

# REGIONALIZACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA DETERMINAR EL OLAJE GENERADO POR EVENTOS NORTE EN EL GOLFO DE MÉXICO

Mendoza Grande Manuel, Ramírez Xicotencatl Rodolfo, Ocaña Espinosa Karina  
mmendoza@imt.mx, rramirez@imt.mx, kocana@imt.mx

## RESUMEN

En la zona costera del Golfo de México existen obras de infraestructura portuaria muy importantes para el país, por lo que es primordial conocer las características del oleaje que se produce por efecto de los eventos "Norte", en este sentido, los modelos numéricos de propagación de oleaje se han convertido en una herramienta ampliamente utilizada en los últimos años, la cual permite estimar el oleaje que se propaga hacia la costa. Utilizando estos modelos numéricos, se reprodujo el oleaje generado por el efecto de eventos extremos no tropicales "Norte" en el Golfo de México, fenómenos que pueden durar de uno a dos días y los cuales se han incrementado en las últimas décadas, con vientos superiores a 100 km/hr.

En este trabajo, se generaron mapas de oleaje producidos por eventos extremos no tropicales (Norte) en el Golfo de México asociados a diferentes periodos de retorno, y se calcularon por regiones las funciones de distribución de probabilidad para identificar zonas de alto impacto para la infraestructura portuaria y costera del Golfo de México.

**Palabras clave:** Eventos Norte, oleaje, viento, macro áreas.

## ABSTARCT

*In the coastal area of the Gulf of Mexico there are very important port infrastructure structures for the country, so it is extremely important to know the characteristics of the waves that are produced as a result of the "North" events; Numerical wave propagation models have become a widely used tool in recent years, which allows estimating the waves that propagate towards the coast. Using these numerical models, the waves generated by the effect of extreme non-tropical "North" events in the Gulf of Mexico were reproduced, phenomena that can last from one to two days and which have increased in recent decades, with higher winds at 100 km/hr.*

*In this work, wave maps produced by extreme non-tropical events (North) in the Gulf of Mexico associated with different return periods were generated, and probability distribution functions were calculated by region to identify areas of high impact for infrastructure port and coastal area of the Gulf of Mexico.*

**Key word:** North events, wave, wind, macro areas.

## INTRODUCCIÓN

Un evento de “Norte” es un fenómeno meteorológico caracterizado por fuertes vientos fríos que se producen cuando una masa de aire frío se desplaza de norte a sur. Estos eventos suelen ocurrir en las regiones costeras del norte de México y el sur de Estados Unidos, los cuales generan cambios en la temperatura, lluvias intensas y vientos de gran intensidad.

Cuando estas dos masas de aire colisionan, la masa de aire caliente asciende debido a que es menos densa, forma una zona de baja presión. Al mismo tiempo, la masa de aire frío se desplaza hacia el frente de la masa de aire caliente, crea una zona de alta presión.

Estos eventos suelen ser más comunes en invierno, pero también pueden ocurrir en otras épocas del año. Durante un evento de Norte, las temperaturas descienden considerablemente, y en ocasiones provoca las llamadas “heladas”. Además, es posible que se produzcan lluvias intensas y con posibilidad de tormentas eléctricas.

Los vientos asociados a un evento de “Norte” suelen ser muy fuertes, y alcanzan velocidades de hasta 100 km/h. Estos vientos pueden ocasionar daños en la costa, árboles y tendido eléctrico, así como dificultades en la navegación marítima.

La fuerza de los vientos a lo largo del año, y a medida que el otoño se acerca al invierno, la mayoría de los estados en la vertiente oriental del país hasta la Península de Yucatán se encuentran en periodos de fuertes vientos.

De septiembre a mayo de cada año, el aire frío que domina el Polo Norte comienza a moverse más al sur, el cual alcanza la mayor parte del territorio nacional. Estas masas frías generalmente son movidas desde el centro y oeste de Estados Unidos hacia México por un sistema de alta presión importante que tiene una circulación a favor de las manecillas del reloj. Éstas, al ingresar en el Golfo de México, favorecen al aumento de las intensidades del viento debido a la fricción (el viento corre libremente sobre superficies lisas) y el aumento de presión (cuanto mayor es el cambio de presión en un área pequeña, más fuerte el viento).

La circulación del sistema origina la dirección característica del Norte, con duraciones promedio de uno a dos días y rachas de 80 a 100 km/h, ocurren generalmente en la parte central del estado de Veracruz, entre la zona de Laguna Verde y el puerto de Veracruz.

Otro caso más significativo se da en el Istmo de Tehuantepec, especialmente en la zona de la Ventosa, Oaxaca, donde se da presenta el efecto Venturi: los vientos provenientes del golfo de México se acumulan en los límites entre la Sierra de Oaxaca y de Chiapas, y existe un pequeño espacio libre donde el viento se acumula y genera presión para encontrar una salida. En dicha salida pueden alcanzar o superar los 150 km/h y, a veces, puede durar varios días.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la entidad gubernamental encargada de monitorear y pronosticar el clima en México, y además cuenta con una clasificación oficial para los eventos de “Norte”, los cuales están definidos en cinco categorías:

- Moderados, que van de los 20 a 38 km/h.
- Fuertes, que van de los 39 a 61 km/h.
- Muy Fuertes, que van de los 62 a 88 km/h.
- Intensos, que van de los 89 a 117 km/h.
- Severos, que van de los > 118 km/h.

