorias se consideran de media cero, varianza  $\sigma^2$  e independientes entre sí, es posible determinar el valor esperado y la varianza de la posición del ojo en el instante  $k$ :

$$E[x_s(t_k)] = x(t_k) \quad (11)$$

$$VAR[x_s(t_k)] = \sum_{i=1}^k VAR(e_i) = k\sigma^2 \quad (12)$$

En otras palabras, la posición esperada del huracán artificial en el instante  $k$  es igual a la posición observada del huracán semilla, mientras que la varianza de la posición crece linealmente con el tiempo; se trata entonces de un proceso estocástico de Wiener.

### 3.2 Presión mínima a nivel del mar

Para estimar la presión central de los huracanes una vez que se han generado sus trayectorias se utilizó un método de auto regresión. Para esto, se generó una cuadrícula de 5x5 grados sobre la región de interés, donde se estableció una regresión lineal para cada celda y para todos los huracanes observados disponibles, donde la presión mínima a nivel del mar en el instante  $t$  es la variable dependiente y las variables independientes son los valores de presión mínima a nivel del mar en los instantes  $t - 1$  y  $t - 2$ , tal como se muestra en la ecuación 13:

$$Cp_{t,obs} = a_0 + a_1 Cp_{t-1,obs} + a_2 Cp_{t-2,obs} + r \quad (13)$$

Donde:

$Cp_{t,obs}$  es la presión observada en el instante  $t$ .

$Cp_{t-1,obs}$  y  $Cp_{t-2,obs}$  son los valores observados de presión en los instantes  $t - 1$  y  $t - 2$ .

$r$  es el valor residual (en mb).

$a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes de la regresión

Mediante la ecuación 13 se ajustaron los coeficientes de regresión para cada una de las celdas. La misma ecuación se utilizó para generar los valores de la presión mínima al nivel del mar para los ciclones estocásticos. Así, para cada paso de tiempo  $t$  de un ciclón estocástico, dada su ubicación de longitud y latitud tenemos:

$$Cp_{t,sim} = a_0(x, y) + a_1(x, y)Cp_{t-1,obs} + a_2(x, y)Cp_{t-2,obs} + r_\sigma \quad (14)$$

Donde:

$Cp_{t,sim}$  es la presión simulada en el instante  $t$ .

$Cp_{t-1,obs}$  y  $Cp_{t-2,obs}$  son los valores observados “reales” de presión en los instantes  $t - 1$  y  $t - 2$  del huracán semilla.

$a_0(x, y)$ ,  $a_1(x, y)$  y  $a_2(x, y)$  son los coeficientes de la regresión específicos para la ubicación  $(x, y)$ .

$r_\sigma$  es el valor residual (en mb).

Los valores aleatorios de  $r_\sigma$  se generaron utilizando una función de distribución específica ajustada a tal efecto sobre los valores reales de los residuos. En particular, después de considerar varias funciones de distribución, se encontró que una distribución  $t$  a escala de localización proporcionaba el mejor ajuste entre los residuales observados y los simulados.

### 3.3 Velocidad máxima del viento

Se sabe que la velocidad máxima del viento está fuertemente correlacionada con la presión mínima a nivel del mar (Holland, 2008; Knaff y Zehr, 2007). En la literatura se pueden encontrar diversas relaciones, normalmente con la forma de una ecuación polinomial de segundo grado. En este trabajo se relacionaron ambas variables como se muestra en la ecuación 15:

$$MWS = aMSLP^2 + bMSLP + c \quad (15)$$

Donde  $W$  es la velocidad del viento (km/h),  $MSLP$  es la presión mínima a nivel del mar y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son los coeficientes de calibración.

Sin embargo, también es ampliamente sabido que la máxima velocidad del viento está relacionada con el tamaño del huracán, es decir, el radio de vientos máximos (RMW), lo que implica que huracanes grandes tienden a tener velocidades máximas del viento mayores y viceversa. Por lo que para asegurarnos de no tener huracanes irreales se incluyó este término en la ecuación, tal como se muestra a continuación:

$$MWS = \beta_0 + \beta_1MSLP^2 + \beta_2MSLO + \varepsilon \quad (16)$$

Donde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son coeficientes calibrados con los datos observados (Demuth et al., 2006) y  $\varepsilon$  es el término aleatorio de la regresión.

