

DETERMINACIÓN DE LA MAREA METEOROLÓGICA

Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl; M. en C. Etelberto Dionisio Serrano Flores; M. en C. María Dolores Servín Lugo; Ing. Arq. María de Lourdes Méndez Reyes.

rramirez@imt.mx; eserrano@imt.mx; dservin@imt.mx; lourdes.mendez@imt.mx

INTRODUCCIÓN

La comprensión de la variabilidad del nivel del mar, implica la comprensión de la variabilidad del océano, así como de los intercambios entre el océano, la tierra, la criosfera, y la atmósfera, dichos cambios abarcan un amplio rango de escalas temporales y espaciales.

Además del oleaje y de las mareas astronómicas, la presencia de un huracán ejerce su influencia sobre el nivel del mar de las siguientes maneras:

- La presión atmosférica ejerce una fuerza vertical continua sobre la superficie del mar, de manera que sus variaciones producen cambios en el nivel del agua.
- El viento cuando sopla sobre el mar provoca un desplazamiento del agua que si se ve interrumpido por la presencia de tierra produce una convergencia y por lo tanto un ascenso del nivel del mar.

A la variación en el nivel del mar causada por la presencia de huracanes tropicales, se le conoce como marea meteorológica (figura 1) y se puede determinar por medio de mediciones del nivel de mar, formulaciones y/o modelos numéricos.



Figura 1. Esquema general de la marea meteorológica
Fuente: ©The COMET Program

MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR

Para determinar la marea meteorológica con base en las mediciones del nivel del mar, simplemente se resta o se obtienen los residuos entre la marea observada en los registros históricos y los pronósticos de los niveles de la marea obtenidos con modelos numéricos (figura 2).

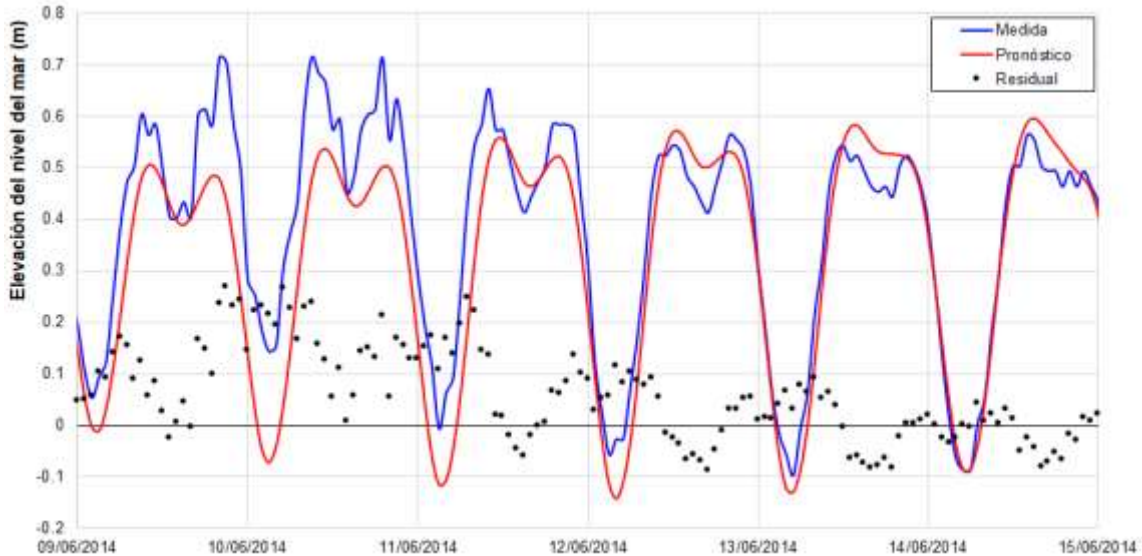


Figura 2. Determinación de la marea meteorológicas a partir de mediciones de los niveles del mar.
Fuente: Elaboración propia con información de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM) del IMT

FORMULACIONES

Debido a que la estimación de la marea meteorológica, está limitada por la escasez de mediciones y de información histórica, un método para hacer la estimación es mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$MM = S_p + S_v$$

Donde:

MM	Marea meteorológica
S_v	Sobreelevación del nivel del mar por efecto del viento (m)
S_p	Sobreelevación del nivel del mar por efecto del gradiente de presiones (m)