### **INFORMACIÓN DE LOS EVENTOS NORTE**

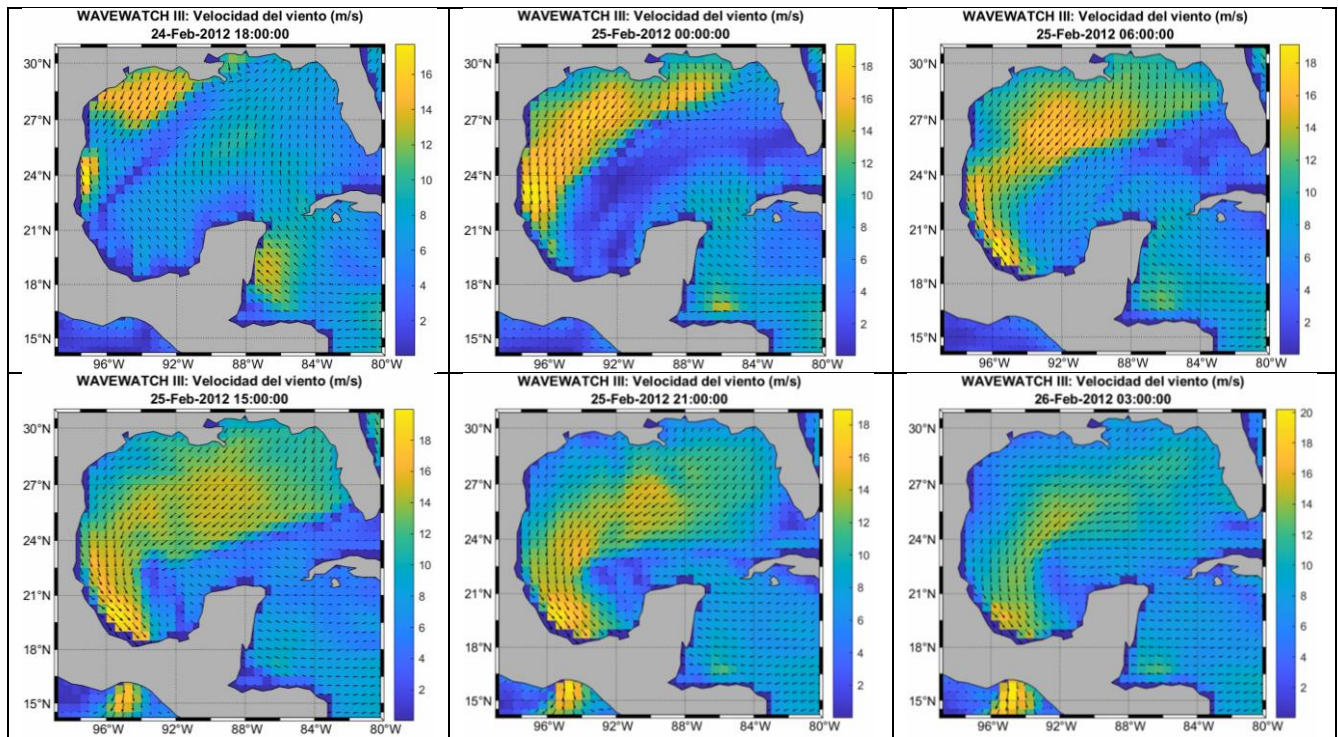
Conocer el viento que se genera en un determinado tiempo, es parte fundamental en los modelos de generación y propagación de oleaje, para lo cual se requiere obtener los campos del viento que circuló en un determinado lugar a fin de definir las condiciones iniciales en los modelos numéricos.

Para la información de viento, se consultó la base de datos denominada Wavewatch III 30-year Hindcast Phase 2, de la cual se obtuvo la velocidad máxima de viento durante los eventos extremos no tropicales (Nortes).

El WAVEWATCH III® 30 años Hindcast Fase 2, es un base de datos de oleaje y viento de 30 años, generada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), el cual utiliza un modelo de tercera generación desarrollado por Ardhuin et al (2010), y está basado en el modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen et al. 1994), dicho modelo se ejecuta en un mosaico de 16 mallas de cálculo regulares (en latitud y longitud) con interacción bidimensional entre las cuadrículas de mayor y menor resolución, y su base de datos de viento es horaria en alta resolución correspondiente al Reanálisis y Predicción del Sistema de Pronóstico Climático (CFSRR por sus siglas en inglés).

El dominio espectral del WAVEWATCH está dividido en 50 intervalos de frecuencia y 36 intervalos direccionales (resolución direccional de 10°). La frecuencia mínima es de 0.035 Hz y el factor de incremento de frecuencia es de 1.07, el cual proporciona un rango de frecuencia de 0.035–0.963. El período que cubre la base de datos es de 41 años de 1979 a 2019.

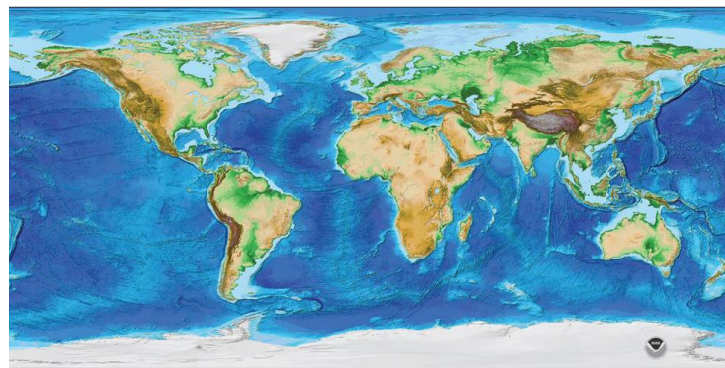
Con la información antes mencionada, se seleccionaron los eventos no tropicales (Nortes), cuya intensidad de viento fuera superior a 39 km/hr, para un total de 664 eventos comprendidos en el período de 1979 a 2019. A manera de ejemplo, en la figura 1, se muestra el evento Norte que se presentó del 24 al 26 de febrero de 2012, en la cual se observa cómo evolucionan los campos de viento sobre el Golfo de México.



**Figura 1 Evolución de un evento Norte en febrero de 2012**

### **INFORMACIÓN BATIMÉTRICA**

La información batimétrica utilizada para el modelo numérico corresponde a la información disponible del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 2022 desarrollado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos de los Estados Unidos de Norteamérica (NGDC, por sus siglas en inglés), el cual es un modelo de relieve global de 15 arco segundos de resolución geográfica de la superficie de la Tierra que combina la topografía terrestre y la batimetría oceánica (ver figura 2).

