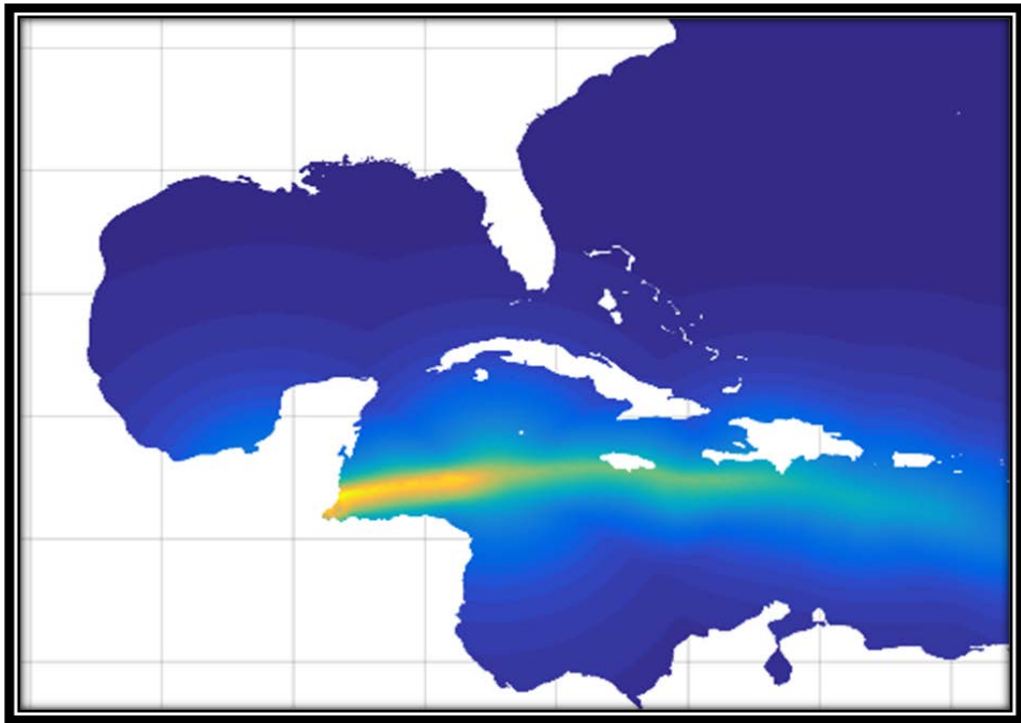


PROYECTO

"Caracterización del Clima Marítimo en Twin Cayes (Belice)"



Santander, Junio-2017

Elaborado por:



Instituto de Hidráulica Ambiental - Universidad de Cantabria

Para:



Mesoamerican Reef Fund - MAR Fund

Autores del trabajo:

Dr. Jorge Pérez (perezgj@unican.es, Tel.: +34 942 20 16 16, ext.1204)

Dra. Melisa Menéndez

Dr. Antonio Espejo

Índice:

1. Introducción.....	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Objetivos del estudio	6
2. Bases de datos	7
2.1. Batimetría / Modelo digital del terreno.....	7
2.2. Nivel del mar	8
2.3. Oleaje en aguas abiertas	13
2.4. Variables atmosféricas (Viento y presión a nivel del mar)	15
2.5. Datos históricos de ciclones tropicales	16
3. Metodología.....	18
3.1. Modelo de oleaje en costa	19
3.2. Reconstrucción local de los forzamientos del oleaje ante ciclones tropicales	21
4. Catálogo de datos de oleaje, nivel del mar y viento proporcionados.....	25
4.1. Viento	25
4.2. Componentes de Marea astronómica y residuo meteorológico del Nivel del mar. 25	
4.3. Oleaje	26
5. Caracterización del clima marítimo del oleaje en la zona objetivo.....	29
5.1. Distribuciones bivariadas Altura de oleaje - Dirección / Periodo.	29
5.2. Régimen medio de la altura y periodo del oleaje.	30
5.3. Régimen extremal.	31
5.4. Efectos del cambio climático en el oleaje	32
Referencias	34

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En febrero de 2017, Mar-Fund se pone en contacto con IHCantabria para exponerle su necesidad de caracterizar las condiciones climáticas de la hidrodinámica en un área específica de la Reserva Marina 'South Water Caye': la isla de arrecifes de coral denominada 'Twin Cayes' (localización en la figura 1). MarFund expone que esta área protegida presenta importantes problemas de erosión que han ocasionado que la estación de campo de la reserva (donde pernoctan los guarda parques y que sirve de centro de coordinación de actividades varias) se encuentre en precarias condiciones. Con el fin de llevar a cabo una serie de actuaciones de protección con el fin de detener la erosión y recuperar playa en este cayo es necesario, en primer lugar, realizar una caracterización de las condiciones hidrodinámicas en el área de estudio.

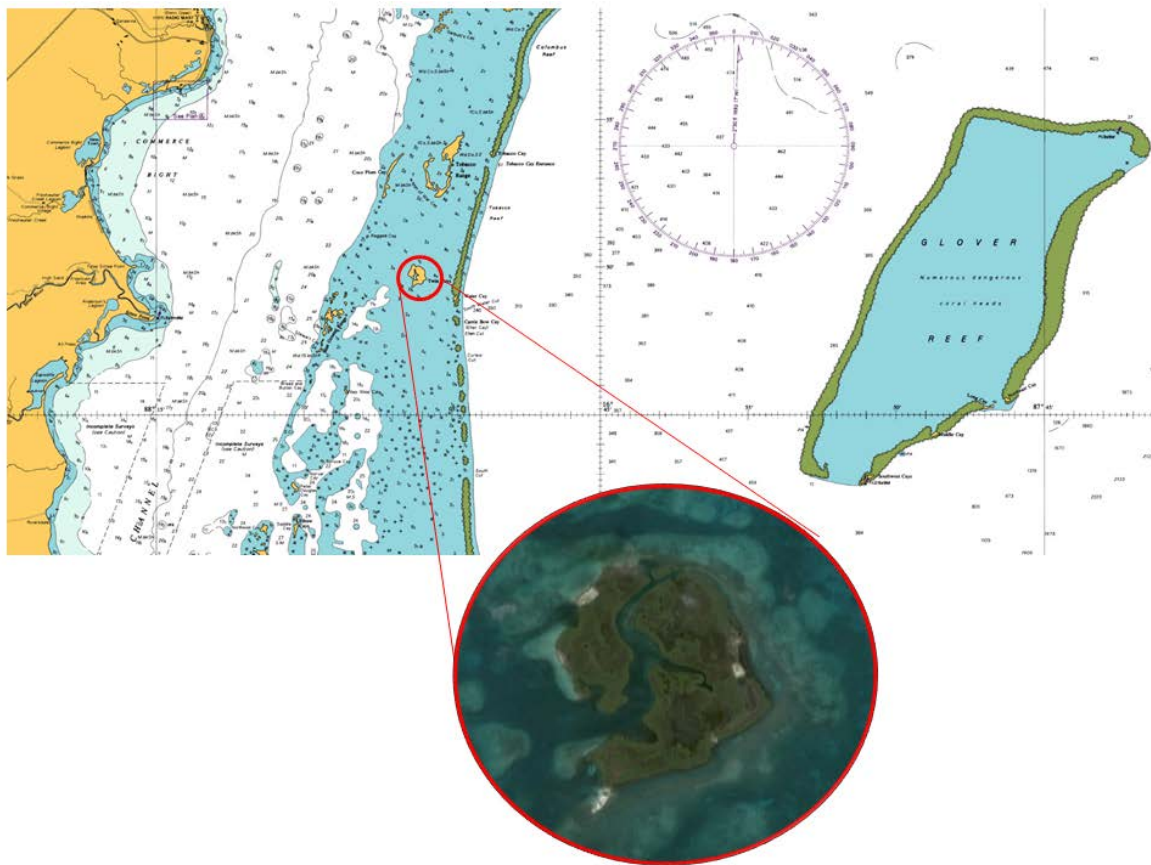


Figura 1. Situación geográfica de Twyn Cayes.

IHCantabria dispone de una base de datos meteo-oceánica global y regional (IHData). No obstante, dadas las singulares características de este tramo litoral (escasa profundidad y efecto barrera que ejercen los arrecifes coralinos más externos de la reserva South Water Caye), se requiere un estudio específico con mayor resolución espacial.

1.2. Objetivos del estudio

El objetivo general del presente estudio consiste en la caracterización del clima marítimo en Twin Cayes (Belice). Para ello se plantea el desarrollo de un estudio específico (en un plazo de 6 semanas) que incluya el modelado y análisis de las condiciones climáticas del oleaje desde fuera de la zona de corales hasta la costa de Twin Cayes, con una resolución espacial no superior a unos centenares de metros.

Para un correcto análisis se ha de considerar el efecto de ciclones tropicales en la región, ya que pueden producir alturas de ola relativamente elevadas. Además, el efecto del aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático puede ser un factor relevante y también debe ser considerado.

Para poder caracterizar las condiciones climáticas se aconseja disponer de información durante al menos 30 años. Por ello se define el periodo de estudio como el periodo de 32 años desde 1985 hasta 2016.

Los productos para la caracterización del clima marítimo que se entregarán son los siguientes:

- Series temporales horarias de los parámetros espectrales del oleaje (altura de ola significativa, periodo medio, periodo de pico y dirección media del oleaje) durante el periodo 1985-2016, considerando el efecto de los ciclones tropicales históricos, y para al menos 4 localizaciones en las proximidades de Twin Cayes.
- Series históricas de nivel del mar (marea astronómica y marea meteorológica) y estimación de la proyección climática del nivel medio del mar a lo largo del siglo XXI para distintos escenarios de cambio climático junto con su incertidumbre.
- Una caracterización del clima marítimo en la zona objetivo. La caracterización del clima marítimo incluirá, la estimación del régimen medio del oleaje (de la altura de ola significativa y periodo medio), la distribución conjunta de altura de ola y periodos, el régimen extremal del oleaje y valores de periodo de retorno asociados, la distribución direccional (rosas) para distintas magnitudes del oleaje.
- Además, se analizarán aspectos relativos a variaciones climáticas de interés, como son los cambios en las condiciones medias y extremas del oleaje ante diferentes escenarios de aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

2. Bases de datos

Para un correcto modelado de las condiciones hidrodinámicas del oleaje en las cercanías de Twin Cayes se requiere de la siguiente información:

- Batimetría / Modelo digital del terreno / líneas de costa.
- Información del nivel del mar para cada una de las componentes relevantes en la zona de estudio: marea astronómica, marea o residuo meteorológico y cambios de largo plazo en el nivel medio del mar.
- Información de las condiciones del oleaje en aguas abiertas próximas a la Reserva Marina 'South Water Caye'.
- Las condiciones meteorológicas sobre la superficie marina de estudio (viento y presión atmosférica a nivel del mar).
- Información histórica de los ciclones tropicales históricos ocurridos durante el periodo 1985-2016.

A continuación se describen las bases de datos utilizadas en este trabajo que contienen la información requerida:

2.1. Batimetría / Modelo digital del terreno

Para este estudio se ha utilizado una batimetría global que ha sido combinada con otras bases de datos para mejorar los resultados cerca de Twin Cayes. Entre las distintas batimetrías globales disponibles (por ejemplo ETOPO, GEBCO, etc.) se ha optado por GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) que cuenta con una resolución espacial de 30 segundos (menos de 1 km). Se ha utilizado la última versión disponible de la malla GEBCO_2014 que incluye numerosas mejoras respecto a bases de datos más antiguas.

Un inconveniente de las batimetrías globales es que no incluyen la presencia de arrecifes de coral, por ello, la batimetría de GEBCO se ha combinado con batimetría del proyecto SeaWifs (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/reefs.pl>). SeaWifs representa un paso importante para mejorar la identificación y caracterización de los arrecifes de coral, y por tanto mejorar la caracterización de la profundidad del agua en los océanos tropicales. El valor de cada píxel en la imagen de clasificación en profundidad SeaWiFS de resolución total se deriva de las profundidades calculadas a partir de diferentes sobrevuelos de SeaWiFS para que los píxeles de la nube puedan eliminarse y se desarrollen las mejores estimaciones de profundidad que eliminan los efectos transitorios del sedimento, la clorofila, etc. El mapa de profundidad más reciente de SeaWiFS representa la contribución de 28.937 archivos de resolución GAC (todos los cinco años de la misión SeaWiFS), 25.682 archivos de resolución de LAC y 1.804 archivos de estación de HRPT de todo el mundo.

La figura 2 muestra cuántos píxeles SeaWiFS separados (incluidos los píxeles turbios) se utilizaron para determinar cada píxel en el mapa final. Hasta el 13 de noviembre de 2002, ningún píxel de mapa tenía menos de 4 píxeles de entrada y muchos tenían más de 200.