El cálculo de la sobreelevación por viento se puede obtener con la fórmula desarrollada por Keulegan

$$S_v = \frac{kV^2x}{g(H_1 - H - S_v)} \ln \frac{H_1}{H + S_v}$$

Donde:

H_1	Profundidad en el borde de la plataforma (m)
-------	--

H	Profundidad en el sitio de estudio (m)
V	Velocidad máxima del viento sostenido (m/s)
x	Distancia desde el borde continental hasta la profundidad H (m)
k	Coefficiente de esfuerzo del viento (3×10^{-6})
g	Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

El cálculo de la sobreelevación por gradiente de presión se puede obtener con la fórmula desarrollada por Per Brunn

$$S_p = 0.13(P_n - P_0) \left(1 - e^{-\frac{R}{r}}\right)$$

Donde:

P_n	Presión neutral (1013 mbar)
P_0	Presión en el centro del huracán (mbar)
R	Radio del máximo viento (km)
r	Distancia radial desde el centro del huracán al punto de cálculo sobre una línea transversal (km)

MÉTODO DEL NOMOGRAMA

Otro método simplificado para obtener la marea meteorológica es mediante el nomograma de Jelesniansky (1972) descrito en el Shore Protection Manual del Coastal Engineering Research Center de la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica.

El método se basa en mediciones estadísticas, así como en análisis empíricos que permiten una estimación rápida de la marea meteorológica, a partir del índice central de presión, el radio de vientos máximos, velocidad de avance del sistema y el ángulo con que la trayectoria del huracán intercepta la línea de costa.

El máximo pico de la sobreelevación del nivel del mar por la marea meteorológica (en pies) esta dado por la siguiente expresión

$$S_v = F_M(S_I)$$

Donde:

S_I	Sobreelevación pico del nivel del mar (pies), obtenido con el nomograma de la figura 3 con el índice central de presión del huracán y el radio de vientos máximos.
F_M	Factor de corrección por el movimiento de la tormenta, obtenido con el nomograma de la figura 4 con la velocidad de avance y el ángulo que forma la trayectoria del huracán y a la línea de costa.

La depresión causada por el huracán (Δ_p) y el radio de viento máximo (R) se obtienen mediante las siguientes expresiones.

$$\Delta p = 1013.25 - P_0$$

$$R = 0.0006574e^{0.01155P_0}$$

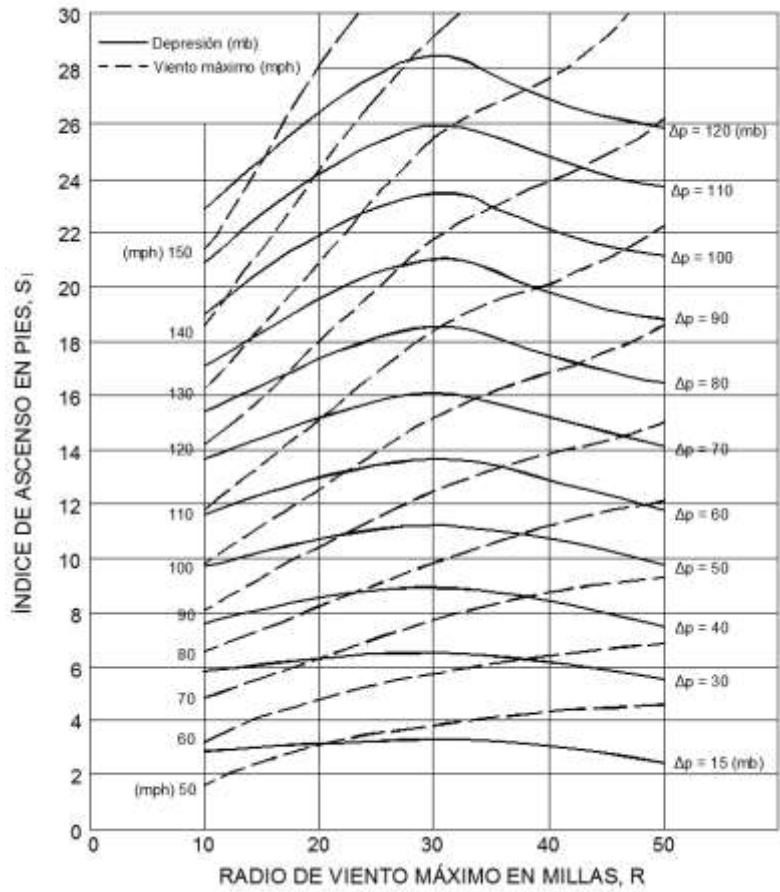


Figura 3. Nomograma para determinar el índice de ascenso (Jelesnianski, 1972)

