Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE Y DE LA ONDA INFRAGRAVITATORIA EN EL ATOLÓN DE WAKE (E.E.U.U)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Trabajo realizado por:

Mar Vayreda

Dirigido:

Fernando Méndez Incera

Alba Ricondo Cueva

Beatriz Pérez Díaz

Titulación:

Máster Universitario en Costas y Puertos

Santander, septiembre de 2022

Resumen

Caracterización del oleaje y de la onda infragravitatoria en el Atolón de Wake (E.E.U.U.)

Mar Vayreda

Directores: Fernando J. Méndez Incera, Alba Ricondo Cueva y Beatriz Pérez Díaz

Septiembre 2022

Las pequeñas islas y atolones del Océano Pacífico que suelen tener menos de 5 metros de cota se ven amenazadas por el cambio climático. Se trata de islas muy susceptibles a inundaciones y eventos extremos, por lo que es de vital importancia disponer de un hindcast del oleaje que permita estudiarlas. En este trabajo se utiliza una metodología de downscaling híbrida llamada BINWAVES específica para localizaciones donde los oleajes se acercan multidireccionalmente, con el objetivo de obtener el clima marítimo en la costa del Atolón de Wake a partir del oleaje espectral en aguas indefinidas. La metodología está basada en la teoría lineal donde cuando la ola se propaga en aguas profundas, las interacciones no lineales son despreciables. Se compone del análisis de componentes principales (PCA) del hindcast utilizado y el método de clasificación KMEANS, ya que es necesario emplear herramientas estadísticas para reducir el coste computacional de propagar toda la serie histórica. También se crea una librería de casos sintética de casos propagados con el modelo de tercera generación SWAN, con la que se ejecutan 696 casos monocromáticos (número obtenido de la discretización en frecuencias y direcciones del espectro utilizado). Combinando los casos seleccionados y los coeficientes de propagación obtenidos a partir de la librería, se procede a la reconstrucción del hindcast.

Las estaciones de oleaje espectral usadas en los datos de entrada del modelo SWAN provienen del hindcast de CSIRO de datos desde el 1979 al 2022, en que se ha usado el modelo WaveWatchIII. La malla global tiene una resolución de 0.4° con mallas anidadas bidireccionales.

La batimetría utilizada se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 10 m que rodea la isla Wake en el Océano Pacífico central. Está referenciada al MHW (Mean High Water) y se compiló a partir de varias fuentes de datos, entre ellas: los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI) de la NOAA, y varias agencias gubernamentales.

La segunda parte del trabajo se dedica a analizar el comportamiento de las ondas infragravitatorias en el interior del atolón, ya que estas juegan un papel importante en las inundaciones. Se ha creado una malla circular de resolución variable con el mallador DELFt3D - GUI (del código libre de Deltares) con la que se han ejecutado cinco casos con el modelo hidrodinámico XBeach. Mediante un PCA, se han analizado los principales modos de oscilación del atolón y los diferentes espectros de Jonswap de algunos puntos en el interior y exterior del atolón. Por último, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de la rugosidad del suelo para uno de los casos ejecutados.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de los resultados son:

- El clima marítimo cercano a Wake no suele presentar una altura de ola de más de 2.5m y el oleaje se ve generalmente influenciado por los vientos alisios del este y en invierno por los ciclones extratropicales del norte.
- La onda infragravitatoria suele amplificar los valores de superficie libre dentro del atolón, y en algunos casos se produce resonancia en las bahías del interior del atolón.
- Hay una oscilación de la onda larga longitudinalmente a lo largo de la costa, entre las paredes del arrecife de coral y la costa de Wake.
- La parte más vulnerable de la isla se encuentra en el noreste exterior.
- El caso sin rugosidad del suelo provoca un aumento de la superficie libre en el interior del atolón y de variación vertical en los puntos exteriores del atolón.

Palabras clave: Hindcast, Downscaling híbrido, Setup, Clima marítimo, Espectro, Ondas Infragravitatorias, Resonancia

Abstract

Characterization of wave climate and infragravity waves at Wake Atoll
Mar Vayreda
Directors: Fernando J. Méndez Incera, Alba Ricondo Cueva y Beatriz Pérez Díaz
September 2022

Small islands and atolls in the Pacific Ocean that typically have less than 5 meters of depth are at risk due to climate change. We're talking about islands that are extremely vulnerable to flooding and extreme weather, so having access to a hindcast wave climate that makes it possible to study them is crucial. In this study, a hybrid downscaling methodology called BINWAVES is used specifically for locations where waves from many directions are approaching. The goal is to determine the wave climate along the Wake Atoll coast using the spectral wave information in deep waters. The methodology is based on the lineal theory, which states that non-linear interactions become unnoticeable as the wave spreads into deep waters. It is composed of a principal component analysis (PCA) of the used hindcast and the KMEANS classification method since statistical tools must be used to lower the computational cost of propagating the entire historical series. With the third-generation SWAN model, a library of simulated propagated cases is also created, and 696 monochromatic cases (the number obtained from the discretization in frequencies and directions of the spectrum used) were executed with this library. To reconstruct the hindcast, it is necessary to combine the chosen cases with the propagation coefficients obtained from the library.

The spectral wave climate stations used in the input data for the SWAN model come from the CSIRO hindcast, which contains data from 1979 to 2022 and uses the WaveWatchIII model. The global mesh has a resolution of 0.4%, with bidirectional nested meshes.

The used bathymetry was generated from a central Pacific Ocean digital elevation model (DEM) that surrounds the island of Wake. It has a resolution of 10 meters. It is referred to the MHW (Mean High Water) and was compiled using a number of data sources, including the NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI) and several government agencies.

The second phase of the research focuses on analyzing the behavior of infragravity waves on the atoll as they play a significant role in flooding. It has been created a circular mesh with varying resolution using DELFt3D-GUI (from the free Deltares open source) and it has been used to run five cases using the XBeach hydrodynamic model. The main atoll oscillation modes and several Jonswap spectrums of some points both inside and outside the atoll have been examined using a PCA. Finally, a sensitive analysis of the rugosity of the soil has been carried out for one of the executed cases.

The main conclusions that can be derived from the results are:

- The local wave climate around Wake rarely has an altitude of more than 2.5 meters, and the waves directions are typically influenced by easterly winds and, during the winter, northerly extratropical cyclones.
- The infragravity waves tend to increase the values of free surface inside the atoll area and, in some cases, it causes resonance in the atoll's bays.
- Between the coral reef and Wake's coast, there is a longitudinal onshore long wave oscillation.
- The island's northwest exterior is where it is most vulnerable.
- The non-friction case results in an increase in free surface in the island's center and increase in resonance at the island's outer points.

Key words: Hindcast, Hybrid downscaling, Setup, Wave climate, Spectrum, Infragravity waves, Resonance

Índice

Tabla de Ilustraciones 7
Tabla de ecuaciones 8
Tabla de abreviaturas 8
1. Introducción 9
1.1. Motivación del trabajo 9
1.2. Objetivos 10
1.3. Descripción de la zona de estudio 10
1.3.1. Dinámicas oceanográficas 12
2. Datos 13
2.1. Datos espectrales 13
2.2. Análisis histórico de las estaciones 14
2.3. Comparación con particiones 16
2.4. Análisis armónico 17
2.5. Batimetría 18
3. Metodología 19
3.1. PCA (Principal Component Analysis) 20
3.2. KMEANS 21
3.3. BINWAVES 21
3.4. Reconstrucción histórica 24
3.5. Datos de entrada para XBeach 24
3.6. Creación de la malla con DELFT3D-GUI 26
3.7. Elección de los 5 casos 27
3.8. PCA del quinto caso 27
3.9. Análisis de sensibilidad de la rugosidad para el tercer caso 28
4. Resultados I – Caracterización del clima marítimo 28
5. Resultados II – Análisis de la onda infragravitatoria 33
5.1. Casos propagados con XBeach 33
5.1.1. PCA Caso 5 35
5.2. Análisis de sensibilidad de la rugosidad 38
6. Conclusiones 39
6.1. Limitaciones del trabajo 40
6.2. Futuras líneas de investigación 41
7. Bibliografía 41
8. Anexo I 44

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: Isla de Wake con islas e infraestructuras señaladas. 11
Ilustración 2: Batimetría de la isla de Wake. 11
Ilustración 3: Daños causados en la iglesia por el tifón Ioke en 2006. 12
Ilustración 4: Red de estaciones del CSIRO. En la derecha la dosestaciones escogidas cercanas a Wake. 13
Ilustración 5: Obstrucción del WW3 en la isla de Wake. 14
Ilustración 6: Estación espectral Oeste clasificada en estaciones. 15
Ilustración 7: Estación espectral Este clasificada en estaciones. 15
Ilustración 8: Parámetros agregados de las estaciones este y oeste. 16
Ilustración 9: Comparación de las particiones cercanas con las estaciones. 17
Ilustración 10: El primer gráfico corresponde a los datos del mareógrafo habiendo quitado la tendencia del nivel del mar, el segundo a la marea astronómica, y el tercero al residuo de la marea. 18
Ilustración 11: Validación del mareógrafo con el tifón Ioke. 18
Ilustración 12: Batimetría de detalle de la isla de Wake con ortofoto superpuesta. 19
Ilustración 13: Esquema de la metodología hasta la caracterización del oleaje en la costa de Wake. 20
Ilustración 14: Librería de casos. 21
Ilustración 15: Ejemplo de transformación del coeficiente de propagación. 22
Ilustración 16: Matriz de los 696 casos propagados con SWAN. 23
Ilustración 17: Ejemplo 1 de cálculo del kp. 23
Ilustración 18: Ejemplo 2 de cálculo del kp. 24
Ilustración 19: Posición de los sensores 25
Ilustración 20: Malla para XBeach. En el acercamiento superior se observa la zona de transición suavizada. En el acercamiento inferior se muestra el círculo interior con la mayor resolución. 26
Ilustración 21: En la figura de la derecha se ve la isla de Wake según el tipo de suelo en polígonos. En la parte izquierda, ya cada tipo de suelo ha sido cambiado al coeficiente de fricción de Manning e interpolado a la malla. 27
Ilustración 22: Altura de ola media en el percentil 90. 29
Ilustración 23: Altura de ola media en el percentil 50. 29
Ilustración 24: Altura de ola media en el percentil 99. 29
Ilustración 25: Periodo pico en el percentil 50. 30
Ilustración 26: Periodo medio en el percentil 50. 30
Ilustración 27: Dirección media de los picos. 30
Ilustración 28: Altura de ola clasificada según estaciones: DCF (invierno), MAM (primavera), JJA (agosto) y SON (otoño). 31
Ilustración 29: Periodo de pico clasificado según estaciones: DCF (invierno), MAM (primavera), JJA (agosto) y SON (otoño). 31
Ilustración 30: parámetros agregados de un punto propagado cercano a Wake. 32
Ilustración 31: Avance del modelo para la altura de ola. 33
Ilustración 32: Propagaciones con Xbeach para el caso 5. Arriba a la izquierda, la media de la superficie libre; arriba a la derecha, la altura de ola media; abajo a la izquierda, la variación de superficie libre con una escala para que se vea el exterior del atolón: abajo a la derecha, la variacón de la superficie libre con una escala para que se vea el interior del atolón. 34

Ilustración 33: Superficie libre de los sensores para el caso 4. 35
Ilustración 34: Análisis de PCA para el caso extremo. 36
Ilustración 35: Espectros del oleaje asociados a los puntos exteriores. 37
Ilustración 36: Espectros del oleaje asociado a los puntos interiores. 37
Ilustración 37: Comparanción de los puntos elegidos con fricció y sin fricción. 38
Ilustración 38: Acercamiento de la costa sudoeste de Wake. En la parte superior el caso 3 sin rugosidad. En la parte inferior el caso 3 con rugosidad. 39
Ilustración 39: Propagaciones con Xbeach para el caso 1. 44
Ilustración 40: Superficie libre de los sensores para el caso 1. 45
Ilustración 41: Acercamiento de la varianza de superficie libre para el caso 1. El círculo rosa corresponde a la zona de la pequeña cuenca donde se encuentra el punto 18. 45
Ilustración 42: Propagaciones con Xbeach para el caso 2. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre. 46
Ilustración 43: Superficie libre de los sensores para el caso 2. 46
Ilustración 44: Propagaciones con Xbeach para el caso 3. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre. 47
Ilustración 45: Superficie libre de los sensores para el caso 3. 47
Ilustración 46: Propagaciones con Xbeach para el caso 4. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre. 48
Ilustración 47: Superficie libre de los sensores para el caso 4. 48

Tabla de ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo de los parámetros agregados de las particiones cercanas a Wake 16
Ecuación 2: Obtención deel coeficiente de propagación (kp) 22
Ecuación 3: Cálculo de los 2000 grupos propagados según el kp 22
Ecuación 4: Definición del espectro JONSWAP 28

Tabla de abreviaturas

Abreviatura	*Significado*
Hs	Altura de ola significante
Tp	Periodo de pico
Dir	Dirección del oleaje media de los picos

1. Introducción

1.1. Motivación del trabajo

Los atolones son plataformas carbonatadas elevadas, creadas a partir de episodios sucesivos de acumulación vertical de arrecifes de coral, que se encuentran en las regiones tropicales de los océanos del mundo. Generalmente se caracterizan por una pendiente muy pronunciada, con profundidades que disminuyen rápidamente de kilómetros a unos pocos metros en la cresta del arrecife del atolón y una laguna central relativamente poco profunda. La superficie emergida de estos atolones presenta normalmente cotas muy bajas, con media de elevaciones por debajo de los 2 o 3 m sobre el nivel del mar, y están compuestas principalmente por una mezcla de sedimentos carbonatados no consolidados, sedimentos carbonatados débilmente litificados (roca de playa) y material emergente de paleoarrecifes. Estos accidentes geográficos son el hogar de decenas de miles de personas, además de docenas de especies endémicas, muchas de las cuales están amenazadas o en peligro de extinción. (Reynolds et al., 2015). Las formaciones de arrecife que rodean los atolones disipan la mayor parte de la energía de las olas incidentes y protegen así las costas de las grandes olas (Ferrario et al., 2014).

En el futuro, el cambio climático incrementará la vulnerabilidad de estos atolones con el aumento del nivel medio del mar (SLR), aumento de la intensidad y frecuencia de fenómenos extremos, acidificación de los océanos… lo que hará que muchas islas y atolones se queden inhabitables. Para el año 2100, se prevé una potencial subida del nivel del mar de 2 m debido a la expansión térmica del agua de mar y al derretimiento de los glaciales/casquetes de hielo (Vermeer and Rahmstorf, 2009; Grinsted et al., 2010; Nicholls and Cazenave, 2010). Procesos de inundación por ondas infragravitatorias aumentarán con el SLR (p. ej., Quataert et al., 2015; Cheriton et al., 2016), y se deben considerar para proyectar completamente la evolución morfológica de los atolones. Se vería afectado el runup (Quataert et al., 2015) y las magnitudes de deposición de sedimentos por desbordamiento, ya que estas ondas se convierten en una gran proporción de la energía del oleaje cerca de la costa a lo largo de las costas con arrecifes estrechos (aproximadamente 100 m) (Ford et al., 2013).

Recientemente, estudios de ingeniería costera utilizan largas series temporales de parámetros del estado del mar (altura de ola significante, periodo de pico, dirección media, etc.). Raramente se encuentran boyas justo en el punto donde las necesitamos, y se utiliza la boya más cercana que puede estar a varios kilómetros y no es representativa del clima local. Aunque existen bases de datos históricas con gran resolución espacial y horaria en mar abierto, no suele ser suficiente para la escala costera, y no se tienen en cuenta procesos de transformación del oleaje cerca de la costa. Por eso, en los últimos años se han desarrollado muchas simulaciones numéricas de las olas del océano, mejorando el conocimiento del clima de olas en aguas profundas o a gran escala. La información que ofrecen los modelos de olas en un área abierta debe transferirse a aguas poco profundas, aumentando la resolución espacial (es decir, reduciendo la escala). Este proceso es llamado downscaling (Camus et al., 2011).

El uso de espectros direccionales de olas completos es crucial para lugares donde es común que la energía llegue desde varias direcciones, como pasa en el atolón de Wake, aislado en el Océano Pacífico, y objeto de estudio del trabajo.

Hay tres tipos de downscaling: el downscaling dinámico, se refiere al uso de simulaciones regionales de alta resolución para extrapolar dinámicamente los efectos de los procesos climáticos, el downscaling estadístico, se desarrolla una relación estadística entre los datos climáticos históricos observados y la salida del modelo climático para el mismo período histórico. La relación se utiliza para desarrollar los datos climáticos futuros. Y el downscaling híbrido, que combina la reducción de escala dinámica (modelos numéricos) y estadística (generalmente un esquema de interpolación) para reducir el esfuerzo computacional.

Anteriormente han sido creados diversos tipos de metodologías híbridas como en el trabajo de Rueda et al., 2019, donde se implementó el metamodelo HyCReWW (Hybrid Coral Reef Wave and Water Level) basado en dos modelos, (a) simulaciones no hidrostáticas de XBeach bajo diferentes configuraciones de arrecifes y condiciones de nivel de agua y olas en alta mar (Pearson et al., 2017); y (b) funciones de base radial (RBF) para aproximar la función no lineal de run-up para el conjunto de parámetros multivariados. También el método propuesto por Camus et al., 2011, que sigue los siguientes pasos: (a) definición del clima marítimo en aguas profundas a partir de bases de datos de series históricas; (b) selección de un subconjunto de estados del mar; (c) transformación del oleaje de aguas profundas a aguas poco profundas de los estados del mar más representativos usando un modelo de propagación de olas; (d) reconstrucción de la serie temporal en aguas poco profundas usando un esquema de interpolación; (e) validación de los resultados generalmente utilizando datos instrumentales; y (f) una vez definidas las series temporales en los puntos de interés cercanos a la costa, se pueden aplicar diferentes modelos estadísticos para caracterizar el clima marítimo en aguas poco profundas.

En este trabajo se utilizará el método de downscaling híbrido Binwaves desarrollado por Cagigal et al., 2022 *in prep.* para transferir el oleaje de un hindcast global de 40 años de datos a la costa. Esta metodología permite propagar eficientemente cualquier espectro direccional de onda multivariante a la costa en base a una biblioteca de casos previamente ejecutados. Por otro lado, se ha realizado un análisis de la onda infragravitatoria en el atolón, a partir de las simulaciones con XBeach.