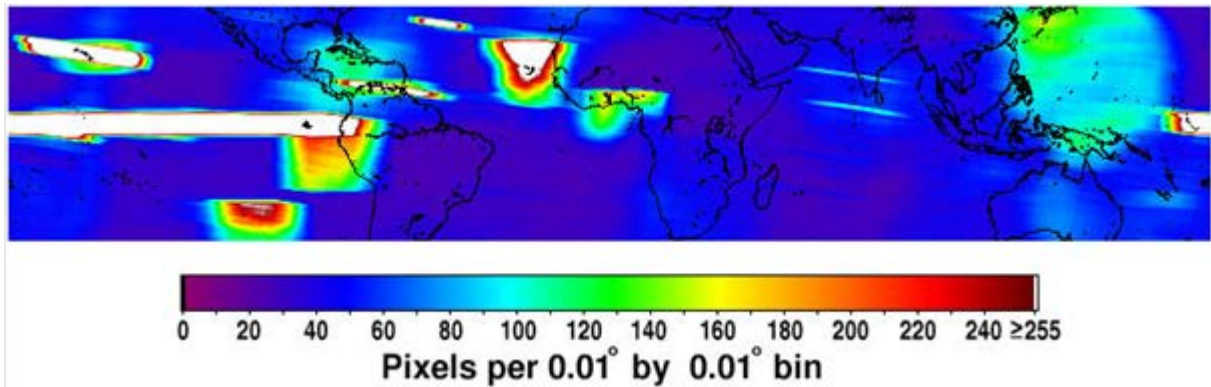


Figura 2. Pixels de SeaWifs por cada celda de 0.01°x0.01°

Por último, se han añadido correcciones menores a partir de la información de la carta náutica 'British Admiralty Nautical Chart 1797' a escala 1:125000 (figura 3).

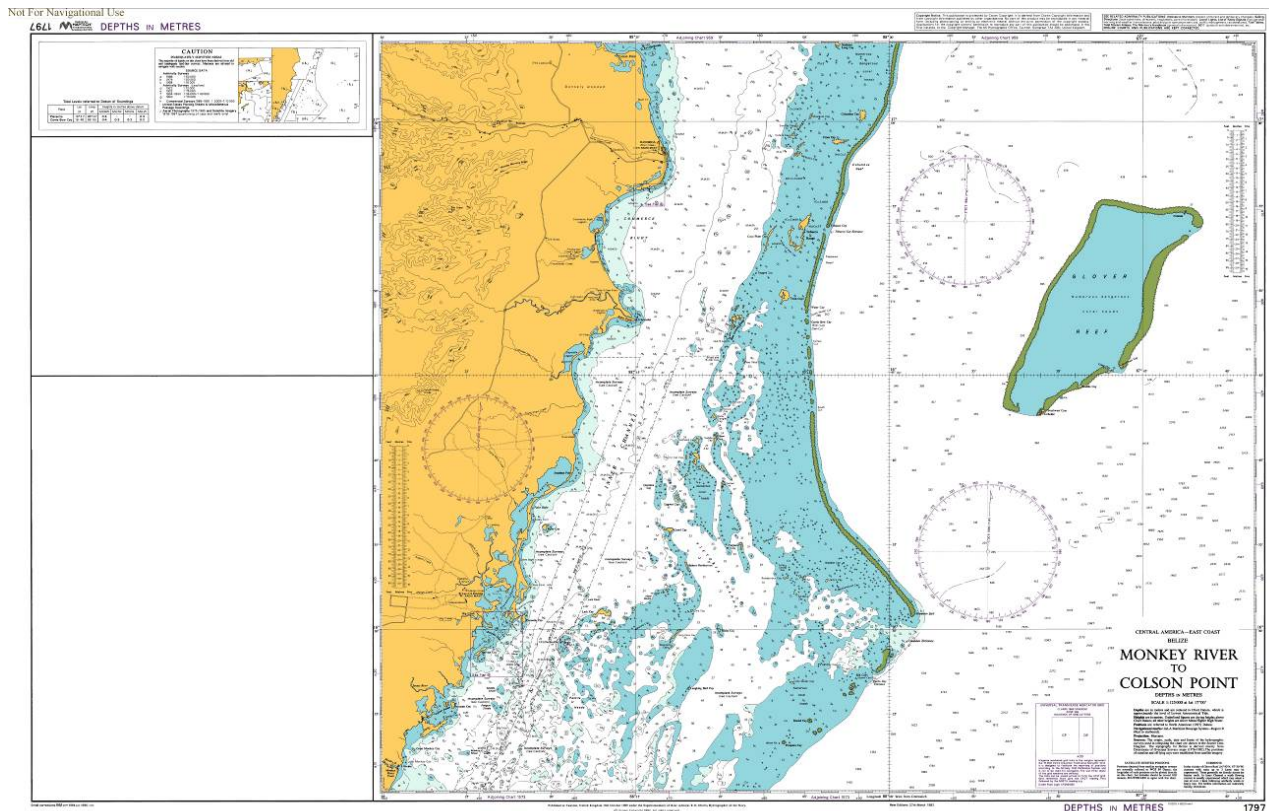


Figura 3. Carta náutica del área de estudio.

2.2. Nivel del mar

Para modelar el oleaje es necesario caracterizar el nivel del mar de la superficie oceánica. El nivel del mar se puede descomponer en: marea astronómica, marea meteorológica y nivel medio del mar (véase figura 4).

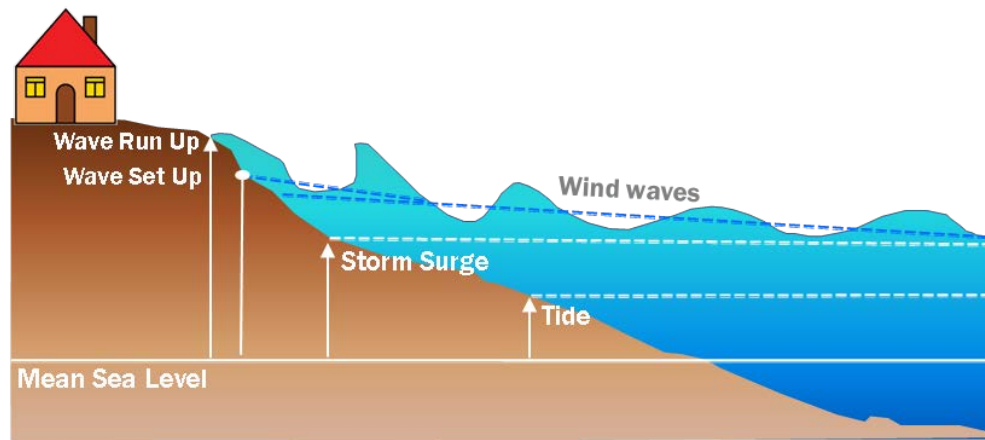


Figura 4. Esquema de los constituyentes del nivel del mar necesarios para caracterizar el oleaje que llega a la costa.

2.2.1. Marea astronómica

En este proyecto se han utilizado datos de marea astronómica procedentes de la base de datos de IHData GOT (Global Ocean Tides). Esta base de datos proporciona series temporales horarias de marea astronómica con cobertura global.

La marea astronómica se genera a partir de las constantes armónicas derivadas del modelo de mareas mundial TPXO 7.2 desarrollado por la Universidad Estatal de Oregón. TPXO 7.2 es una versión actual de un modelo global de mareas oceánicas, que busca el mejor ajuste, en el sentido de mínimos cuadrados, a las ecuaciones de Laplace y a los datos promediados a lo largo de las trayectorias de las misiones satelitales TOPEX-Poseidon y Jason. Los métodos utilizados en este modelo se describen en Egbert et al. (1994) y con más detalle en Egbert y Erofeeva (2002).

Las salidas del modelo TPXO incluyen las ocho constantes armónicas primarias (M₂, S₂, N₂, K₂, K₁, O₁, P₁, Q₁), dos largos períodos constituyentes (M_f, M_m) y 3 constituyentes armónicas no lineales (M₄, MS₄, MN₄), proporcionadas en una malla global de 1440 x 721 puntos con resolución de 0.25 grados.

Esta información se utiliza posteriormente para reconstruir series temporales horarias de marea en la zona de estudio utilizando la herramienta de t_tide (Pawlowicz et al., 2002).

Las series temporales de marea astronómica resultante han sido contrastadas con medidas in-situ. Además esta fuente de información de marea ha sido utilizada para la elaboración de numerosas publicaciones científicas e informes técnicos por todo el mundo.

2.2.2. Marea meteorológica

La marea o residuo meteorológico del nivel del mar es la variación del nivel de la mar producida por los cambios de presión y del viento que actúan sobre la superficie marina. En la generación de la marea meteorológica entran en juego otros condicionantes como la

profundidad, de forma que en aguas someras la marea meteorológica que se produce es mayor que en aguas profundas.

En este trabajo se ha utilizado la base de datos GOS (Global Ocean Surges, Cid et al., 2014) procedente de IHData. GOS es un conjunto de reconstrucciones históricas de marea meteorológica, generadas con modelado numérico oceánico regional ROMS (Regional Ocean Model System, Shchepetkin and McWilliams, 2003, 2005). ROMS es un modelo oceánico que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds utilizando la aproximación de Boussinesq. Para la obtención de la marea meteorológica, el modelo ROMS se emplea en modo barotrópico. El modelo fue forzado con datos del viento a 10 m de altura y la presión del nivel del mar proporcionada por el reanálisis global NCEP / NCAR (Kalnay et al., 1996) (resolución temporal de 6 horas y resolución espacial de 1.9041° en latitud y 1.875° en longitud). Las condiciones en los límites abiertos del dominio fueron definidas por el efecto barómetro invertido.

En particular se ha utilizado el dominio de la base de datos GOS en Latino-América (Losada et al., 2013). El dominio se extiende desde 61°S a 41°N en latitud y desde 125°W a 20°W en longitud con una resolución horizontal de $1 / 4^\circ$ (figura 5). La batimetría usada proviene de la base de datos ETOPO 2, una batimetría global de 2 minutos de resolución, derivada de sondeos de profundidad y observaciones de gravedad por satélite (Smith y Sandwell, 1997). Esta base de datos ha sido validada con medidas instrumentales in-situ procedentes de mareógrafos y remotas procedentes de satélite.

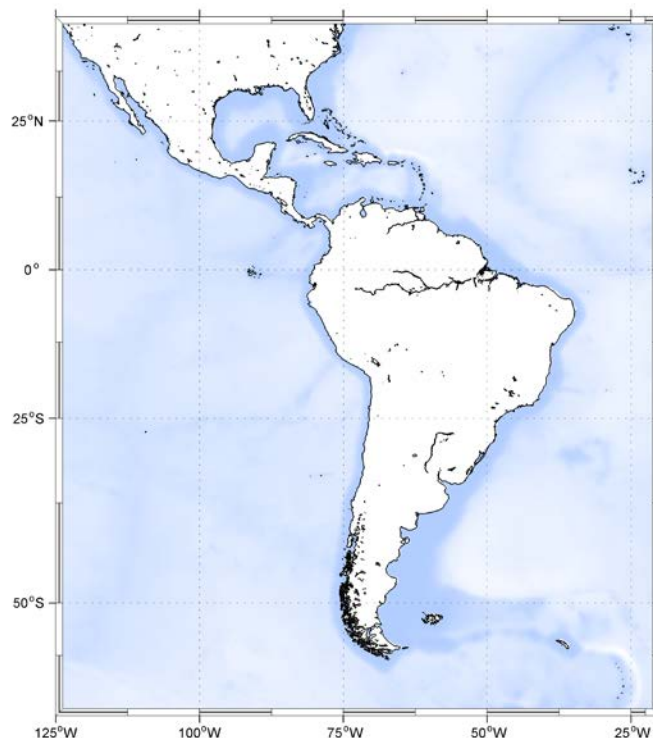


Figura 5. Dominio de la base de datos GOS en Latino América.

2.2.3. Nivel Medio del Mar

Las bases de datos consultadas y analizadas del nivel medio del mar (NMM) son las siguientes: (i) una base de datos histórica que reconstruye la variación del nivel medio del mar regional a partir de registros de mareógrafos y satelitales desde 1950 y (ii) la base de datos de aumento de nivel del mar elaborada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su quinto informe (AR5, 2013) para diferentes escenarios de cambio climático. La base de datos histórica permite estimar la tendencia de aumento del NMM en la zona costera próxima a Twin Cayes en la actualidad, mientras que los cambios en el nivel medio del mar a partir de proyecciones climáticas permiten estimar posibles cambios futuros ante distintos escenarios de cambio climático.

La base de datos histórica de nivel medio del mar ha sido desarrollada por IH-Cantabria a partir del método propuesto por Church et al. (2004). La reconstrucción cubre el periodo 1950-2009 con resolución mensual. La variable nivel medio del mar procesada presenta las siguientes correcciones: (i) eliminación de la variación estacional media; (ii) corrección de barómetro inverso, y (iii) corrección GIA (Glacial Isostatic Adjustment, Mitrovica) en la información procedente de mareógrafos. El registro de nivel del mar que se ha utilizado constituye el nodo más cercano (87°W, 17°N) a Twin Cayes.