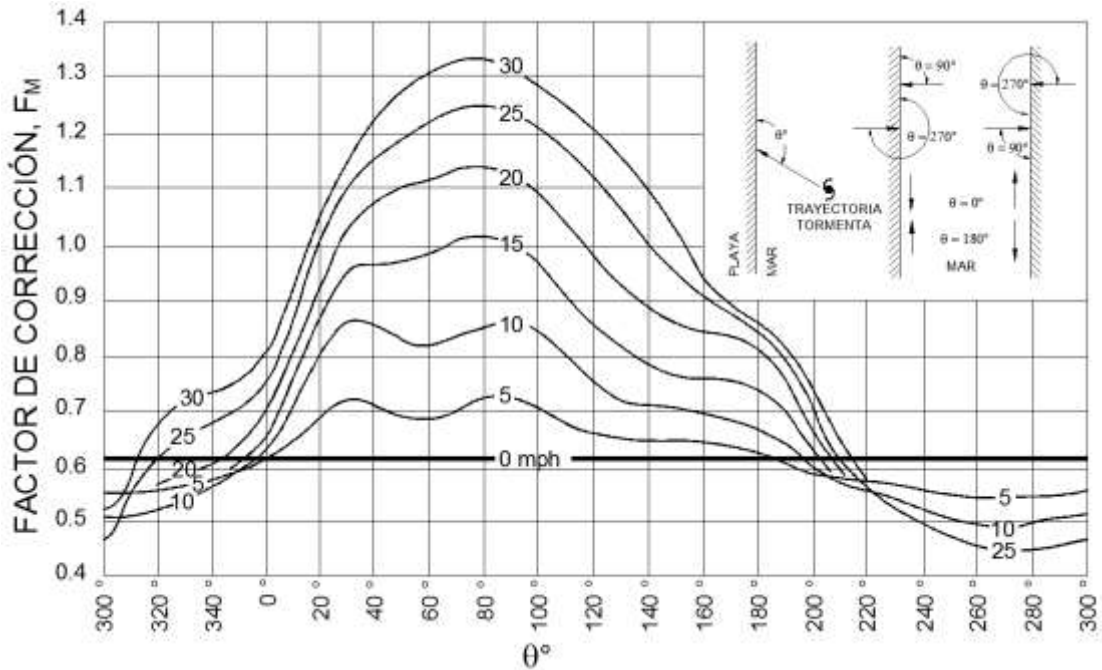


Figura 4. Nomograma para determinar el factor de ajuste (Jelesnianski, 1972)

MODELOS NUMÉRICOS

Actualmente, otra forma para estimar la sobreelevación del nivel del mar generada por huracanes tropicales, en sitios con insuficiente información histórica, es la implementación de modelos hidrodinámicos en 2 dimensiones e integrados en la vertical, forzados a partir de los campos de viento generados por el huracán, con la desventaja inherente de requerir información sobre las variables climáticas que definen al huracán y que pocas veces está disponible para todos los eventos históricos.

Uno de estos modelos es el modelo hidrodinámico Flow Model FM del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, el cual emplea el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) incompresibles, sujetas a las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática. Las ecuaciones que describen los flujos y las variaciones del nivel del mar son las siguientes:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q \\ - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega_p \\ - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

Donde:

$h(x, y, t)$	Profundidad del agua (m).
$\zeta(x, y, t)$	Superficie de elevación (m).
$p, q(x, y, t)$	Flujos de densidad en las direcciones x, y ($m^3/s/m$) = (uh, vh)
u, v	Velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x, y
C	Resistencia de Chezy ($m^{1/2}/s$)
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2).
f	Factor de fricción por viento
V, V_x, V_y	Componentes de velocidad del viento en las direcciones x, y (m/s)
Ω	Parámetro de Coriolis dependiente de la latitud
p_a	Presión atmosférica ($kg/m/s^2$)
ρ_w	Densidad del agua (kg/m^3).
x, y	Coordenadas cartesianas(m).
t	Tiempo.
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	Componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