1.2. Objetivos

Se plantean los siguientes objetivos:

- Caracterización del clima marítimo cercano a la costa de la isla de Wake.
- Análisis de la onda infragravitatoria dentro del atolón.

1.3. Descripción de la zona de estudio

La isla de Wake es un atolón de arrecife de coral con una longitud de costa de 19.3 km en el Océano Pacífico Norte, a unos 3700 km al oeste de Honolulu. La isla tiene un pequeño puerto marítimo, y su propio aeropuerto.

Es un territorio no incorporado de los Estados Unidos y está formada por tres islas: Peale, Wilkes y Wake (figura 1), construidas sobre un volcán submarino. La laguna central es lo que fue el cráter y las islas son parte de la orilla, estas están alineadas a lo largo de los bordes norte, sur y

este del plano del arrecife, respectivamente. Es por esto por lo que tiene una gran pendiente que puede llegar a miles de metros de profundidad alejándose pocos metros de la costa (figura 2). La elevación media aproximada de estas islas es de 3.5 m sobre el nivel del mar y la laguna de Wake tiene < 5 m de profundidad (Shope et al., 2017).

Ilustración 1: Isla de Wake con islas e infraestructuras señaladas.

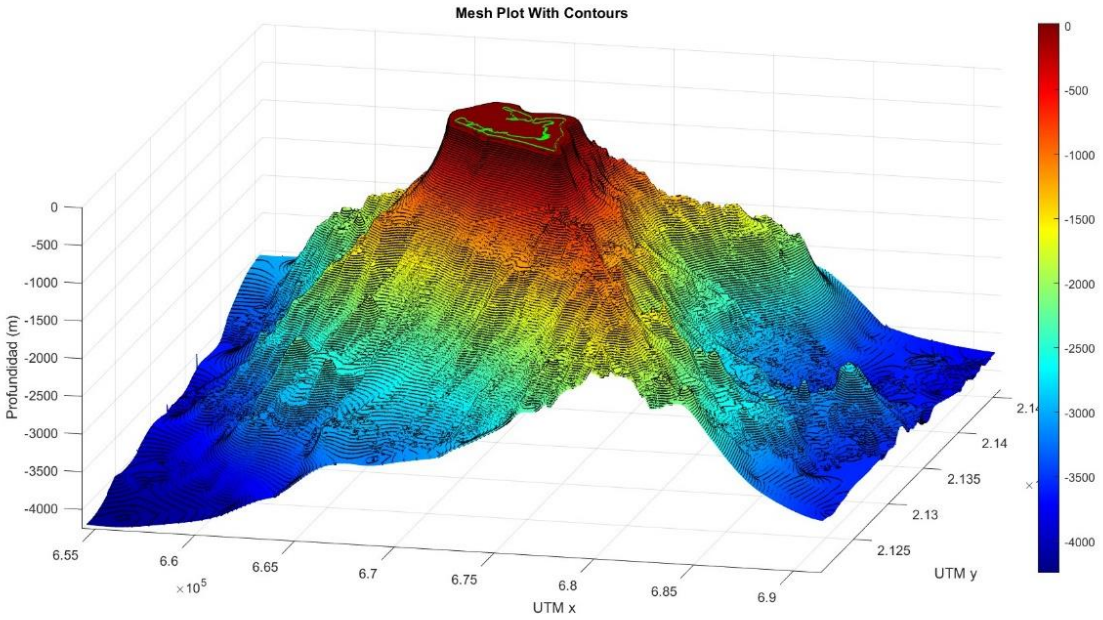


Ilustración 2: Batimetría de la isla de Wake.

No hay registros de inundaciones por swell en la isla, pero si por tormentas tropicales y tifones. El primer registro ocurrió el 19 de octubre de 1940, una tormenta tropical golpeó la isla Wake con vientos de 220 km/h. El 16 de septiembre de 1952 ocurrió el Súper Tifón Olive, con velocidades de viento que alcanzaban los 278 km/h. El tifón causó inundaciones reales, destruyó aproximadamente el 85% de las estructuras de Wake y causó 1,6 millones de dólares en daños (CPHC NOAA, 2007). El 28 de agosto de 2006, apareció el Súper Tifón Ioke, la fuerza aérea de los

Estados Unidos evacuó a los 188 habitantes de la isla. Ioke, con giros de más 298 km/h, causó inundaciones de 6m con olas que entraban directamente en el interior del atolón (Voanews, 2009).

Un grupo de evaluación y reparación de las fuerzas armadas de aviación de los Estados Unidos regresó a la isla en septiembre de 2006 y restableció la pista de aterrizaje y las oficinas que finalmente lograron regresar a las tareas típicas.

Ilustración 3: Daños causados en la iglesia por el tifón Ioke en 2006.

1.3.1. Dinámicas oceanográficas

Las islas del Pacífico son receptoras de swells multidireccionales a lo largo de todo el año. Las mayores alturas de las olas en Wake se observan durante el invierno debido a los ciclones extratropicales del hemisferio norte (Alves, 2006; Semedo et al., 2013). La media histórica no desagregada (1976–2005) del 5 % superior de la altura de ola significativa (Hs) de diciembre a febrero (DJF) de un WAVEWATCH III basado en un modelo climático global es 5,1 ± 0,6 m para Wake (Shope et al., 2016). La dirección de las olas incidentes durante el invierno está en el rango noreste (33 ± 51°) con una Tm de 12,5 ± 2 s (Shope et al., 2016). En verano hay menos energía de las olas, con la más grandes generadas por los vientos alisios y el oleaje del hemisferio sur de los ciclones extratropicales (Alves, 2006). La media histórica del 5% superior de junio-agosto es de 4,0 ± 0,8 m (Shope et al., 2016). Las mayores olas en verano se acercan des del este (109 ± 60°) con un Tm de 12.5 ± 1.3 s, demostrando el dominio de los vientos alisios en las condiciones de las olas de verano (Shope et al., 2017).

2. Datos

2.1. Datos espectrales

Se ha utilizado la serie histórica de los espectros direccionales del CAWCR (Centre for Australian Weather and Climate Research) obtenido a partir del modelo WW3 (WaveWacth III). En el acercamiento de la figura 4 se puede ver la posición de las dos estaciones utilizadas. El CAWCR pertenece al portal de datos CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). WW3 es un modelo de olas de tercera generación que se usa ampliamente en los centros de predicción de oleaje. Los espectros de ondas direccionales se agruparon en 29 frecuencias espaciadas exponencialmente de 0,038 a 0,5 Hz y se discretizaron en 24 direcciones con un espaciado constante de 15°. La malla global tiene una resolución de 0,4° con mallas anidadas bidireccionales (Tolman, 2008) para Australia y entre 18 km 7 km para las islas del Pacífico sudoccidental (Smith et al., 2021).

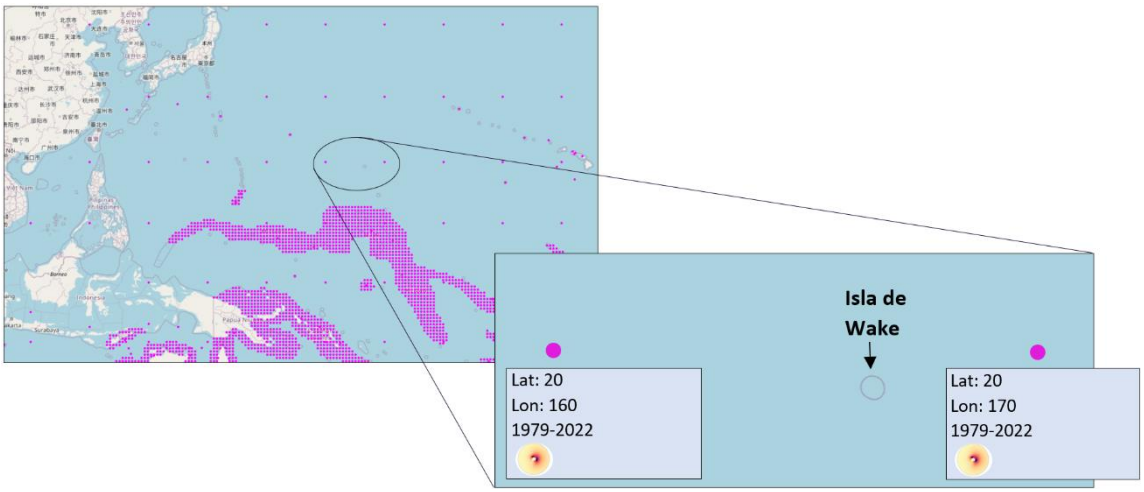


Ilustración 4: Red de estaciones del CSIRO. En la derecha la dosestaciones escogidas cercanas a Wake.

La batimetría para todas las mallas se extrajo del conjunto de datos batimétricos digitales DBDB2v3 (NRL, 2006). El anidamiento bidireccional de las mallas de diferente resolución permite que la energía de las olas se propague desde las celdas gruesas a las anidadas y desde las anidadas de nuevo a las gruesas (Smith et al., 2021). Muchos países de las islas del Pacífico se definen como archipiélagos compuestos por muchas islas e islotes, algunos de los cuales son mucho más pequeños que la resolución de cuadrícula más fina. Para tener en cuenta la reducción de la energía del oleaje a pequeña escala como en las islas, se implementó un sistema de disipación de energía de la isla que suprime la energía entre las celdas de la malla adyacentes en función de un valor de obstrucción en las direcciones x e y (Tolman, 2008).

Este es el caso del atolón Wake, como se puede ver en la siguiente figura, hay una obstrucción del 20% en x, es por esto que es necesario realizar un downscaling des de estaciones lejanas, ya que los valores cerca de Wake no serán reales.

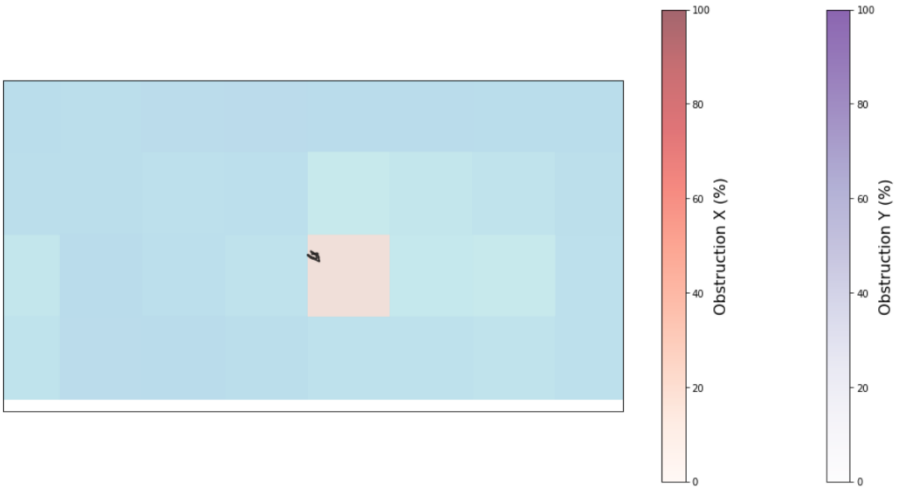


Ilustración 5: Obstrucción del WW3 en la isla de Wake.

La serie histórica requiere datos globales de viento y hielo marino para ser descargados y preprocesados en el formato WWIII antes de la ejecución del modelo. Los vientos superficiales a 10 m y el hielo marino requeridos por las actualizaciones mensuales en curso son generados por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecasts System Version 2 (CFSv2) (desde 2011) y obtenidos del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Los vientos superficiales tienen una resolución espacial de 0,2° a intervalos de una hora, mientras que el hielo marino tiene una resolución de seis horas (Smith et al., 2021).

El modelo proporciona información de 3 diferentes formas:

1. El espectro direccional completo
2. Parámetros agregados (Hs, Tp, θm)
3. Particiones de los grupos de oleaje que llegan a cada punto.

Para este trabajo se ha utilizado la serie temporal de espectros direccionales para propagar el oleaje y las particiones para hacer una comparación de las dos estaciones más cercanas entre ellos y con Wake.

2.2. Análisis histórico de las estaciones

Se han representado los espectros según un análisis estacional en las figuras 6 y 7. Se trata de dos puntos muy parecidos, en las cuatro estaciones la energía se centra en las mismas direcciones. La energía en las dos estaciones espectrales oscila entre los 0 y 0.3 m^2/Hz y no hay diferencias notables. Cabe destacar que la energía proveniente del SSE y NE sigue vigente durante todo el año. En otoño aparece energía proveniente del NNO la cual aumenta en invierno llegando hasta los 0.3 m^2/Hz, y a partir de primavera se va disipando hasta desaparecer en verano. A partir del espectro direccional de cada estación, se obtienen los parámetros bulk mediante la librería Wavespectra (algorítmo desarrollado por Metocean Solutions). Wavespectra es una biblioteca para procesar datos espectrales de olas oceánicas. Proporciona lectura y escritura de formatos de datos espectrales comunes, cálculo de parámetros de onda integrados comunes, varios métodos de partición y manipulación espectrales en una librería basada en la velocidad y la eficiencia para una gran cantidad de espectros.

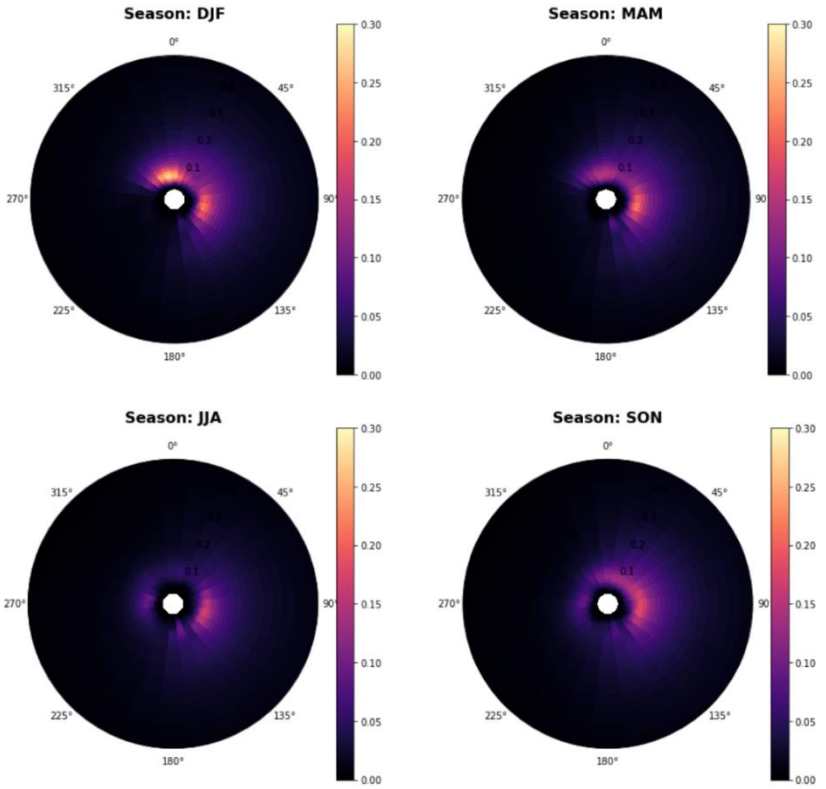


Ilustración 6: Estación espectral Oeste clasificada en estaciones.

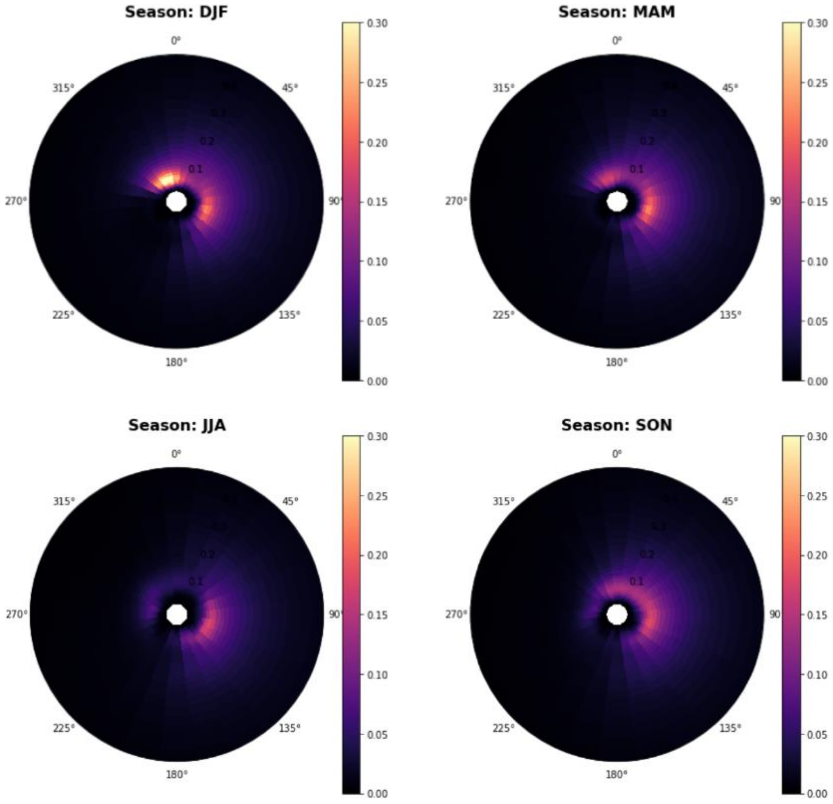


Ilustración 7: Estación espectral Este clasificada en estaciones.

Es necesario comparar las estaciones de forma más precisa para poder ver la diferencia entre ellas, ya que los espectros son muy parecidos. Por eso, a continuación, se utilizarán los parámetros bulk calculados para comparar la serie temporal de Hs, Tp y Dir.

