

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE OLEAJE Y VIENTO DE 1948-2007 EN EL LITORAL MEXICANO

Gabriel Ruiz, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva

Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Edificio 5, 04510, Coyoacán, México D.F.
gruizm@ii.unam.mx

Gregorio Posada

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Edificio Bernardo Quintana Arrijoja, 04510, México

Dulce Pérez

Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada
Avenida del Mediterráneo s/n, 18006, Granada, España

Germán Rivillas

Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Edificio 5, 04510, Coyoacán, México D.F.

Edgar Escalante, Francisco Ruiz

Unidad Académica Puerto Morelos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Av. Niños Héroes s/n, 77580, P. Morelos, Quintana Roo, México

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de una caracterización del oleaje y viento a lo largo del litoral mexicano para el periodo de 1948 a 2007. La estimación del régimen de oleaje y viento se llevó a cabo con el acoplamiento de los modelos numéricos WAM y HURAC, los cuales fueron forzados con vientos provenientes de la base de datos del NCEP/NCAR e información meteorológica de boletines de ciclones tropicales, respectivamente. A partir de los resultados de dicha modelación, se realizó un análisis estadístico con el que se generaron las gráficas de probabilidad de ocurrencia conjunta, rosas de viento y oleaje, probabilidad de excedencia, análisis extremal y periodos de retorno que se presentan en este artículo. Esta información permitirá tener una base de datos confiable y de consulta libre para cualquier estudio que se realice en el litoral mexicano, y a la vez, la metodología empleada constituye una herramienta que puede ser aplicada en otras latitudes.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del clima marítimo es una actividad prioritaria para que la explotación de los recursos marítimos de un país se realice de manera sustentable y segura. En México, las principales industrias (petrolera, transformación y turística) se desenvuelven en las zonas costeras y, por lo tanto, dependen de forma muy importante de la conservación, explotación y recuperación de los recursos marítimos (Cortina *et al.*, 2007). Esta situación ha originado que en años recientes se hayan llevado a cabo un sinnúmero de esfuerzos con el fin de contar con información

que permita, a los diferentes actores involucrados, mejorar su conocimiento de las condiciones marítimas. A pesar de ello, entre las principales carencias que persisten en el medio mexicano se cuentan la falta de programas de monitoreo sistemático y que no existe una base de datos confiable de variables oceanográficas. Por el sesgo de información instrumental y escasez de la misma, a la fecha, se siguen utilizando fuentes estadísticas de datos visuales de barcos de ruta cuya calidad es fuertemente cuestionable dado su carácter subjetivo y por la ausencia de datos asociados a eventos extremos. Las técnicas y capacidades actuales de la modelación numérica,

la han convertido en una herramienta que permite la reconstrucción de bases de datos históricas con muy buena precisión y que complementan adecuadamente los esfuerzos de medición en campo.

En este sentido, este trabajo tiene como objetivo presentar la caracterización del régimen de oleaje y viento para las vertientes atlántica y pacífica mexicanas, a partir de información generada numéricamente y con técnicas de reanálisis. El reanálisis del oleaje se ha realizado utilizando un modelo híbrido. La base de datos así generada, está integrada por parámetros de viento y oleaje en intervalos de una hora durante 60 años (1948-2007). Esta información se utilizó también para desarrollar dos atlas de oleaje y viento, Silva *et al.* (2008a, b).

Las ventajas que tiene el uso de la metodología de modelación empleada son: (1) los modelos numéricos son de libre acceso y existen varias versiones disponibles (algunos de ellos pueden ser obtenidos a través de la página web: <http://www.hubertz.embarqspace.com/#/wavemodels/4529105133>), (2) los requerimientos de programación que se necesitan para la integración y el procesamiento de resultados no son complicados, (3) las bases de datos meteorológicas son de libre acceso y fácilmente pueden ser sustituidas por otras fuentes y (4) los modelos pueden ser ejecutados desde una computadora personal hasta una supercomputadora.

El trabajo se ha dividido en tres secciones. En la primera parte se describen las características de los modelos de predicción del oleaje utilizados, la información necesaria para su ejecución, así como la validación de los modelos comparando los resultados numéricos contra los datos medidos por boyas oceanográficas. En la segunda sección del trabajo se detalla la metodología empleada para el análisis estadístico del oleaje y viento y se presentan resultados. En la última sección se presentan las principales conclusiones.

MODELO HÍBRIDO DE PREDICCIÓN DE OLAJE

Se implementó el modelo híbrido de generación de oleaje presentado por Ruiz *et al.*, (2008) para el periodo de 1948 al 2007. Este modelo híbrido consiste en el acoplamiento de: 1) el modelo de tercera generación WAM *cycle 4* (Güntner *et al.*, 1992) que en este trabajo se utiliza para estimar el oleaje en aguas profundas para condiciones medias, y 2) el modelo de segunda generación HURAC (Silva *et al.*, 2002) que se utiliza para estimar las condiciones de oleaje y

viento en presencia de huracanes.

La aplicación del modelo híbrido se realizó en las dos vertientes del litoral mexicano. En la malla del Pacífico se cubre la región comprendida entre las latitudes 12.5° N y 33.5° N y las longitudes 90.5° W y 119.5° W con una discretización espacial de 0.25° × 0.25° (Figura 1a). En la vertiente atlántica se utilizó una malla que abarca de 15° N a 31° N en latitud y 80° W a 98° W en longitud con la misma discretización, como se muestra en la Figura 1b.

Las condiciones generales para el forzamiento del modelo WAM fueron las siguientes: una batimetría con dos minutos de resolución que se obtuvo de la base de datos del National Geophysical Data Center (www.ngdc.noaa.gov) y los campos de viento de la base de datos del programa de reanálisis de National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (<http://www.cdc.noaa.gov>). Debido a la baja resolución de los campos de viento, la información debió ser interpolada tanto en el tiempo como en el espacio. La discretización temporal del modelo WAM fue de 10 minutos y el espectro de oleaje se dividió en 30 frecuencias y 24 direcciones. Por su parte, para el forzado del modelo HURAC se obtuvo la siguiente información de boletines meteorológicos (www.noaa.gov): fecha del aviso, presión central, ubicación geográfica del centro del ciclón, radio de máximos vientos (radio ciclostrofico), dirección y velocidad de desplazamiento del meteoro. Con estos datos se evaluaron los campos de presión atmosférica, vientos medios y oleaje asociados a los huracanes que se presentaron en el tiempo analizado. El procedimiento para el acoplamiento de los modelos se detalla en Ruiz *et al.*, (2008). Este acoplamiento ha permitido incrementar la calidad de las predicciones principalmente para eventos extremos, ya que como concluyeron Pérez *et al.*, (2008), con el uso de la información del NCEP/NCAR se obtienen resultados muy adecuados para la evolución espacio-temporal del oleaje, sin embargo en el caso de huracanes, los picos de las tormentas tienden a subestimarse y la predicción del oleaje se ve afectada.