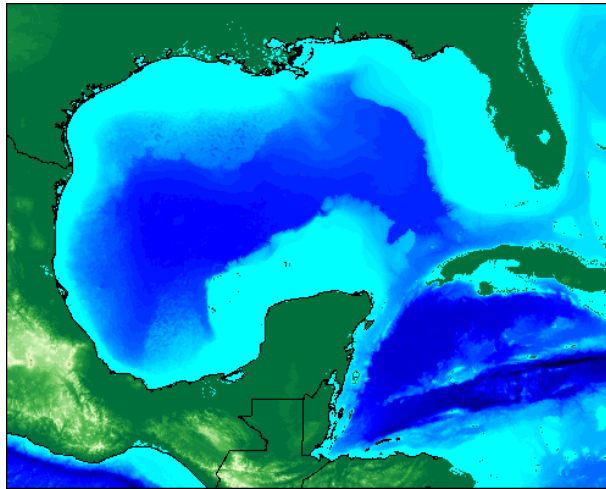


**Figura 2 Modelo de relieve global de superficie ETOPO 2022**

El modelo ETOPO 2022 se construyó a partir de conjuntos de datos globales y regionales, que fueron editados, evaluados y transformados en datos horizontales y verticales, obtenidos de las agencias NGDC, Antarctic Digital Database (ADD), European Ice Sheet Modeling Initiative (EISMINT), Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Japan Oceanographic Data Center (JODC), Caspian Environment

Programme (CEP), Mediterranean Science Commission (CIESM), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Scripps Institute of Oceanography (SIO) e Leibniz Institute for Baltic Sea Research (LIBSR).

De esta fuente de información, se obtuvieron las profundidades de la zona comprendida entre las coordenadas 14.5° de latitud Norte, 100° de longitud Oeste y 31.5° de latitud Norte, 78° de longitud Oeste (Figura 3).



**Figura 3 Información batimétrica de ETOPO 2022 utilizada para este trabajo**

### **MODELO NUMÉRICO**

Se aplicó un modelo de espectro de oleaje de tercera generación para determinar el oleaje producido por los eventos Nortes, forzado a partir de los campos de viento generados por cada uno de dichos eventos.

El cálculo de la generación y propagación del oleaje se realizó mediante el uso del modelo Spectral Waves, el cual simula el crecimiento, transformación y disipación del oleaje generado por el viento, y cuyas principales características son:

- Crecimiento del oleaje debido a la acción del viento.
- Interacción no lineal entre olas.
- Disipación debido al descrestamiento (whitecapping).
- Disipación debido a la fricción de fondo.
- Disipación por asomeramiento debido a la rotura del oleaje.
- Refracción y difracción debido a variaciones batimétricas.
- Interacción oleaje – corriente.

Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, una formulación paramétrica direccionalmente desacoplada, y una formulación totalmente espectral.

La formulación paramétrica direccionalmente desacoplada se basa en una parametrización de la ecuación de conservación del oleaje, de acuerdo con

Holthuijsen (1989), dicha parametrización se realiza en el dominio de la frecuencia y como variables dependientes el momento cero y el primer momento del espectro del oleaje.

El modelo totalmente espectral se basa en la ecuación de conservación del oleaje descrita por Komen et al. (1994) y Young (1999), donde la frecuencia – dirección del espectro del oleaje es la variable dependiente.

La discretización de la ecuación gobernante en el espacio geográfico y espectral se realiza con el método de volumen finito centrado. La integración de tiempo se realiza con un enfoque de pasos fraccionarios, donde se aplica un método explícito de múltiples secuencias para la propagación del oleaje.

Los campos de viento generados por un evento Norte a menudo pueden describirse mediante modelos paramétricos simples basados en algunos parámetros como la velocidad de los vientos máximos.

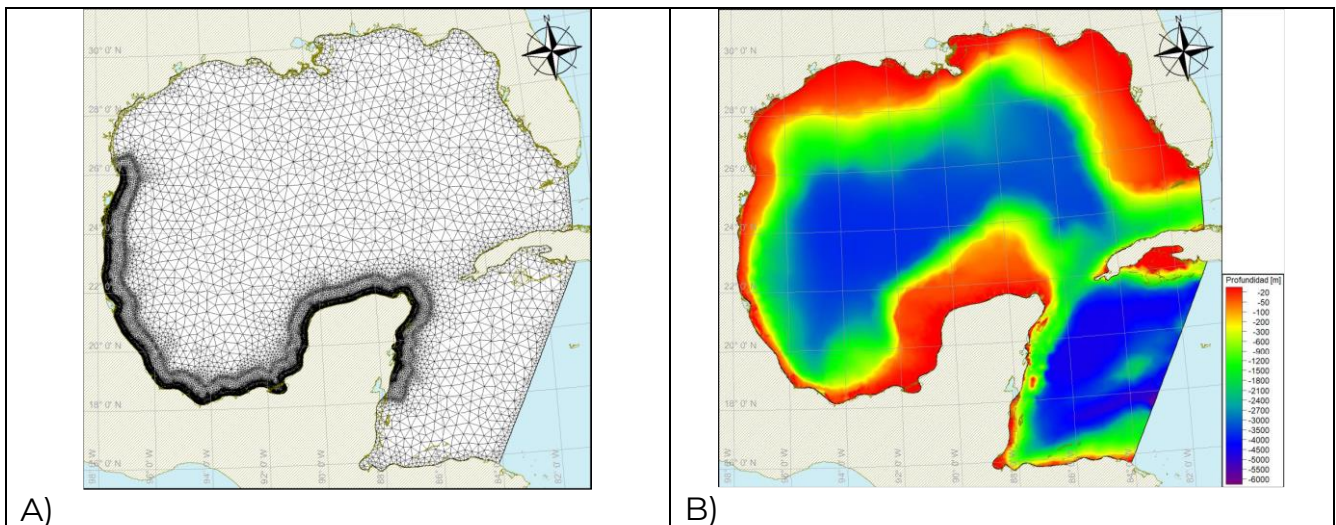
### **MALLA DE CALCULO**

Para realizar el modelo numérico se definió una malla de cálculo, mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, dicho método permite la distribución óptima de los nodos de cálculo, en el cual, se adapta la resolución de las celdas a las características físicas del lugar y a las zonas de interés dentro del modelo numérico, lo que permite focalizar la mayor resolución a la zona de estudio y el resto del dominio con un espaciamiento amplio, y con ello se optimiza el rendimiento computacional.