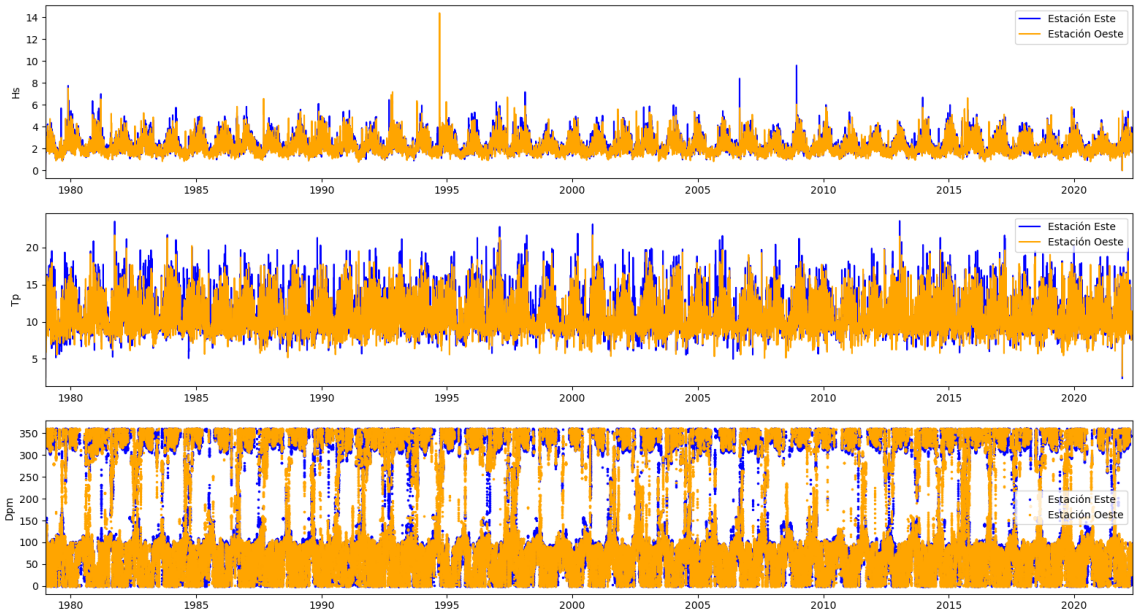


Ilustración 8: Parámetros agregados de las estaciones este y oeste.

En las dos estaciones las alturas de ola se encuentran 0.5 m y 7 m, con excepciones de eventos extremos. Aun así, se aprecia que la estación del este generalmente tiene más altura que la del oeste. El periodo de pico está entre 5 s y 22 s y la dirección media de los picos varia des de los 300º hasta los 120º como se veía en los espectros de las figuras 6 y 7. Para estas dos variables también hay más energía de la estación este, por lo que escoger esta estación significaría estar del lado de la seguridad.

A continuación, se compararán las estaciones con las particiones cercanas, con el fin de escoger la más representativa según estas.

2.3. Comparación con particiones

Para la obtención de datos en Wake, se han utilizado las particiones de una serie temporal de una estación del CSIRO cercana a Wake. Se han calculado los parámetros agregados de las particiones cercanas a Wake de la siguiente forma:

Ecuación 1

$$Hs^2 = Hs0^2 + Hs1^2 + Hs2^2 \dots$$

Esta altura de ola será la comparada con los parámetros bulk (agregados) de cada estación.

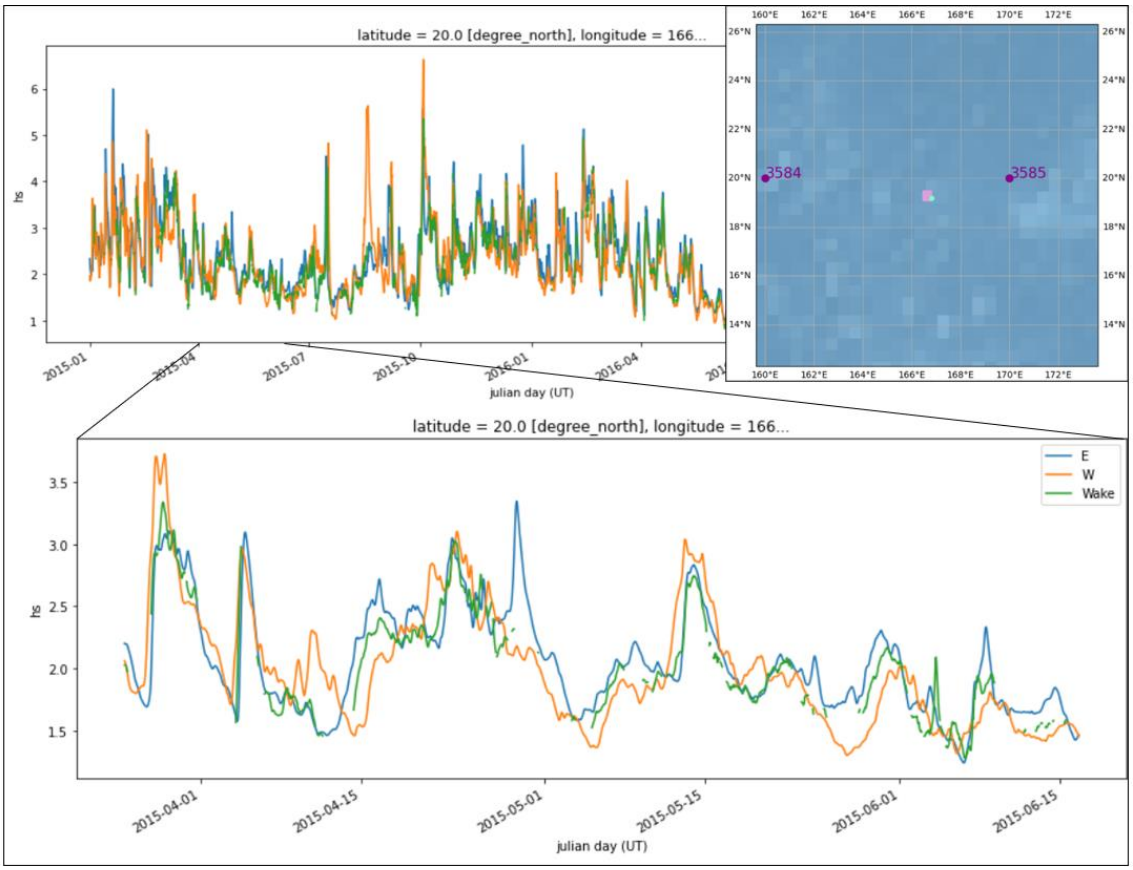


Ilustración 9: Comparación de las particiones cercanas con las estaciones.

Comparando las estaciones con las particiones en Wake, mediante la figura 9, se ve que la estación oeste tiene a diferir en los picos, generalmente subestimándolos. En cambio, la estación este es más precisa y capta mejor los picos, por lo que se ha decidido escoger ésta para las condiciones de contorno en SWAN (Simulating WAves Nearshore).

2.4. Análisis armónico

Se ha realizado un análisis armónico mediante la librería utide. Se han utilizado los datos del mareógrafo de una base de datos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de [Holgate et al., 2013; PSMSL, 2022]. Se han obtenido por tanto el nivel del mar habiéndole quitado la tendencia de aumento de nivel del mar, la marea astronómica, y el residuo como se ve en la figura 10.

Se observa una carrera de marea de un metro y medio aproximadamente, la marea astronómica es semidiurna y el residuo no supera el medio metro en la mayoría de los casos. Destaca un valor por encima de todos en 2006, correspondiente al tifón IOKE. En la figura 11 se puede ver que el pico llega hasta 1.34 metros justo en el intervalo en el que pasa el huracán. También se muestra el recorrido del tifón en el océano pacífico.

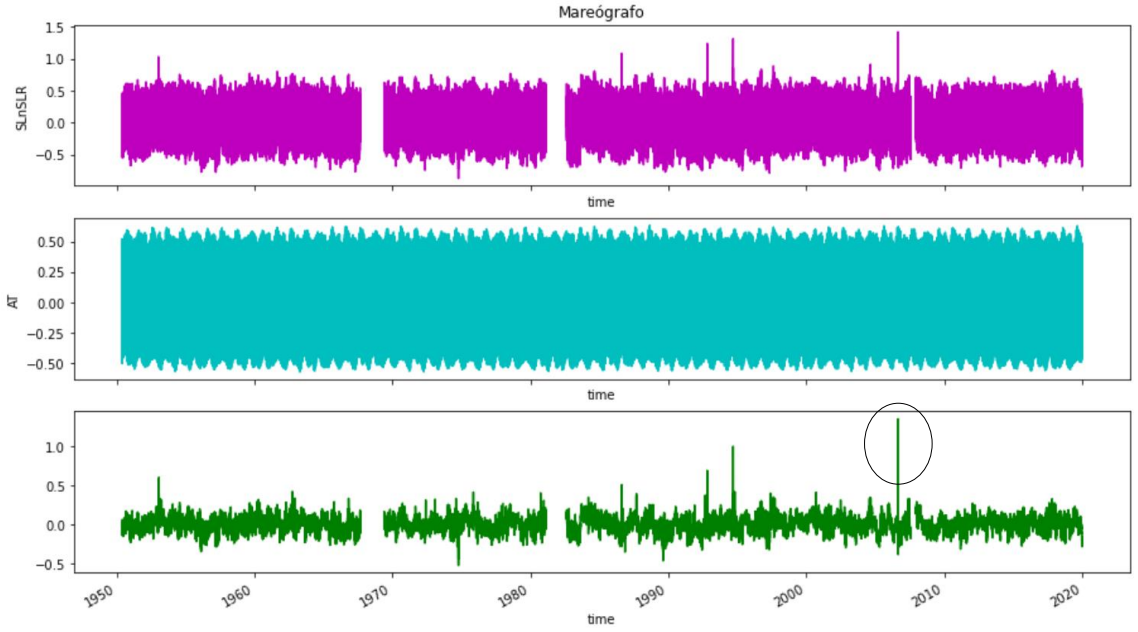


Ilustración 10: El primer gráfico corresponde a los datos del mareógrafo habiendo quitado la tendencia del nivel del mar, el segundo a la marea astronómica, y el tercero al residuo de la marea.

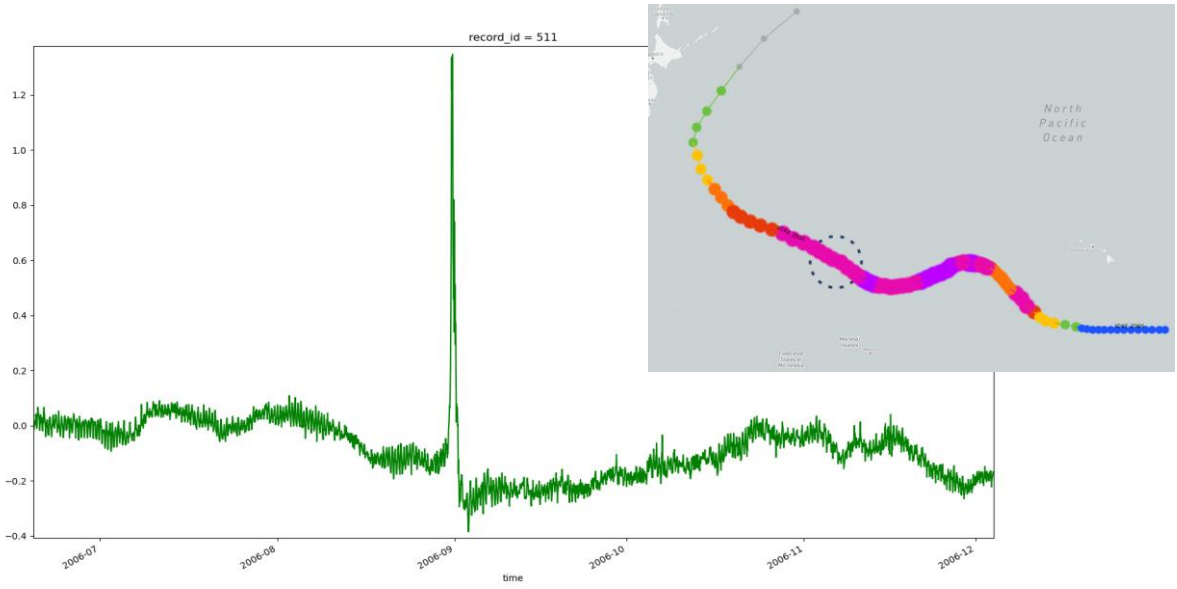


Ilustración 11: Validación del mareógrafo con el tifón Ioke.

2.5. Batimetría

La batimetría se creó con un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 10 m que rodea la isla Wake en el Océano Pacífico central. Cubre las tres pequeñas islas, Peale, Wake y Wilkes, que forman la isla y se extiende sobre la pendiente volcánica. Está referenciada al MHW (Mean High Water) y se compiló a partir de varias fuentes de datos, entre ellas: los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI) de la NOAA, anteriormente el Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC); el Servicio Nacional Oceánico de EE. UU. (NOS), el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (USACE), la Agencia Federal

para el Manejo de Emergencias (FEMA) y otras agencias gubernamentales federales, estatales y locales, instituciones académicas, y empresas privadas.

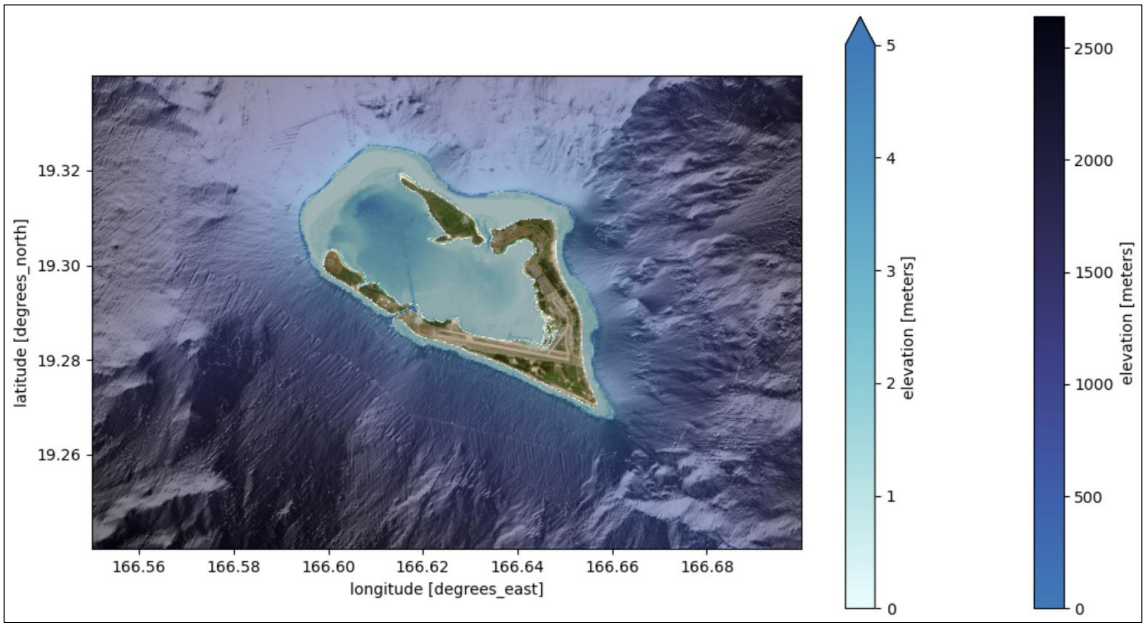


Ilustración 12: Batimetría de detalle de la isla de Wake con ortofoto superpuesta.

3. Metodología

Con el objetivo de la caracterización del oleaje en Wake, se ha desarrollado la metodología de downscaling híbrido de BINWAVES, resumida brevemente en los siguientes apartados:

1. Se ha realizado una descomposición de la serie temporal de los espectros en los modos de oscilación, es decir, una clasificación de los PCA (Principal Component Analysis). De los 43 años se han conseguido 49 modos de oscilación principales que explican el 95% de la varianza. Cada EOF (modo de oscilación) tiene un peso (PC) por cada instante.
2. Mediante el método de KMEANS, se divide el espacio de datos (49 x número de tiempos) en 2000 grupos, un número suficientemente pequeño para poblar los diferentes grupos y suficientemente grande como para capturar la variabilidad completa de los espectros.
3. Se hace una simulación numérica con SWAN de casos monocromáticos. Se ejecutan 696 casos monocromáticos (24 frecuencias x 29 direcciones del espectro discretizado del CSIRO) con altura de ola unitaria (1m). A partir de los casos propagados, se obtiene el coeficiente de propagación para cada caso. Para reconstruir un espectro inicial cualquiera de los 40 años con los 49 EOFs, miramos la ponderación en cada PC para ese instante. Se reconstruyen así los 2000 espectros.
4. Para la reconstrucción histórica, se busca el clúster al cual pertenece cada espectro de cada instante, y se reconstruye el espectro según el centroide de ese clúster.

Una vez analizado el clima obtenido en la reconstrucción histórica, se procede a la utilización del modelo XBeach para analizar las dinámicas y la importancia de la onda infragravitatoria en el atolón. Se han seguido los siguientes pasos:

5. Como datos de entrada son necesarios dos ficheros con toda la información de la ejecución.
6. Dentro de esos ficheros se debe añadir la malla, la cual ha sido creada con el mallador DELFT3D-GUI. Se trata de una malla circular de resolución variable. También se ha añadido la rugosidad del suelo e interpolado a la malla.
7. Se han seleccionado 5 casos para las ejecuciones de XBeach. Cuatro con altura de ola unitaria y 10 s de Tp, con diferentes direcciones. El quinto con las condiciones de un evento extremo según el anterior análisis del clima realizado.
8. Para el quinto caso se ha realizado un análisis de los Componentes Principales (PCA) y analizado el espectro de Jonswap de algunos puntos, con la intención de hacer un análisis de las ondas infragravitatorias en el atolón.
9. Por último, se ha añadido un análisis de sensibilidad de la rugosidad del suelo para el tercer caso.