La Figura 2 presenta una comparación entre los resultados obtenidos con el uso del modelo híbrido y datos medidos por una boya oceanográfica para el año 2005. El panel A) corresponde al registro de oleaje obtenido con el modelo WAM; los resultados del modelo HURAC se presentan en el panel B). En el panel C) se muestra la integración de los resultados obteni-

dos con ambos modelos y finalmente en el panel D), la comparación entre los datos obtenidos del modelo híbrido y la información registrada por la boya 42056 de la National Data Buoy Center (<http://www.ndbc.noaa.gov/rmd.shtml>) que se localiza en el Golfo de México y Mar Caribe (ver Figura 1). El coeficiente de determinación entre los datos del modelo híbrido y la información registrada por esta boya, para este caso, fue de 0.94. Es importante señalar que no existen datos medidos del oleaje para la vertiente Pacífica que pudieran ser utilizados para realizar una compa-

ración entre los datos calculados y los medidos, es por ello, que para dar una mayor certeza a los datos que se obtuvieron del modelo híbrido, se compararon los datos registrados por las boyas 42001, 42002, 42036, 42040 y 42055 (localizadas en el Golfo de México y Mar Caribe) con los campos de viento y oleaje que se determinaron a partir del uso del modelo WAM-HURAC, De hecho el coeficiente de determinación entre ambos datos fueron de 0.88, 0.83, 0.84, 0.89 y 0.88, respectivamente, para cada una de las celdas antes mencionadas

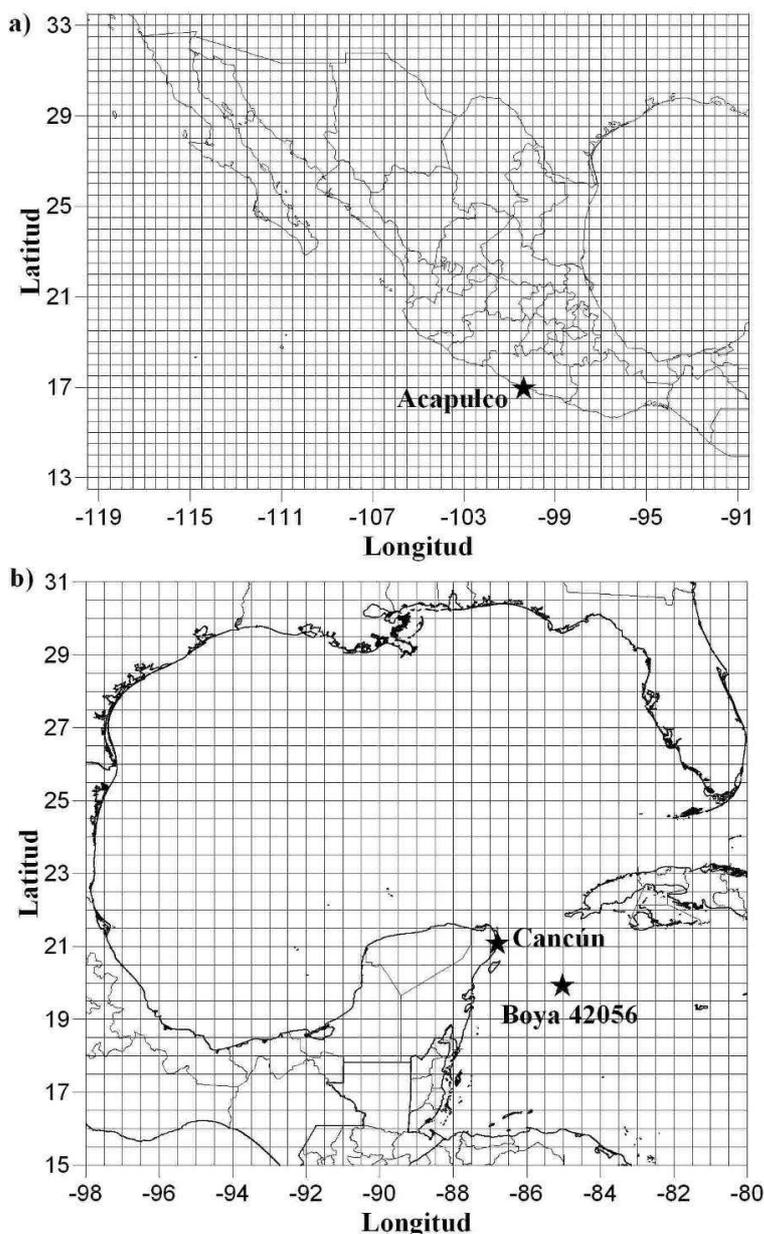


Figura 1. Celdas de trabajo para la caracterización del régimen de oleaje en el Pacífico de México (a) y en la (b) vertiente Atlántica; ubicación de geográfica de: Acapulco, Gro., Mex (a), Cancún, Q.R., Mex. y boya marina 42056 de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (b)

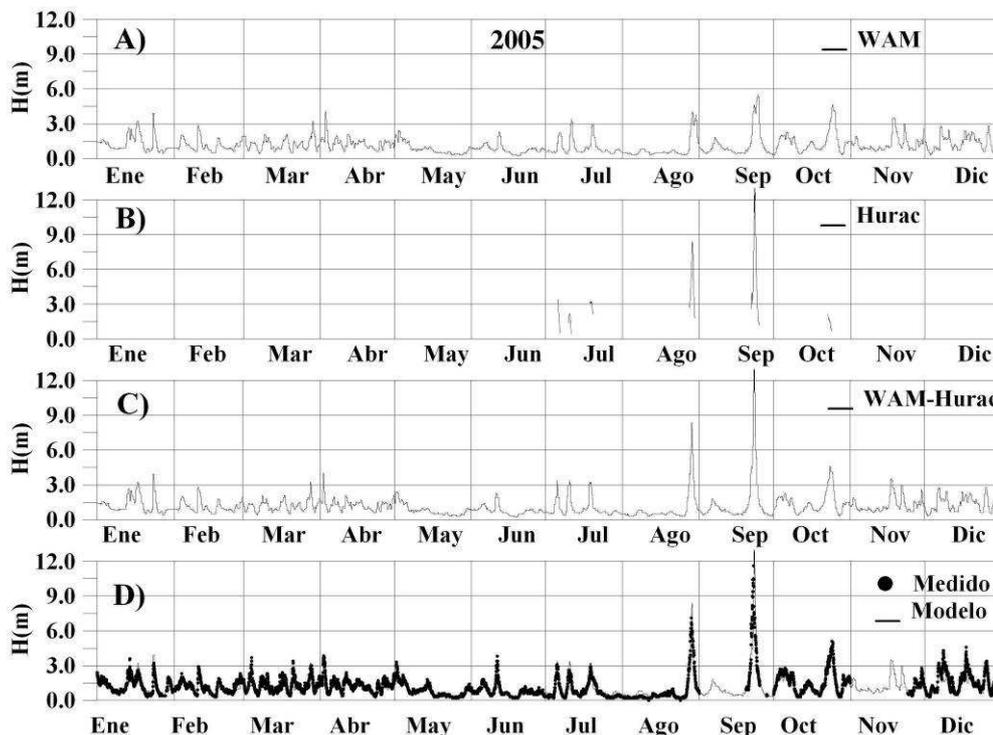


Figura 2. Metodología y validación de los resultados del modelo híbrido WAM-HURAC para la caracterización del clima marítimo en Golfo de México y Mar Caribe

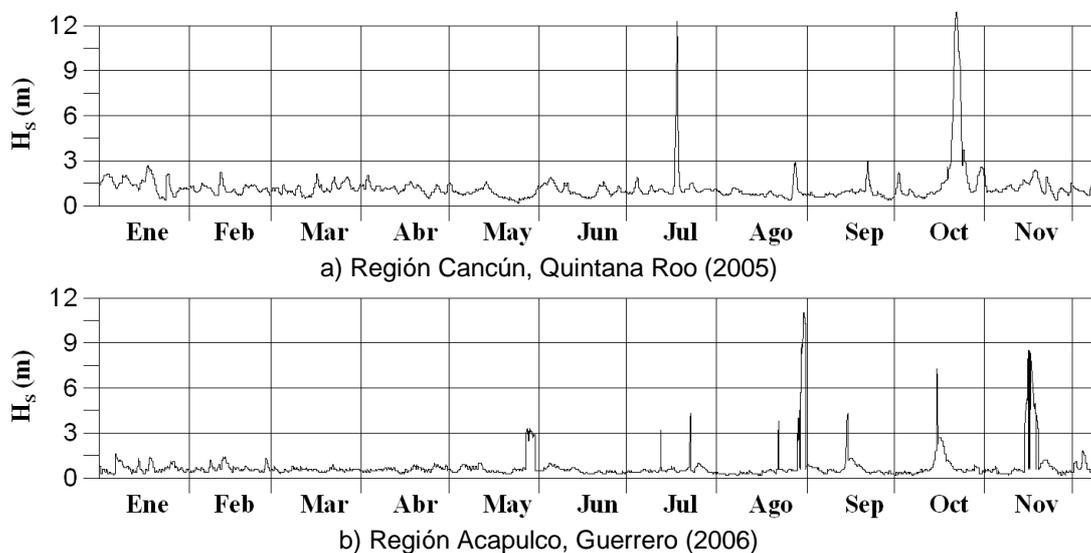


Figura 3. Evolución temporal de los estados de mar obtenidos con el modelo híbrido WAM-HURAC

Como puede observarse en los resultados, una de las bondades que tiene la modelación numérica es la continuidad de los registros. Esto permite que pueda utilizarse para soslayar problemas de intermitencia que comúnmente se encuentran en la información de los equipos de medición de oleaje en sitio.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

El tratamiento de los datos generados por el modelo consistió en obtener, para cada celda de la malla, un fichero con la siguiente información: 1) fecha (año, mes, día y hora), 2) velocidad de viento (V) en m/s sostenida en un promedio de

10 minutos a 10 metros sobre el nivel medio del mar, 3) dirección de viento (θ_w), 4) altura de ola significativa en metros (H), 5) dirección del oleaje (θ_H) y 6) periodo del oleaje (T) en segundos. Las direcciones son referidas al Norte.