Las proyecciones de NMM nos dan las variaciones (incrementos) de NMM para unos escenarios futuros. Los datos proporcionan información para 2 posibles escenarios de emisión futuros (Trayectorias de Concentración Representativas, RCP, por sus siglas en inglés): rcp45 y rcp85. La estimación de cambio del NMM es compleja y depende de diferentes procesos y fenómenos. A modo de resumen las principales componentes que se han considerado en esta base de datos son: (i) componente asociada a la contribución de la expansión termal, (ii) componente asociada a las dinámicas del nivel de la superficie del mar (principalmente oceanográfica), (iii) componente asociada a la variabilidad atmosférica (Presión, barómetro inverso), (iv) componente asociada a la variabilidad en los glaciares (no incluidos los del Antártico y Groenlandia en esta componente), (v) cambios en el balance de masa en la capa de hielo superficial en Groenlandia y en el Antártico (principalmente extensión terrestre), (vi) cambios en las dinámicas en la capa de hielo en Groenlandia y en el Antártico (incluye extensión sobre medio marino), (vii) componente asociada a la contribución de agua continental, y (viii) GIA (Glacial Isostatic Adjustment): ajuste isostático glacial, cambios en la superficie terrestre por la variación de la capa de hielo que se encuentra sobre esta. Para el modelado de las distintas componentes se han utilizado 21 Modelos Climáticos diferentes. Los modelos utilizados son: ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ES-M2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME, INMCM4. La información se proporciona como incremento durante un periodo futuro (2081-2100) con respecto al periodo histórico de control. El periodo histórico de control utilizado es 1986-2005.

La figura 6 muestra los cambios estimados en la región del Caribe a fin de siglo (diferencia entre el periodo 1986-2005 y el NMM estimado en 2081-2100) para los dos escenarios climáticos analizados a fin de siglo. El cambio estimado en la zona de Twin Cayes para el escenario **RCP4.5** es de **49.2cm** (intervalo de confianza al 90% definido por el límite inferior de 28.6cm y el límite superior de 71.2cm). El cambio estimado en la zona de Twin Cayes para el escenario **RCP8.5** es **65.3cm** (intervalo de confianza al 90% definido por el límite inferior de 38.4cm y el límite superior de 95.5cm).

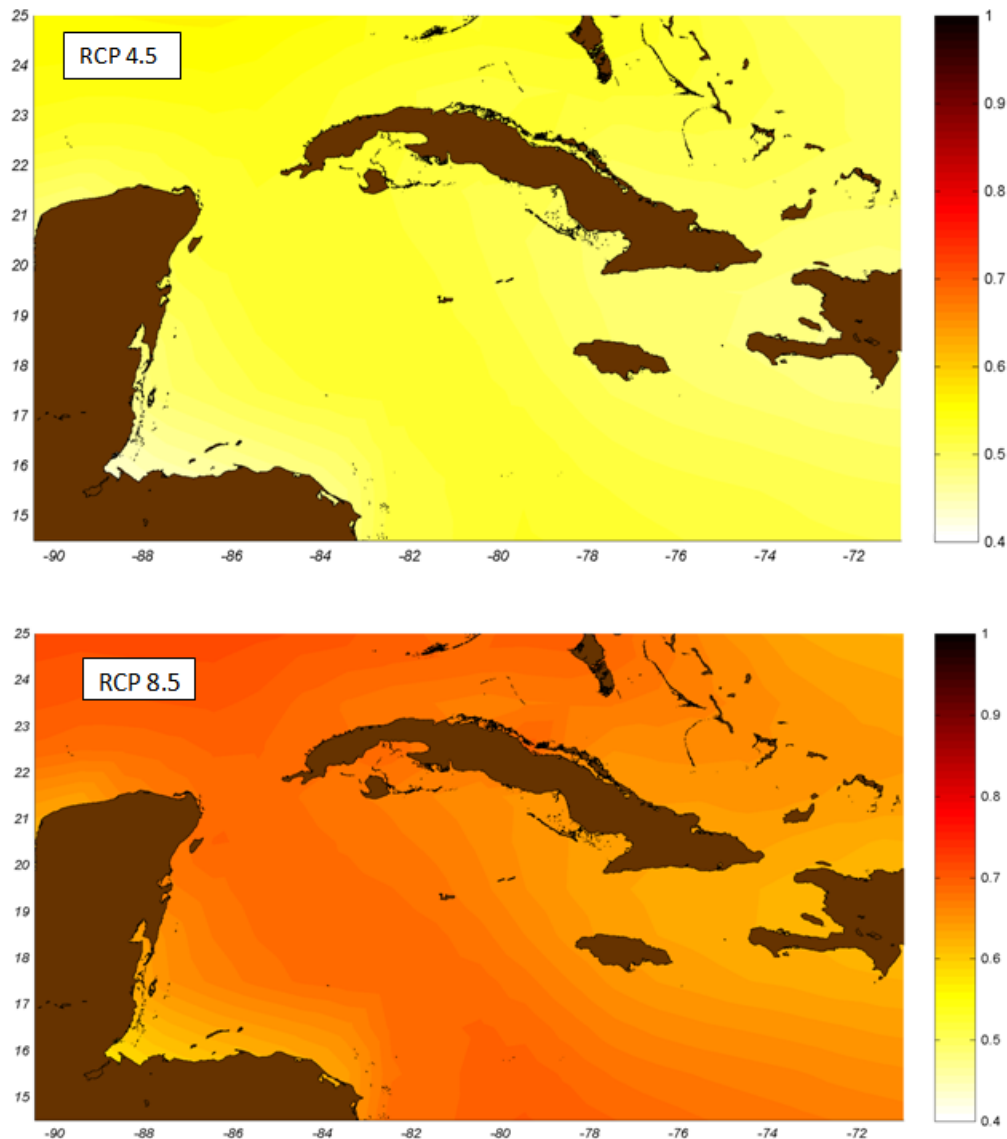


Figura 6. Cambios regionales de aumento del nivel medio del mar en la región del Caribe ante los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5.

Estas estimaciones se han comparado con las tendencias obtenidas a partir de la información histórica (figura 7). Para ello se ha estimado la tendencia lineal a partir de 1950 (2.3mm/año) y a partir de la década de los 90 (2.95mm/año). Si se considerase esta evolución de cambio para finales de siglo los cambios estimados resultarían en 20.7cm y 26.5cm a finales del s.XXI respectivamente. Los valores de cambio estimados para ambas bases de datos se resumen en la figura 7. Debido a que los incrementos estimados a partir de la información histórica son menores que la estimación de las proyecciones climáticas, en este trabajo se han considerado los valores promedio de incremento a fin de siglo presentados en el último informe del IPCC.



Figura 7. Tendencias de cambio del nivel medio del mar para la región de Twin Cayes a partir de información histórica y los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP 8.5.

2.3. Oleaje en aguas abiertas

La información procedente del oleaje que alcanza la barrera exterior a la reserva marina 'South Water Caye' se ha obtenido a partir de la base de datos GOW (Global Ocean Waves). GOW es una reconstrucción histórica de oleaje global generada con el modelo numérico WaveWatch III (WW3). WW3 es un modelo espectral de tercera generación que simula tanto la generación como propagación del oleaje. La hipótesis fundamental asumida en la resolución de la ecuación de balance de densidad espectral es que las propiedades del medio, así como las del campo de oleaje, varían en el espacio y en el tiempo en escalas mucho mayores que una longitud de onda.

GOW2 (Perez et al., 2017) utiliza forzamientos (campos de viento y hielo) procedentes del reanálisis CFSR (Saha et al., 2010) y las parametrizaciones más avanzadas para proporcionar datos horarios a partir de 1979 con una resolución de 0.125° en las costas.

Las características más relevantes empleadas para el desarrollo de esta base de datos se resumen a continuación. WW3 fue implementado usando la parametrización TEST451 (Ardhuin et al., 2010). Las alturas de ola obtenidas con TEST451 (por ejemplo, Rasche y Ardhuin 2013) tienen sesgos más pequeños que los obtenidos con parametrizaciones anteriores (Stopa et al., 2016). Se aplicó un tratamiento continuo del hielo (Tolman 2003) con niveles crecientes de bloqueo desde concentraciones de 0.25 (sin efecto) a 0.75 (bloqueo total). La fricción por fondo SHOWEX (Ardhuin et al., 2003), basada en las mediciones de campo de los experimentos DUCK'94 y SHOWEX fue activada en lugar de la formulación empírica JONSWAP más antigua. La atenuación del oleaje producida por islas y elementos costeros más pequeños que el tamaño de celda puede ser una fuente importante de errores. Se consideró mediante la reducción del flujo de energía a través de los límites de las celdas (Tolman 2003). La reflexión de la costa y elementos sub-malla se consideró con un valor de 0.05.

GOW2 ha sido validado con medidas instrumentales in-situ procedentes de boyas y medidas remotas procedentes de satélite (misiones intercalibradas ERS-1&2, ENVISAT, GEOSAT, GFO, Jason-1, Jason-2, TOPEX-Poseidon y CryoSat)

Los resultados de la validación muestran correlaciones muy altas y sesgos pequeños (Figura 8) y una gran mejora en la representación de valores extremos respecto a bases de datos más antiguas. En la región de estudio la base de datos GOW2 muestra una gran calidad, con correlaciones superiores a 0.9, sesgos menores a 0.1 m y errores cuadráticos medios inferiores a 0.4 m.

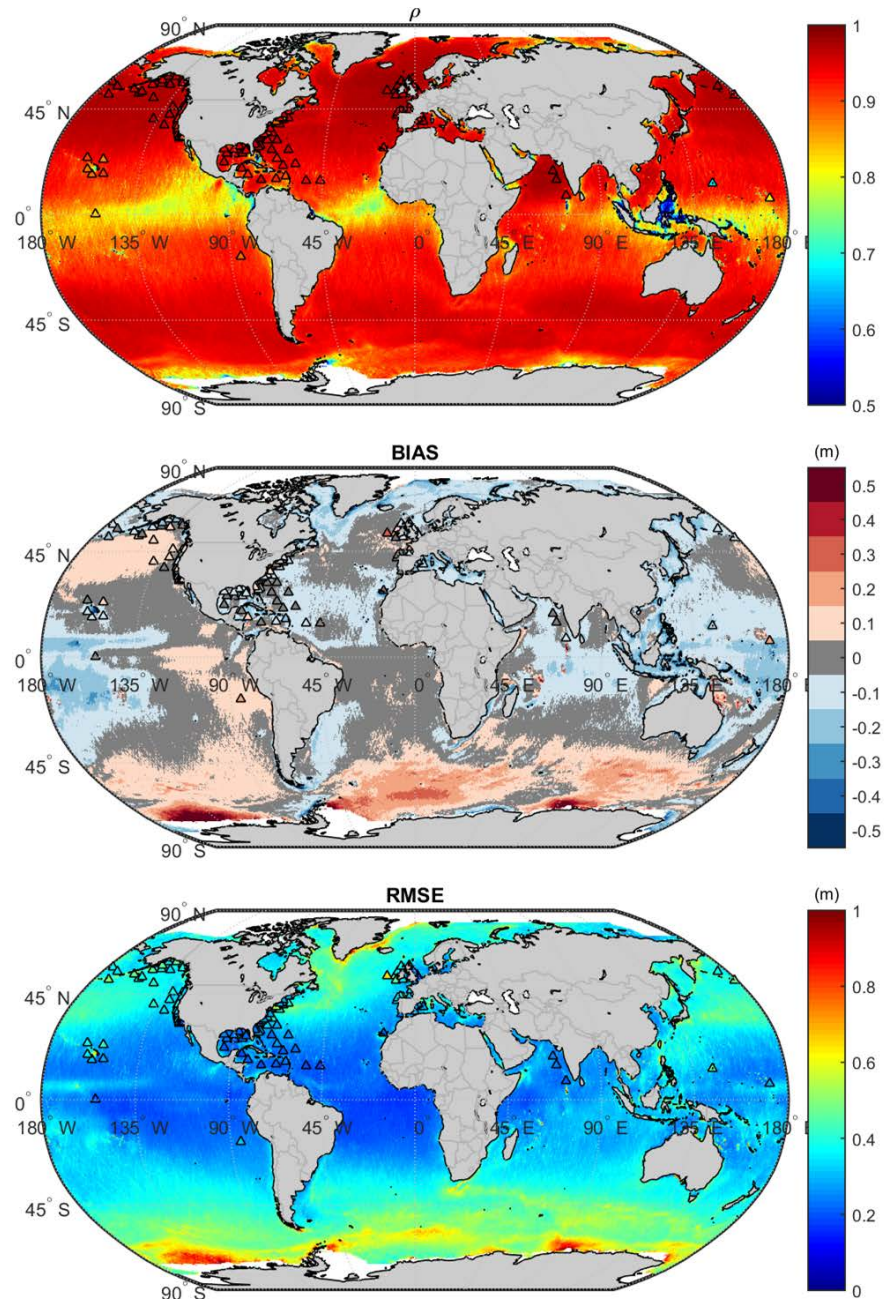


Figura 8. (de arriba abajo) coeficiente de correlación, sesgo y error cuadrático medio de la base de datos GOW2 frente a los registros medidos por boyas (triángulos) y los datos satelitales.

Un valor añadido de esta base de datos es que dispone de datos completos del espectro del oleaje además de los parámetros estándar del estado de mar. En el marco del presente proyecto se han utilizado datos de espectros de la base de datos GOW2 en el periodo comprendido entre el 1 de Enero de 1985 y el 31 de Diciembre de 2016, completando un total de 32 años de registros 3-horarios.