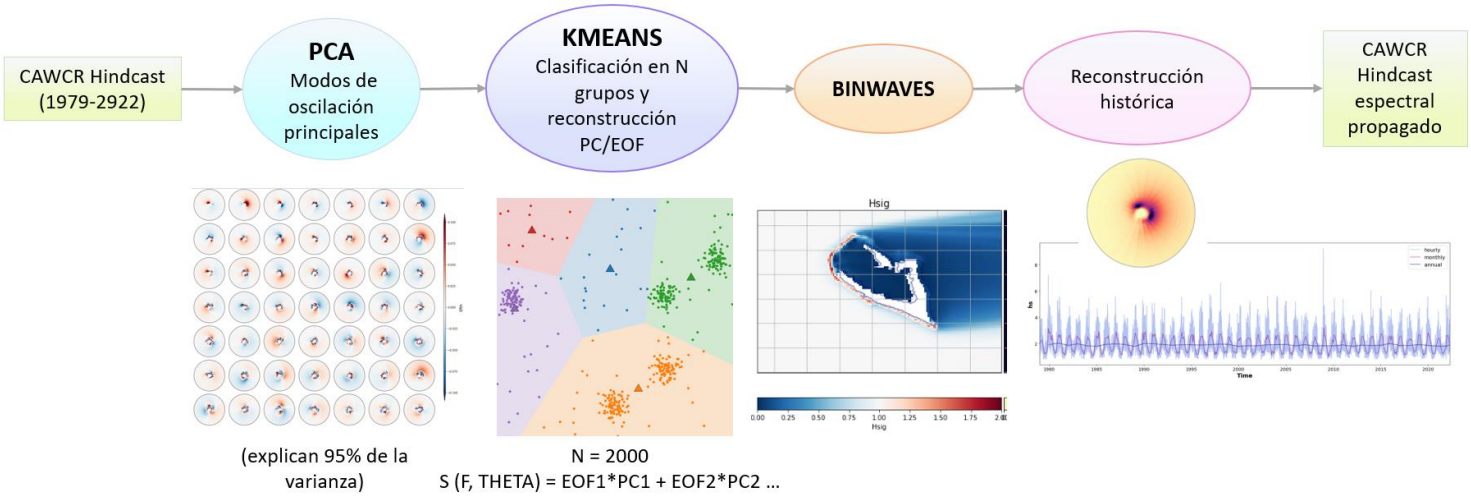


Ilustración 13: Esquema de la metodología hasta la caracterización del oleaje en la costa de Wake.

3.1. PCA (Principal Component Analysis)

El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica para reducir la dimensionalidad de los conjuntos de datos, minimizando la pérdida de información. Lo hace creando nuevas variables no correlacionadas que maximizan sucesivamente la varianza. Encontrar estas nuevas variables, los componentes principales, se reduce a resolver un problema de valores propios/vectores propios, y las nuevas variables se definen por el conjunto de datos utilizados, lo que convierte este análisis en una técnica de análisis de datos adaptativa.

Por tanto, las descomposiciones de los espectros de la serie temporal de la estación este en los modos de oscilación (EOF) son los PCA. De todos los tiempos se han conseguido 49 modos de oscilación principales que explican 95% de la varianza. Asimismo, cada tiempo estará explicado por 49 EOFs. Cada EOF tiene un peso (PC).

De este modo, todos los espectros serán más homogéneos y será más fácil para el método de KMEANS agruparlos.

3.2. KMEANS

K-means es un algoritmo de clasificación no supervisada (clusterización) que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o clúster. Se suele usar la distancia cuadrática.

El algoritmo consta de tres pasos:

1. Inicialización: una vez escogido el número de grupos, k, se establecen k centroides en el espacio de los datos.
2. Asignación de objetos a los centroides: cada objeto de los datos es asignado a su centroide más cercano.
3. Actualización de los centroides: se actualiza la posición del centroide de cada grupo tomando como nuevo centroide la posición del promedio de los objetos pertenecientes a dicho grupo.

Para nuestra base de datos, se divide el espacio de datos (49 EOFS x número de tiempos) en 2000 grupos, un número suficientemente pequeño para poblar los diferentes grupos y suficientemente grande como para capturar la variabilidad completa de los espectros.

De esta forma, para reconstruir un espectro inicial cualquiera de los 40 años con los 49 EOFs, miramos la ponderación en cada PC para ese instante. Se reconstruyen así los 2000 espectros.

3.3. BINWAVES

Con la intención de crear una librería de casos sintética, se propaga el oleaje en aguas indefinidas hasta las aguas someras que rodean la isla con BINWAVES.

Para eso es necesario conocer la discretización de los espectros usados, en este caso los del CSIRO constan de 29 frecuencias y 24 direcciones (696 casos). Así la energía espectral está dividida en bins.

Se trata de simulaciones numéricas de oleaje monocromático con el modelo numérico SWAN.

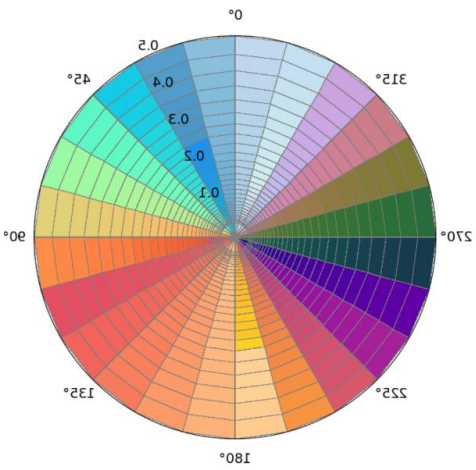


Ilustración 14: Librería de casos.

Es necesario utilizar diferentes modelos numéricos que resuelvan diferentes procesos según la profundidad a la que se encuentra la ola:

Cuando la ola se propaga en profundidades indefinidas, no sufre ningún proceso afectado por la batimetría. A medida que la ola se aproxima a costa, la profundidad disminuye, y la ola aumenta su altura por asomeramiento. Otro posible proceso es la refracción, ocurre cuando un tren de olas encuentra un cambio en la profundidad que produce un cambio en la velocidad de

propagación. Si la profundidad disminuye, la velocidad disminuirá; si la profundidad aumenta, la velocidad aumentará. Al aumentar la velocidad de una parte del oleaje, se produce un giro del frente de olas hacia la costa. También existe el proceso de difracción, que ocurre cuando el frente de olas es interrumpido por un objeto, lo cual provoca que las olas que se propagan a los lados del objeto tienden a radiar energía hacia la zona en sombra y las crestas giran en esta dirección. Otro proceso es la reflexión del oleaje en acantilados o playas de pendientes pronunciadas, o la disipación de energía por rotura por fondo o peralte.

Con el fin de resolver estos procesos existen dos tipos de modelos:

a. Que resuelven la fase de la onda, basados en ecuaciones de balance de masa y conservación del momento, integradas en vertical y dependientes del tiempo. Con mucho más tiempo de ejecución, destinado a áreas pequeñas.
b. Los modelos de fase promediada basados en la ecuación de balance de energía espectral. Para grandes áreas.

Para la ejecución de los 696 casos, se ha usado el modelo SWAN, de modo que se incluyan los procesos de transformación del oleaje (downscaling dinámico). SWAN es un modelo de olas de tercera generación, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft, que calcula olas aleatorias de cresta corta generadas por el viento en regiones costeras y aguas continentales.

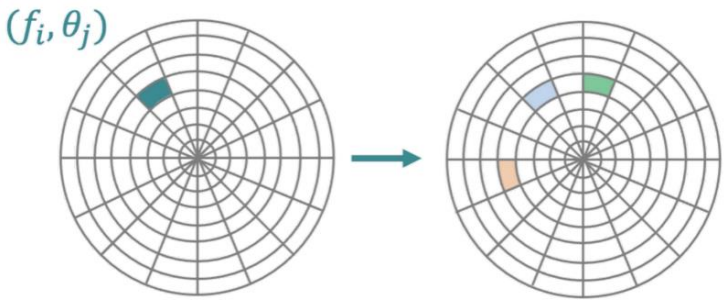


Ilustración 15: Ejemplo de transformación del coeficiente de propagación.

Ecuación 2

$$K_p(f_i,\theta_j) = \frac{U_p(f_i,\theta_j)}{\iint U(f_i,\theta_j)\, d_f\, d_\theta}$$

Ecuación 3

$$Sp(f_i,\theta_j) = \sum_i \sum_j S(f_i,\theta_j) * {K_p}^2(f_i,\theta_j)$$

Se han ejecutado los 696 casos con altura de ola unitaria (1m), de forma que se crea la librería de casos sintética. Si el periodo es muy pequeño se utiliza Hs de 0.1m debido a que, en la realidad, el peralte aumentaría y la ola podría romper. Hay un postproceso de los 696 casos para obtener el coeficiente de propagación (kp) mediante la fórmula de la ecuación 2, donde como se ve en la figura 15, se utiliza la variación de la dirección y frecuencia propagadas para calcular el nuevo kp. Con la siguiente ecuación 3, utilizando los kp, se propagan los 2000 grupos de KMEANS. La siguiente figura corresponde a la matriz de los 696 casos propagados con SWAN, con altura de ola de 1m.

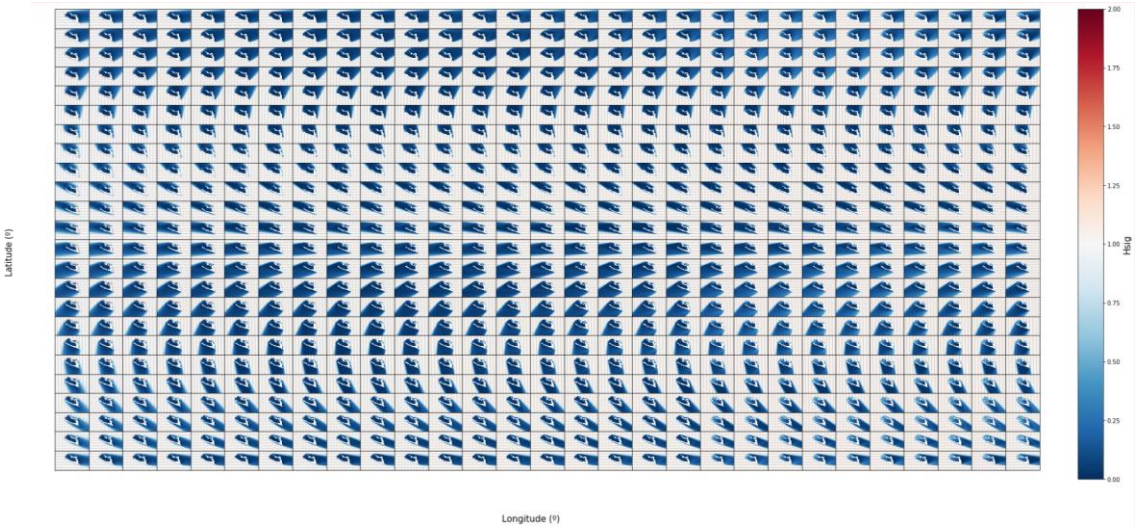


Ilustración 16: Matriz de los 696 casos propagados con SWAN.

A continuación, se muestran dos ejemplos de obtención del coeficiente de propagación con uno de los casos propagados con SWAN, de dirección 262.5º y Tp 11.02 s. Se grafica el punto que se muestra en los mapas con una pequeña estrella.

En el primer ejemplo en la figura 17, el punto de interés se encuentra en una zona donde recibe el oleaje directamente y no sufre ningún proceso de disipación de energía. Por eso, el Kp inicial y final es el mismo. En el segundo ejemplo en la figura 18, se trata de un punto en una zona de sombra, donde el oleaje se está refractando. Asimismo, varía en dirección y energía. Por tanto, el Kp disminuye de 1 a 0.3.

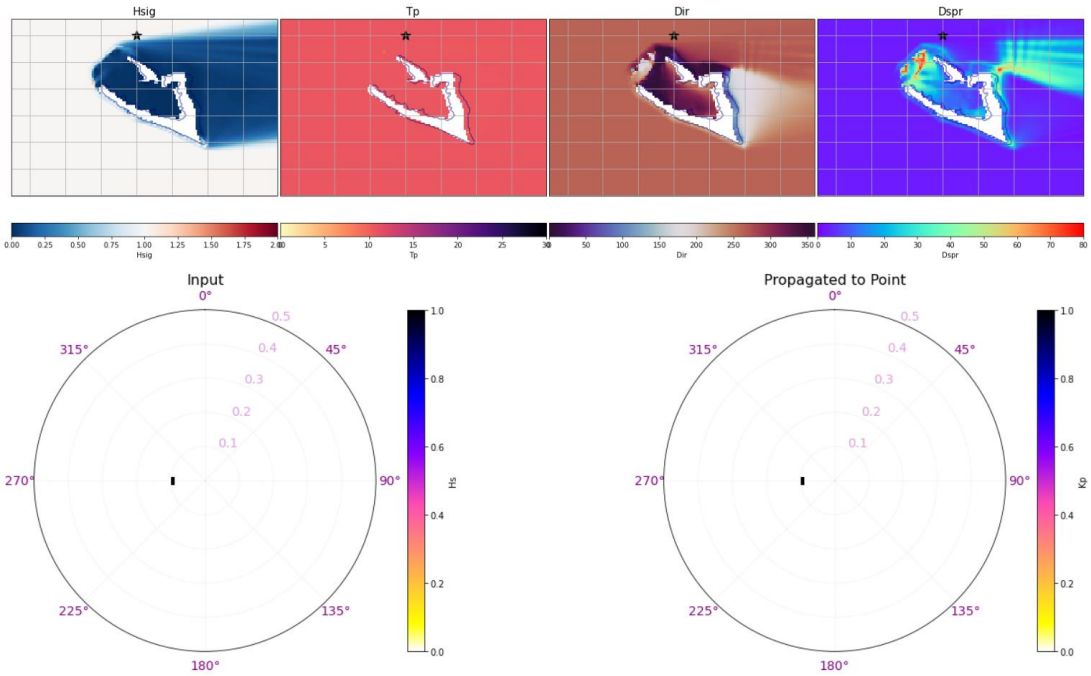


Ilustración 17: Ejemplo 1 de cálculo del kp.

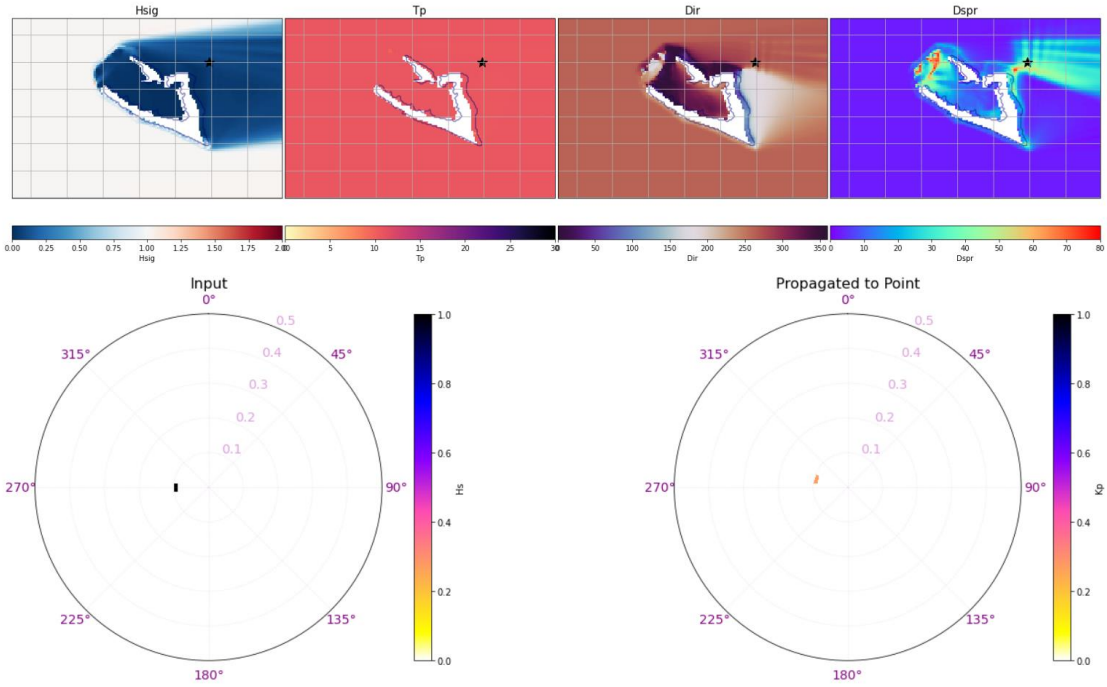


Ilustración 18: Ejemplo 2 de cálculo del kp.

3.4. Reconstrucción histórica

Para la reconstrucción de toda la serie temporal de espectros, se busca el clúster al cual pertenece cada espectro de cada instante, y se reconstruye el espectro según el centroide de ese clúster. Gracias a esto, se simplifica el proceso de reconstrucción enormemente. Con los 2000 grupos para el conjunto de datos se considera que cada centroide del clúster es representativo de ese mismo clúster. De esta forma, ya se puede analizar el clima marítimo en la costa de Wake.

3.5. Datos de entrada para XBeach

A continuación, se procede a la metodología utilizada para el análisis de las ondas infragravitatorias en el interior del atolón, para el que se ha utilizado el modelo XBeach. XBeach es un modelo numérico que se desarrolló originalmente para simular procesos e impactos hidrodinámicos y morfodinámicos en costas arenosas con un dominio de kilómetros y una escala temporal de tormentas. Desde entonces, el modelo se ha aplicado a otro tipo de costas y finalidades.

El modelo incluye los procesos hidrodinámicos de transformación de onda corta (refracción, asomeramiento y rotura), transformación de onda larga (onda infragravitatoria) (generación, propagación y disipación), setup y corrientes, así como desbordamiento del oleaje e inundación. Los procesos morfodinámicos incluyen carga de fondo y transporte de sedimentos suspendido. Se han incluido los efectos de la vegetación y de las estructuras duras. El modelo ha sido validado con una serie de casos de prueba analíticos, de laboratorio y de campo.

El modelo consta de tres modos: modo de onda estacionaria, resuelve eficientemente las ecuaciones promediadas de onda pero ignorando las ondas infragravitatorias; modo Surf-beat (no estacionario), donde se resuelven las variaciones de onda corta en la escala del grupo de olas (envolvente de onda corta) y las ondas largas asociadas a ellas; modo no hidrostático (resolución de onda), donde se aplica una combinación de ecuaciones no lineales de aguas poco profundas con un término de corrección de presión, lo que permite modelar la propagación y el decaimiento de olas individuales (Deltares, 2015).

Para las ejecuciones de este trabajo se ha utilizado el modo surfbeat.

Modo surfbeat

Resuelve la variación de altura onda corta a una escala de grupo, para esto emplea un modelo de disipación para los grupos de ola y un modelo 'roller' para representar el momentum almacenado en la superficie posterior al rompimiento de la ola. Estas variaciones ejercen una fuerza en la columna de agua y conllevan a mayores periodos de oleaje y corrientes inestables, debido a los gradientes de tensores de radiación, que son resueltos por el modelo con ecuaciones no lineares de aguas someras. Por lo tanto, se incluyen las corrientes impulsadas por las olas (corrientes longitudinales, corrientes de resaca) o viento, las olas largas (infragravitatorias) y las corrientes ascendentes y descendentes de las olas largas (swash) (Deltares, 2015).