Debido al gran número de celdas que se obtuvieron para las dos vertientes (3268 en la atlántica y 4680 en la pacífica), en este trabajo se decidió mostrar a detalle solamente la caracterización del régimen del oleaje en las celdas ubicadas dentro de las coordenadas (86.5°W , 21°N) y (101.5°W , 17.5°N). Ahí se localizan los centros turísticos de Cancún, Quintana Roo y Acapulco, Guerrero, respectivamente (ver Figura 1).

Como datos de partida se muestran, en la Figura 3, ejemplos de la evolución temporal del oleaje significativo, obtenidos a partir de la simulación numérica WAM-HURAC, para las regiones de Cancún y Acapulco. Para cada región se ha dibujado un año diferente, a saber, el año 2005 para Cancún y el 2006 para Acapulco. Se eligieron particularmente estos años porque en ellos se presentaron, en cada vertiente, los huracanes más importantes en la última década. Así, en los registros se pueden identificar las alturas de ola asociadas a los huracanes en la vertiente Atlántica, Emily (11-21/Jul/05) y Wilma (15-25/Oct/05), así como en la vertiente Pacífica, John (28/Ago/06-04/Sep/06), Iliana (21-29/Ago/06) y Sergio (13-20/Nov/06).

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DEL OLAJE Y VIENTO

Se realizó un análisis estadístico considerando todos los datos horarios de la base de datos generada. A partir de esta información se realizó la caracterización tanto del régimen medio como el régimen de largo plazo.

RÉGIMEN MEDIO

Como lo menciona Holthuijsen (2007) para determinar la estadística del clima marítimo a partir de una serie de datos de oleaje es necesario estimar la probabilidad de la función de densidad conjunta. Esto usualmente se realiza mediante la separación en clases de los valores observados, obteniéndose con ello un ordenamiento de datos que se pueden exponer de manera gráfica utilizando histogramas de H y T

en sus respectivos sectores de θ_H . Esta información puede proporcionarse por año, temporada o de manera mensual (mostrando valores acumulados o promediados a lo largo de un número de años). Una técnica común para ofrecer información más completa es modificar los histogramas agregando la cuantificación total de los valores observados en cada dirección de propagación y/o en cada periodo de oleaje. Con ello es posible obtener gráficas de frecuencia conjunta que relacionen la altura de ola significativa con el periodo de la ola o la dirección (World Meteorological Organization, 1998). Los datos se agrupan en clases por altura y periodo (o dirección), cada clase se divide por el número total de datos de la muestra con el objeto de obtener un estimado de la correspondiente probabilidad de ocurrencia ($p(H, T)$ o $p(H, \theta_H)$). En la Figura 4 se muestran, como ejemplo, las gráficas de probabilidad de ocurrencia conjunta $p(H, T)$ y $p(H, \theta_H)$ para las celdas correspondientes a Cancún (4a y 4b) y Acapulco (4c y 4d). En el primer caso se identifica que las condiciones con mayor probabilidad de ocurrencia son alturas de ola significativa entre 1.0 y 1.5 m con periodos asociados de 4 y 6 s, respectivamente. Por su parte, la dirección predominante es la de 90 respecto del Norte con altura de ola asociada de un metro. Para el caso de Acapulco se observa que el oleaje en aguas profundas que con mayor probabilidad ocurrirá, corresponde a una altura menor de un metro, periodo cercano a 4 segundos y dirección de 270° respecto del norte.

En los regímenes de oleaje, una manera de representar la frecuencia de la altura de ola con respecto a su dirección es mediante el uso de rosas de oleaje. Las rosas de oleaje y viento que se obtuvieron para la caracterización fueron de manera anual y estacional. Como ejemplo, en la Figura 5 se muestran las rosas de oleaje y viento para las regiones de Cancún, paneles a) y b), y Acapulco; paneles c) y d). Se observa que para la zona de Cancún el 28% del oleaje que se presenta anualmente proviene de la dirección este-sureste; mientras que el oleaje que llega del este, representa el 30% de las olas. En cuanto al viento se aprecia que la dirección predominante de éste en Cancún es oeste-suroeste. Para Acapulco (Figura 5c y 5d) se identifica que el 50% del oleaje proviene del sector que cubre los cuadrantes oeste y oeste-sur-oeste y el viento dominante tiene una dirección este-noreste.

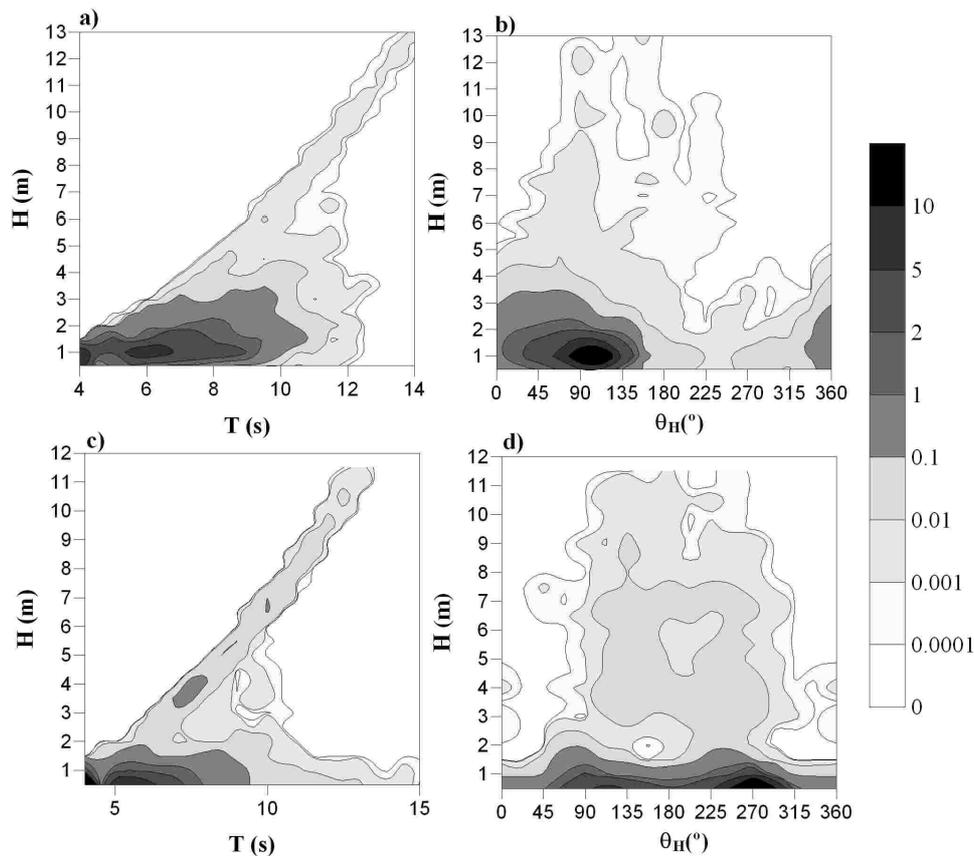
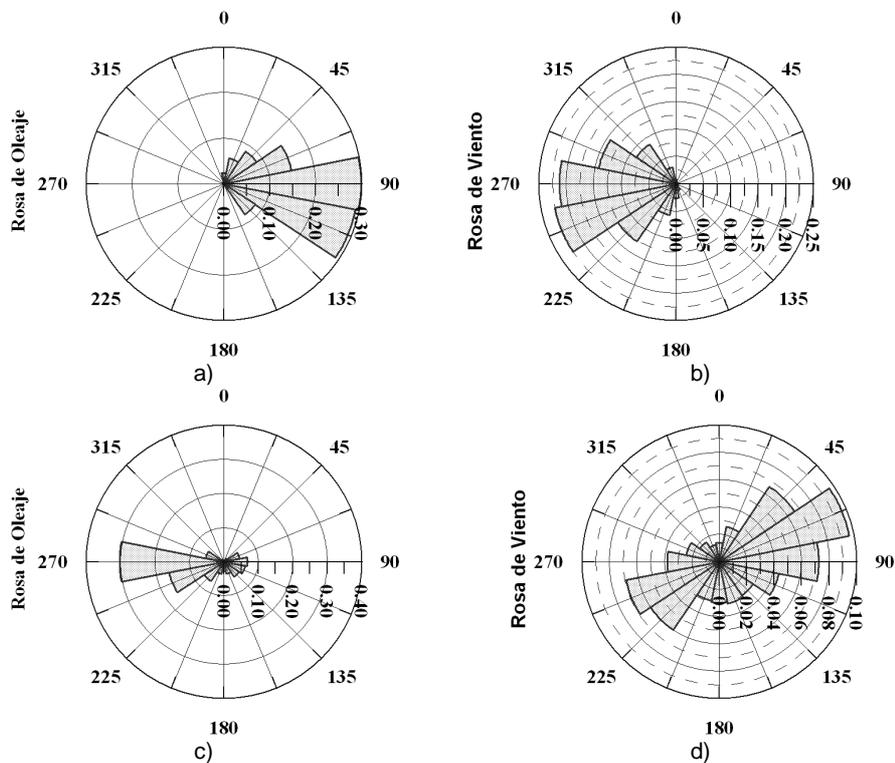