La fricción en el fondo se determina por medio de la siguiente ley cuadrática

$$\frac{\overline{\tau}_b}{\rho_w} = C_f \overline{u}_b |\overline{u}_b|$$

Donde:

Ub Velocidad del flujo por encima del fondo

Cf Coeficiente de arrastre, en términos del número de Manning

$$C_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2}$$

M Número de Manning, definido como

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}}$$

k_s Rugosidad del fondo

El factor de fricción por viento se determina de acuerdo con Smith & Banke (1975), considerando la siguiente parametrización

$$f(v) = \begin{cases} f_0 & \text{para } V < V_0 \\ f_0 + \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \cdot (f_1 - f_0) & \text{para } V_0 \leq V \leq V_1 \\ f_1 & \text{para } V > V_1 \end{cases}$$

Donde $f_0 = 0.00063$, $V_0 = 0$ m/s y $f_1 = 0.00260$, $V_1 = 30$ m/s, conforme a la gráfica mostrada en la figura 5

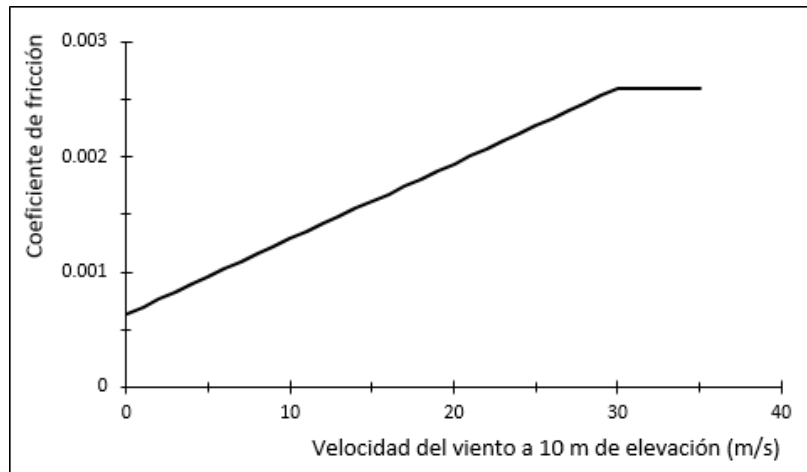


Figura 5. Coeficiente de fricción por viento (Smith & Banke, 1975)

Las velocidades del viento y de la presión atmosférica se obtienen del modelo de vórtice de Rankine (1947)

$$V_g(r) = \begin{cases} V_{max} \cdot \left(\frac{r}{R_{mw}}\right) & \text{para } 0 \leq r < R_{mw} \\ V_{max} \cdot \left(\frac{R_{mw}}{r}\right)^X & \text{para } r > R_{mw} \end{cases}$$

Donde:

V_g	Gradiente rotacional del viento
V_{max}	Velocidad máxima de viento en m/s
X	Parámetro de ajuste de la distribución del viento, valores típicos entre 0.4 y 0.6
R_{mw}	Radio de máximo viento en kilómetros, propuesto por Kalourazi como:

$$R_{mw} = 0.0008e^{0.0113pc}$$

pc presión en el ojo del huracán en Hpa

EJEMPLO DE APLICACIÓN CON MODELO NUMÉRICO

Los modelos numéricos presentan grandes ventajas sobre los métodos simplificados, ya que pueden permitir la interacción de diferentes variables, (por ejemplo, los efectos de la batimetría), y a su vez pueden cubrir grandes áreas para determinar la sobreelevación del nivel del mar en diferentes puntos simultáneos.

Como ejemplo de aplicación de los modelos numéricos para la determinación de la marea meteorológica, se seleccionó el huracán Pauline, que se presentó en el Pacífico del 05 al 10 de octubre de 1997, y alcanzó la categoría 4 en la escala Saffir – Simpson con vientos de 215 km/hr y rachas de hasta 240 km/hr, afectando a los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero.