Dentro del modelo son necesarios una serie de ficheros explicados a continuación:

- Params.txt: es un fichero que guarda toda la información de la ejecución, tanto como la malla, batimetría, línea de costa, tiempo de ejecución (en este trabajo se han realizado cinco ejecuciones de 2 horas escogiendo la segunda hora como válida, y una ejecución de cinco horas descartando también la primera hora), los coeficientes de fricción, la posición de los sensores, etc.
- Jonswap.txt: es un fichero que contiene los datos de contorno de oleaje (Hs, Tp, Dir…)

Se han elegido un total de 21 sensores, la posición de los cuales con el objetivo de analizar el setup y onda larga a lo largo de la costa de Wake, como se ve en la siguiente figura. Según el caso ejecutado, se han escogido los puntos relevantes a analizar.

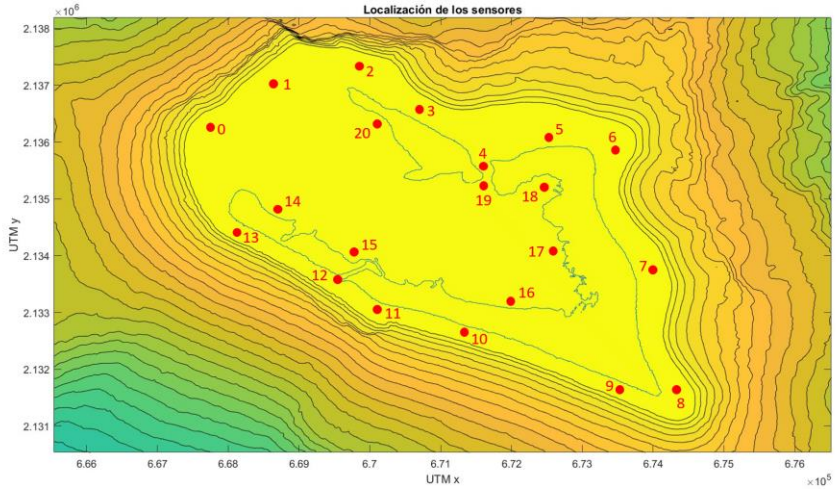


Ilustración 19: Posición de los sensores

3.6. Creación de la malla con DELFT3D-GUI

Se ha creado una malla en forma circular de resolución variable de forma que el radio exterior funciona como condiciones de contorno absorbentes. Debido al pequeño tamaño de la isla y a su forma en uve, es necesario hacer celdas muy pequeñas para captar bien su contorno, resultando en 109.719 celdas intentando que haya el mismo valor aproximado de resolución en dx y dy. Dentro de la malla, hay dos círculos interiores más con la intención de afinar la malla en la zona de la isla, mientras que en la zona de agua exterior no es necesario ese nivel de resolución. Además, se ha suavizado la zona de transición entre círculos.

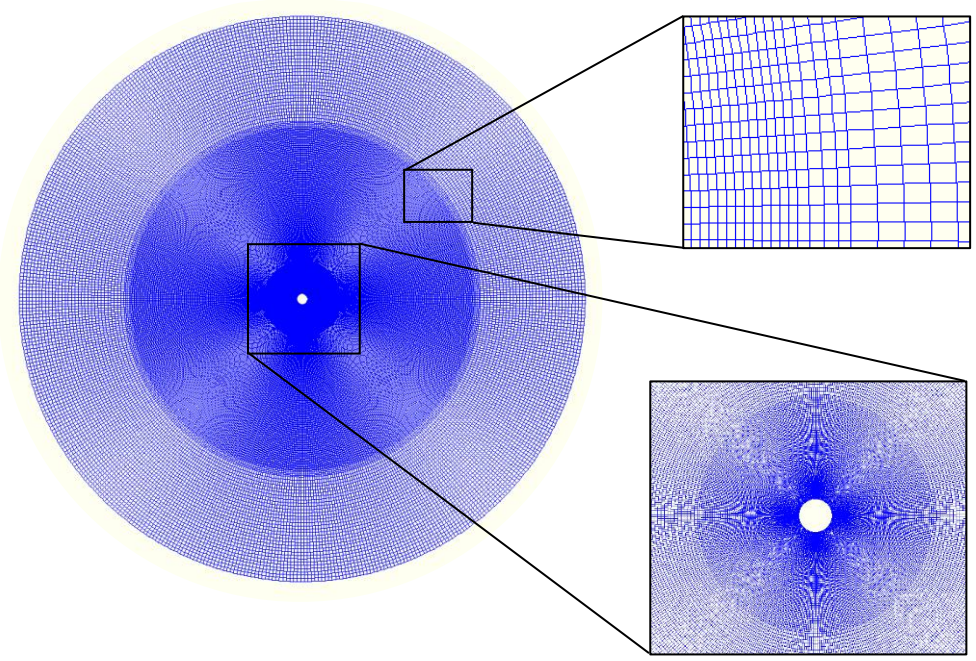


Ilustración 20: Malla para XBeach. En el acercamiento superior se observa la zona de transición suavizada. En el acercamiento inferior se muestra el círculo interior con la mayor resolución.

Una vez creada la malla se carga e interpola la batimetría con el mallador DELFT3D-GUI y se guarda este archivo, el cual se utilizará como dato de entrada en el fichero params.txt.

Dentro de la malla también se le añaden ficheros de fricción para rozamiento de ondas cortas y de ondas largas:

Partimos de un fichero con varios polígonos asignados a cada tipo de suelo en la isla (figura 21 derecha). Este fichero se ha descargado del portal Allen Coral Atlas. Este portal es administrado por el Centro para el Descubrimiento Global y la Ciencia de la Conservación de la Universidad Estatal de Arizona. Junto con socios de Planet, Coral Reef Alliance y la Universidad de Queensland. Para mapear las zonas geomórficas y bénticas de los arrecifes de coral globales, utilizan datos de imágenes de Planet Dove, profundidad del agua derivada de imágenes satelitales de Sentinel 2, Landsat o Planet Dove, ondas modeladas y sustitutos de la rugosidad y la pendiente mediante inteligencia artificial utilizando reglas eco-geomorfológicas.

A cada tipo de suelo se le asigna un coeficiente de fricción de Manning. Según el estudio de Van Dongeren et al., 2013, para coral, 0.09; para microalga, 0.06; para roca, 0.03; para detrito, 0.04;

para arena, 0.02, y para planta acuática, 0.05. Así se consigue un fichero de coeficientes de fricción que se interpola directamente a la malla para ondas largas. Para ondas cortas, se trata del mismo fichero de coeficientes de magnitud 10 veces mayor.

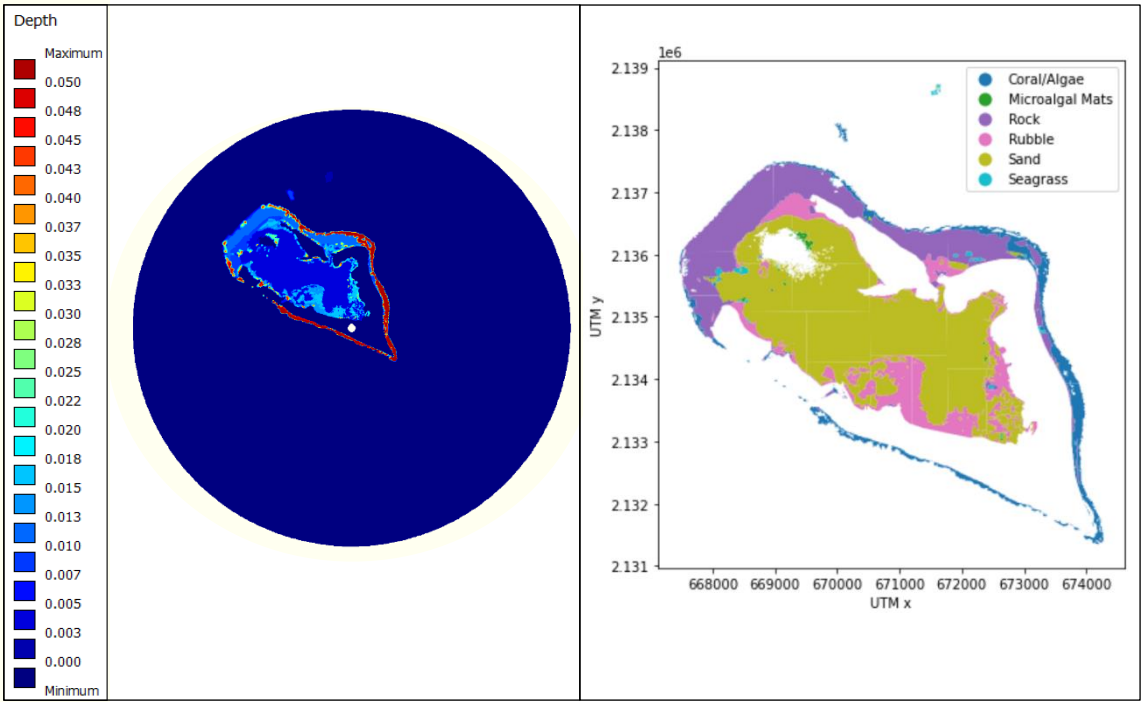


Ilustración 21: En la figura de la derecha se ve la isla de Wake según el tipo de suelo en polígonos. En la parte izquierda, ya cada tipo de suelo ha sido cambiado al coeficiente de fricción de Manning e interpolado a la malla.

3.7. Elección de los 5 casos

Se han escogido 5 casos, los cuatro primeros tienen altura de ola 1 m y periodo 10 s, con diversas direcciones (Caso 1 – 290º, Caso 2 – 0º, Caso 3 – 230º, Caso 4 – 335º). Para el quinto caso se han querido representar las condiciones extremas de un temporal, para eso, según la caracterización del clima anterior, se ha escogido una Hs de 4m, un Tp de 15 s y una dirección del oleaje de 55º.

3.8. PCA del quinto caso

Anteriormente, en el apartado 3.1, se ha explicado el funcionamiento de los PCA. Para analizar los modos de oscilación de la superficie libre en el atolón, se mostrarán mapas de nodos y antinodos, correspondientes a los EOFs; gráficos con los PC, es decir, la ponderación para cada instante de ese EOF, y el espectro de JONSWAP asociado.

Se utilizan varios espectros idealizados con el fin de representar la energía del oleaje. El más simple fue el propuesto por Pierson y Moskowites en 1964, para el que asumía un mar completamente desarrollado en que las olas se encuentran en equilibrio con el viento (aguas profundas).

El espectro de JONSWAP propuesto por Hasselmann et al., permite definir oleajes parcialmente desarrollados, es decir, mar de viento limitado por longitud del fetch y/o duración del viento como forzamiento. Se define con la siguiente ecuación:

Ecuación 4

$$S_J(\omega) = A_\gamma * S_{PM}(\omega) * \gamma^{e\left(-0{,}5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma*\omega_p}\right)^2\right)}$$

Siendo:

- S(ω) la densidad de energía espectral.
- ω la frecuencia de la ola.
- γ el factor de intensificación pico, su valor se encuentra en un rango entre 1 y 7.
- ωp la frecuencia pico.
- $A\gamma$ un factor normalizado, que se calcula de la siguiente forma: $A\gamma = 1 - 0{,}287 * \ln(\gamma)$.

3.9. Análisis de sensibilidad de la rugosidad para el tercer caso

Para este análisis se compararán varios puntos estratégicos según la dirección de incidencia del oleaje con dos ejecuciones del mismo caso 3, una con valores de rugosidad nulos, y otra con los valores de rugosidad establecidos en el apartado 3.6.

4. Resultados I – Caracterización del clima marítimo

En las próximas figuras se presentan valores estadísticos para el oleaje cerca de la costa de Wake, resultados de la propagación con BINWAVES-SWAN. A continuación, en las figuras 22, 23 y 24 se muestran valores estadísticos de la altura de ola. Para el percentil 50, es decir, la media, hay una altura de ola de 1.79 m. Se puede observar como cuando el oleaje llega a la barrera de coral, hay una disminución brusca de la altura de ola hasta 0.5 m, ya que rompe por asomeramiento. Aun así, también se ve como el oleaje entra dentro del atolón refractándose y llegando a disiparse totalmente hasta 0 m. A medida que avanza el oleaje se forma una zona de sombra detrás de la isla donde la ola disminuye hasta un 40%. Se aprecian unas pequeñas acumulaciones del oleaje marcadas con un círculo fucsia justo en las zonas donde sobresale una punta de tierra. Esto es debido a la refracción del oleaje, que, al disminuir la profundidad en esa zona, disminuye la velocidad del oleaje mientras que el frente de olas paralelo sigue a la misma velocidad. Eso provoca una cesión de energía donde aún no ha llegado el oleaje y ahí se produce esa concentración que para este caso aumenta la altura de ola hasta 2.25 m. Para el percentil 90, es decir, las olas más grandes que el 90% de los casos, la altura de ola se encuentra en 3 m. Se observan los mismos procesos, pero hay más puntos donde se concentra el oleaje llegando hasta 3.2 m. Para el percentil 99, el más extremos de todos, la altura de ola está en 4.1 m, pero hay un aumento significativo en las concentraciones del oleaje que llegan hasta 5.4 m, sobre todo en la zona de entrada al atolón.

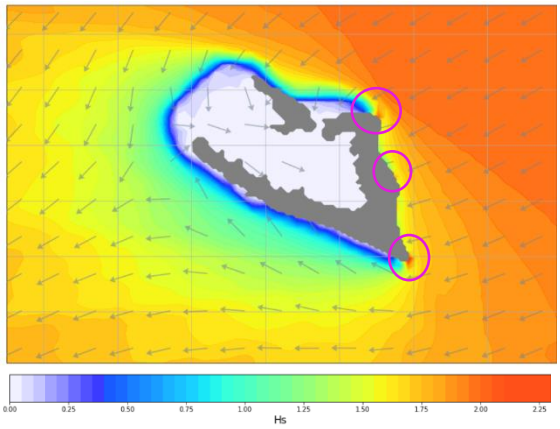


Ilustración 23: Altura de ola media en el percentil 50.

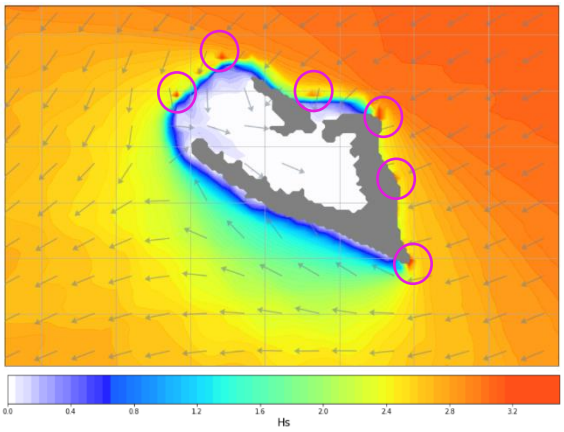


Ilustración 22: Altura de ola media en el percentil 90.

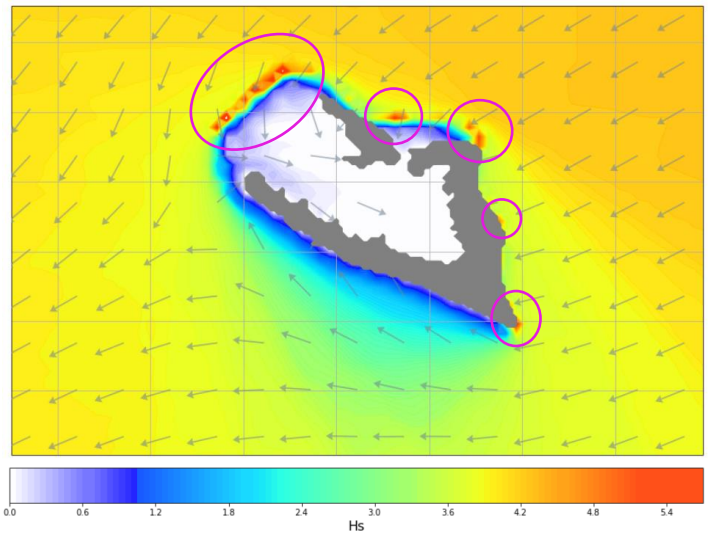


Ilustración 24: Altura de ola media en el percentil 99.

En las figuras 25 y 26, se muestran el periodo medio y de pico, respectivamente, para el percentil 50. Para el primero, el periodo se encuentra en 7.9 s mientras que para el de pico es de 10.18 s. Los periodos son constantes hasta pasar la barrera de coral, y dentro del atolón hay zona de periodos cortos correspondientes a olas que han roto y zonas con periodos largos. Podría deberse a que la onda se amplifica dentro del atolón.

En la figura 27, la dirección media de los picos representa la dirección de las olas de mayor energía, que en este caso es de 55º. A medida que avanza el oleaje, la dirección cerca de la costa se vuelve más dispersa y difícil de precisar. Por ejemplo, puede ocurrir reflexión por lo que se juntarían dos direcciones opuestas. También se ve dispersión en las entradas del atolón, ya que son zonas de gran refracción y de concentración de oleajes (círculos amarillos de la figura 27). Dentro del atolón, debido a la refracción y entrada del oleaje, las direcciones se encuentran entre 240 y 300º. El área de color blanco corresponde a una zona donde ya no llega el oleaje, por lo que ya no hay dirección, corresponderían a la zona más interior del atolón y a la zona de sombra junto a la costa.

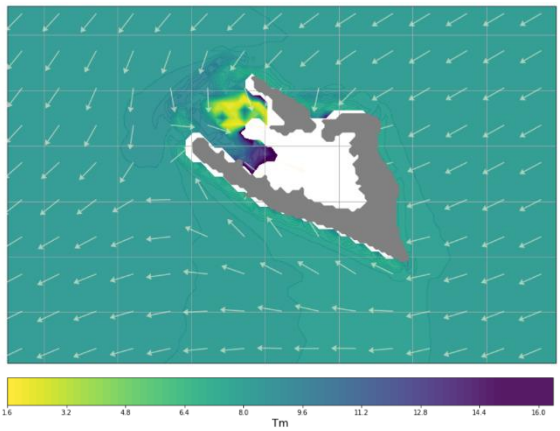


Ilustración 26: Periodo medio en el percentil 50.