Figura 4. Gráficas de probabilidad conjunta de ocurrencia de altura de ola significativa-periodo medio y altura de ola significativa-dirección de propagación con observaciones anuales de 1948 al 2007. Cancún (a y b) y Acapulco (c y d)



En la Figura 6 se muestran las gráficas de probabilidad de altura de ola y velocidad de viento para las regiones de Cancún y Acapulco. En el caso de Cancún, las alturas de ola mayores a dos metros tienen una probabilidad de excedencia de 0.05. Si ese valor se multiplica por las 24 horas que corresponden a un día, es posible cuantificar la duración diaria que la ola excederá el umbral determinado. En este caso específico la altura de ola de 2.0 m se excederá aproximadamente 1.2 horas al día. Una operación similar se debe realizar si se desea conocer el número de horas que los estados de mar superarán cierto umbral de altura de ola en un año o en cualquier otra temporalidad. Para la región de Acapulco, la altura de 2.0 m se excederá aproximadamente 175 horas en un año.

Si se desea conocer el número de horas que un viento con velocidad de 5 m/s puede ser excedido en un año en las zonas de Cancún y Acapulco, a partir de las Figuras 6b y 6d es posible estimarlo; siendo el resultado 1752 horas al año en Cancún y 526 en Acapulco. Este tipo de in-

formación puede ser fácilmente utilizable para estudios de operación de infraestructura.

RÉGIMEN EXTREMAL

No existe un único criterio para determinar las condiciones del oleaje universalmente aceptado. Antes de llevar a cabo una estadística de largo plazo y análisis extremal del clima marítimo, se debe elegir cómo plantear y resolver algunas premisas como son: la definición de los eventos extremos, la elección de un método que agrupe los datos y la selección de una distribución de probabilidad que caracterice dichos eventos.

Muchas de las técnicas utilizadas para el análisis extremal requieren de una muestra que corresponda a una selección, bajo un criterio dado, de los valores extremos del registro de datos. Para obtener la muestra de valores se puede elegir: (1) muestra total, (2) los valores pico del registro o (3) los datos máximos anuales (Goda, 1990). Los resultados del análisis a largo plazo que aquí se presenta se derivan de considerar los máximos anuales y estacionales.

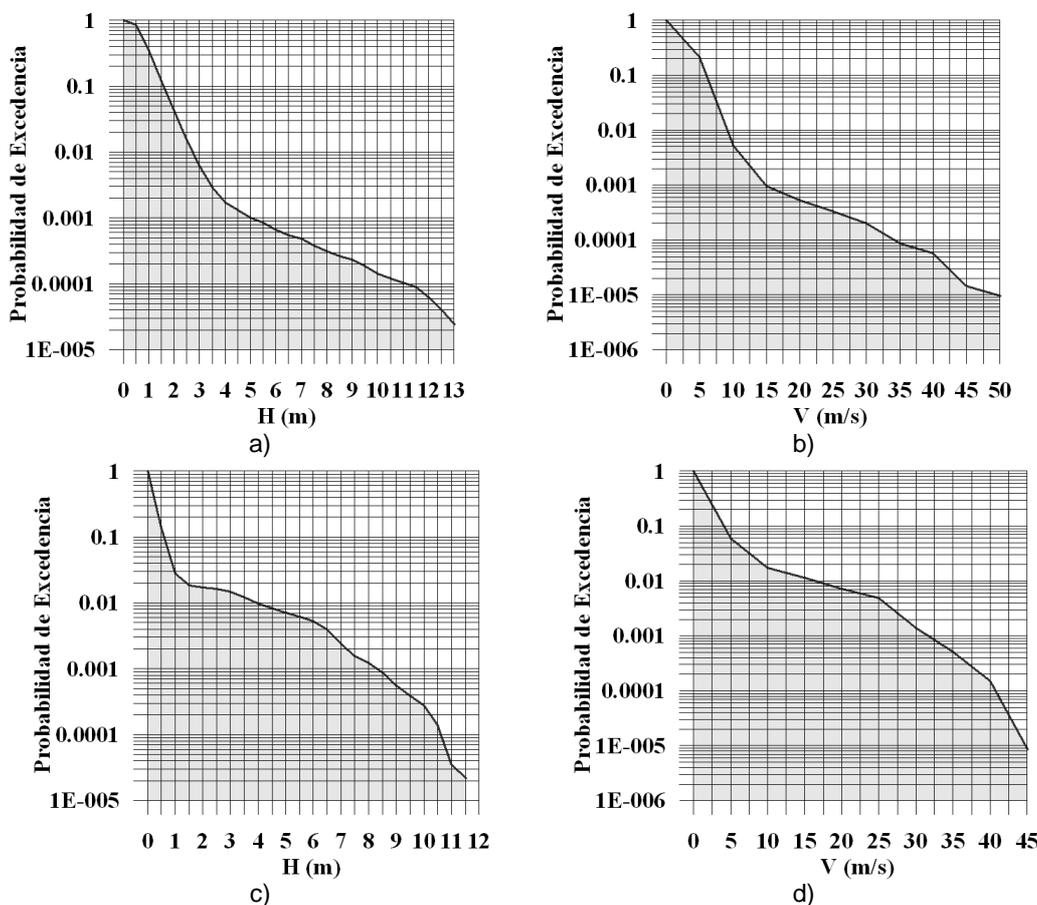


Figura 6. Gráficas de probabilidad de excedencia de altura de ola y velocidad del viento de 1948 al 2007 para Cancún (a y b) y Acapulco (c y d)