### 3.3.1 Efecto tierra adentro

Para considerar el decaimiento de la intensidad de los vientos cuando un huracán entra a tierra se utilizó el modelo propuesto por Kaplan y Demaria (1995), donde se relaciona la velocidad máxima del viento del huracán al momento de tocar tierra con el tiempo transcurrido desde que lo hizo, a través de la siguiente expresión:

$$V(t) = V_b + (RV_0 - V_b)e^{-\alpha t} \quad (17)$$

Donde:

$V(t)$  es la velocidad máxima del viento (en nudos) del huracán en el momento  $t$  (en horas).

$V_b$  es la velocidad de viento de fondo, alrededor de 27kt (Kaplan y Demaria, 1995).

$R$  es un factor de reducción por rugosidad de la superficie (no usado en este trabajo, por lo tanto  $R = 1$ )

$V_0$  es la velocidad máxima al momento de que el huracán toca tierra.

$\alpha$  es el coeficiente de decaimiento exponencial.

Por lo que, a fin de reproducir la variabilidad natural del coeficiente decaimiento exponencial  $\alpha$ , se trató a este como una variable aleatoria de distribución log-normal, de forma que para cada huracán estocástico que toca tierra, la velocidad del viento se calcula siguiendo la relación descrita en la ecuación 17 con un coeficiente aleatorio.

### 3.4 Comparación de tasas de excedencia

Finalmente, para corroborar que la generación de los catálogos estocásticos con la metodología descrita anteriormente sea confiable, se procedió a calcular curvas de tasas de excedencia tanto de los eventos estocásticos como de los eventos históricos para diferentes ciudades en México y comparando estas curvas con los datos disponibles en el manual de la CFE para diseño por viento de 2008 (figuras 6 a 8), tomando en cuenta que éstas consideran todas las fuentes de viento y no solo las producidas por huracanes.

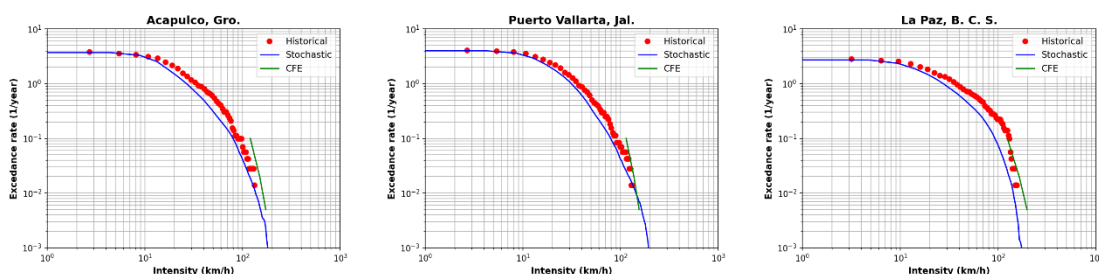


Figura 6. Comparación de tasas de excedencia entre los eventos históricos y estocásticos para ciudades en la costa del Pacífico.

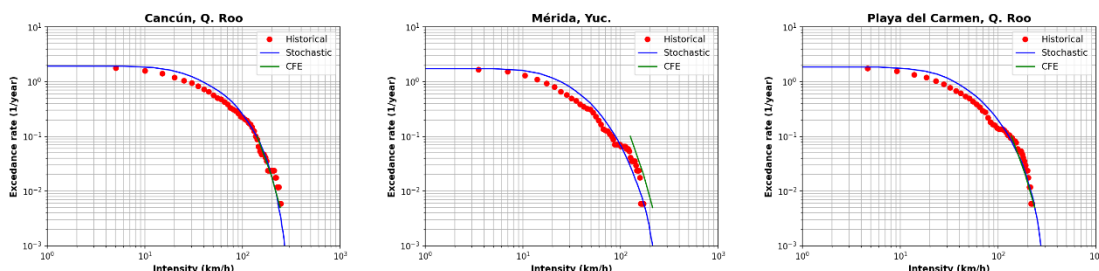


Figura 7. Comparación de tasas de excedencia entre los eventos históricos y estocásticos para ciudades en la costa del Caribe mexicano.