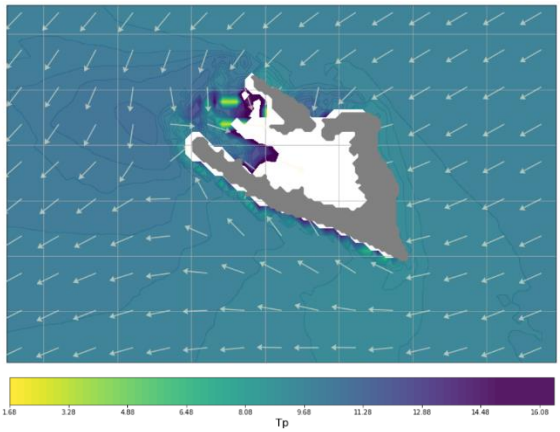


Ilustración 25: Periodo pico en el percentil 50.

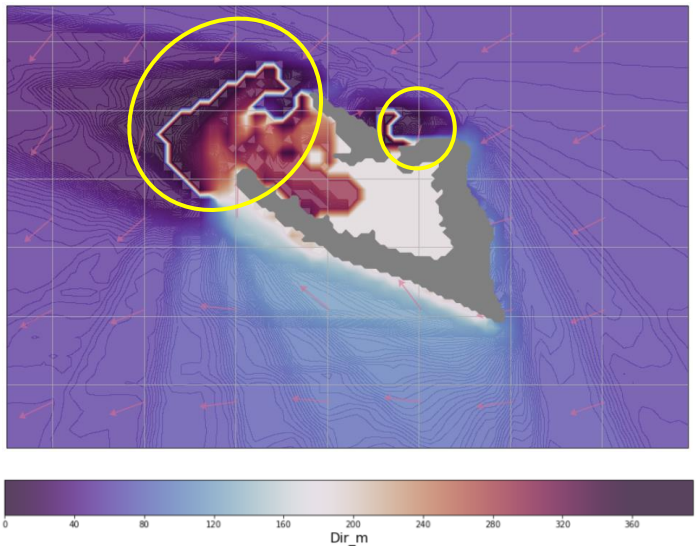


Ilustración 27: Dirección media de los picos.

Se ha realizado un análisis estacional del oleaje para altura de ola y periodo de pico, es decir, la media estacional de cada valor en el campo espacial de los mapas. Para la altura de ola, se observa que, como es de esperar, las olas con mayor energía ocurren en invierno con una media de 2.6 m de altura, y es donde más ocurren las concentraciones de oleaje por refracción y consecuente aumento de altura de ola en eso puntos. Seguidamente, las estaciones más energéticas son las de transición, otoño y primavera respectivamente. Por último, la estación menos energética es verano, con alturas de ola de 1.6m. Estas tres últimas, tienen una fuerte influencia de los vientos alisios, los cuales soplan de este a oeste desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales (zona de convergencia intertropical). Además de los vientos, en invierno se puede ver como la altura de ola también aparece des de la dirección norte. Esto es debido a los ciclones extratropicales del hemisferio norte que aparecen en esa estación.

Para el periodo de pico se observan valores bastante constantes entre estaciones entre 9 s (en verano) y 15 s (en invierno). Siendo invierno la estación con mayor periodo de pico y mayor altura de ola.

Altura de ola - Estaciones

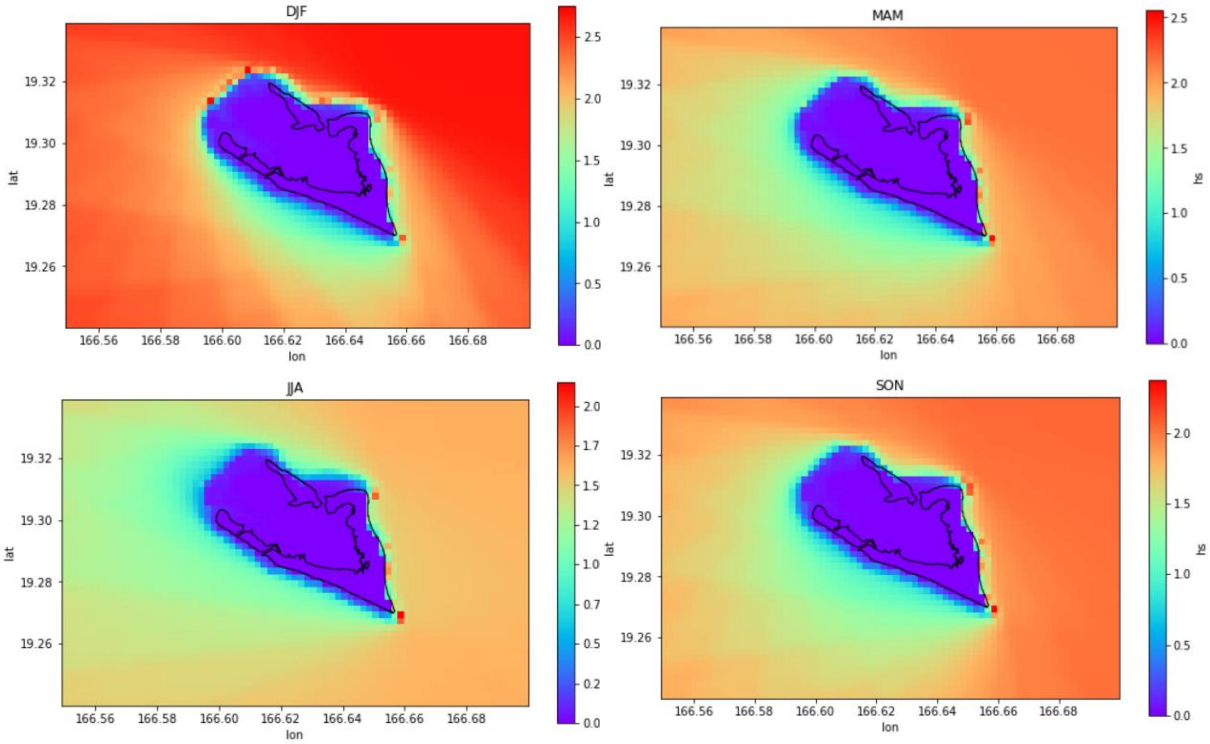


Ilustración 28: Altura de ola clasificada según estaciones: DCF (invierno), MAM (primavera), JJA (agosto) y SON (otoño).

Periodo de pico- Estaciones

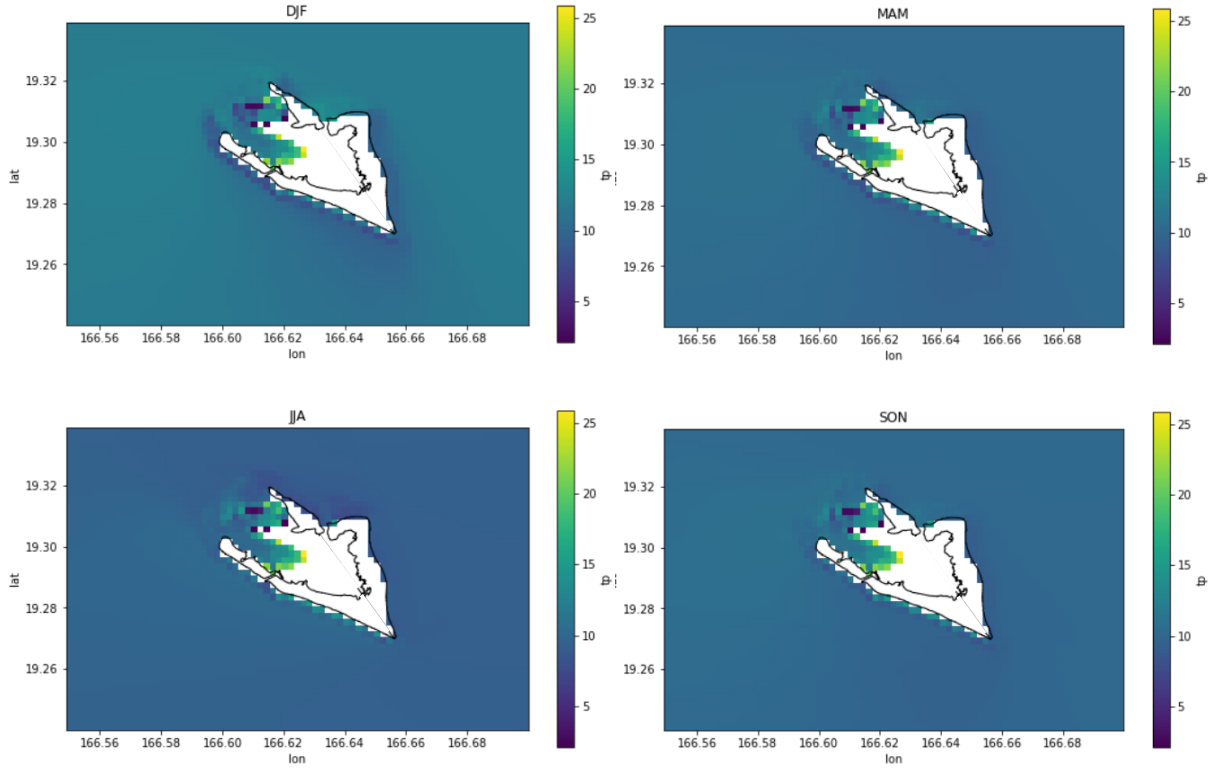


Ilustración 29: Periodo de pico clasificado según estaciones: DCF (invierno), MAM (primavera), JJA (agosto) y SON (otoño).

Parámetros agregados

Para los siguientes resultados se muestra la serie temporal de los parámetros agregados para un punto al norte de la isla, fuera del arrecife de coral:

En los gráficos se pueden ver los resultados según la media anual, la media mensual o por cada hora. La altura de ola oscila entre 0.5 m y 5 m, con excepciones más altas por razón de ciclones. Los Tp entre 7.7 s y 19.8 s, y las direcciones entre 300º y 100º, es decir, de WNW – ESE. Estos son valores muy parecidos a las estaciones iniciales este y oeste, ya que se trata de un punto exterior aunque cercano a la isla. Al ser una isla con una pendiente tan prominente, rápidamente se pasa del arrecife de coral a aguas profundas, por lo que la propagación se produce en aguas profundas donde según la teoría lineal no hay una dispación significativa de energía de la ola.

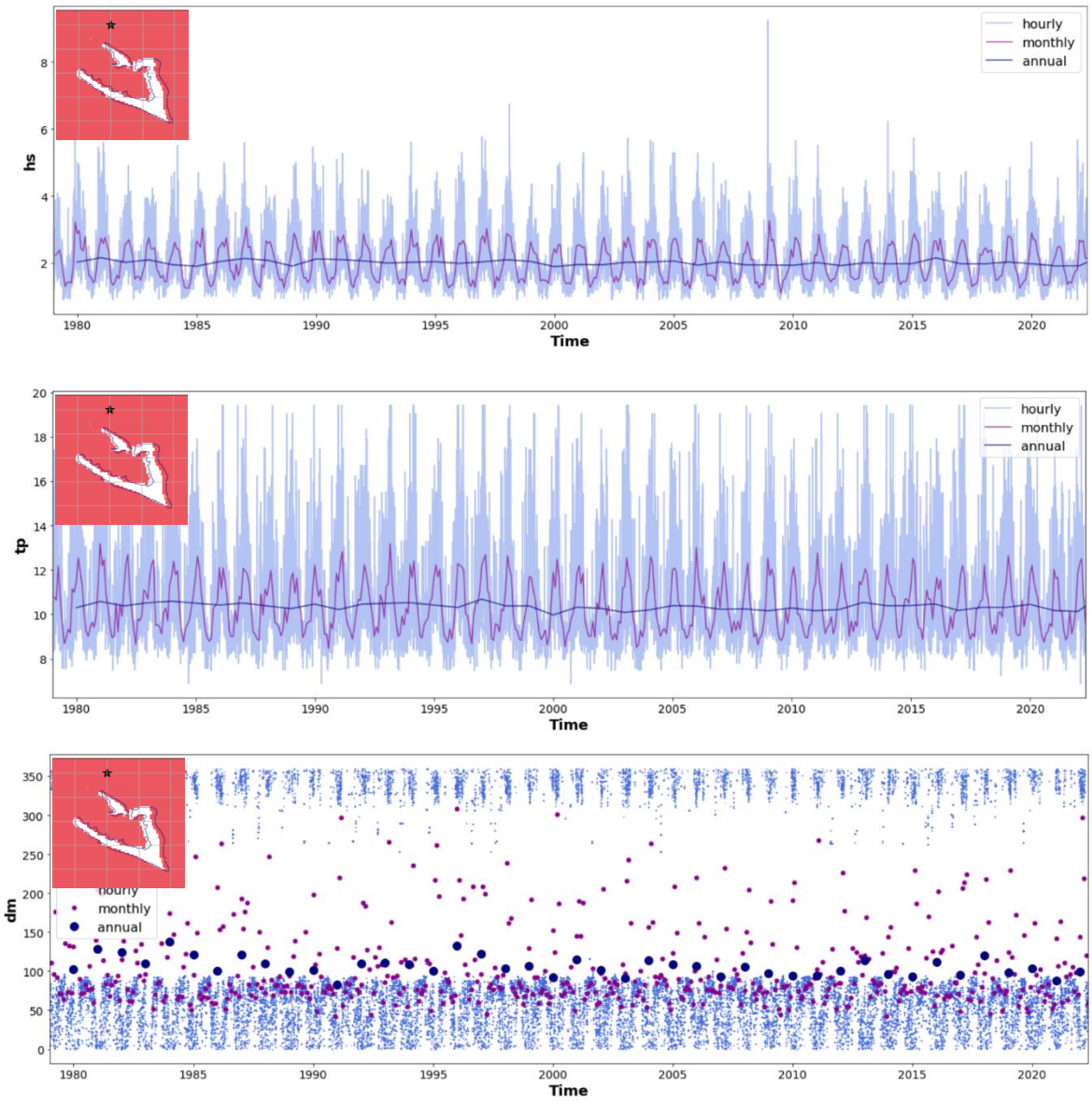


Ilustración 30: parámetros agregados de un punto propagado cercano a Wake.

5. Resultados II – Análisis de la onda infragravitatoria

5.1. Casos propagados con XBeach

A continuación, con imágenes de momentos específicos de la simulación del caso 1, se muestra como el modelo avanza hasta estabilizarse. Al tratarse de una malla circular, todo el contorno de la malla entra con altura de ola dirección 290º, por eso incluso en el contorno opuesto se puede ver una altura de 1m. Siendo el contorno absorbente, esta ola no se reflejará. Aun así, la zona próxima al contorno de creación de la malla (sombra) no proporciona resultados válidos.

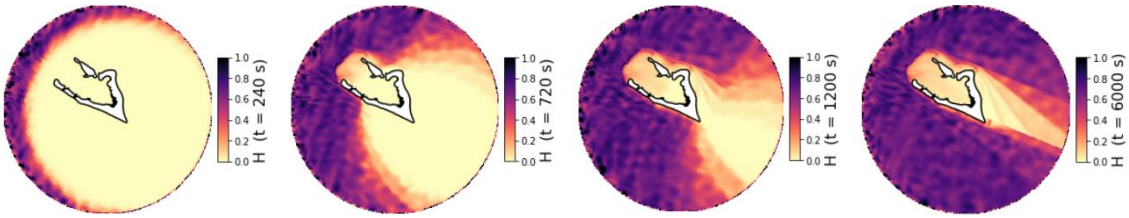


Ilustración 31: Avance del modelo para la altura de ola.

En el Anexo I se pueden ver los mapas de propagación con XBeach para los casos del 1 al 4 (altura de ola 1 m, Tp 10 s i diferentes direcciones), y los gráficos de superficie libre de los diferentes sensores analizados en cada caso. Se observa que la varianza de la superficie libre dentro del atolón para los 4 primeros casos es del orden de milímetros, mientras que para el quinto (el extremo), es del orden de centímetros. En la zona del arrecife de coral (dependiendo de la dirección del oleaje de cada caso) se distingue una línea de valores negativos, debido a que ocurre un setdown antes de que la ola se asomere.

Los puntos en el interior del atolón y el noreste de la isla (puntos 4 y 5) obtienen los mayores valores de superficie libre. Además, se distinguen pequeñas acumulaciones en las pequeñas bahías dentro del atolón, esto es provocado por la amplificación de la onda larga al acercarse a la costa. Los valores en el interior del atolón para los cuatro primeros casos oscilan entre el 0.03m y 0.07. Los puntos 4 y 5 para el caso 3 y 4, entre 0.07m y 0.1m.

En el caso 3 con el oleaje procedente del suroeste (230º), los puntos del exterior suroeste presentan mucha variación vertical. Esto podría deberse a resonancia entre el arrecife de coral y la costa.

En todos los casos el punto 18 dentro del atolón tiene un periodo de 20 minutos y una variación vertical de aproximadamente un centímetro. Se encuentra en una bahía pequeña dentro del atolón, en la que en las gráficas de varianza de la superficie libre de todos los casos, se puede ver una amplificación de la superficie libre. Por tanto, es posible que se produzca resonancia entre las paredes de esta bahía.

Para el caso 5 (Hs = 4m, Tp = 15s, Dir = 55º), se ha realizado una ejecución de 5 horas (descartando la primera hora) con un intervalo de datos cada 6s. De esta forma, se podrán clarificar los mayores periodos. Como se ve en la figura 32, en este caso los mayores valores de superficie libre se encuentran en la parte noreste exterior de la isla, llegando hasta 1 m con mucha variación vertical. Gracias a la simulación de 5 horas de la figura 33, se puede discernir un periodo 40 minutos para estos puntos. Esto podría ser debido a la oscilación de la ola a lo

largo de la costa. Además, el mayor valor corresponde al punto 5, al noreste de la isla, que oscila entre 0.6m y 0.8m. Mientras que en el interior oscilan entre 0.15m y 0.25m.

Se puede ver el efecto del canal noreste, ya que el punto 4 se encuentra justo en la entrada del canal y el punto 19 se encuentra justo después, lo que ha provocado una disminución del 45% de la superficie libre.