Actualmente no existe un criterio claro que indique qué tipo de curva se debe de emplear para la extrapolación, de modo que la elección de ésta es totalmente empírica. Entre las distribuciones que ajustan adecuadamente los valores, se tienen la Normal, Log-normal, Gamma, Weibull, Rayleigh, Fisher-Tippet I o Gumbel, Fisher-Tippet II o Frechet, Fisher-Tippet III, Log Pearson Tipo III, Pearson Tipo III, Exponencial, Binomial, Poisson, Valor Extremo Generalizado, Generalizado de Pareto, entre otras. (Isaacson y Mackenszie, 1981, Johnson *et al.* 1995). La diferencia en el uso de cada una de ellas, radica en el cálculo de sus respectivos parámetros; por facilidad, dichos parámetros se estiman ajustando las distribuciones elegidas a los datos y se opta por la que presente el menor error. La elección de la distribución con que se extrapolará la información puede ser arbitraria, pero se ha observado que las distribuciones que consideran dos o tres parámetros son las más adecuadas para realizar ajustes simples, siendo las distribuciones con dos parámetros las más sencillas de utilizar ya que solamente tienen como variables la ordenada al origen y pendiente de la recta. Es evidente que a mayor número de parámetros, se tendrá un mejor ajuste, puesto que se contará con un mayor número de grados de libertad, por ello se recomienda utilizar aquellas distribuciones que tengan 3 parámetros o variables. (Hogben 1990, Ochi 1990, Thompson 2001).

En este sentido, todas las referencias consultadas, recomiendan usar la distribución de Weibull, definida como:

$$P(\bar{H} \leq H) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{A-H}{B} \right)^C \right] & \text{para } -\infty < H \leq A \\ 1 - \exp \left[- \left(\frac{H-A}{B} \right)^C \right] & \text{para } H \geq A \end{cases} \quad (1)$$

donde A representa la posición de la distribución con respecto al eje H (parámetro umbral), $B (> 0)$ es un parámetro de escala o normalización que determina el ancho de la distribución y C es un factor de forma. El parámetro A también representa el menor de los límites de la altura significativa.

Si bien la distribución de Weibull con 3 parámetros muestra un mejor ajuste de alturas de olas mayores, no todas las alturas se ajustarán de manera exacta, ya que la distribución no define adecuadamente las alturas de ola asociadas a los eventos de calma. Sin embargo, para este trabajo se siguió la recomendación de Ward *et*

al. (2003) respecto al uso de la distribución de Weibull. Los autores han demostrado que esta distribución presenta un buen ajuste en la mayoría de los océanos. La principal razón radica en que las magnitudes de las alturas que se presentan durante las tormentas, no divergen de la línea de ajuste tal como ocurre con la distribución Log-normal con estos datos.

Para ajustar las distribuciones de probabilidad a las observaciones, se requiere que se determine una probabilidad de no excedencia que se encuentre en función de una técnica o expresión de punteo, ya sea que ésta se encuentre basada en la frecuencia, en los momentos estadísticos de la muestra o en la distribución de frecuencias (ejemplo una expresión de punteo es la de: Weibull,) (Rao y Hamed 2000).

En el caso específico de este trabajo, la frecuencia de punteo se encuentra definida por la ecuación de posición gráfica de Weibull, puesto que las probabilidades que se obtienen para valores altos de la muestra (tormentas) no sufren distorsión alguna con respecto a los valores menores (calmas) (Cunnane, 1978).

Goda (1990), Mathiesen *et al.* (1994) y Silva (2005) señalan que la técnica de mínimos cuadrados es la más recomendable para evaluar la bondad de la distribución de Weibull o Gumbel, ya que minimiza la suma de las diferencias cuadradas entre las observaciones y la distribución de probabilidad. En la Figura 7 se pueden observar, sobre papel probabilístico Weibull, los valores máximos de altura de ola significativa y de velocidad del viento para las zonas de Cancún y Acapulco. La línea recta representa la distribución de probabilidad de Weibull; la bondad del ajuste es evidente, los coeficientes de correlación de los valores máximos de las Figuras 7a y 7b son de 0.93 y 0.96, respectivamente. Para el caso de los ajustes que se presentan en las Figuras 7c y 7d, los coeficientes de correlación poseen los valores de 0.95 para oleaje y 0.95 para el viento. En las mismas Figuras se presenta, como segundo eje de las ordenadas, el periodo de retorno asociado a la probabilidad, con el fin de mostrar un valor ingenierilmente más representativo.

Por otro lado, Bendat y Piersol (1985) y Massel (1996) sugieren que una manera sencilla de cuantificar la bondad del ajuste es mediante la cuantificación del error cuadrático que se observa por la misma función, técnica que se utilizó en este trabajo.

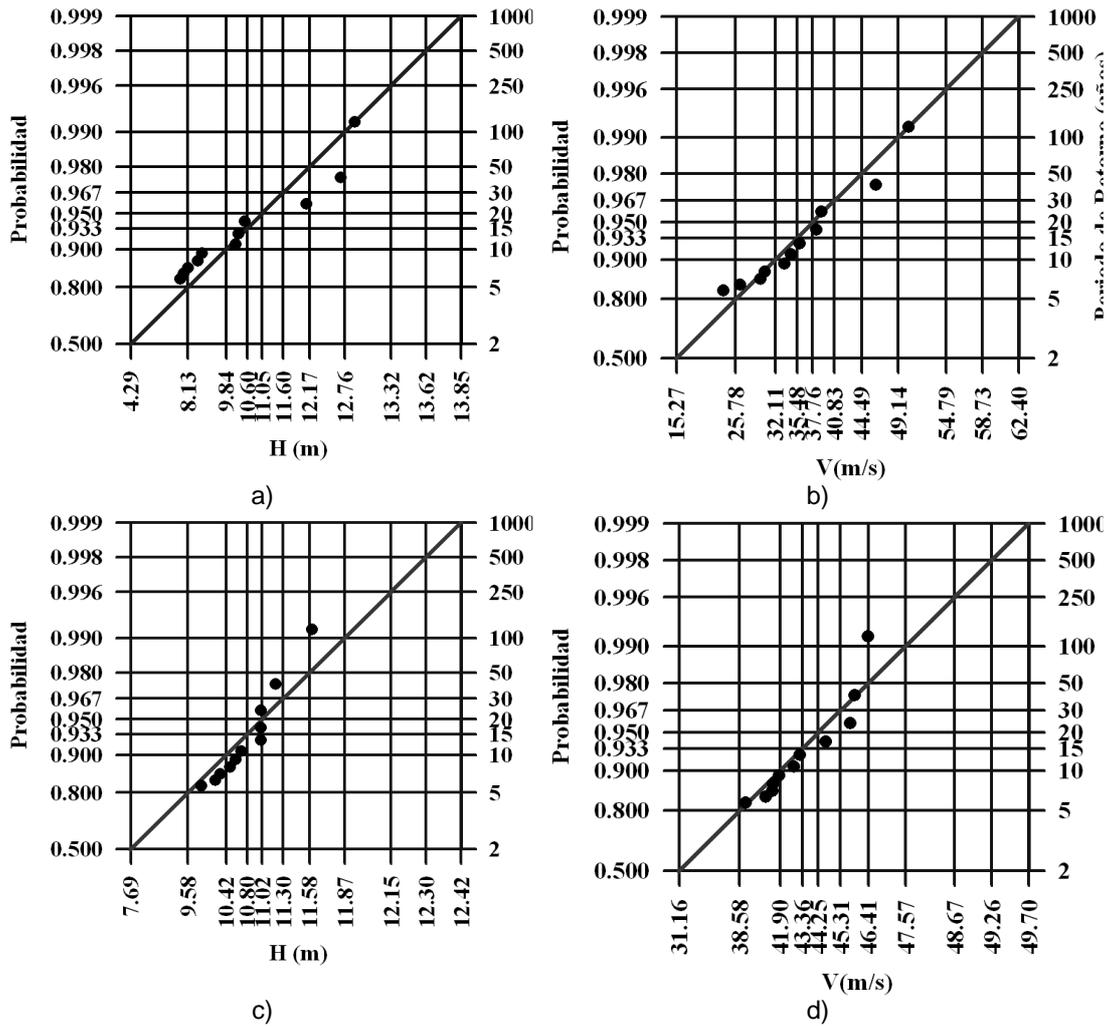


Figura 7. Distribuciones de Weibull y datos máximos anuales de altura de ola significativa y viento para Cancún (a y b) y Acapulco (c y d)

Adicionalmente a la información que proporciona la determinación la probabilidad de que un valor máximo no observado se exceda, en la ingeniería suele ser más frecuente conocer el periodo de retorno de los valores extremos del clima marítimo. En este sentido, a manera de ejemplo, si se desea conocer las características de ocurrencia de un oleaje con alturas significativas aproximadas de 12.9 m (dato registrado durante el huracán Wilma en 2005) para la región de Cancún, la Figura 7a indica que el 99.2

Del mismo modo, si se quiere conocer la misma información respecto de un huracán de categoría 2 (46 m/s) en la región de Acapulco, la Figura 7d indica una probabilidad de 97

Según el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (1983), en los proyectos que se desarrollan en la zona litoral mexi-

cana, y dependiendo de la importancia de cada uno, el periodo de retorno generalmente empleado es de 5, 25, 50 y 100 años.