Para la implementación del modelo numérico, se definió una malla de cálculo, la cual abarcó un área aproximada de 315000 km², cubriendo un frente marítimo de 750 km y hasta la profundidad de -4000 m, dicha malla se elaboró mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, la información topo-batimétrica fue obtenida del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 1 de la National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica en combinación con la información batimétrica obtenida de portulanos, y la información topográfica obtenida del modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Ver figura 6

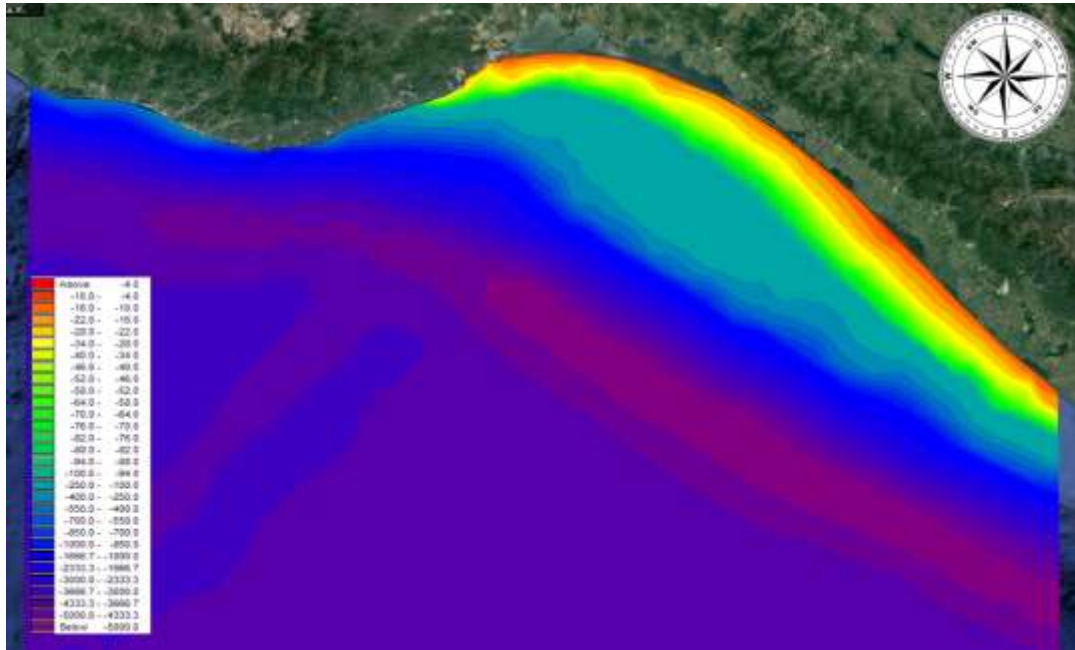


Figura 6. Malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.

La información de la velocidad máxima de viento y la presión en el ojo del huracán, se tomó de la base de datos de dominio público denominada HURDAT2 (Hurricane Databases), publicada por el National Hurricane Center (NHC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la cual contiene información a cada 6 horas de la ubicación (latitud y longitud), velocidad máxima de los vientos sostenidos y presión en el ojo, de las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes del período comprendido entre 1949 – 2020.