2.4. Variables atmosféricas (Viento y presión a nivel del mar)

2.4.1. Reanálisis CFSR

El estudio del clima atmosférico histórico se puede basar en distintas fuentes de datos como, por ejemplo, observaciones visuales y medidas instrumentales. Sin embargo, estas bases de datos presentan limitaciones. Las observaciones visuales son heterogéneas espacial y temporalmente; los datos instrumentales (e.g. anemómetros y satélites) están concentradas en pocos lugares o cubren periodos de tiempo cortos. Una manera de evitar estas limitaciones es utilizar datos procedentes de reanálisis. Los reanálisis combinan modelos numéricos similares a los que se utilizan en predicción meteorológica con asimilación de datos instrumentales para realizar reconstrucciones históricas del sistema climático de hasta varias décadas mediante un procedimiento denominado asimilación de datos. Al combinar las fortalezas de las distintas fuentes de datos, los reanálisis consiguen proporcionar representaciones homogéneas del sistema climático en el pasado con una distribución espacial uniforme.

CFSR (Climate Forecast System Reanalysis, Saha et al., 2010) es un producto de reanálisis global, resultado de una iniciativa conjunta de NCEP (National Centers for Environmental Prediction) y NCAR (National Center for Atmospheric Research). Consiste en un sistema acoplado de atmósfera, océano, tierra, y hielo en la superficie del mar, diseñado para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios a escala global y alta resolución. CFSR incluye (1) acoplamiento de la atmósfera y el océano durante la generación del campo de predicción cada 6 horas, (2) un modelo de hielo marino interactivo, y (3) la asimilación de radiancias de satélite. La resolución atmosférica de CFSR es ~ 38 km (T382) con 64 niveles. El océano se resuelve a 0.25° en el ecuador, y a más de 0.5° más allá de los trópicos, con 40 niveles. El modelo de la superficie terrestre mundial tiene 4 niveles de suelo y el modelo global del hielo marino tiene 3 niveles.

Las características más notables de CFSR son: (i) superior a anteriores reanálisis de NCEP con respecto a: mejora del modelo, resolución más fina, esquemas de asimilación avanzados, acoplamiento de hielo atmósfera-océano-tierra-mar, asimilación de radiancias de satélite; (ii) representa el cambio en la concentración de CO₂ y otros gases traza, aerosoles, y variaciones solares; y (iii) se aproxima a la resolución horizontal de reanálisis regionales como el NARR (North American Regional Reanalysis) y el ARS (Arctic Reanalysis System). El reanálisis CFSR proporciona datos de viento desde 1979 hasta 2010 con resolución temporal horaria (Figura 9). Los datos de CFSR son considerablemente más precisos que los de reanálisis producidos previamente por NCEP debido a las numerosas mejoras.

En el marco del presente proyecto se ha realizado la descarga de los datos de velocidad del viento (componente U y V) de la base de datos CFSR y su continuación CFSv2 (Saha et al., 2014) para el periodo comprendido entre el 1 de Enero de 1985 y el 31 de Diciembre de 2016, completando un total de 32 años de registros horarios en el área de estudio.

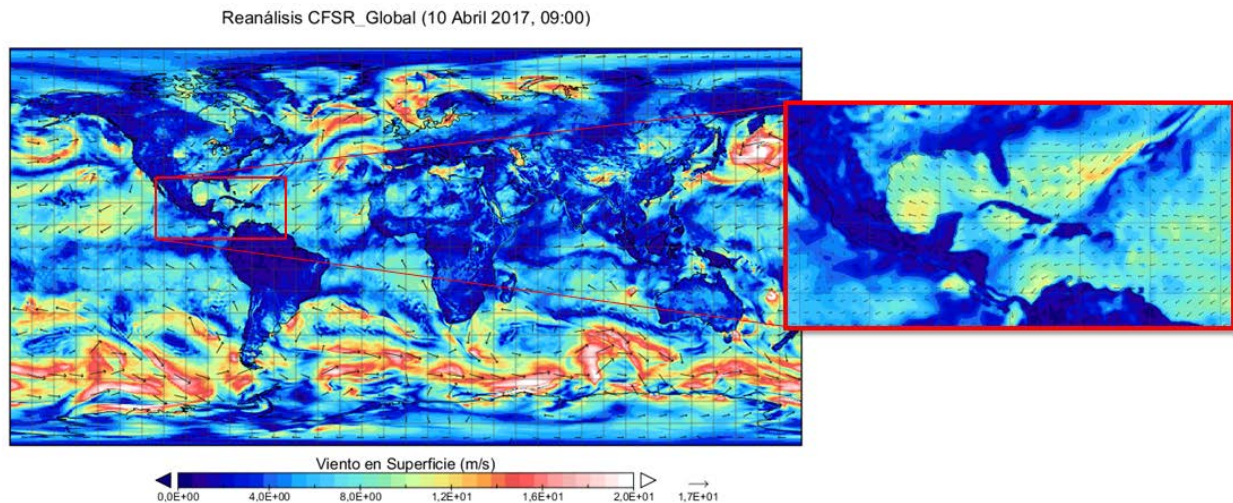


Figura 9. Velocidad del viento a partir de CFSR para el 10 de abril de 2017 a las 09:00 horas GMT.

2.5. Datos históricos de ciclones tropicales

Para caracterizar el riesgo de olas y niveles del mar extremos producidos por ciclones tropicales, es necesario disponer de un registro suficientemente largo que ofrezca información sobre las trazas e intensidades de los ciclones tropicales que hayan pasado a una distancia dada de la zona de estudio. En este trabajo se ha optado por emplear la base de datos IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship; Knapp et al., 2010). Esta base de datos contiene información seis horaria sobre la posición del centro del huracán y su intensidad (definida por la velocidad del viento máxima en periodos de 1 minuto (en nudos) y la presión mínima (en milibares) de los eventos acontecidos desde 1851 hasta la actualidad.

En la figura 10 se muestran las trazas de los ciclones tropicales históricos contenidos en la base de datos IBTrACS que han pasado por la zona de estudio. Los ciclones tropicales seleccionados para su posterior simulación, son aquellos cuyas trazas pasan por una región de ~300 km alrededor de Twyn Cayes. Han sido excluidos ciclones categorizados como depresiones tropicales, cuya intensidad no era lo suficientemente grande para producir oleajes extremos. Ante estas limitaciones se han seleccionado 19 ciclones con trayectorias próximas al área de estudio.

Como puede observarse, independientemente de la latitud media de cada una de las trazas, la trayectoria más probable corresponde a la dirección sureste-nordeste, lo que les confiere un alto potencial destructivo en la costa de Belice, pues la mayoría de ellos tocan tierra con direcciones relativas a la línea de costa casi perpendiculares.

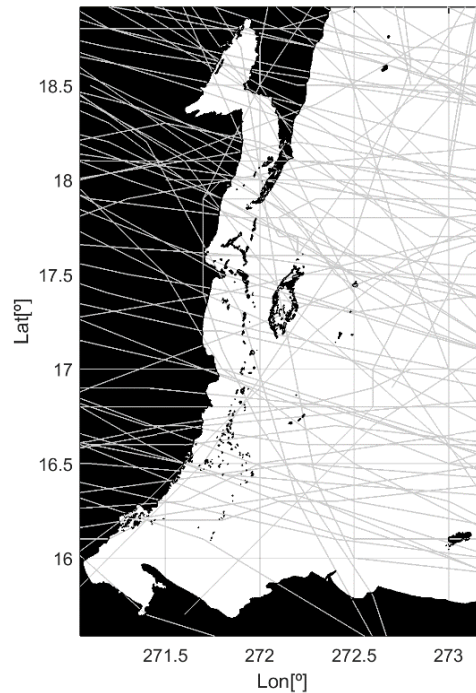


Figura 10. Trazas de los huracanes históricos de la base de datos IBTrACS.

La Figura 11 presenta la climatología de huracanes en la zona de estudio (Categorías 1 a 5 en la escala Saffir-Simpson) que se muestra en la Figura 10. A pesar de que se han observado eventos en todas las estaciones del año, es claramente a finales del verano y principios de otoño cuando mayores probabilidades existen de sufrir los efectos de este tipo de eventos.

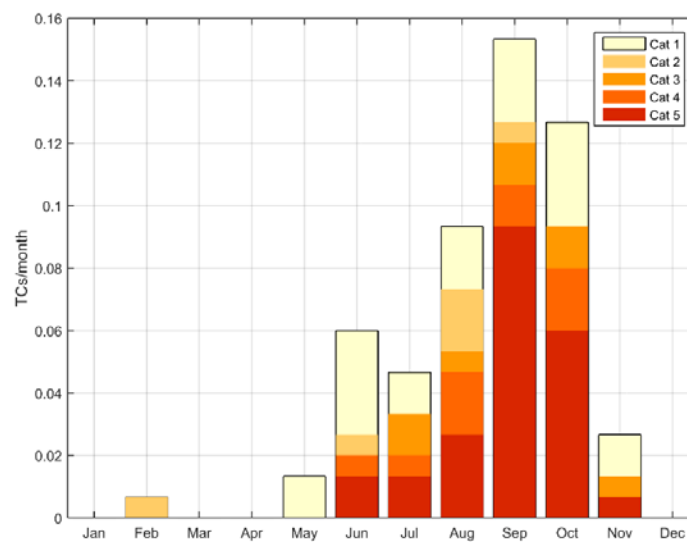


Figura 11. Probabilidad de ocurrencia por categorías de los ciclones tropicales en la zona de estudio.

3. Metodología

Para la obtención del clima marítimo del oleaje en la localización objetivo se hace necesario realizar un downscaling (aumento de resolución espacial) en la región de estudio durante un periodo histórico de suficiente duración que pueda representar las condiciones climáticas existentes. Para ello se ha planteado realizar un downscaling dinámico, es decir, emplear un modelo numérico con suficiente resolución que capture las características locales de la zona objetivo y simule con suficiente precisión los procesos costeros del oleaje (refracción, rotura, etc.).

El procedimiento empleado en este estudio se detalla en la figura 12. En primer lugar se realiza una búsqueda y recopilación de la información batimétrica y de las líneas de costa. Posteriormente se lleva a cabo una integración de la información batimétrica recopilada mediante post-procesado digital. El siguiente paso consiste en la preparación del esquema numérico de simulación, es decir, la selección del modelo de oleaje a emplear y de los parámetros de configuración apropiados y la definición de los dominios geográficos a simular y sus resoluciones. A partir de este segundo paso metodológico, se han realizado tres procesos que básicamente se diferencian en la configuración de las condiciones de contorno e iniciales empleadas en las simulaciones numéricas:

(i) la simulación histórica hora a hora desde 1985 hasta 2016 de los oleajes que alcanzan Twin Cayes. Para realizar este proceso se hace necesario pos-procesar los campos de viento horarios procedentes de la base de datos de reanálisis así como las condiciones de nivel del mar asociadas.

(ii) la reconstrucción histórica de las características locales del oleaje ante los eventos de ciclón tropical ocurridos durante el periodo 1985-2016. Para ello se hace necesario reconstruir las condiciones de viento huracanado en la región de estudio con alta resolución ante cada ciclón tropical. Este proceso es necesario debido a que la base de datos de reanálisis disponible no presenta suficiente resolución espacial para capturar con exactitud este tipo de tormentas.

(iii) la posible modificación en las condiciones de oleaje que podrían ocurrir debido al cambio climático. Para ello y a partir de las condiciones climáticas medias y extremas obtenidas en los dos pasos anteriores, se evalúa el cambio en la hidrodinámica que se produciría debido al aumento del nivel del mar en la zona de estudio. Este proceso conlleva una nueva simulación numérica del oleaje con diferentes condiciones de contorno e iniciales de nivel del mar.

Por último se procesan e integran los resultados obtenidos para obtener los productos finales que consisten en (i) una nueva base de datos local de oleaje, (ii) una caracterización de las condiciones medias y extremas mediante análisis estadístico y (iii) una evaluación de los posibles cambios de oleaje futuros debidos al aumento del nivel del mar.

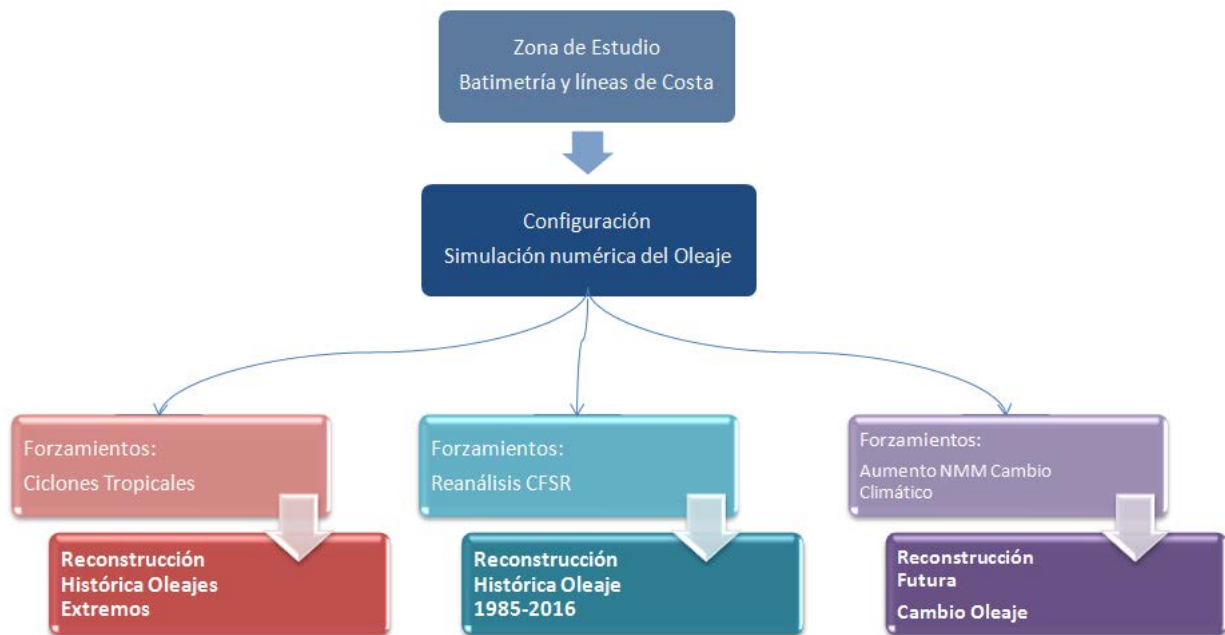


Figura 12. Esquema de la metodología empleada en este estudio.