Si el estudio de la costa o el diseño de las obras marinas requieren de un análisis temporal que se considere dentro de la escala "eventos" de Cowell y Thom (1997), para el periodo de retorno de cinco años (Figura 8a) se observa que el rango de las alturas de ola más recurrentes en la vertiente del Atlántico, se encontrarán entre 6.5 y 9 metros. Por otro lado, para un periodo de retorno de veinticinco años, los valores de las olas que se presentarán en la parte norte y noreste de la Península de Yucatán, se ubican en un rango de 10 a 12 metros (Figura 8b), mientras que olas con altura de 8 metros se registrarán en el resto del litoral mexicano.

Para cualquier proyecto que se desarrolle en

la zona litoral de México y se ubique dentro de la escala de ingeniería, historia y planeación de Cowell y Thom (1997), en la Figura 8c se identifica que las alturas de ola excederán el rango de 10 metros en la mayoría del Golfo de México y Mar Caribe. Además, en el mapa del periodo de retorno de 100 años (Figura 8d) se reconoce que las mayores alturas de las olas coinciden con las zonas donde se han registrado las trayectorias de los huracanes que se desarrollan en esta latitud del continente.

En la Figura 9a se identifica que en gran parte del litoral del Pacífico mexicano, la altura de ola que puede presentarse cada cinco años se encuentra en un rango de 8 a 10 m. En las regiones del noroeste y sureste, se identifican que las olas alcanzan alturas entre los 4 a 7 metros.

En los mapas de oleaje para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años (Figuras 9b, 9c, 9d, respectivamente), se reconoce que las magnitudes de la altura de ola son menores en las

regiones noroeste y sureste de México, por el contrario las mayores alturas que se presentarán en los periodos de retorno antes mencionados, fluctuarán entre los 11 y 13 metros. En esta vertiente no se identifica de manera contundente un relación de las alturas mayores de ola con zonas donde se tienen registradas las trayectorias de los ciclones tropicales que se han presentado en la zona.

A partir de los datos obtenidos, los periodos de retorno de las alturas de las olas se representaron de manera estacional y anual. En la Figura 10 se muestran, a manera de comparación, las diferentes alturas que se presentan en verano e invierno para ambas vertientes con un periodo de retorno de cincuenta años. En los paneles correspondientes a la estación de verano de la Figura 10 (a y c) se identifica que las alturas de las olas se incrementan de manera importante con respecto a las que se presentan en invierno (paneles b y d).