Como se indicó anteriormente, la malla de cálculo quedó constituida por celdas triangulares de diferentes tamaños que van de una resolución gruesa (aproximadamente 10 km entre nodo) hasta una resolución más fina (500 m entre nodos) cerca al litoral mexicano.

La malla de cálculo resultante contiene 110,451 celdas triangulares que cubren un área aproximada de 1'958,020 km<sup>2</sup>, se cubrió todo el Golfo de México y parte del Mar Caribe (ver figura 4).

Una vez definida la malla de cálculo se agregó la información de profundidades del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 2022.



**Figura 4 A) Definición de la malla de cálculo y B) Malla de cálculo con profundidades**

### **CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**

Para llevar a cabo la calibración del modelo numérico, se utilizó la información de uno de los eventos “Norte” que afectó considerablemente las costas del estado de Veracruz, registrado el 12 de noviembre de 2019, dicho evento generó fuertes vientos en el Golfo de México de aproximadamente 70 km/hr.

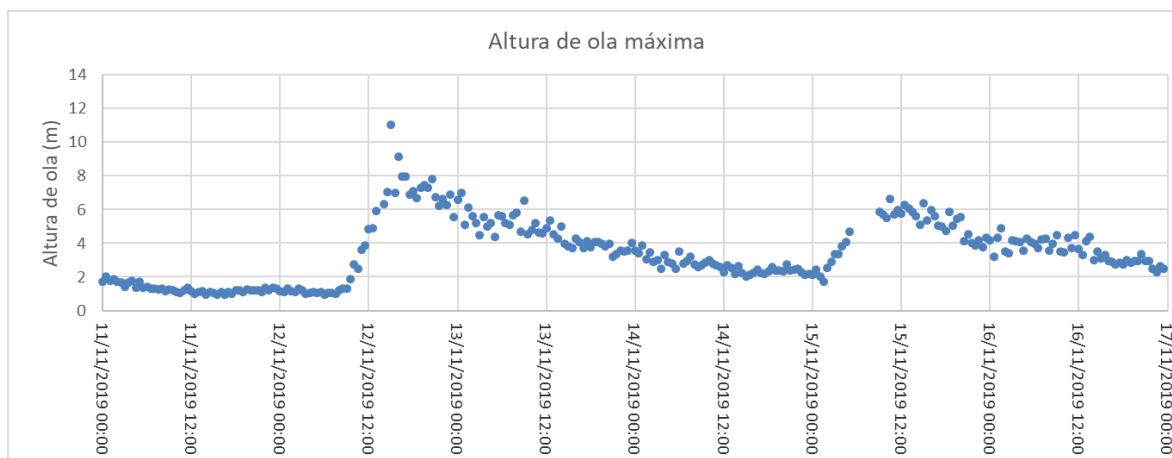
Para conocer el comportamiento del evento Norte, se obtuvo información registrada de la Red de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), el cual es un proyecto que tiene como objetivo medir, analizar, interpretar y difundir información océano meteorológica de los litorales mexicanos, administrado y operado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) dependiente de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).

Para el caso de estudio, se utilizó una boya medidora de oleaje que se encuentra ubicada en la zona exterior del puerto, en la parte norte de la Bahía de Vergara, la ubicación de la estación se muestra en la figura 5.



**Figura 5 Ubicación de la boya**

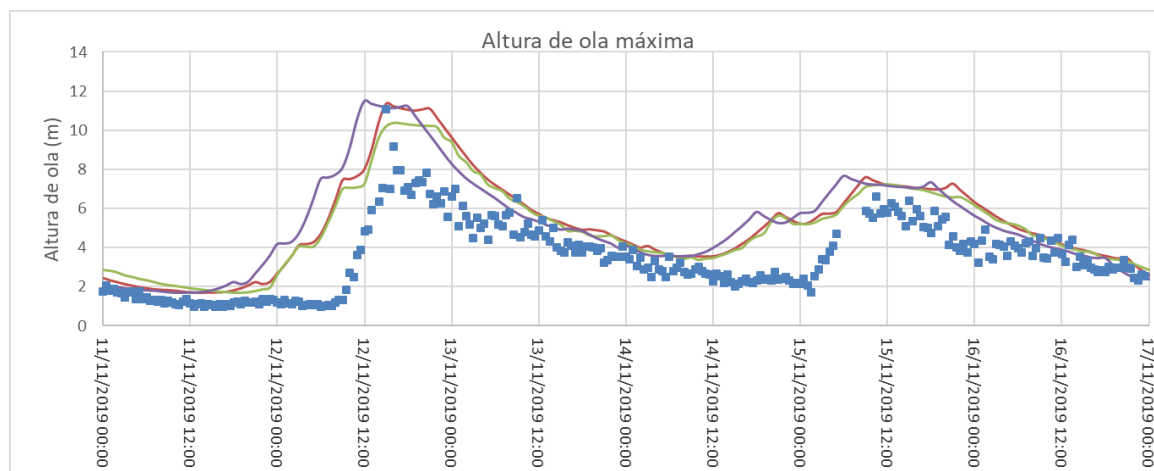
De la información registrada por la boya, se seleccionó la serie de tiempo del 11 al 17 de noviembre de 2019. Para este caso, se tomó en cuenta la información del oleaje máximo, dichos datos se muestran en la figura 6.