A continuación se detallan una serie de aspectos técnicos empleados en esta metodología.

3.1. Modelo de oleaje en costa

La simulación del oleaje costero requiere resoluciones espaciales muy superiores a las necesarias en aguas abiertas. Esto se debe a que cerca de costa los efectos de sombra producida por pequeñas islas y cabos y la fricción por fondo se convierten en una importante fuente de variabilidad.

3.1.1. Modelo de generación y propagación de oleaje SWAN

El modelo de propagación SWAN (Booij et al., 1999) desarrollado por Delft University of Technology, es denominado un modelo espectral de tercera generación. Este modelo simula el oleaje generado por viento y propagado a una escala regional, para propagarlo desde aguas intermedias hasta la costa. El modelo SWAN utiliza la acción del oleaje para describir el espectro, (Holthuijsen, 2007). La relación entre la acción del oleaje y la energía se describe de la siguiente manera:

$$A(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)}{f}$$

donde $A(f, \theta)$ y $E(f, \theta)$ son la densidad de acción y energía del oleaje respectivamente en función de la frecuencia relativa y la dirección del oleaje. El modelo SWAN describe la evolución espacial y temporal del espectro mediante la ecuación del balance de energía del oleaje. La expresión matemática de la ecuación en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_f A}{\partial f} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = \frac{S}{f}$$

donde c_x y c_y son las velocidades de propagación en el espacio geográfico, c_f y c_θ en el espacio espectral. El primer término del lado izquierdo de la ecuación representa el cambio

de la densidad de la acción del oleaje con respecto al tiempo; el segundo y tercer término siguiente representan la propagación de la densidad de acción del oleaje en el espacio geográfico, y el cuarto y quinto término del lado izquierdo de la ecuación corresponden a la propagación de la densidad de acción del oleaje en el espacio espectral. El término del lado derecho de la ecuación es la suma de los términos fuente, representados por los forzamientos del viento, la disipación por white-capping, la fricción del fondo, la rotura del oleaje y la transferencia de energía entre componentes del oleaje.

La interacción no lineal entre componentes del oleaje puede tener efectos significativos en la evolución del espectro. En profundidades indefinidas, los cuádruples tienen relevancia debido a que transfieren, débilmente, la energía entre la componente del oleaje con la frecuencia pico hacia las bajas frecuencias, este proceso también se realiza de la frecuencia pico hacia las altas frecuencias siguiendo la aproximación de Hasselmann et al., 1985. Sin embargo, la energía en las altas frecuencias suele ser disipada por medio del white-capping.

En aguas poco profundas, las triadas tienen efecto en el espectro del oleaje al transferir energía desde las bajas frecuencia hacia las altas frecuencias, lo que puede causar la aparición de super-armónicos.

El modelo SWAN genera el oleaje a partir de la transferencia de energía del viento hacia la superficie libre siguiendo los mecanismos descritos y acoplados en (Phillips, 1957 y Miles, 1957), lo cual realiza mediante la siguiente ecuación:

$$S_m(f, \theta) = A + BE(f, \theta)$$

La expresión para B es estimada según Janssen (1991):

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{w_s}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2$$

La variable β es una constante, ρ_a y ρ_w son la densidad del aire y el agua respectivamente; c_{ph} es la fase del oleaje, θ es la dirección del viento; el término A es descrito por (Cavaleri et al., 1981) y se utiliza únicamente cuando se genera el oleaje.

El modelo SWAN resuelve los procesos de disipación de energía en aguas profundas siguiendo la teoría de (Hasselmann, 1974) y en aguas poco profundas, cuando la fricción con el fondo es importante, mediante cualquiera de los métodos de Hasselmann (1973), Collins (1972) o Madsen et al., (1988), los cuales se diferencian en la forma de estimar el coeficiente de fricción. Asimismo, cuando el oleaje se propaga hacia la costa y la altura de la ola se incrementa por efecto del asomeramiento, el modelo SWAN trata este proceso de disipación de energía por medio de la rotura del oleaje siguiendo la teoría de (Battjes, 1978 y Eldeberky, 1996).

3.1.2. Configuración de los dominios de simulación

Para la caracterización del oleaje en las cercanías de Twin Cayes se ha utilizado un diseño compuesto por 3 mallas anidadas (Belice1, Belice2 y Belice3) de resolución creciente (Figura 13). Este diseño permite una transición suave de la resolución de 0.25° de GOW2 a la resolución de 0.0025° de la malla de mayor detalle.

Las características de las 3 mallas son las siguientes. Belize1 es la malla más externa y cuenta con una resolución de 0.05° (~5.5km) en el área localizada entre 15.5°N y 19°N y entre 89°O y 86.75°O. Belice2 cuenta con una resolución de 0.01° (~1km) en el área localizada entre 16.4°N y 17.7°N y entre 88.6°O y 87.45°O. Belice3 es la malla más interna

y cuenta con una resolución de 0.0025° ($\sim 250\text{m}$) en el área localizada entre 16.79°N y 16.89°N y entre 88.16°O y 88.06°O .

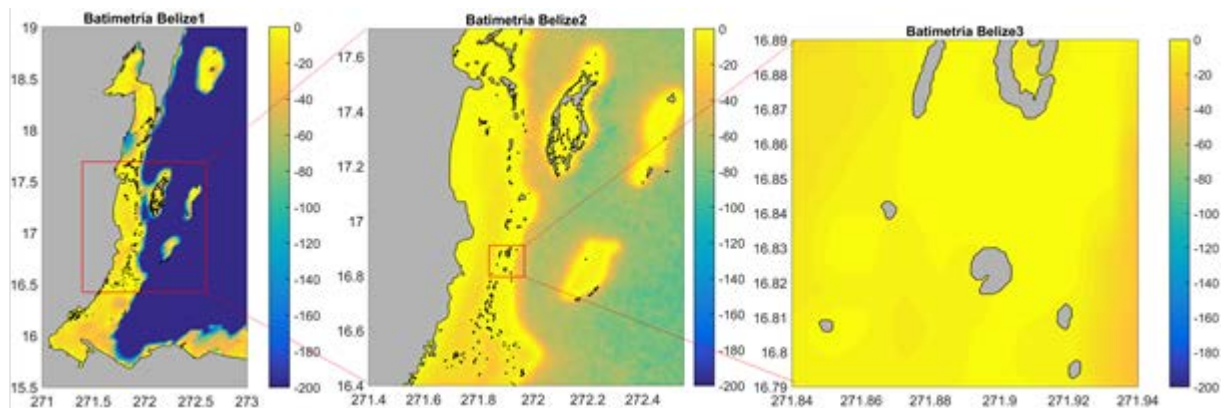


Figura 13. Mallas regionales de oleaje utilizadas en el proyecto de downscaling de oleaje

3.2. Reconstrucción local de los forzamientos del oleaje ante ciclones tropicales

Como se ha mencionado anteriormente, la base de datos de ciclones empleada sólo contiene información de la posición e intensidad de cada uno de los ciclones observados. Sin embargo, esta base de datos no ofrece información acerca de la estructura superficial del viento y presión atmosférica que, en última instancia, son los responsables de la generación de oleajes y niveles extremos. Por ello, un paso previo antes de la ejecución de los modelos hidrodinámicos y de oleaje, es la obtención de los campos de viento y presión que serán usados en las simulaciones.

3.2.1. Modelo paramétrico de viento y presión

En este trabajo se ha empleado el modelo de vientos simplificado de Emanuel y Rotunno (2011) y el modelo de Holland (1980) para la obtención de los campos de presión atmosférica al nivel del mar. Estos modelos han demostrado ser válidos para la estimación del storm surge y oleaje por medio de modelos numéricos, produciendo resultados muy satisfactorios (Lin and Chanvas, 2012).

La velocidad del viento, V , es determinada según la expresión:

$$V(r) = \frac{2r(R_m V_m + 0.5fR_m^2)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2}$$

donde r es el radio (distancia respecto al centro del ciclón), f el factor de Coriolis, R_m el radio de máximos vientos y V_m la velocidad del viento máximo. Como V_m en IBTraCS es estimada en periodos de 1 minuto, se usa un factor de corrección de 0.9 para estimar el viento máximo promediado en un periodo horario. La asimetría del campo de vientos es generada añadiendo un 60% de la velocidad de translación a la velocidad obtenida mediante el perfil de vientos.

La presión atmosférica al nivel del mar es estimada por medio del modelo paramétrico de Holland et al., 1980:

$$P(r) = (P_n - P_c) \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + P_c$$

donde P_c es la presión mínima en el centro del ciclón y P_n es la presión en la última isobara cerrada (i.e. la presión ambiental, generalmente 1013 milibares):

$$B = \frac{\rho e V_m^2}{(P_n - P_c)}$$

A modo de ejemplo se muestra, en la Figura 14, la velocidad del viento máxima producida por el huracán Iris (Cat. 4), ocurrido en Octubre del 2001.

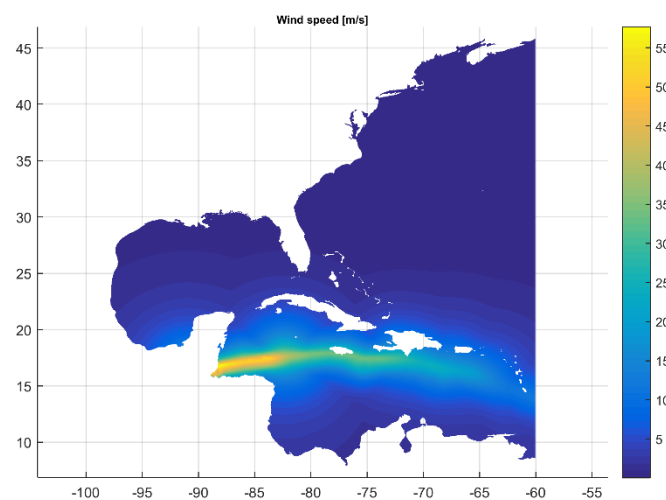


Figura 14. Viento máximo (en m/s) producido por el huracán Iris, 4 a 9 de Octubre del 2001.

3.2.2. Obtención del residuo meteorológico de nivel del mar (storm surge) asociado a ciclones tropicales

La determinación del storm surge o marea meteorológica asociada a ciclones tropicales en un área determinada es una tarea compleja que engloba el tratamiento estadístico y la generación de huracanes sintéticos que permitan salvar el inconveniente del limitado número de eventos existentes en el periodo observacional, y el empleo de modelos numéricos sofisticados que permitan resolver las dinámicas involucradas a la máxima resolución espacial posible. El gran coste computacional y de recursos humanos que supone la estimación probabilística del storm surge hace que esta tarea se encuentre fuera del alcance de este proyecto. Aun así, y con el objetivo de obtener sobre elevaciones del nivel del mar asociadas a ciclones tropicales de una forma realista, se ha optado por simular la hidrodinámica del Huracán Iris, uno de los peores huracanes que han golpeado Belice en el registro reciente.

Para ello, ha sido empleado el modelo acoplado de corrientes, nivel del mar y oleaje ADCIRC+SWAN, el cual ha sido ampliamente usado y validado a través del modelado de un gran número de eventos históricos (Dietrich et al., 2012). El modelo ADCIRC resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en vertical en su forma barotrópica (Luettich and Westerink, 2004). El nivel del mar es determinado mediante la ecuación de continuidad

de onda y la velocidad de la corriente mediante las ecuaciones de momento integradas en vertical.

La velocidad del viento, las corrientes y los niveles del mar son compartidos cada 10 minutos con el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore; Booij et al., 1999). SWAN calcula el tensor de radiación y su gradiente en la misma malla triangular que ADCIRC, compartiendo los gradientes del tensor de radiación con los que el modelo hidrodinámico determina la contribución del oleaje sobre las corrientes y el nivel del mar (wave set-up). SWAN discretiza el espectro direccional de oleaje en 40 frecuencias y 36 direcciones. Las simulaciones han sido obtenidas despreciando el oleaje existente antes de que el huracán entre en el dominio de cálculo, por lo que los valores de H_s obtenidos son exclusivamente generados por los vientos ciclónicos.

La Figura 15 muestra la malla no estructurada empleada en la simulación del Huracán Iris, esta abarca un dominio comprendido entre 98°E - 59.25°E y 7.3°N - 56°N , con resoluciones de entre 1 y 100 km y un número total de elementos de 58369, lo que permite simulaciones relativamente rápidas sin menoscabar la precisión de los resultados.