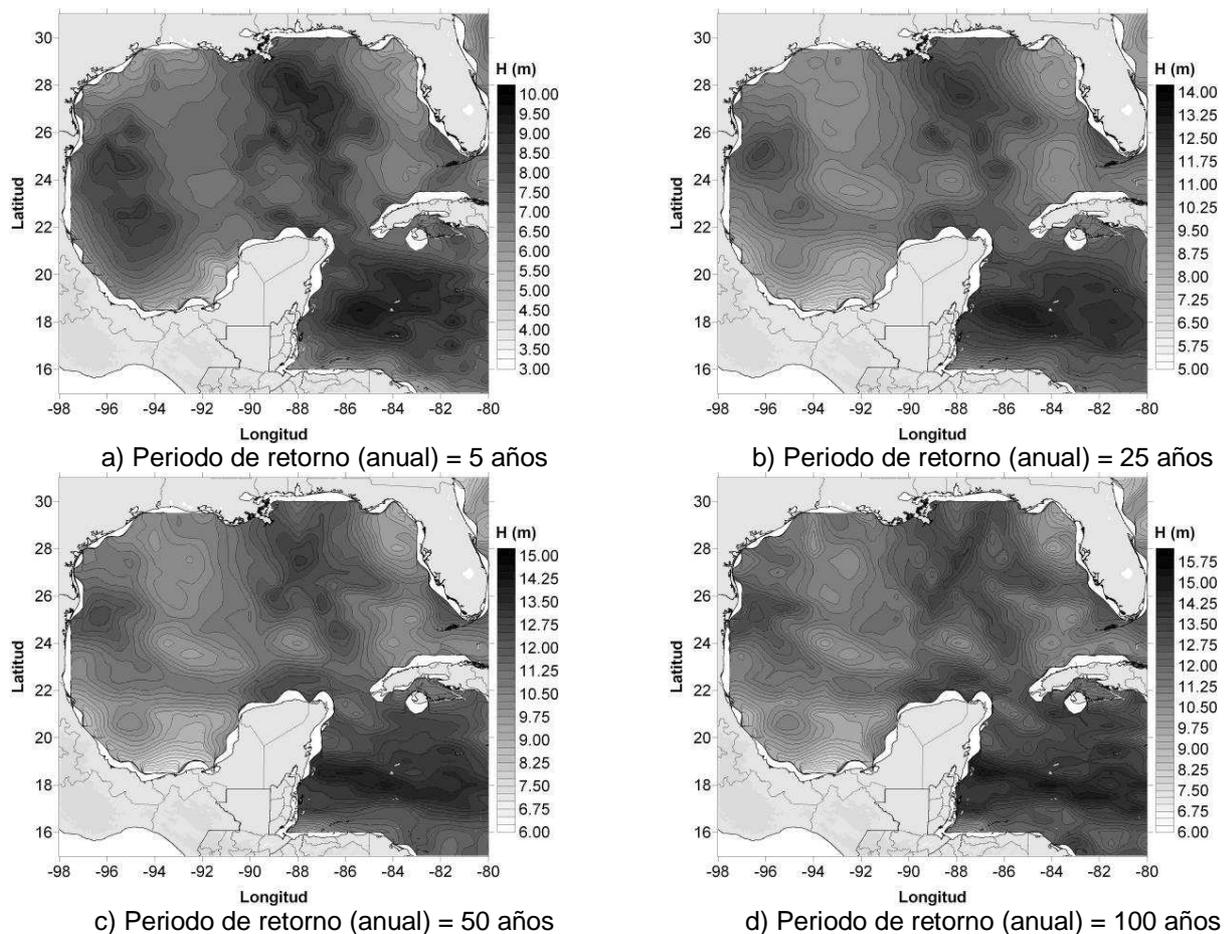


Figura 8. Mapas de periodo de retorno de la vertiente Atlántica

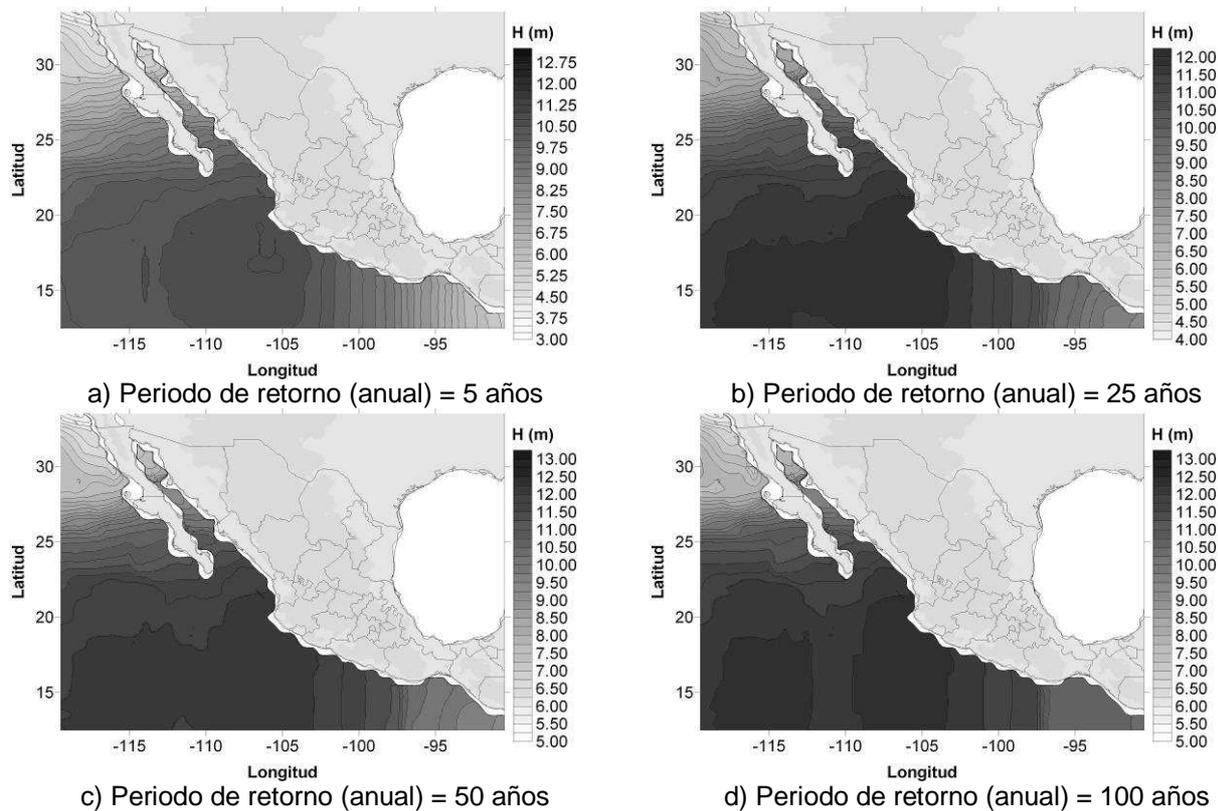


Figura 9. Mapas de periodo de retorno de la vertiente del Pacífico

Es evidente que las mayores alturas de las olas ocurren en los meses de verano, donde se presentan las tormentas y ciclones. En los paneles a) y c) de la Figura 10, es posible percatarse que las olas con mayor altura que se reconocerán en las costas mexicanas serán de 7 a 12 metros tanto para el Pacífico, así como para el Atlántico en el verano. Por otra parte en invierno, las alturas de las olas que se identifican a lo largo de la línea de costa de la zona del Pacífico, con excepción de las costas del estado de Baja California Norte, se presentan alturas de olas menores a las que se registran en verano, ya que éstas no sobrepasan el valor de tres metros. Las alturas de las olas que se estiman, se presentarán en el Golfo de México y Mar Caribe con un periodo de retorno de 50 años, variarán de 2 a 7 metros. Es interesante hacer notar que en verano, las alturas de ola dividen el Golfo de México en tres principales zonas, en dos de ellas las alturas máximas alcanzan 13 metros y en la tercera, la elevación de la ola alcanza los nueve metros. Por otro lado, en la misma vertiente para la estación de invierno, el rango de alturas se distribuye de manera más uniforme (Figura 10a), es decir, las alturas de las olas tienden a disminuir conforme las olas se

acercan a la costa (Figura 10b), comportamiento diferente a los que se observa en la estación de verano.

Respecto a la distribución de las alturas de olas en el Pacífico México, se puede notar que en invierno, las alturas de ola que se presentan en aguas profundas tienden a converger hacia la costa, mientras que la distribución de las alturas en verano muestra que solo el oleaje tienden a disminuir su elevación en la zona norte y sur de la república mexicana. La información que se proporciona a través de los mapas de las alturas del oleaje para distintos periodos de retorno puede ser utilizada en los ámbitos de planeación de obras marítimas, estimación de parámetros medios que se requieren para el estudio de las costas.

CONCLUSIONES

La metodología empleada en el desarrollo del presente artículo, perfectamente puede ser utilizada en regiones en las cuales no se cuenta con información histórica adecuada o cuando por alguna razón se ha perdido la secuencia de registros medidos in situ.

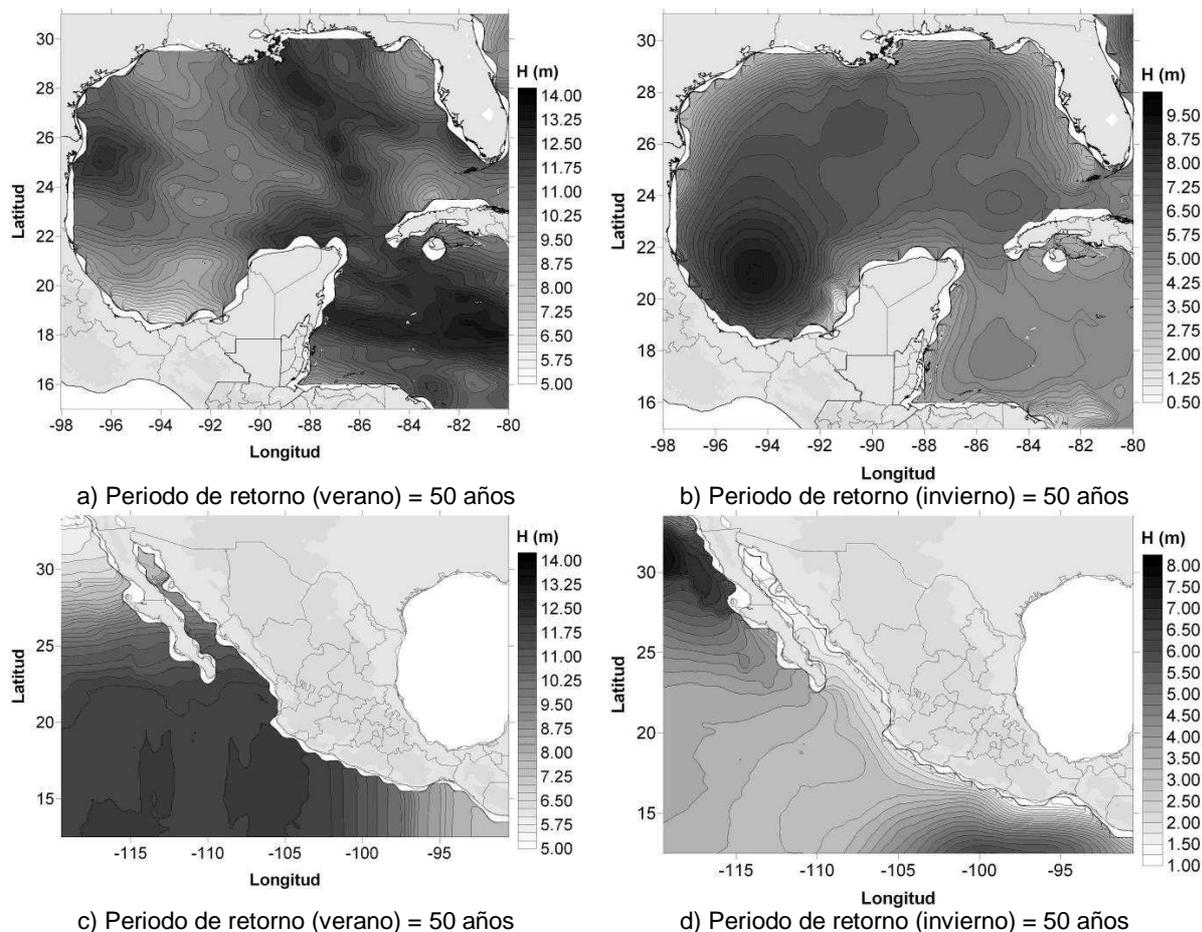


Figura 10. Comparación del periodo de retorno de 50 años de las alturas de ola para cada una de las vertientes oceánicas, tanto en verano como en invierno

Para el caso concreto de México, a través de un reanálisis de vientos y modelaciones numéricas se han desarrollado dos atlas de oleaje, Silva *et al.* (2008a,b). Entre la información que se tiene disponible en los atlas se cuenta la altura de ola significativa con su dirección media y periodo asociados, así como la velocidad media del viento y su dirección para 817 y 1170 celdas (de resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) que cubren las aguas oceánicas mexicanas atlántica y pacífica, respectivamente en el periodo de 1948 a 2007. A partir de estos datos, y en adición al régimen medio, se presentan una serie de resultados de postproceso que se pueden clasificar en tres grandes grupos: análisis extremal, análisis de tormentas y análisis energético.