**Figura 6 Comportamiento del oleaje máximo registrado por la boya.**

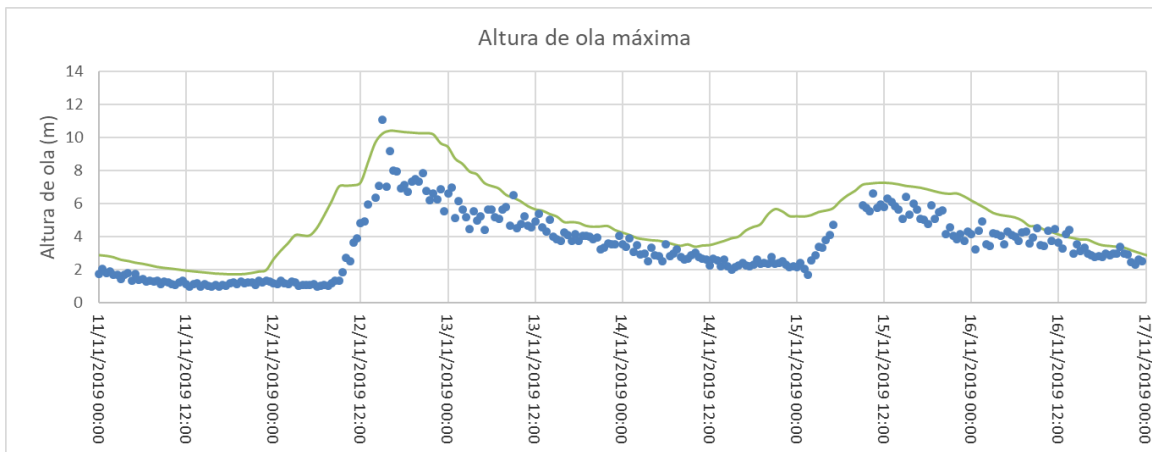
Como se puede observar en la figura 6, a principios del medio día del 11 de noviembre el oleaje máximo se encontraba a aproximadamente a 1 m, y el 12 de noviembre, a inicios del medio día, el oleaje máximo se incrementó hasta llegar a una altura de ola máxima de casi 11 m.

Para llevar a cabo la calibración del modelo, se realizaron varias simulaciones, en la figura 7, muestra algunos de los principales resultados que proporcionaron un mejor ajuste a los valores medidos.



**Figura 7 Resultados con diferentes valores de calibración del modelo**

De los resultados mostrados en la figura 7, se seleccionó la gráfica que mejor se ajustó a los datos medidos, dicha gráfica se muestra en la figura 8.

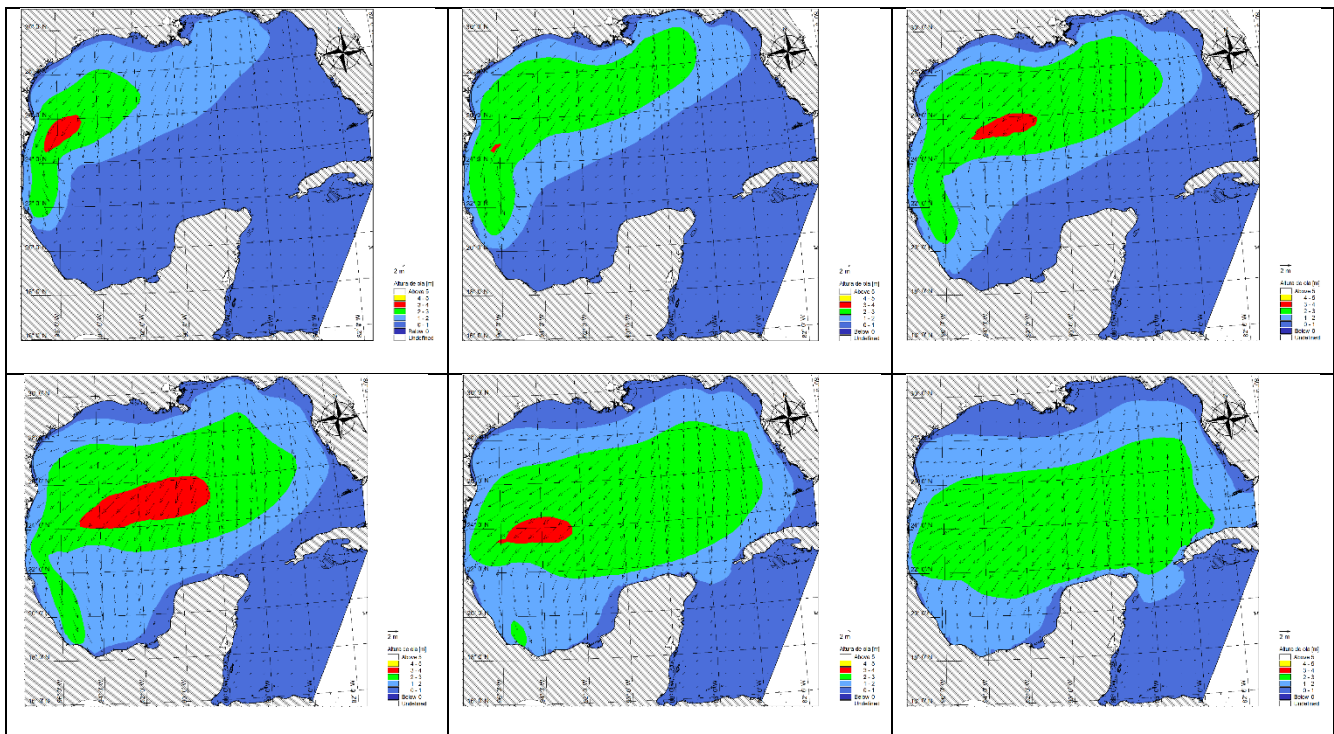


**Figura 8 Calibración del modelo numérico con la altura máxima**

Una vez calibrado el modelo numérico, se realizaron 664 modelaciones numéricas de generación y propagación del oleaje para diferentes eventos no tropicales que ocurrieron en el Golfo de México desde 1979 a 2019.