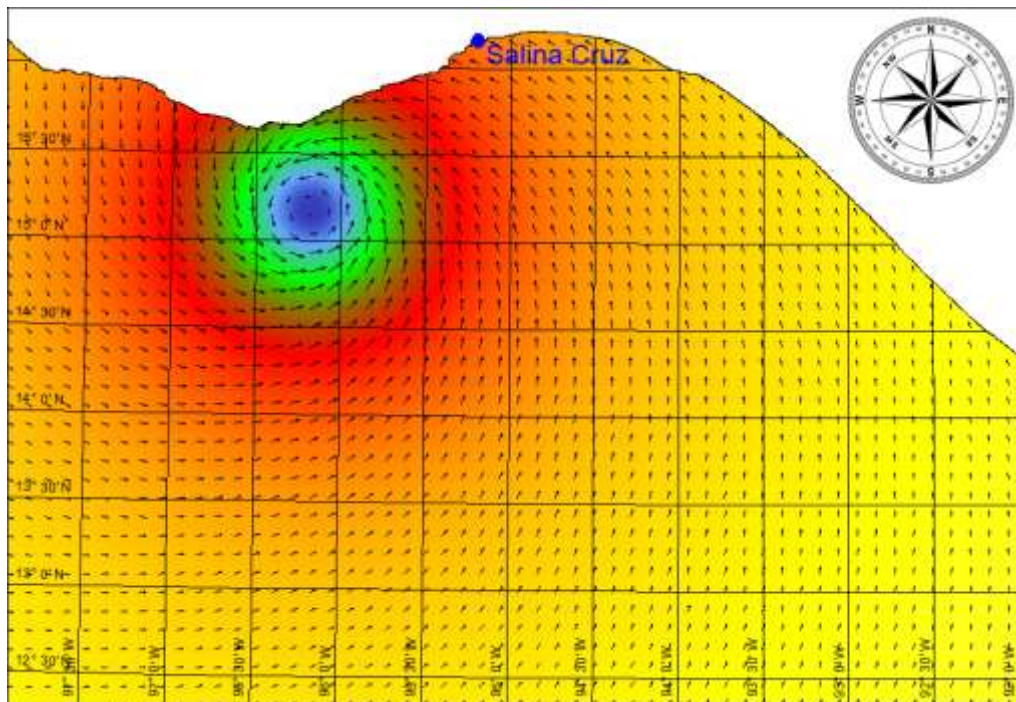


Figura 7. Campos de viento y de presión generados por el huracán Pauline el día 8 de octubre de 1997 a las 17 horas.

Con la información del huracán antes señalada, se realizó la modelación numérica, generando previamente un archivo con los campos de presión y viento a cada hora para el período del 05/11/1997 12:00 al 10/10/1997 06:00. (Figura 7)

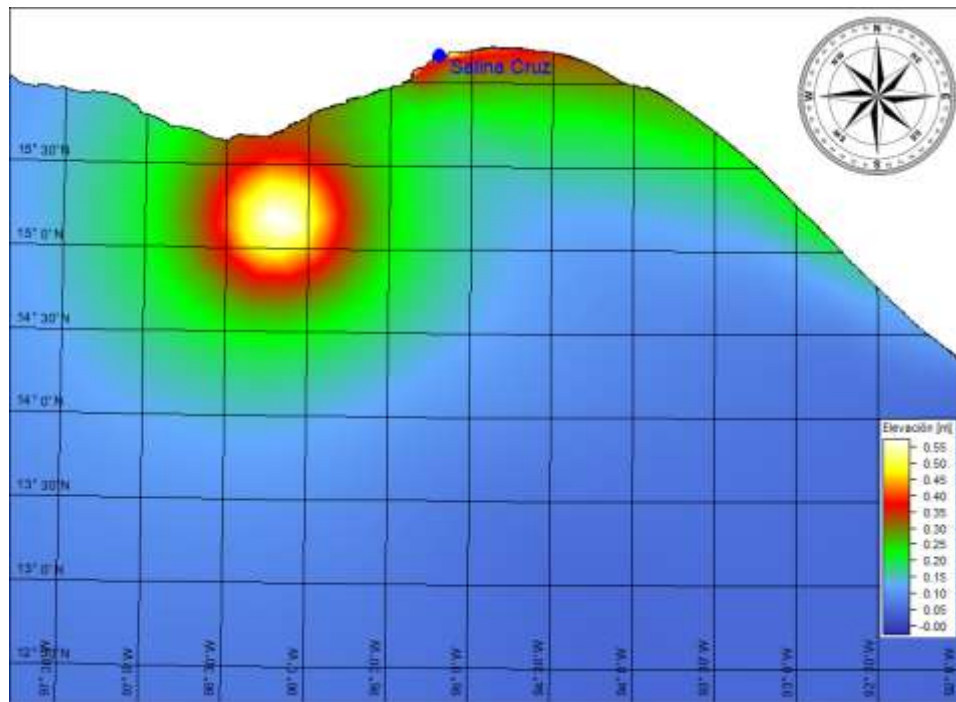


Figura 8. Marea meteorológica generada por el huracán Pauline el día 8 de octubre de 1997 a las 17 horas.