Los resultados de caracterización del régimen de oleaje se proporcionan mediante histogramas de probabilidad de excedencia de las características del oleaje y el viento, así como los de probabilidad conjunta de altura de ola significativa con dirección de propagación, altura de ola

significante con el periodo y velocidad del viento con dirección. Además, se presentan también los ajustes de los valores máximos obtenidos con la distribución de probabilidad de Weibull y los mapas de periodo de retorno para las diversas características de oleaje y viento. Es importante resaltar que todos los resultados del análisis mencionado se llevaron a cabo y están disponibles desde ópticas anuales o estacionales y para cada una de las celdas. En algunos casos, se proporcionan mapas que abarcan en su totalidad la vertiente de interés.

La caracterización de las principales variables del viento que se ha realizado para un periodo de 60 años, puede considerarse como una etapa inicial para el futuro desarrollo de la elaboración de mapas o determinación de cotas de inundación en las costas debidas a tormentas y huracanes. Por otro lado, el análisis de las tendencias de los valores relacionados al oleaje permite realizar predicciones acerca del comportamiento y modificación de los procesos costeros de sedi-

mentación y erosión de la costa

El análisis extremal del clima marítimo que se expuso en el presente artículo, tiene como objeto servir como una herramienta de ponderación confiable para la determinación de las condiciones de diseño del oleaje; el uso y manejo adecuado de estos datos, en cualquier proyecto o estudio de la zona litoral, se basará en considerar que las características del oleaje que se provee, son para aguas profundas.

Otra característica relevante de la caracterización del régimen del oleaje que se presentó en este trabajo, es que la calidad, continuidad y longitud del periodo histórico que representan los datos, hace que el potencial de aplicación de la información disponible sea muy amplio. Esto es, en virtud de que se pueden realizar análisis a diferentes escalas temporales, la información puede ayudar en la determinación de las condiciones de los agentes climático-atmosféricos en ámbitos que van desde marcos jurídicos para el gestión litoral y operatividad de zonas portuarias hasta actividades de recreo en las zonas marítimas. Es posible también, estimar las condiciones de diseño, operación, construcción, los regímenes medios y extremales, así como los periodos de retorno para diversas obras de protección y explotación de los litorales.

LISTA DE SÍMBOLOS

H : Altura de ola significativa (m)

T : Periodo de la ola (s)

θ_H : Dirección de propagación de la ola (grados)

$p(H), p(T)$: Probabilidad de la función de densidad de la altura de ola y periodo, respectivamente

$p(H, T), p(H, \theta_H)$: Probabilidad de la función de ocurrencia conjunta altura de ola - periodo, altura de ola - dirección de propagación, respectivamente

$P(\bar{H} \leq H)$: Probabilidad de la función de distribución de las alturas de olas

A : Parámetro de umbral (posición) de la función de distribución de Weibull

B : Parámetro de escala de la función de distribución de Weibull

C : Parámetro de forma de la función de distribución de Weibull.

REFERENCIAS

Bendat. J.S., Piersol, A.G., (1985). Random data. Analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, 566 pp., USA.

Cortina, S., Brachet, G., Ibañez de la Calle, M. y Quiñones, L., (2007). Océanos y costas. Análisis del marco jurídico e instrumentos de política ambiental en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología, 236 pp., México.

Comisión Federal de Electricidad, (1983). Manual de diseño de obras civiles. Hidrotécnica A.2.13. Hidráulica Marítima, 304 pp., México.

Cowell, P.J. y Thom, B.G., (1997). Morphodynamics of coastal evolution. En Carter, R.W.G. y Woodroffe, C.D. (eds.), Coastal Evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics, Cambridge University Press, pp. 33–86, Cambridge.

Cunnane, C., (1978). Unbiased plotting positions, a review. J. Hydrology, 37, 205–222.

Goda, Y., (1990). Distribution of sea state parameters and data fitting. En Herbich, J.B. (ed.), Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1, pp. 371–408, Gulf Publishing Company, USA.

Günther, H., Hasselmann, S. y Janssen, P.A.E.M., (1992). The WAM model cycle 4. Report No. 4, Modellberatungsgruppe, Vol. 109 pp., Hamburg.

Holgben, N., (1990). Long term wave statistics. En LéMehuaté, B. y Hanes, D. (eds.), The Sea, Vol. 9, pp. 293–333, Ocean Engineering Science, John Wiley & Sons, USA.

Holthuijsen, L.H., (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 387 pp., USA.

Isaacson, M. de ST.Q. y Mackenzie, N.G., (1981). Long term distributions of ocean waves. J. Wat. Port and Coast Ocean Div., ASCE, 107(2), 93–109.

Johnson, N.L., Kotz, S. y Balakrishnan, N., (1995). Continuous univariate distributions. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, Vol. 2, 752 pp., USA.

Massel, S.R., (1996). Ocean surface waves: their physics and prediction. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 11, 491 pp., World Scientific, Singapore.

Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P.J., Mansard, E., Martin, M.J., Peltier, E., Thompson, E.F. y Van Vledder, G., (1994). Recommended practice for extreme wave

- analysis. *J. Hydraulics Research*, 32(6), 803–814.
- Ochi, M.K. (1990). *Applied probability and stochastic processes in Engineering and Physical Sciences*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley and Sons. USA., 500 pag.
- Pérez, D.M., Bolaños, R. y Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica*, Vol. XXIII (2), pp. 5–20, México.
- Rao, A.R. y Hamed, K.H., (2000). *Flood Frequency Analysis*. CRC Press LLC, 355 pp., USA.
- Ruiz, G., Silva, R., Pérez, D., Posada, G., y Bautista, G., (2008). Modelo híbrido para la caracterización del oleaje. *Ingeniería Hidráulica*, México. Aceptado.
- Silva, R., (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie Docencia 49. Instituto de Ingeniería, UNAM, 179 pp., México.
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G. y Diaz, G. (2002). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering, World Scientific, Singapore.
- Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D.M., Rivillas, G.D. y Espinal, J.C. (2008a). Atlas de clima marítimo de la vertiente Atlántica mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN en trámite.
- Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D.M., Rivillas, G.D. y Espinal, J.C. (2008b). Atlas de clima marítimo de la vertiente Pacífica mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN en trámite
- Thompson, E.F., (2001). Hydrodynamic analysis and design conditions. En Pope, J. (ed.), *Coastal Engineering Manual, Part II, Chapter 8.*, pp. II-8-1–II-8-62, US Army Engineers Engineering Research and Development Center, Mississippi.
- Ward, D.L., Thompson, E.F. y Zang, J., (2003). Selection of a design wave height for coastal engineering. En Mohan, R.K., Magoon, O. y Pirrello, M. (eds.), *Advances in Coastal Structure Design*, ASCE, pp. 116–134, USA.
- World Meteorological Organization, (1998). *Guide to wave analysis and forecasting*. WMO-No. 702, 160 pp., Geneva.