Caso 5 (Hs = 4m, Tp = 15s, Dir = 55º)

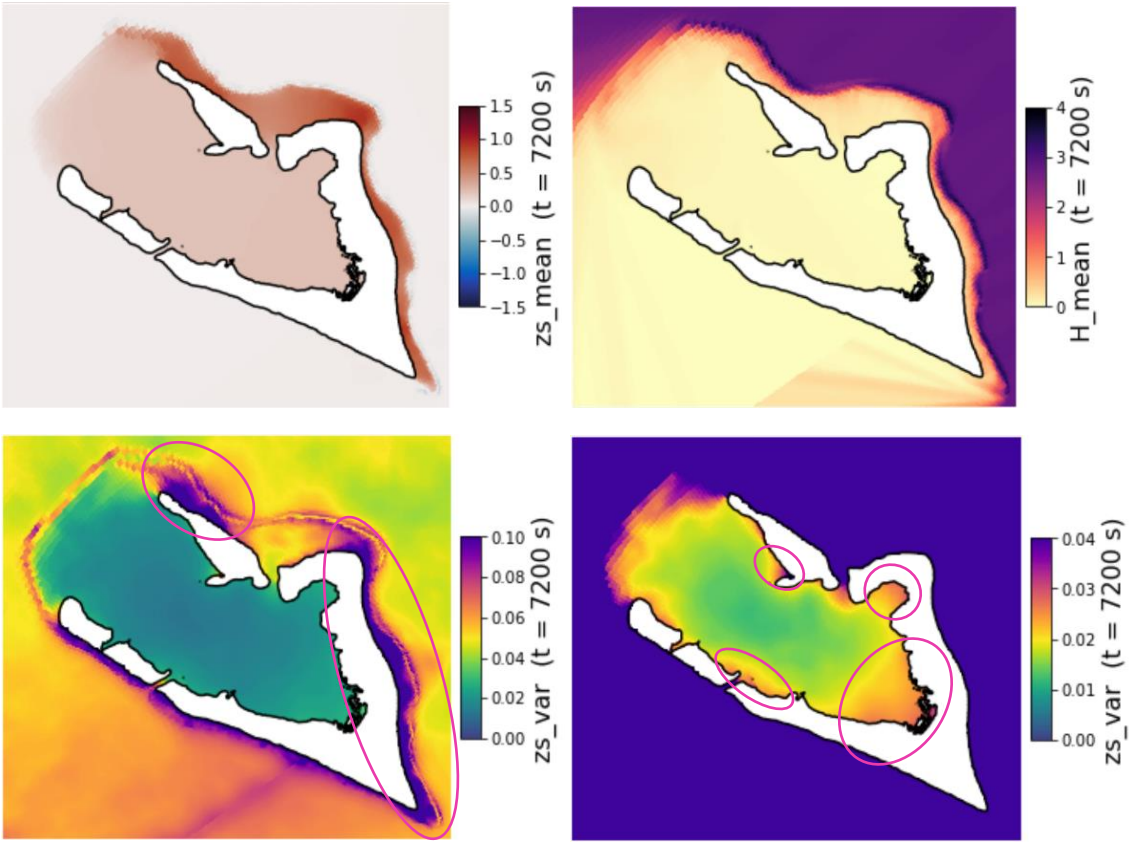
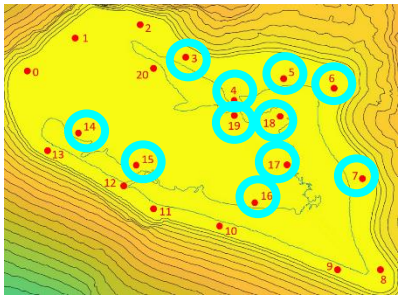


Ilustración 32: Propagaciones con Xbeach para el caso 5. Arriba a la izquierda, la media de la superficie libre; arriba a la derecha, la altura de ola media; abajo a la izquierda, la variación de superficie libre con una escala para que se vea el exterior del atolón: abajo a la derecha, la variacón de la superficie libre con una escala para que se vea el interior del atolón.

Puntos analizados en el caso 5:



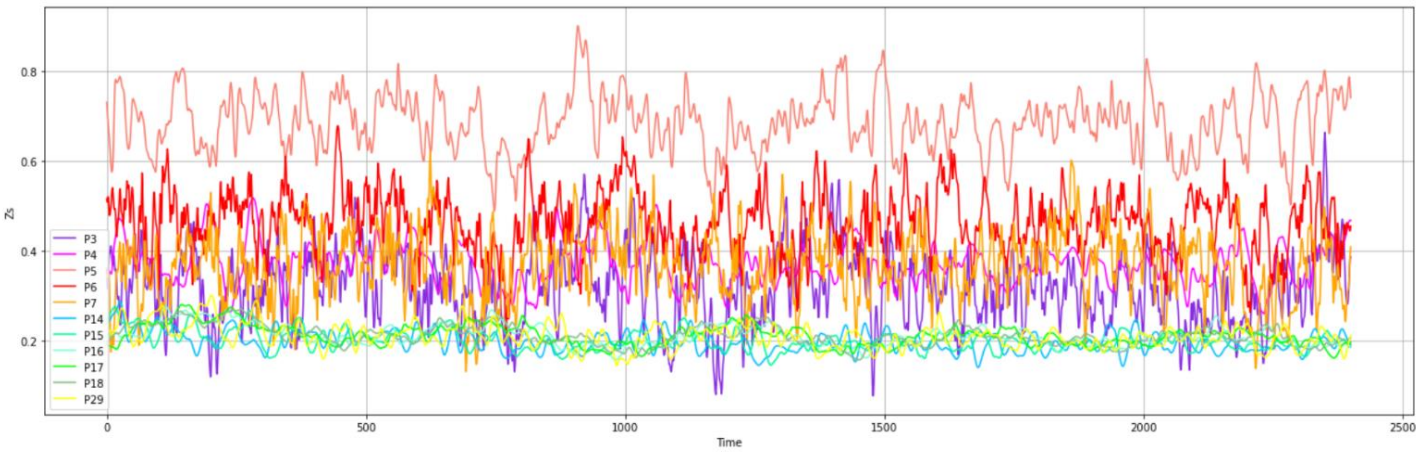
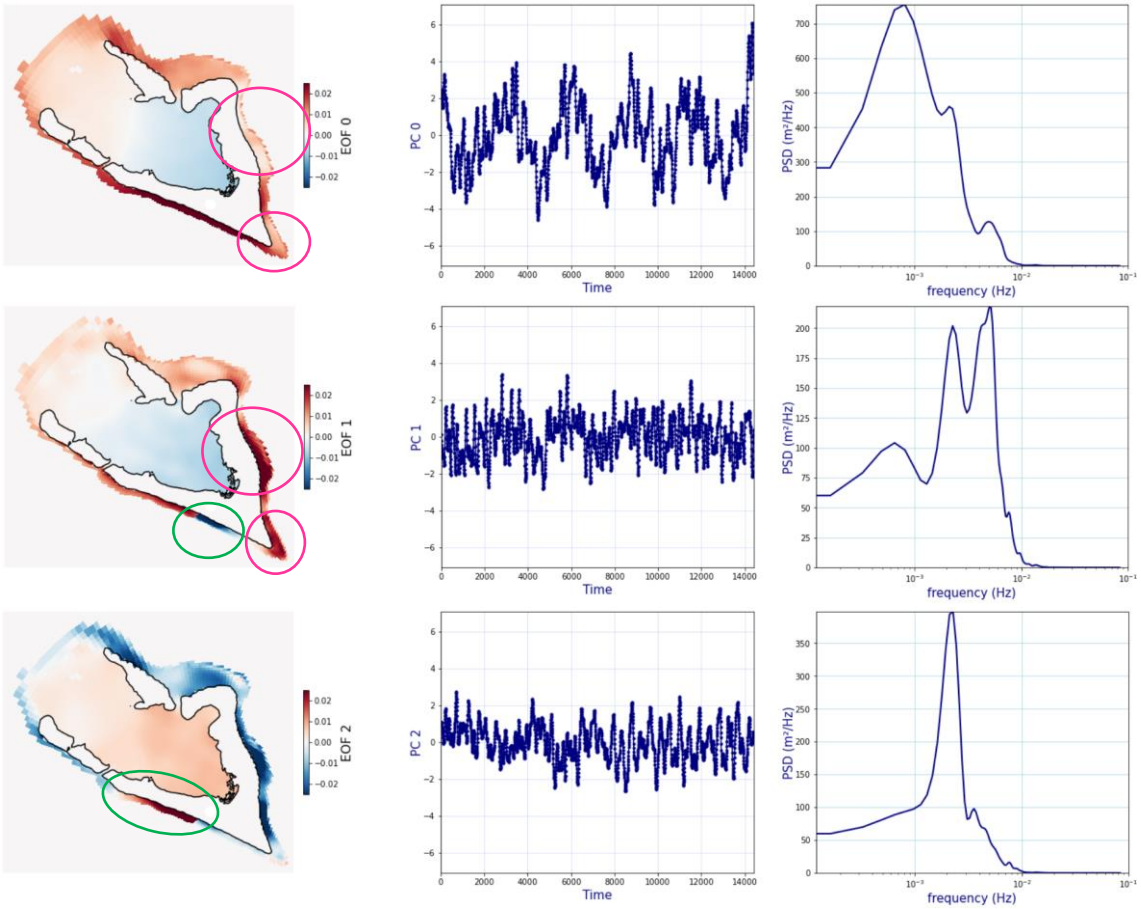


Ilustración 33: Superficie libre de los sensores para el caso 5.

5.1.1. PCA Caso 5

A continuación, las siguientes figuras muestran los cuatro primeros modos de oscilación principales en los mapas, el PC para cada tiempo de la oscilación y el respectivo espectro en los gráficos:



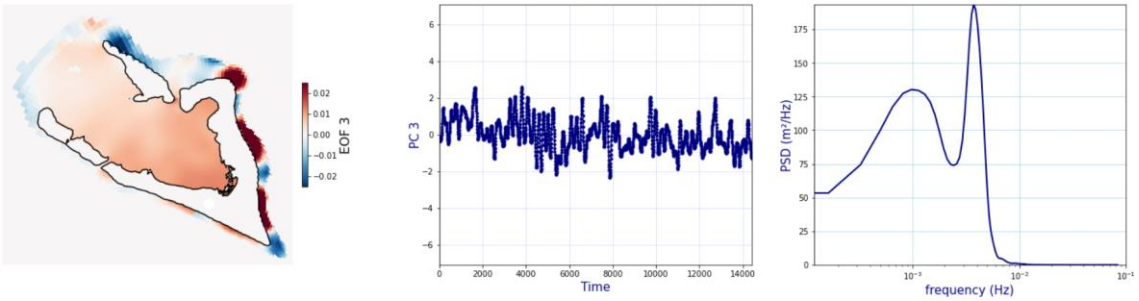


Ilustración 34: Análisis de PCA para el caso extremo.

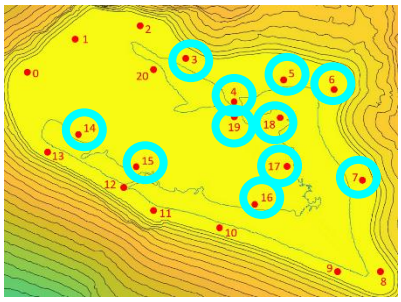
Para el modo de oscilación 0 se observa que el pico de mayor energía se encuentra en el orden de frecuencias de 10^{-4} con 760 m2/Hz, y aparecen dos picos más de menor energía hasta el orden de 10^{-3}, ya que, debido al desarrollo del oleaje irregular, se produce una transmisión de la energía hacia frecuencias más altas. El mayor pico correspondería a un periodo de 1428 s, es decir, 24 minutos. Por lo tanto, se trataría de una onda larga con mucha energía. En el mapa se observa una zona de antinodo que cubre la parte más interior del atolón, mientras que todo el exterior es nodo.

En el modo de oscilación 1, la energía pico ha disminuido hasta 220 m2/Hz. Además, no hay un pico de energía claro, ya que hay dos muy parecidos, el pico con menor frecuencia es de periodo 14 minutos y el mayor de casi 4 minutos. También aparece un pequeño aumento en frecuencias menores del mismo orden que el primer modo de oscilación, aunque con mucha menos energía (100 m2/Hz). Se ha señalado con dos círculos en el mapa, dos zonas de nodo con mayor energía en las cuales en el modo 0 presentaban poca energía, lo que podría significar un movimiento de oscilación longitudinal a lo largo de la costa. Además, aparece una nueva zona de antinodo en el sur de la isla.

En el modo de oscilación 2, las zonas de nodo y antinodo se invierten, siendo el exterior de la costa de la isla el antinodo. El espectro concentra la energía en la frecuencia 0.0012 (14 minutos) con 400 (m2/Hz), y al igual que en el modo 0, la energía se transmite a frecuencias mayores.

En el modo de oscilación 3, el pico de mayor energía tiene 200 m2/Hz con 7 minutos de periodo. Además, aparece una acumulación de energía en frecuencias menores llegando al orden 10^{-4} en frecuencia. En el mapa se distinguen varias zonas de nodo y antinodo en toda la costa exterior este de la isla, lo que podría suponer una oscilación entre la costa y el arrecife, o a lo largo de la costa. En este caso sería más notable que en los modos de oscilación 1-2.

Se analiza el espectro de los siguientes puntos:



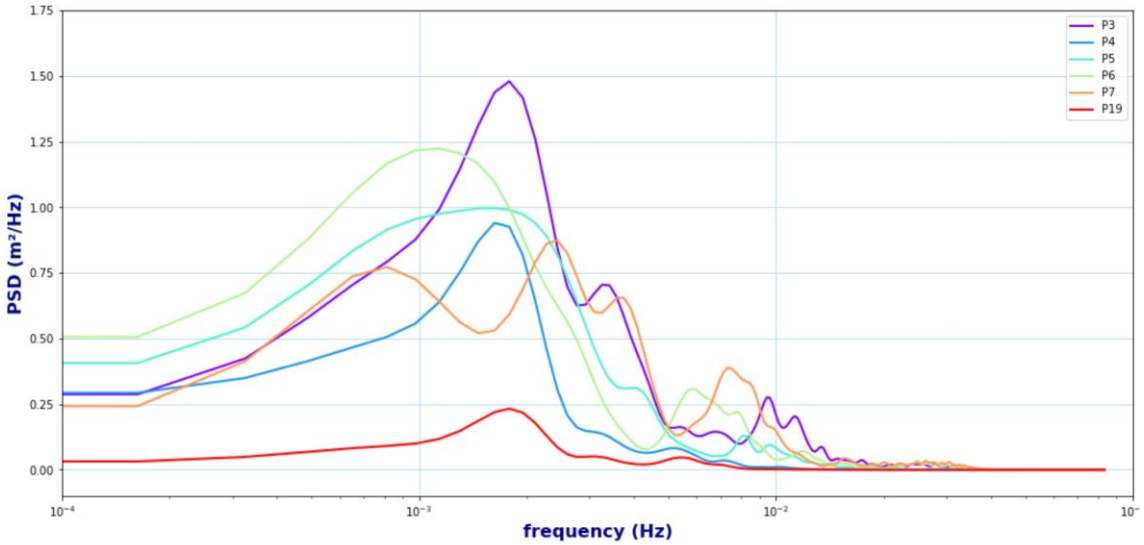


Ilustración 35: Espectros del oleaje asociados a los puntos exteriores.

En la figura 35 se muestran los puntos exteriores más el punto 19 justo después del canal. Se trata de picos de energía de frecuencias muy pequeñas del orden de 10^3-10^4, al igual que en los modos de oscilación. Destaca el punto 3 con mayor energía (hasta 150 m2/Hz), que coincide con una de las zonas de nodo con mayor energía en el modo de oscilación 0 (el más probable). Siguen el punto 6 y 5 con un pico de energía ancho con picos pequeños que migran a mayores frecuencias. A continuación, el pico 14 que se encuentra antes del canal, tiene la misma forma que el espectro del punto 19, justo después del canal, aunque ha disminuido la energía en 0.7 m2/Hz. El punto 7 presenta energía repartida en varios picos, este punto coincide con zonas de oscilación entre nodo y antinodo en todos los modos de oscilación anteriores.

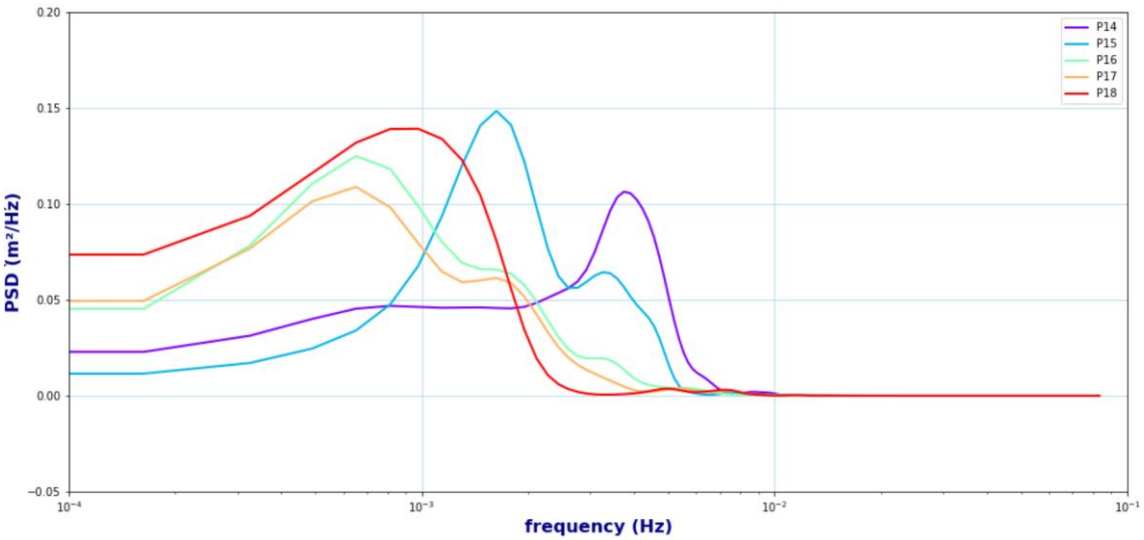


Ilustración 36: Espectros del oleaje asociado a los puntos interiores.

Referente a los puntos del interior, como se veía con el punto 19, la energía ha disminuido. Los puntos 16 y 17 se encuentran en las menores frecuencias, con un periodo de 33 minutos. Son los puntos más cercanos al interior del atolón. Cabe destacar que en la figura 32, en la variación de la superficie libre, se puede observar una amplificación de la superficie libre debido a la aproximación a la costa de la onda larga. En el punto 18, durante los casos anteriores, también se veía esta amplificación, ya que se trataba de una pequeña bahía. En este caso el pico de

energía equivale a un periodo de 20 minutos, coincidiendo con el periodo observado en este punto según los gráficos de superficie libre.