### MODELACIONES NUMÉRICAS

Para determinar los mapas del oleaje extremal asociados con diferentes períodos de retorno, de los resultados de las modelaciones numéricas, se obtuvo en cada celda del dominio de cálculo, las máximas alturas de ola generadas por cada uno de los eventos extremos (Ver figura 9).

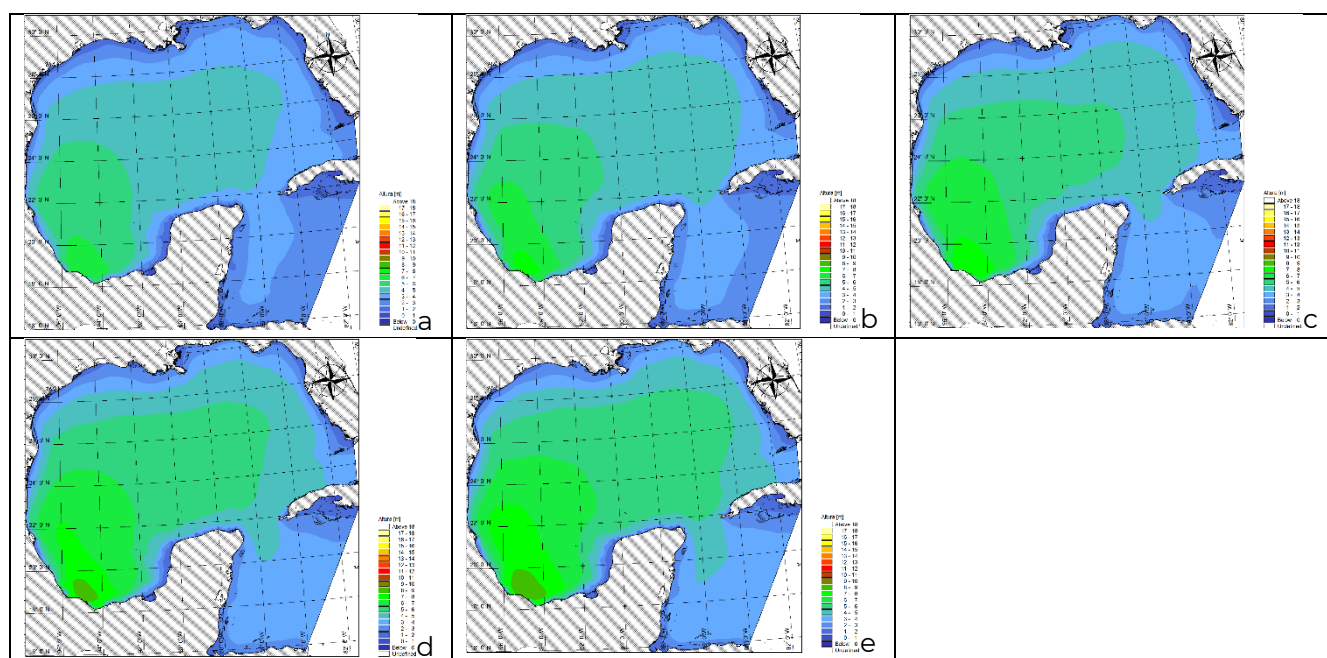


**Figura 9 Ejemplo de propagación de oleaje producido por un evento Norte de fecha del 22 de octubre a las 18:00 hrs al 24 de octubre a las 12:00 hrs del 2006**

Para cada celda de cálculo (110451 celdas) se crearon series con 664 datos de alturas de ola máxima y, para cada serie, se determinó la altura de ola a diferentes periodos de retorno mediante un análisis de valores extremos.

Para ello se define cualquier altura de ola (que es parte del estadístico) en términos de probabilidad, es decir, la probabilidad de que un valor de altura de ola determinado sea mayor que una altura de ola determinada, para un conjunto de datos registrados en un cierto tiempo, por lo que es necesario conocer el modelo de función de distribución de probabilidad que mejor represente a la muestra estadística.

Para el análisis de valores extremos, se consideraron 5 funciones de distribución de probabilidad: Exponencial, Gumbel o Fisher Tippett I, Weibull, Frechet o Fisher Tippett II y Rayleigh (ver figura 10).



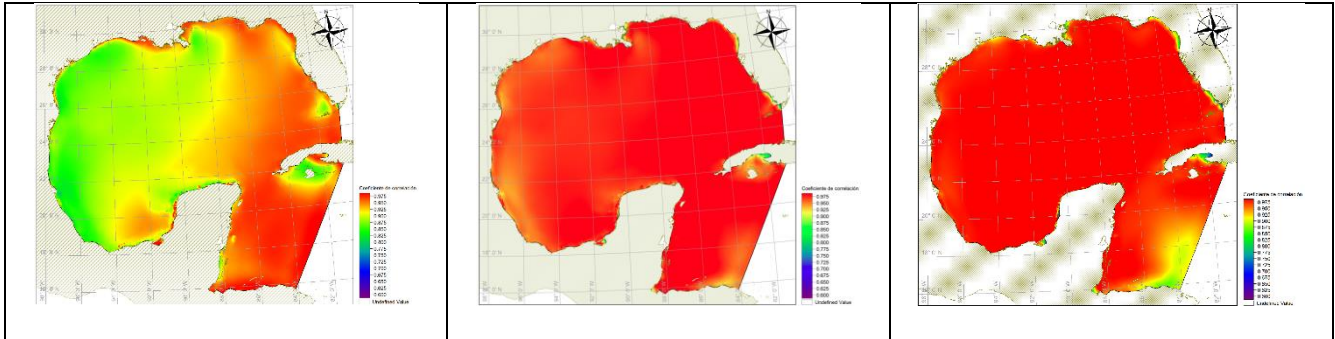
**Figura 10 Mapas de altura de ola asociados a diferentes periodos de retorno para la distribución Weibull con  $k = 2.0$  a)  $Tr = 5$  años, b)  $Tr = 10$  años, c)  $Tr = 25$  años, d)  $Tr = 50$  años y e)  $Tr = 100$  años**