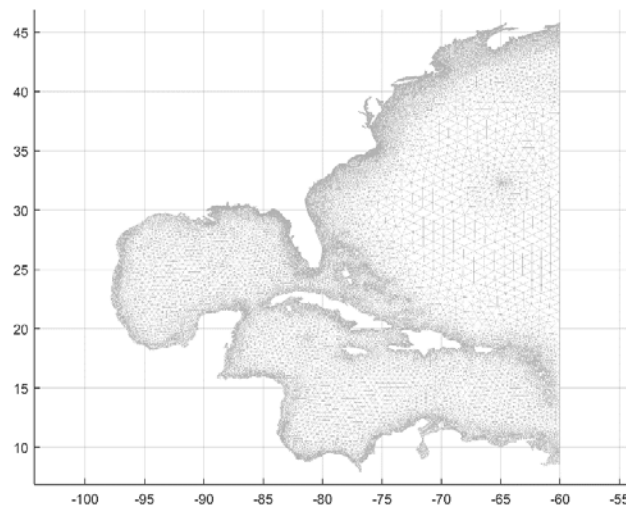


Figura 15. Malla empleada en la simulación ADCIRC+SWAN del Huracán Iris.

A pesar de que la malla empleada no tiene la resolución deseada en la zona de estudio, debido a su gran extensión, es capaz de reproducir los fenómenos de generación y propagación del oleaje de manera satisfactoria. Los resultados de altura de ola significativa máxima asociada al Huracán Iris se muestran en la Figura 16. Como puede observarse, debido a velocidades del viento sostenidas de aproximadamente 200 Km/h en la fase de mayor intensidad, Iris produjo olas del orden de 20 m en mar abierto, antes de tocar tierra.

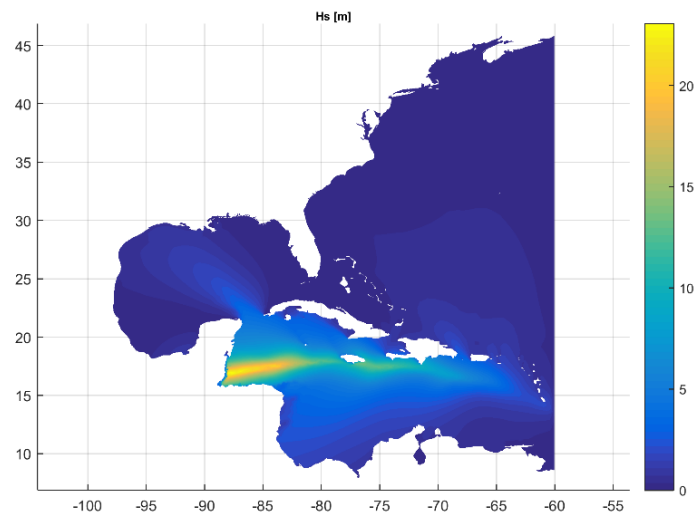


Figura 16. Hs máxima asociada al Huracán Iris.

En la Figura 17 se muestra el storm surge máximo producido por Iris. En esta figura se observa como el huracán no indujo sobreelevaciones superiores a 1 m en aguas profundas. Sin embargo, cuando el Huracán se aproxima a tierra, el storm surge asciende a más de 3.5 m en la zona de estudio. A pesar de que la malla empleada no consigue capturar los elementos geomorfológicos existentes (islas barreras, cayos, etc.), los resultados obtenidos ofrecen un rango realista sobre las sobreelevaciones que los ciclones tropicales pueden producir en la zona de estudio.

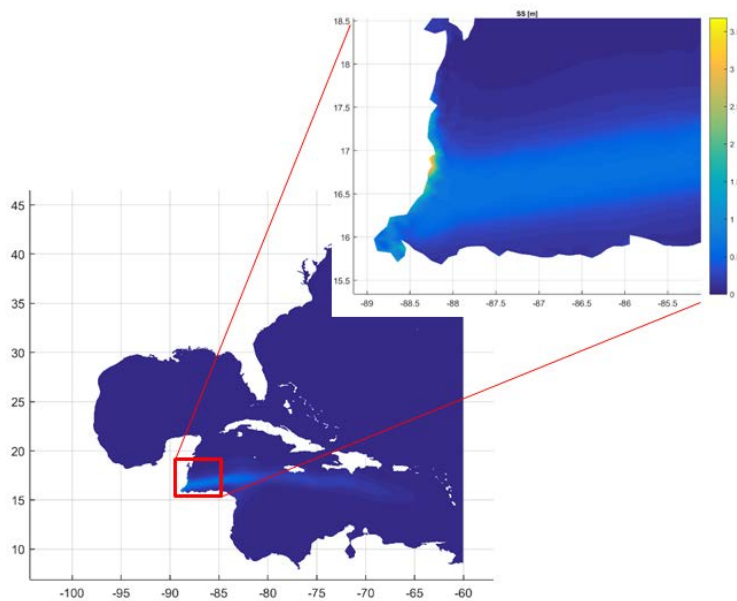


Figura 17. Storm surge máximo producido por el Huracán Iris.

4. Catálogo de datos de oleaje, nivel del mar y viento proporcionados.

Además del informe presente, el presente estudio tiene como objetivo elaborar una base de datos que describa las condiciones met-oceánicas históricas durante al menos 30 años en el entorno de Twin Cayes. A continuación se describen los datos proporcionados.

4.1. Viento

La figura 18 muestra las series de velocidad y dirección del viento a 10 m de altura del reanálisis CFSR durante el periodo 1979-2010. Los datos se han proporcionado en el fichero de texto regular *DatosViento.txt*. Los datos representan las condiciones medias del viento en una superficie marina de extensión aproximada de 32km. Es por ello que las características del viento en una localización más próxima a costa deben resultar de menor magnitud. Por otro lado, las características del viento en una situación concreta de la costa de Twyn Cayes también podría presentar diferente comportamiento debido a la presencia de elementos locales (ej. efectos de sombra/aceleración producidos por la vegetación de manglares/canales internos de la isla).

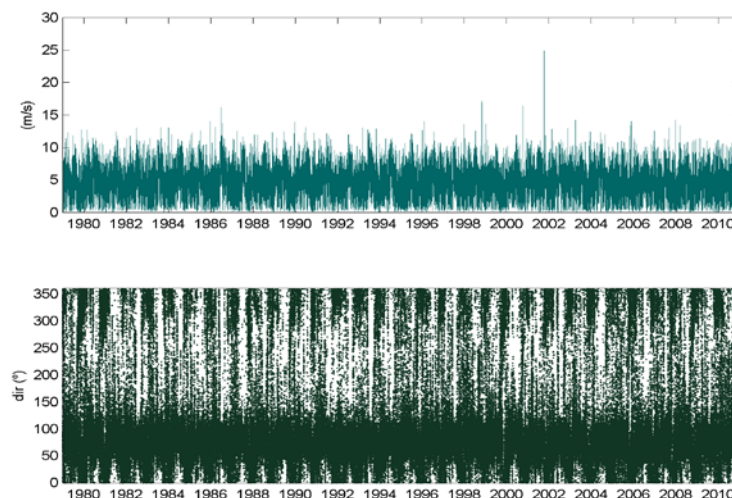


Figura 18. Series históricas de viento en superficie en el área de estudio.

4.2. Componentes de Marea astronómica y residuo meteorológico del Nivel del mar.

La figura 19 muestra las series de marea astronómica y marea meteorológica horarias en el periodo 1948-2008. Los datos se han proporcionado en el fichero de texto regular *DatosNivelMar.txt*. Se puede observar que los valores de marea meteorológica son generalmente pequeños, aunque los valores más extremos están claramente subestimados ya que la base de datos GOS tiene una resolución demasiado grosera como para modelar correctamente la marea meteorológica producida por ciclones tropicales. La carrera de marea astronómica es de unos 40 cm.

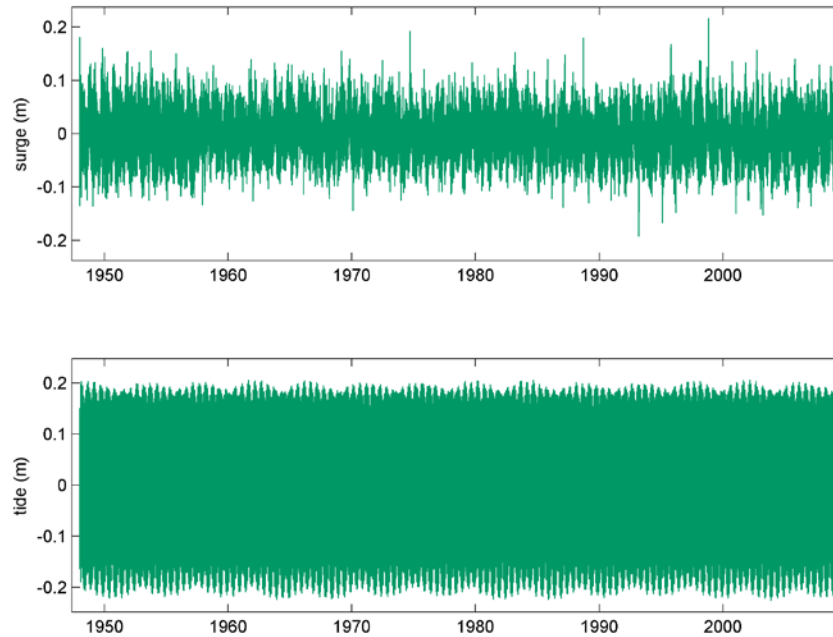


Figura 19. Series de meteorológica (GOS) y marea astronómica (GOT) en el nodo más próximo a Twin Cayes.

4.3. Oleaje

Para la caracterización del oleaje en Twin Cayes se han extraído 5 series temporales horarias de 1985 a 2016 en las localizaciones indicadas en la Tabla 1 y la figura 20. Una serie está situada antes del arrecife para representar las condiciones del oleaje en aguas profundas. Las otras 4 series están situadas alrededor de Twin Cayes (norte, sur, este y oeste) para representar las condiciones en aguas someras en las cercanías de Twin cayes. Los datos se han proporcionado en los ficheros de texto regular *DatosOleaje1Exterior.txt*, *DatosOleaje2InteriorEste.txt*, *DatosOleaje3InteriorOeste.txt*, *DatosOleaje4InteriorNorte.txt* y *DatosOleaje5InteriorSur.txt*.

Identificador	Latitud	Longitud
Punto 1 (exterior)	16.83°	271.95°
Punto 2 (Interior Este)	16.83°	271.9075°
Punto 3 (Interior Oeste)	16.83°	271.8875°
Punto 4 (Interior Norte)	16.84°	271.8975°
Punto 5 (Interior Sur)	16.82°	271.8975°

Tabla 1. Identificadores y coordenadas de los nodos de oleaje.

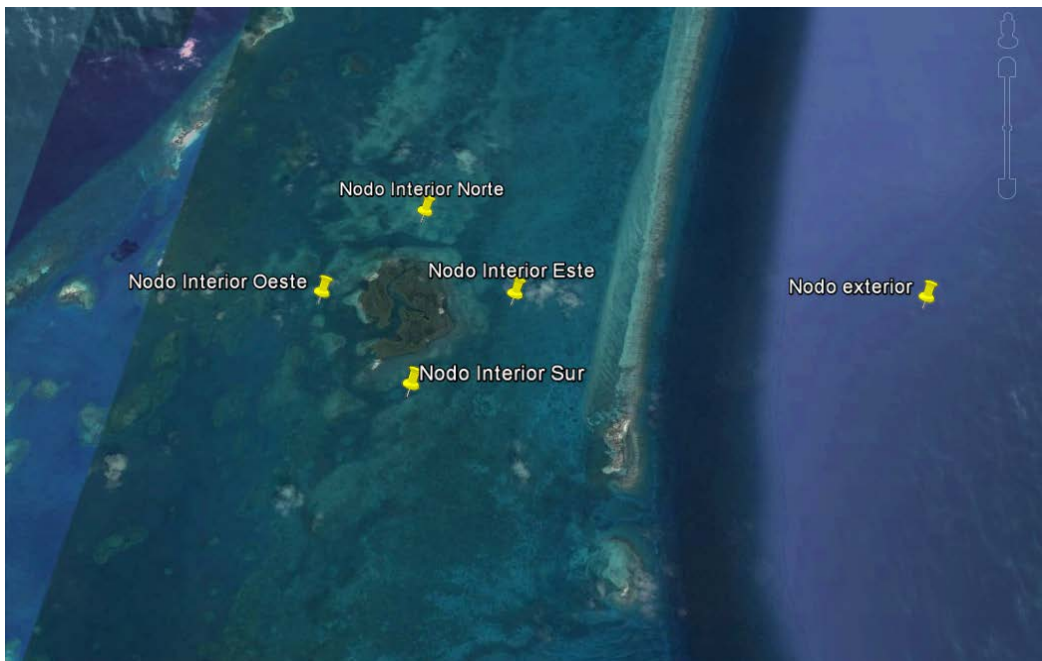


Figura 20. Identificadores y coordenadas de los nodos de oleaje.

Las figuras 21 y 22 muestran las series temporales de altura de ola significativa periodo y dirección para las localizaciones exterior y sur respectivamente.