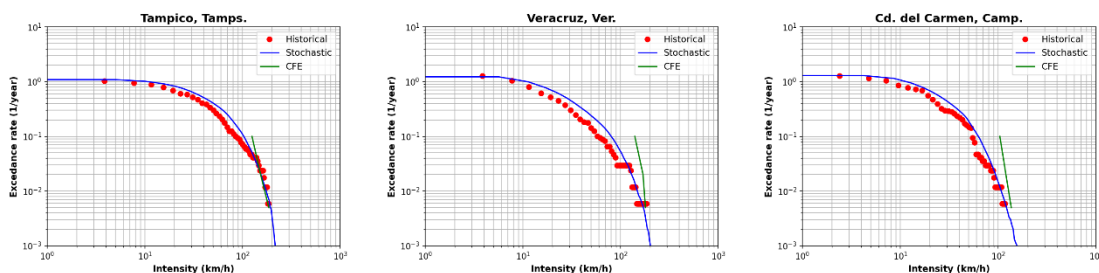


Figura 8. Comparación de tasas de excedencia entre los eventos históricos y estocásticos para ciudades en la costa del Golfo de México.

## 4 CONCLUSIONES

Como pudimos observar, las diferencias entre los tres conjuntos de datos pueden ser importantes en los datos que contienen entre sí y los resultados de intensidad modelada que arroja cada conjunto, estas diferencias cobran relevancia en la operación de seguros paramétricos donde el pago está asociado a un valor previamente acordado de localización y/o intensidad de la trayectoria, o a la modelación de intensidades utilizando ecuaciones de campo. Por ello en la operación de seguros paramétricos es importante definir la fuente empleada en la operación post-evento (i.e. adv o CARQ) buscando la mayor coherencia posible con los datos utilizados para la generación del catálogo estocástico (HURDAT2). Para el caso de la cuenca del Atlántico Norte en México, los resultados de este análisis, y principalmente para las tormentas fuertes, indican son los del conjunto de datos *Best track* preliminares – CARQ.

Adicionalmente, a estas diferencias, tenemos el buen ajuste de las curvas tasas de excedencia de los catálogos estocásticos comparadas con las de eventos históricos, lo que ayuda a reducir el riesgo de base en la implementación de seguros paramétricos en el país, los cuales, ante la falta de la cultura del aseguramiento de bienes en el país pueden ofrecer una gran alternativa para incrementar la resiliencia de la población afectada por estos fenómenos meteorológicos.

## 5 REFERENCIAS

- CENAPRED. (2020). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México 2019*. [http://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](http://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- CENAPRED. (2021). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México 2020. Resumen ejecutivo*.
- Demuth, J. L., DeMaria, M., & Knaff, J. A. (2006). Improvement of Advanced Microwave Sounding Unit Tropical Cyclone Intensity and Size Estimation Algorithms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(11), 1573–1581. <https://doi.org/10.1175/JAM2429.1>
- Hinojoza, O., Huerta, B., Garay, O., Salgado, M., & Ordaz, M. (2022). Herramienta para el diseño y operación de seguros paramétricos por sismo en México. *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Holland, G. (2008). A Revised Hurricane Pressure–Wind Model. *Monthly Weather Review*, 136(9), 3432–3445. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2395.1>
- IRI. (2010). *Seguros en base a índices climáticos y riesgo climático: Perspectivas para el desarrollo y la gestión de desastres*. Instituto Internacional de Investigación para el Clima y Sociedad. <http://iri.columbia.edu>
- Kaplan, J., & Demaria, M. (1995). A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall. *Journal of Applied Meteorology*, 34(11), 2499–2512. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2499:ASEMFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2499:ASEMFP>2.0.CO;2)
- Knaff, J. A., & Zehr, R. M. (2007). Reexamination of Tropical Cyclone Wind–Pressure Relationships. *Weather and Forecasting*, 22(1), 71–88. <https://doi.org/10.1175/WAF965.1>
- Landsea, C. W., & Franklin, J. L. (2012). Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Monthly Weather Review*, 141. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1>
- Reinoso, E., Ordaz, M., Huerta, B., Zeballos, A., Avelar, C. E., & Hernández, J. J. (2006). METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EDIFICIOS Y NAVES INDUSTRIALES ANTE FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS OCURRIDOS EN MÉXICO. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*.
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G., & Díaz, G. (2002). OCEANOGRAPHIC VULNERABILITY TO HURRICANES ON THE MEXICAN COAST. *Coastal Engineering 2002*, 39–51. [https://doi.org/10.1142/9789812791306\\_0004](https://doi.org/10.1142/9789812791306_0004)
- Vickery, P. J., & Wadhwa, D. (2008). Statistical Models of Holland Pressure Profile Parameter and Radius to Maximum Winds of Hurricanes from Flight-Level Pressure and H\*Wind Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10), 2497–2517. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1837.1>