## RESULTADOS

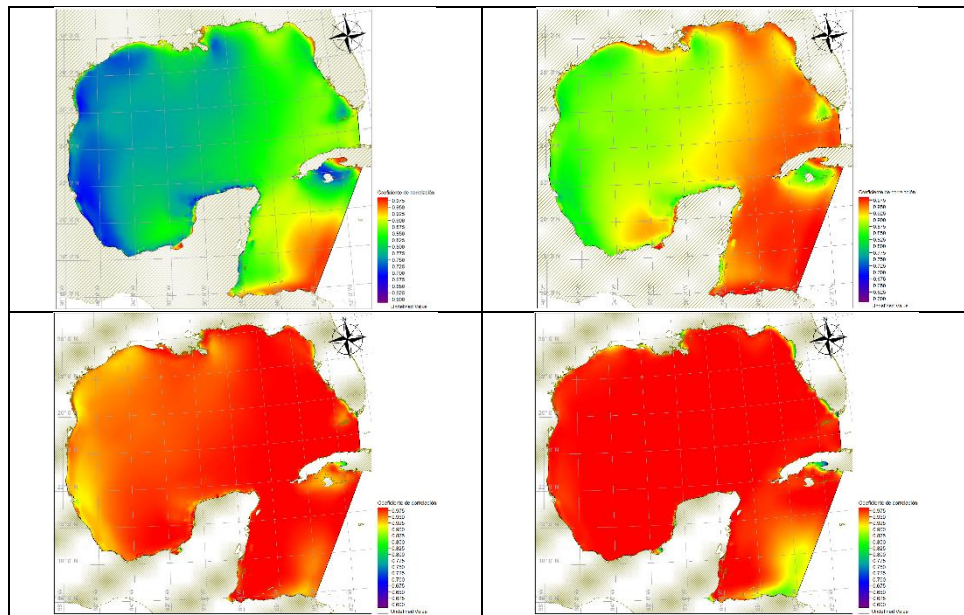
A partir de los resultados de análisis de valores extremos, se consideraron 5 funciones de probabilidad, se encontró que las alturas de ola y las funciones de distribución de probabilidad existe variabilidad, por lo que, para elegir la función de distribución con la mejor aproximación a las alturas de ola generadas por los eventos extremos, se calculó el coeficiente de correlación lineal ( $\rho$ ) con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

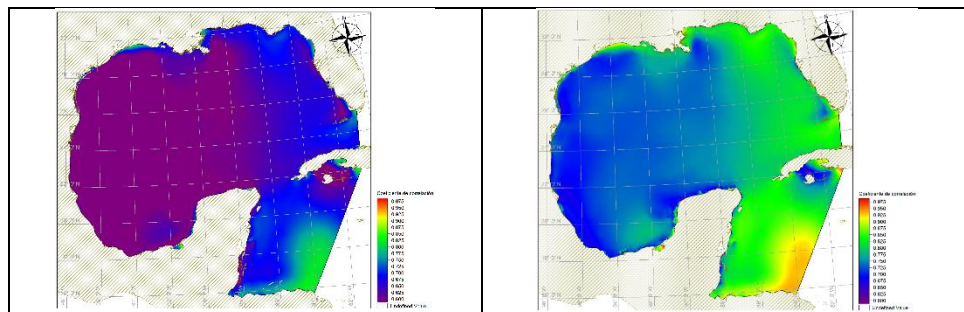
Con base en lo anterior, se obtuvieron los coeficientes de correlación en todo el dominio de cálculo, los cuales se muestran en los mapas de las figuras 11 a la 13.

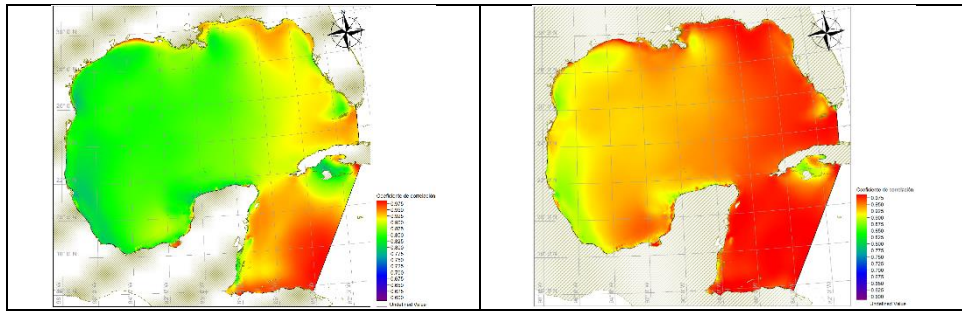


**Figura 11** Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Exponencial; B) Gumbel (FT-I); C) Rayleigh



**Figura 12** Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Weibull con  $k = 0.75$ ; B) Weibull con  $k = 1.0$ ; C) Weibull con  $k = 1.4$ ; D) Weibull con  $k = 2.0$