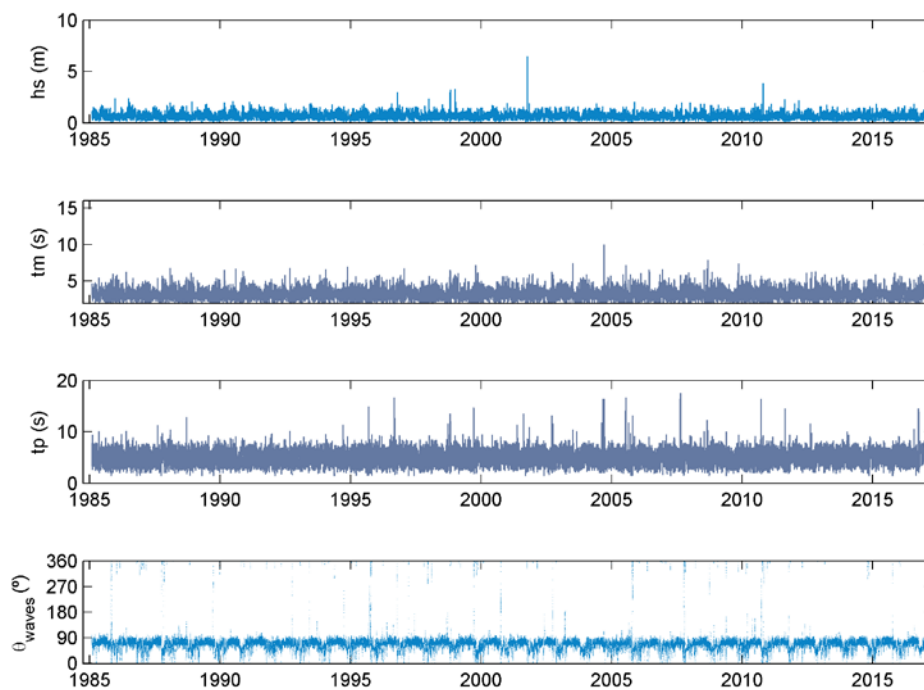


Figura 21. Series de parámetros de oleaje para la localización exterior.

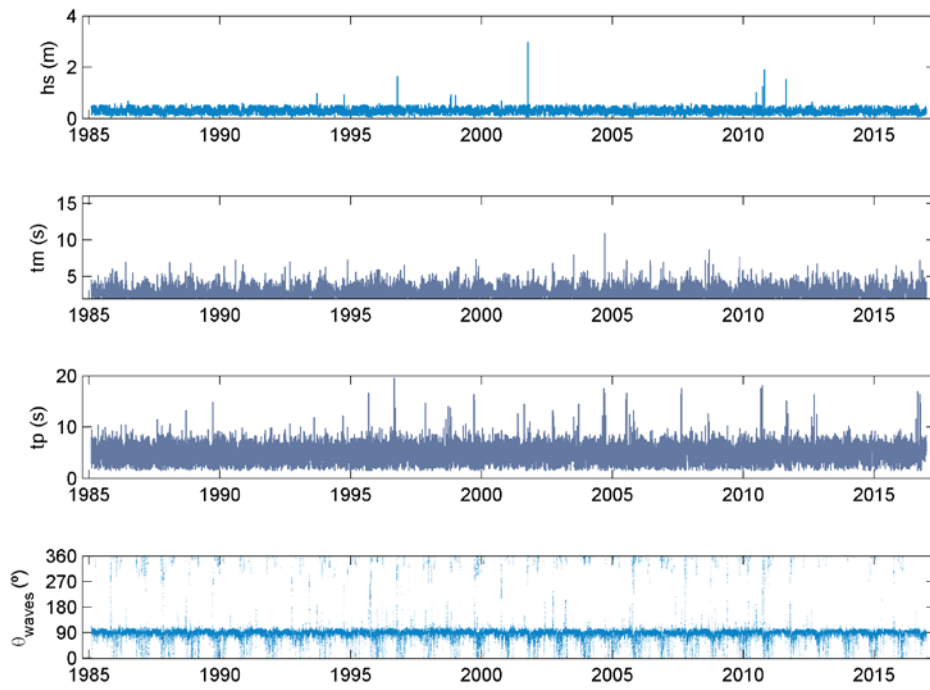


Figura 22. Series de parámetros de oleaje para la localización interior sur.

5. Caracterización del clima marítimo del oleaje en la zona objetivo.

A continuación se muestran resultados de caracterización del clima del oleaje para la localización exterior al arrecife y la localización al sur de Twin Cayes que es la más próxima al emplazamiento de la estación de campo de los guardas. La caracterización de las condiciones climáticas consiste en un análisis de la distribución del oleaje por direcciones, la distribución conjunta de altura de ola significativa y periodo medio, la caracterización probabilística de las condiciones medias y por último el análisis de eventos extremos y sus valores asociados a periodos de retorno.

5.1. Distribuciones bivariadas Altura de oleaje - Dirección / Periodo.

Las rosas de oleaje para las dos localizaciones seleccionadas se muestran en la figura 23. El nodo interior muestra un oleaje de menor intensidad y con una distribución de dirección de oleaje con olas dominantes del E.

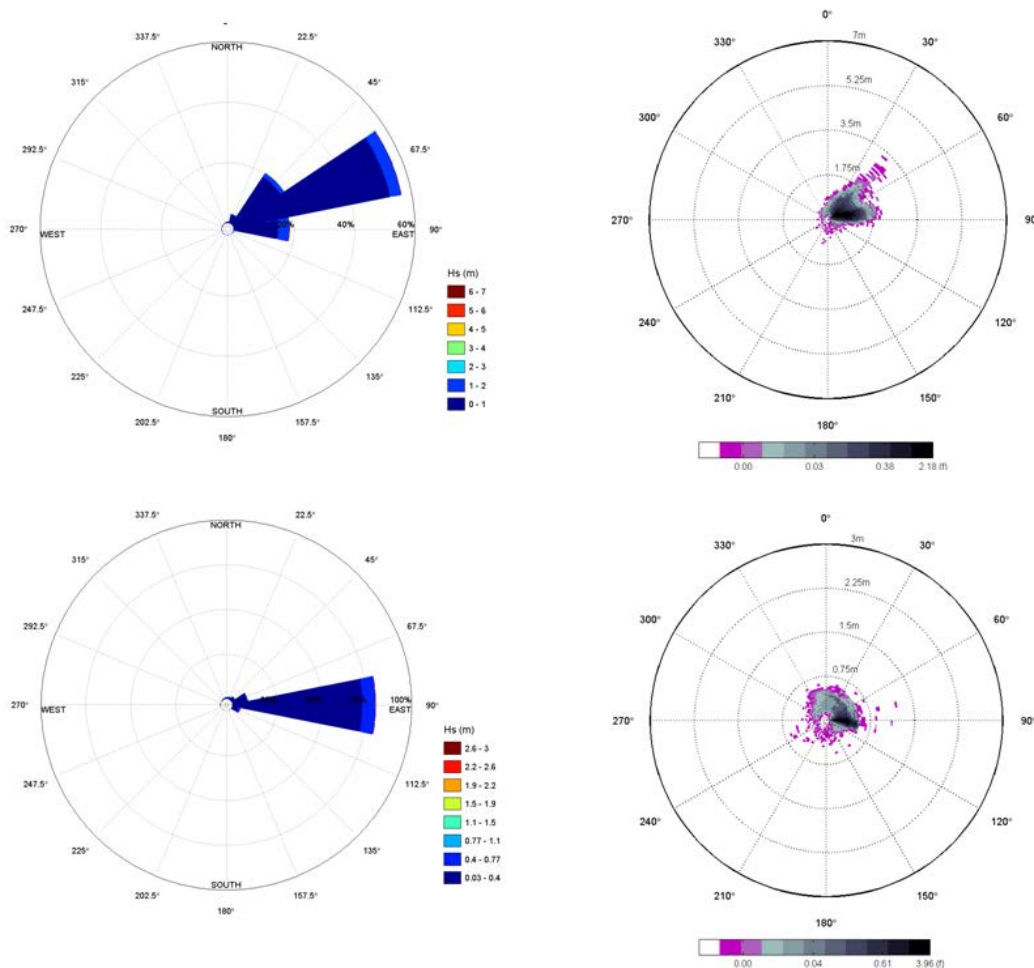


Figura 23. Rosas de oleaje para la localización exterior (arriba) y la localización interior (abajo). Las rosas de la izquierda muestran la magnitud de la altura de ola significativa en el radio. Las rosas de la derecha muestran la probabilidad de ocurrencia de la altura de ola significativa.

La figura 24 muestra la distribución conjunta de altura de ola significativa - período medio. La diferencia entre ambas distribuciones indica la rotura de los oleajes más energéticos por reducción de la profundidad.

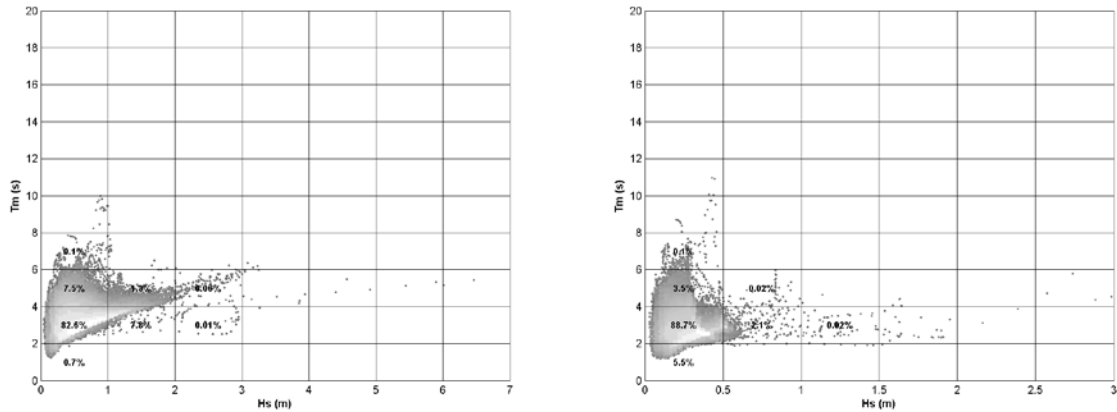


Figura 24. Distribución conjunta de Hs - Tm para la localización exterior (izquierda) y la localización interior (derecha).

5.2. Régimen medio de la altura y periodo del oleaje.

Las figuras 25 y 26 muestran la distribución a largo plazo para la altura de ola y el período significantes, respectivamente.

La distribución marginal de altura de ola significativa se modela con la distribución lognormal y el periodo medio con la distribución normal.

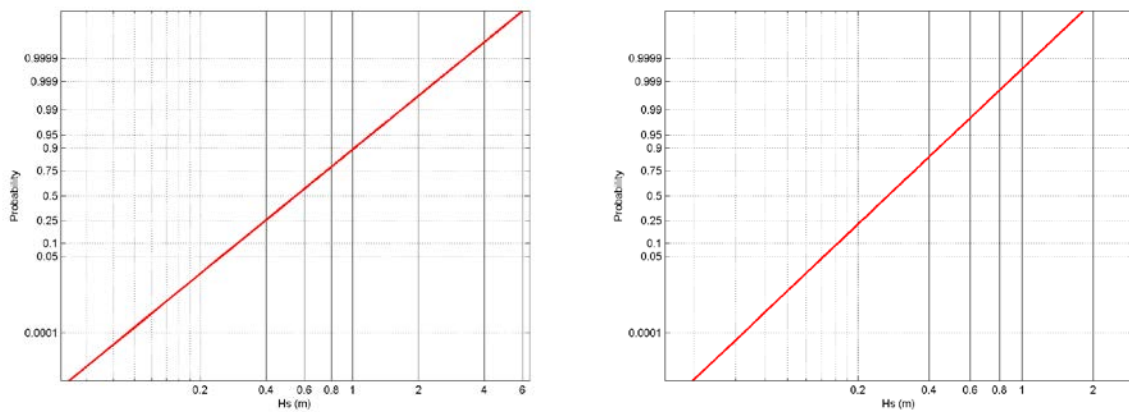


Figura 25. Régimen medio de Hs para la localización exterior (izquierda) y la localización interior (derecha).

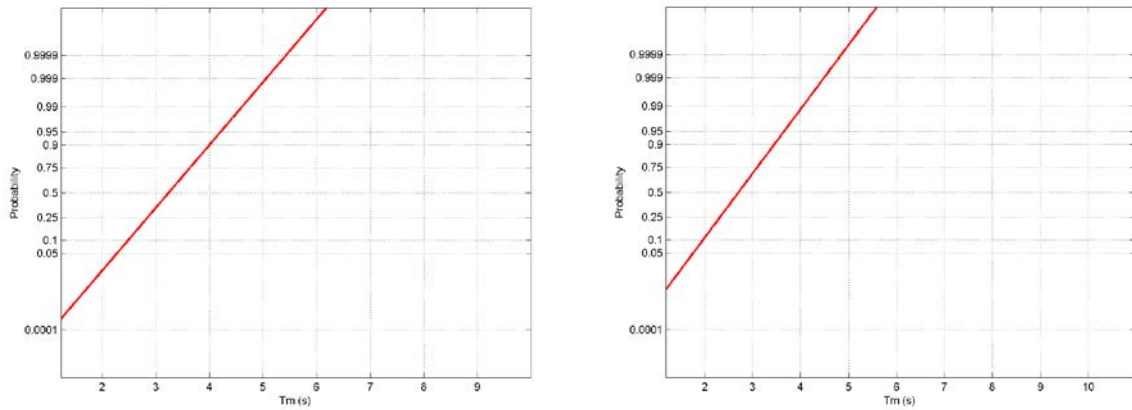


Figura 26. Régimen medio de T_m para la localización exterior (izquierda) y la localización interior (derecha).