Finalmente, se obtuvo la sobreelevación del nivel del mar que generó el huracán Pauline en diferentes sitios. Cabe señalar que, en la modelación numérica no se incluyó las variaciones del nivel del mar por la marea astronómica, por lo que, la máxima elevación alcanzada en los sitios señalados, pudo ser mayor dependiendo si dicha elevación coincidió con la pleamar del lugar. (Figura 9)

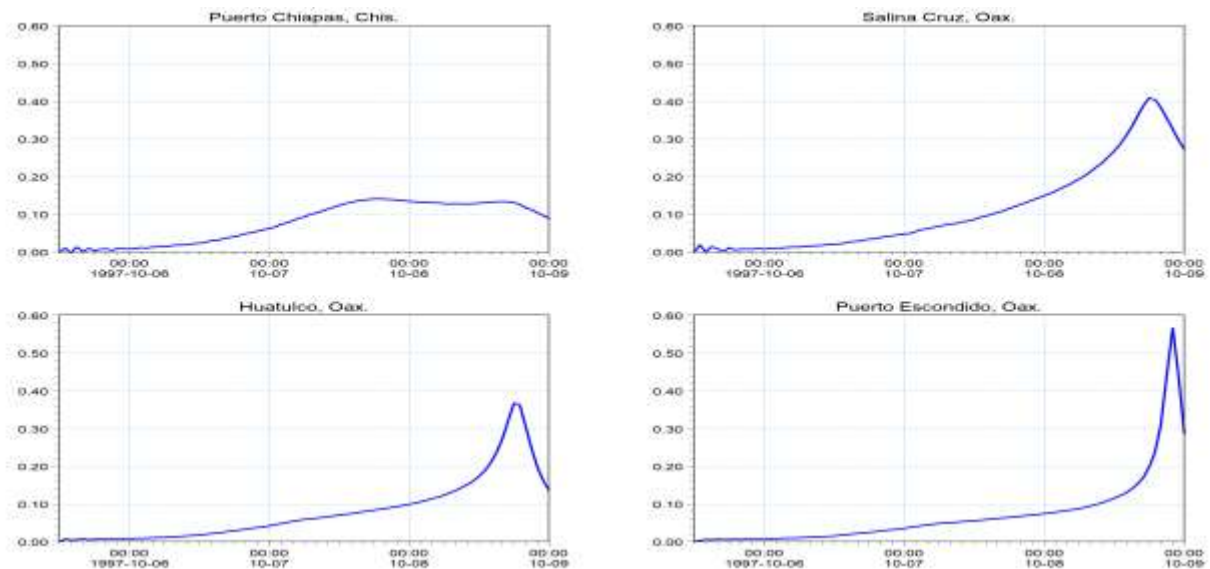


Figura 9. Marea meteorológica generada por el huracán Pauline en 4 puertos del sur de México.

CONCLUSIONES

Los métodos simplificados para la determinación de la marea meteorológica permiten conocer de forma rápida y preliminar la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, sin embargo, un cálculo no adecuado, tendría grandes repercusiones económicas entre las que se podrían destacar, la destrucción considerable de estructuras y bienes portuarios y costeros, entre otros.

La implementación de modelos numéricos que contemplan la interacción de diferentes variables para determinar la marea meteorológica, van a permitir que las estimaciones de la sobreelevación del nivel del mar que se obtengan, sean más precisas, permitiendo definir estrategias para prevenir o mitigar sus efectos, sin embargo, es necesario que dichos modelos numéricos se complementen con mediciones del nivel del mar, a fin de calibrar y validar dichos modelos numéricos y mejorar considerablemente las predicciones que se obtengan para las zonas de interés.

BIBLIOGRAFÍA

CERC, 1984. Shore Protection Manual Vol 1 y 2. Government Printing Office of USA

Danish Hydraulics Institute, 2009. Hydrodynamic Module. Scientific Documentation

Herrejón de la Torre Luis, López Gutiérrez Héctor, Macdonel Martínez Guillermo, Pindter Vega Julio, Pizá Ortiz Juan, 1999. Ingeniería Marítima y Portuaria. Ed Alfaomega, México

Instituto Mexicano del Transporte, 2020. Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENOM). México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2020. Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. México.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020. Northeast and North Central Pacific hurricane database (HURDAT2) 1949-2019. USA.

University Corporation for Atmospheric Research, 2017, Tropical Cyclone Storm Surge: Forecasting and Communication. USA