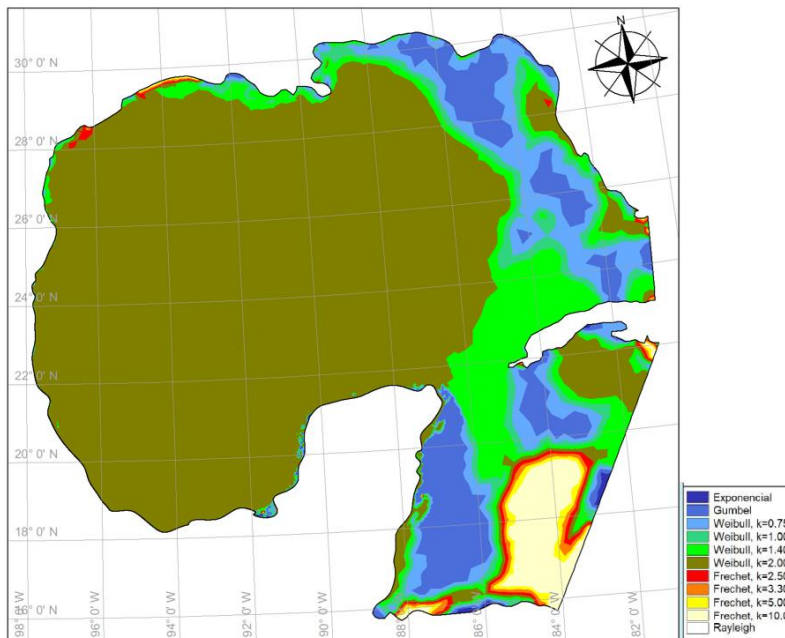


**Figura 13 Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Frechet con  $k = 2.5$ ; B) Frechet con  $k = 3.3$ ; C) Frechet con  $k = 5.0$ ; D) Frechet con  $k = 10.0$**

Como se puede ver en las figuras anteriores, la mejor distribución a nivel regional (Golfo de México y Mar Caribe) es la función de Weibull con el parámetro de forma  $k = 2$ .

Para definir que función es la más adecuada en determinadas zonas de estudio del Golfo de México y mar Caribe, se realizó una regionalización del dominio de cálculo conforme a las distribuciones con el mejor ajuste o coeficiente de correlación lineal (ver figura 14).

Cabe señalar que, los resultados presentados en este estudio deberán considerarse como una guía o fuente de consulta e información para los interesados en la materia y no pretende imponer criterios, ni suplir el juicio y experiencia del lector.



**Figura 14 Mapas de la regionalización de las distribuciones de probabilidad con el mejor ajuste**

## CONCLUSIONES

En las últimas décadas los eventos “Norte” en el Golfo de México pueden generar cambios bruscos en las condiciones climáticas de la región, estos eventos suelen ocurrir durante los meses de invierno, entre noviembre y febrero y afectan tanto a las personas como a la infraestructura portuaria del país, así como a la economía local. Es importante tomar precauciones y estar preparados frente a la llegada de estos eventos para evitar posibles daños.

Obtener información de datos batimétricos, de información de viento global y de modelos numéricos de propagación de oleaje, son partes esenciales para poder desarrollar mapas de propagación de oleaje con eventos extremos no tropicales (Nortes).

En este estudio se obtuvieron mapas de oleaje para 5 distribuciones de probabilidad (Exponencial, Gumbel, Rayleigh, Weibull y Frechet) y con varios períodos de retorno (5, 10, 25, 50 y años).

Como se mostró, el oleaje debido a los eventos extremos no tropicales impacta, principalmente, al estado de Veracruz y de ahí, con menor rango, a los estados de Tamaulipas y Campeche.

Con los resultados de las funciones de distribución se realizó un estudio de correlación para obtener la relación entre dos series de datos de oleaje y, con los resultados obtenidos se generó un mapa (ver figura 14), en donde se observa que la función de distribución de Weibull con  $k = 2$ , es la que tiene mejor correlación con respecto a las demás funciones de distribución de probabilidad.

los eventos del Norte tienen un impacto significativo en la República Mexicana, ya sea en términos de infraestructura, transporte, producción agrícola, turismo o industria. Es necesario tomar medidas preventivas y de respuesta adecuadas para minimizar los daños y asegurar la pronta recuperación de estas zonas afectadas.

Por último, se recomienda realizar estudios, no solo de oleaje, sino también de corrientes, y con ello conocer las velocidades que se pueden generar con la presencia de eventos no tropicales (Norte).

## BIBLIOGRAFÍA

- Denton, T. (2016). *Respuesta dinámica del Golfo de México al paso del frente frío intenso (Caso del frente frío No 4 de 2007)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- González, G. (2016). *Formación y dinámica de frentes fríos*. Universidad de Sonora, México.
- Lobato, R. (2019). *Análisis de la precipitación inducida por forzamiento orográfico, ente el paso de frentes fríos en la porción norte de Chiapas y Sierra de Tabasco*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- López, J. (2009). *Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco*. UNAM. México.
- Lopez, L. (2016). *Pronostico del desplazamiento de los frentes fríos sobre el Golfo de México, península de Yucatán y región occidental de Cuba, campo de viento y lluvia asociado*. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Luna, R. (2016). *Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental*. CICESE, Baja California. México.
- Pineda, L. (2005). *Descripción del clima y modelación numérica de fenómenos meteorológicos en San Luis Potosí, México*. Instituto potosino de investigación científica y tecnológica. México.
- Prieto, R. (2008). *Metodología para la creación e implementación del sistema de alerta temprana para frentes fríos y nortes, Informe final*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Ramírez, N. (2002). *Seguimiento de nortes en el litoral del Golfo de México en la temporada de 199-2000*. Publicado en la Revista Geográfica. España.
- Rojas, J. (2008). *Respuesta de la circulación oceánica ante el forzamiento de eventos de Norte en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano*. UNAM, México.
- Servicio Meteorológico Nacional (2021). *Registro de variaciones del nivel del mar asociados a los frentes fríos números 39 y 40*. Instituto de Geofísica de la UNAM. México.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística de oleaje*. Publicado en el Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- Todelano, N. López, A. Ramírez, R. Segura, H. (2021). *Caracterización del estado del mar con las mediciones de oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas*. Publicación técnica del IMT. México.

European Commission [EC]. (2023). European Marine Observation and Data Network (EMODet). [Consulta en línea]. <https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>.

General Bathymetric Chart of the Oceans [GEBCO]. (2023). Global Ocean and land terrain models. [Consulta en línea]. [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

MIKE Powered by DHI [MIKE 21]. (2023). Spectral Waves FM, User Guide. [Consulta en línea]. [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast\\_and\\_Sea/MIKE21SW.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE21SW.pdf).

National Centers for Environmental Information [NOAA]. (2023). ETOPO Global Relief Model. [Consulta en línea]. <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.