5.3. Régimen extremal.

La figura 27 muestra el gráfico de periodos de retorno de altura de ola significativa en el lugar de estudio. Los valores asociados a distintos periodos de retorno se han estimado a partir de la selección de los máximos en las serie de altura de ola significativa generadas para el punto 1 y 5. Posteriormente se ha ajustado a la familia de distribuciones generalizada de extremos (GEV) por máxima verosimilitud. Para la ubicación de estudio, este resultado está muy condicionado por la existencia de eventos asociados a ciclones tropicales.

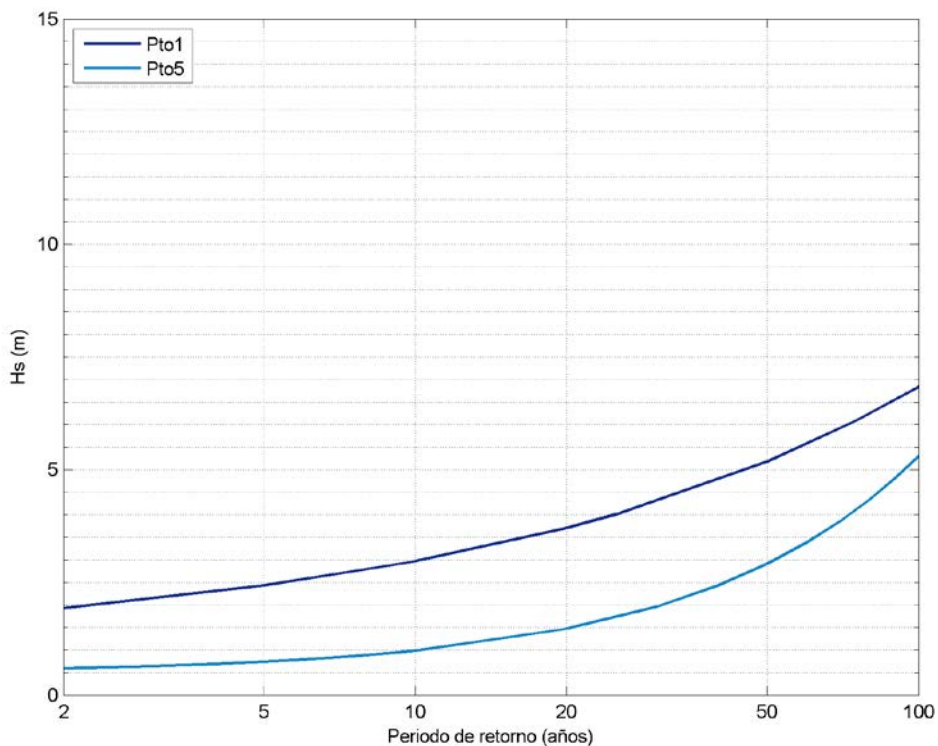


Figura 27. Gráfico de periodo de retorno de la altura de ola significativa.

5.4. Efectos del cambio climático en el oleaje

Se han analizado 2 escenarios de cambio climático o RCPs (Representative Concentration Pathways), el RCP4.5, que representa un incremento moderado de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el RCP8.5, que representa un incremento elevado de las emisiones. Se han realizado simulaciones numéricas para ambos escenarios de subida del nivel del mar, considerando tanto las condiciones climáticas medias como los ciclones tropicales.

En el caso del escenario RCP4.5 se ha considerado una subida de nivel del mar de 49.2cm y en el caso del escenario RCP8.5 se ha considerado un aumento de 65.3 cm. Estos aumentos de nivel del mar producen generalmente aumentos en las alturas de ola debido a una menor fricción por fondo y a un límite superior para la rotura del oleaje. No obstante, pueden producirse disminuciones locales debido a cambios en la dirección de propagación del oleaje que modifican las zonas de concentración del oleaje.

Se han analizado por separado los efectos en el clima medio y en los oleajes producidos por ciclones tropicales. Los cambios producidos en el clima medio en los cinco nodos de estudio se describen en la tabla 2. Puede observarse que los incrementos en la altura de ola significativa media son mucho más notables en los nodos interiores, dado que al tratarse de zonas de profundidades muy pequeñas la influencia relativa de una subida del nivel del mar es mayor.

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Cambio total (cm)	Cambio relativo (%)	Cambio total (cm)	Cambio relativo (%)
Punto 1 (exterior)	<0.1	0.4	<0.1	0.5
Punto 2 (Interior Este)	1.0	2.6	1.3	3.7
Punto 3 (Interior Oeste)	1.2	4.8	1.6	7.1
Punto 4 (Interior Norte)	0.8	2.7	1.1	3.8
Punto 5 (Interior Sur)	2.0	7.0	2.7	10.0

Tabla 2. Cambios en la altura de ola significativa media por aumento del nivel del mar para los 5 nodos analizados.

Los cambios producidos en las alturas de ola significativa máximas producidas por ciclones tropicales históricos se describen en la tabla 3. Se observa que los incrementos absolutos en las alturas de ola significativa son superiores a los observados para clima medio. Los cambios relativos por su parte son algo superiores al 5% para el RCP4.5 y ligeramente inferiores al 10% para el RCP 8.5.

	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Cambio máximo (cm)	Cambio relativo (%)	Cambio máximo (cm)	Cambio relativo (%)
Punto 1 (exterior)	4.3	1.9	5.7	2.5
Punto 2 (Interior Este)	9.1	6.2	12.1	8.3
Punto 3 (Interior Oeste)	7.7	4.8	10.2	6.3
Punto 4 (Interior Norte)	11.5	7.0	15.3	9.2
Punto 5 (Interior Sur)	9.9	6.1	13.2	8.0

Tabla 3. Cambios máximos por aumento del nivel del mar en las alturas de ola significativa generadas por ciclones tropicales para los 5 nodos analizados.

La figura 28 muestra un ejemplo de la distribución espacial de los cambios en la altura de ola significativa máxima generada por ciclones tropicales para un escenario de subida del nivel del mar. Se puede observar que, para el huracán Iris y el escenario RCP8.5, los incrementos de altura de ola significativa más notables se producen en zonas de sombra y zonas someras.

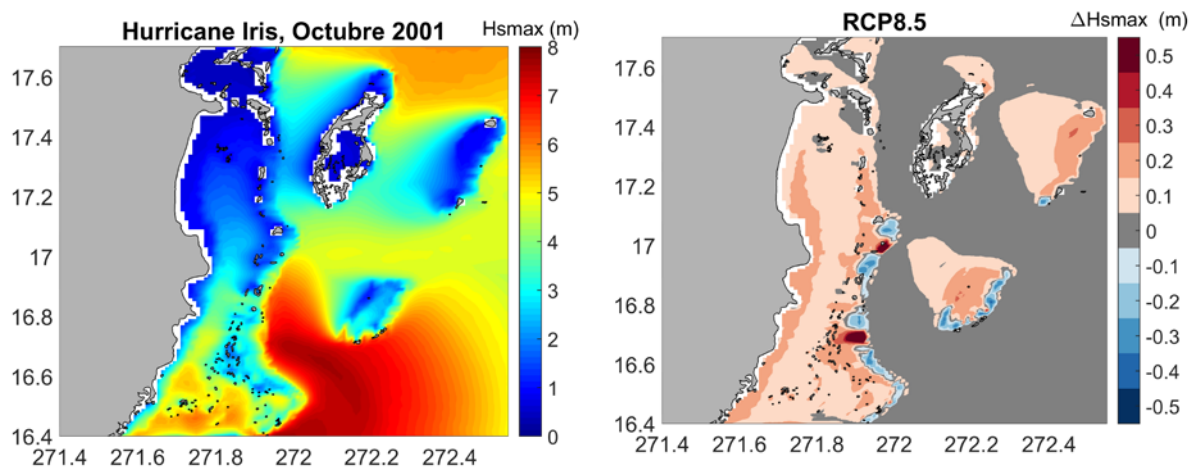


Figura 28. Alturas de ola significativa máximas producidas por el huracán Iris en las cercanías de Twin Cayes (izquierda) y diferencias ante el aumento de nivel del mar considerado para el escenario RCP8.5 (derecha).

Referencias

- Ardhuin F, O'Reilly WC, Herbers THC, Jessen PF (2003). Swell transformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional broadening. *Journal of Physical Oceanography*, 33(9), 1921-1939, doi: 10.1175/1520-0485(2003)033<1921:STATCS>2.0.CO;2
- Ardhuin F, Rogers E, Babanin AV, Filipot J-F, Magne R, Roland, A, Van der Westhuysen A, Queffelec P, Lefevre J-M, Aouf L, Collard F (2010). Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), 1917–1941, doi:10.1175/2010JPO4324.1
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Coastal Engineering 1978* (pp. 569-587).
- Booij, N., Ris, R., Holthuijsen, L., (1999). A third-generation wave model for coastal regions, part I: model description and validation, *Journal of Geophysical Research* 104 (C4), pp. 7649-7666.
- Cavaleri, L., & Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 10961-10973.
- Church, J. A., White, N. J., Coleman, R., Lambeck, K., & Mitrovica, J. X. (2004). Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period. *Journal of climate*, 17(13), 2609-2625.
- Cid A., S. Castanedo, A. J. Abascal, M. Menéndez, R. Medina (2014). A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-013-2041-0
- Collins, J. I. (1972). Prediction of shallow-water spectra. *Journal of Geophysical Research*, 77(15), 2693-2707.
- Dietrich, J. C., Tanaka, S., Westerink, J. J., Dawson, C. N., Luettich Jr., R. A., Zijlema, M., Holthuijsen, L. H., Smith, J. M., Westerink, L. G., and Westerink, H. J. (2012). Performance of the Unstructured-Mesh, SWAN+ADCIRC Model in Computing Hurricane Waves and Surge, *J. Sci. Comput.*, 52, 468-497.
- Egbert, G. D., Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [http://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Egbert, G. D., Bennett, A. F., & Foreman, M. G. G. (1994). TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12), 24821. <http://doi.org/10.1029/94JC01894>
- Eldeberky, Y., & Battjes, J. A. (1996). Spectral modeling of wave breaking: application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C1), 1253-1264.
- Emanuel, K. and Rotunno, R. (2011). Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure, *J. Atmos. Sci.*, 68, 2236–2249
- Hasselmann K, Barnett TP, Bouws E, Carlson H, Cartwright DE, Enke K, Ewing JA, Gienapp H, Hasselmann DE, Kruseman P, Meerburg A, Mueller P, Olbers DJ, Richter K, Sell W, Walden H (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North SeaWave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*(8), 12, 95 pp.

- Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, 6(1-2), 107-127.
- Hasselmann S, Hasselmann K, Allender J, Barnett T (1985). Computation and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models, *Journal of Physical Oceanography*, doi: 10.1175/1520-0485(1985)015<1378:CAPOTN>2.0.CO;2
- Holland, G. J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, *Mon. Weather. Rev.*, 108, 1212–1218.
- Janssen, P. A. E. M. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1631–1642.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Knapp, K.R., M.C. Kruk, D.H. Levinson, H.J. Diamond, and C.J. Neumann (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 363–376, doi: 10.1175/2009BAMS2755.1.
- Lin, N. and Chavas, D. (2012). On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling, *J. Geophys. Res.*, 117, D09120, doi:10.1029/2011JD017126.
- Losada, I. J., Reguero, B. G., Méndez, F. J., Castanedo, S., Abascal, A. J., & Mínguez, R. (2013). Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*, 104, 34-50.
- Luetlich, R. A. and Westerink, J. J. (2004) Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44.XX, University of North Carolina, 74 pp.
- Madsen, O. S., Y.-K. Poon and H. C. Graber (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: theory, *Proc. 21st Int. Conf. Coastal Engineering (Malaga)*, NewYork, ASCE, pp. 492–504
- Miles, J. W. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(02), 185-204.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929–937. [http://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](http://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Perez J, Menendez M, Losada IJ (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering* 124C (2017) pp. 1-11, doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.03.005
- Phillips, O. M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech*, 2(5), 417-445.
- Rasclé N, Ardhuin F (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Modelling*, 70:174-188, doi: 10.1016/j.ocemod.2012.12.001
- Saha S, et al. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1057, doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Saha S, et al. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185–2208, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3090–. <http://doi.org/10.1029/2001JC001047>

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347–404. <http://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>

Smith, W.H.F., Sandwell, D.T. (1997). Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1957–1962.

Stopa JE, Ardhuin F, Babanin A, Zieger S (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models. *Ocean Modelling*, 103, 2-17, doi: 10.1016/j.ocemod.2015.09.003

Tolman HL (2003). Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models. *Ocean Modelling*, 5 (3), 219–231, doi: 10.1016/S1463-5003(02)00040-9