5.2. Análisis de sensibilidad de la rugosidad

Para este análisis se ha ejecutado el mismo caso 3 (Hs = 1m, Tp = 10s, Dir = 230º) sin los parámetros de rugosidad del suelo, con el objetivo de evaluar los efectos de este en los siguientes puntos:

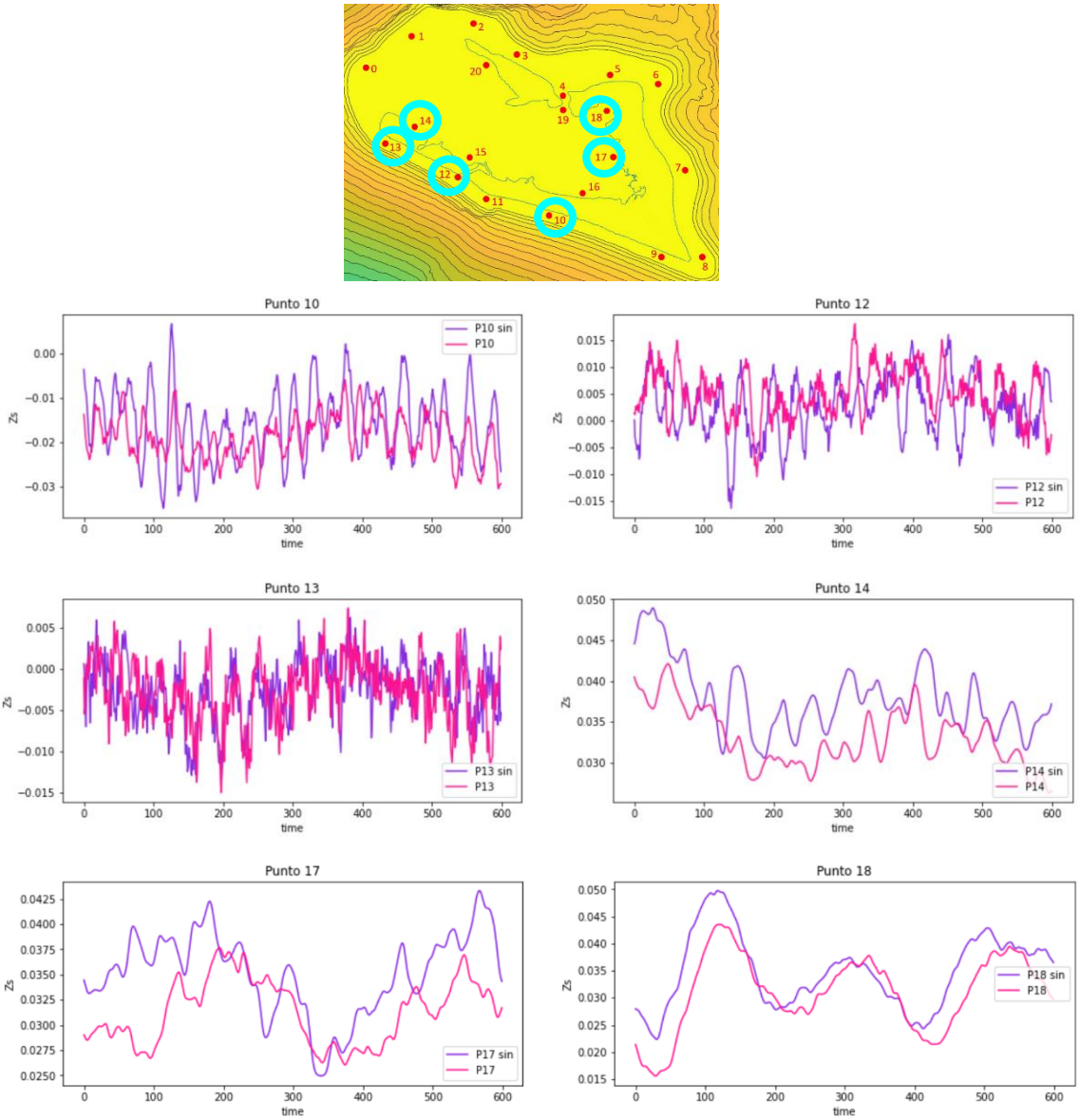


Ilustración 37: Comparación de los puntos elegidos con fricció y sin fricción.

En las figuras se muestra que los puntos del interior del atolón (14, 17 y 18) presentan los mayores valores de superficie libre oscilando entre 0.015 m y 0.05 m para el caso sin rugosidad. Además, la superficie libre de los casos sin rugosidad aumenta entre un 12% y 37% para estos puntos. Los puntos del exterior del atolón (10, 12 y 13) se encuentran en la parte sudoeste de la isla donde la distancia entre la costa y el arrecife es más corta. En los resultados con rugosidad,

ya se aprecia una mayor variación vertical con respecto a los otros puntos. Destacan el 10 y 12 por haber amplificado la variación, en el punto 10 hasta un 50%. La siguiente figura muestra un acercamiento de la costa sudoeste de la isla, en la superior sin rugosidad, y en la inferior con rugosidad. Se puede ver el aumento de la superficie libre media en la zona de los puntos 10 y 12.

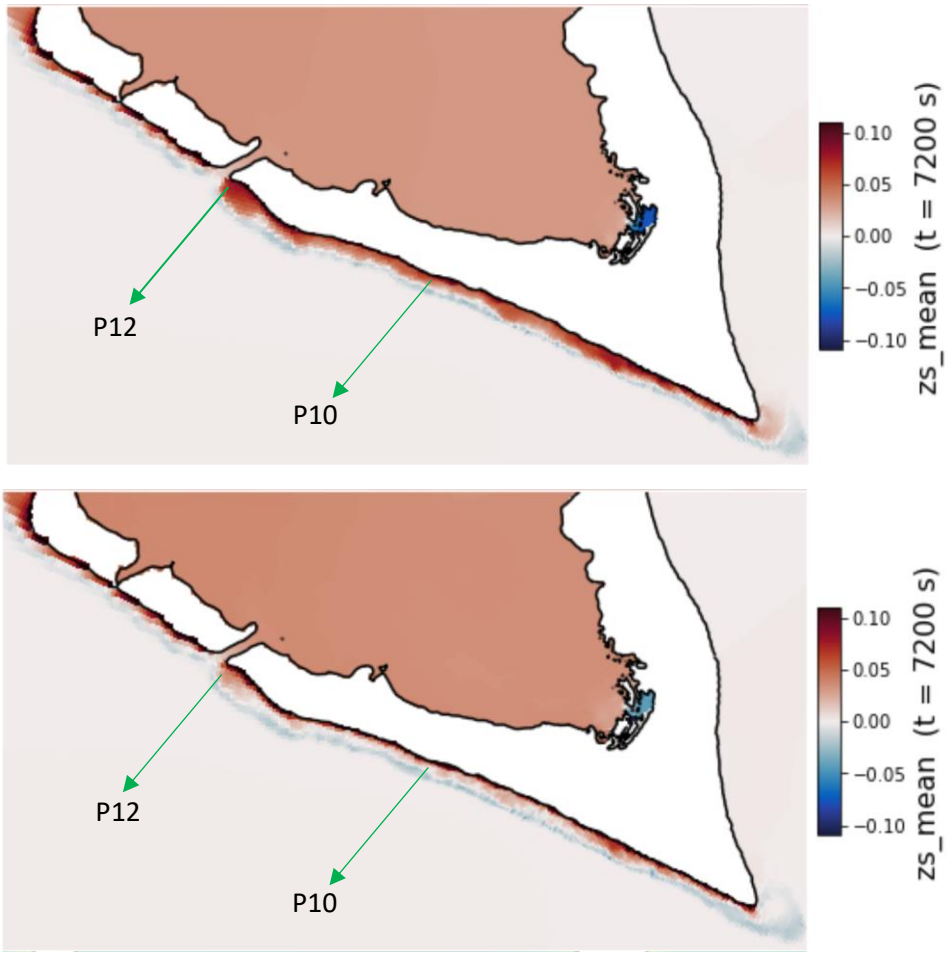


Ilustración 38: Acercamiento de la costa sudoeste de Wake. En la parte superior el caso 3 sin rugosidad. En la parte inferior el caso 3 con rugosidad.

6. Conclusiones

El Atolón de Wake presenta un clima marítimo típico de océano Pacífico central – norte, con predominancia de la dirección este del oleaje debido a los vientos alisios, y un aumento del oleaje con dirección norte en invierno debido a los ciclones extratropicales. No se caracteriza por grandes alturas de ola, sino que se encuentran en el rango de 0.5 y 3 m. Excepto para el percentil 99 de altura de ola donde se podía llegar hasta cuatro metros.

Al tratarse de un atolón con una gran pendiente, después del arrecife es muy rápido el proceso de alcanzar aguas profundas, por lo que los resultados de BINWAVES (método basado en la teoría lineal) son muy parecidos a las estaciones este y oeste analizadas al inicio del trabajo.

Para los cuatro primeros casos de XBeach se presentan mayores valores de superficie libre en la dirección N (0º) llegando hasta el 10% de la ola inicial de 1 m. Seguidamente las direcciones WNW (290º) y NW (335º), llegando hasta 8% de la ola inicial. Y, por último, la dirección que menos superficie libre provoca es la del SW (230º).

Los puntos que se encuentran entre la costa y el arrecife suelen presentar una mayor variación vertical, esto se puede ver en los gráficos de las EOFs, como en la zona exterior a lo largo de la costa existen zonas de nodos y antinodos.

El punto 18 se encuentra en una pequeña bahía en el norte del interior del atolón, este presenta en todos los casos la misma forma de onda con un periodo de ola de 20 minutos, y suele tener los mayores valores de superficie libre de la zona interior. Esto podría deberse a resonancia entre las paredes de la bahía.

En todos los casos se observa una acumulación del oleaje cerca de la costa en el interior del atolón. Esto es debido a que la onda larga se amplifica al llegar a la costa y aumenta en superficie libre. Este proceso se ve más acusado en el caso extremo y podría ser el causante de futuras inundaciones en el interior del atolón. Aun así, los mayores valores de superficie libre se encuentran en el exterior noreste, llegando hasta 0.9 m (un 22.5% de la ola de 4 m), y en los puntos del interior con una media de 0.23 m (un 6% de la altura de ola inicial).

Teniendo en cuenta que la dirección media de los picos es 55º (NE), y que en general, los mayores valores de superficie libre aparecen en el exterior norte y noreste de la isla, convierte la costa exterior noreste de la isla en la más vulnerable.

Con la simulación de 5 horas, desestimando la primera hora, se observa que los puntos del exterior tienen un periodo de cuarenta minutos con mayor variación vertical. Enlazando estos resultados con los gráficos de las EOFs, se puede llegar a la conclusión de que esto es debido a la oscilación de la onda larga a lo largo de la costa noreste.

Todos los espectros asociados a las EOFs son de periodo largo, ya que se trata de modos de oscilación principales. A medida que aumentan los EOFs, el espectro va aumentando en frecuencias y aparecen periodos más cortos.

En el análisis de sensibilidad de la rugosidad del caso 3, se ve como la resonancia en los puntos entre la costa y el arrecife de coral se ve modificada, ya que la variación vertical aumenta en los puntos 10 y 12. Además, dentro del atolón aumenta la superficie libre entre un 12% y un 37%.

6.1. Limitaciones del trabajo

En este trabajo se ha utilizado una malla circular de resolución variable para las ejecuciones con XBeach. Por un lado, esto permitía conseguir que las condiciones de contorno rodearan la isla como podría pasar en un caso real. Del otro lado, la zona donde se encontraban los bordes de contorno de la malla no se podía utilizar, ya que no se puede conectar un lado con otro de la malla. Por esto, para cada caso, la malla ha sido rotada para que la zona de sombra de la isla coincida con los bordes de contorno de la malla. Se trata de contornos absorbentes, que, aunque no ocasionen ruido, tampoco consiguen condiciones reales en las que el oleaje refractado de cada lado de la isla se uniría.

Desafortunadamente, el área de estudio no consta de boyas que se puedan usar para la validación. Aun así, esta metodología de downscaling híbrido ha sido utilizada y validada con éxito en otras zonas muy parecidas, como en las islas de Tonga en el Pacífico sur. Una zona que, como en Wake, es de cota baja, con una pendiente pronunciada, y recibe oleajes multidireccionales.

6.2. Futuras líneas de investigación

En el futuro, sería interesante realizar la reconstrucción histórica en el interior del atolón. A partir de las propagaciones con BINWAVES, se podría crear un superpunto (Cagigal et al., 2022 *in prep.*) con la información espectral de varios puntos reconstruidos alrededor de la costa cercana a Wake. Este método permitiría captar toda la energía que se aproxima al área de interés. Se propagaría la información del superpunto con XBeach y, mediante el uso de un metamodelo, se obtendría una librería de casos sintéticos, a partir de la cual se haría la reconstrucción histórica de dentro del atolón. Esto permitiría la creación de un forecast, es decir, una previsión del clima en el atolón y poder crear un sistema de alerta temprano de inundaciones.

Otra opción, sería utilizar un modelo numérico capaz de predecir la inundación en la costa, como Lisflood, con la intención de observar hasta dónde puede llegar la inundación y si puede afectar a las instalaciones de la isla.

7. Bibliografía

Alves, J., 2006. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. Ocean Model 11 (1–2), 98–122. http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2004. 11.007

Cagigal, L., Mendez F., Ricondo, A., Ripoll, N. (In preparation) BinWaves: Hybrid Downscaling of Multimodal Wave Systems to Nearshore Areas. To be submitted to Ocean Modelling

Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, *58*(9), 851–862. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007

Cheriton, O. M., Storlazzi, C. D., and Rosenberger, K. J. (2016). Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low-frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding. J. Geophys. Res. Oceans 121, 3121–3140. doi: 10.1002/2015JC0 11231

Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoldi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. Nat. Commun. 5, 3794. http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4794.

Ford, M., Merrifield, M. A., & Becker, J. M. (2018). Inundation of a low-lying urban atoll island: Majuro, Marshall Islands. *Natural Hazards*, *91*(3), 1273–1297. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3183-5

Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 ad. Clim. Dyn. 34 (4), 461–472. https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-008-0507-2

Hasselmann, D., Dunckel, M., Ewing. J., 1973. *[15200485 - Journal of Physical Oceanography] Directional Wave Spectra Observed during JONSWAP 1973*. (n.d.).

"Monster' Typhoon Ioke Makes Direct Hit on Wake Island". VOA News. October 31, 2009.

Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. Science 328 (5985), 1517–1520.

NRL (2006) Digital bathymetry data base 2-minute resolution v. 3 (DBDB2). Retrieved from https://www7320.nrlssc.navy.mil/DBDB2_WWW/v3.0/NRLCOM_dbdb2.html

Pearson, S.G., Storlazzi, C., van Dongeren, A.R., Tissier, M.F.S., Reniers, A.J.H.M., 2017. A Bayesian-based system to assess wave-driven 1 flooding hazards on coral reef lined coasts. J. Geophys. Res.: Oceans 122 (10), 117. https://doi.org/10.1002/ 2017JC013204. 099–10.

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), 2022, "Tide Gauge Data", Retrieved 29 Aug 2022 from http://www.psmsl.org/data/obtaining/.

Quataert, E., Storlazzi, C., van Rooijen, A., Cheriton, O., and van Dongeren, A. (2015). The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines. Geophys. Res. Lett. 42, 6407–6415. doi: 10.1002/ 2015GL064861

Reynolds, M.H., Courtot, K.N., Berkowitz, P., Storlazzi, C.D., Moore, J., Flint, E., 2015. Will the effects of sea-level rise create ecological traps for pacific island seabirds? edited by P. Quillfeldt. PLoS One 10 (9), e0136773. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0136773

Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, *134*, 103–123. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.004

Roelvink, D., Van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., De Vet, L., Nederhoff, K. (2015). XBeach Manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Tecnhology.

Rueda, A., Cagigal, L., Pearson, S., Antolínez, J. A. A., Storlazzi, C., van Dongeren, A., Camus, P., & Mendez, F. J. (2019). HyCReWW: A Hybrid Coral Reef Wave and Water level metamodel. *Computers and Geosciences*, *127*, 85–90. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.03.004

Semedo, A., Weisse, R., Behrens, A., Sterl, A., Bengtsson, L., Guenther, H., 2013. Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century. J. Clim. 26 (21), 8269–8288. http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00658.1.

Shope, J.B., Storlazzi, C.D., Erikson, L.H., Hegermiller, C.A., 2016. Changes to extreme wave climates of islands within the western tropical Pacific throughout the 21st century under RCP 4.5 and RCP 8.5, with implications for island vulnerability and sustainability. Glob. Planet. Chang. 141, 25–38. http://dx.doi.org/10.1016/j. gloplacha.2016.03.009.

Shope, J. B., Storlazzi, C. D., & Hoeke, R. K. (2017). Projected atoll shoreline and run-up changes in response to sea-level rise and varying large wave conditions at Wake and Midway Atolls,

Northwestern Hawaiian Islands. *Geomorphology*, *295*, 537–550. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.002

Simon J. Holgate, Andrew Matthews, Philip L. Woodworth, Lesley J. Rickards, Mark E. Tamisiea, Elizabeth Bradshaw, Peter R. Foden, Kathleen M. Gordon, Svetlana Jevrejeva, and Jeff Pugh (2013) New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. Journal of Coastal Research: Volume 29, Issue 3: pp. 493 – 504. doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.

Smith, G. A., Hemer, M., Greenslade, D., Trenham, C., Zieger, S., & Durrant, T. (2021). Global wave hindcast with Australian and Pacific Island Focus: From past to present. *Geoscience Data Journal*, *8*(1), 24–33. https://doi.org/10.1002/gdj3.104

Tolman, H.L. (2008). A mosaic approach to wind wave modeling. Ocean Modelling, 25(1-2), 35–47. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500308000863?via%3Dihub

Van Dongeren, A., Lowe, R., Pomeroy, A., Trang, D. M., Roelvink, D., Symonds, G., & Ranasinghe, R. (2013b). Numerical modeling of low-frequency wave dynamics over a fringing coral reef. *Coastal Engineering*, *73*, 178–190. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.004

Vermeer, M., Rahmstorf, S., 2009. Global sea level linked to global temperature. Proc. Natl. Acad. Sci. 106 (51), 21527–21532.

"1967 Central Pacific Tropical Cyclone season". Central Pacific Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration. May 4, 2007. Archived from the original on July 2, 2017. Retrieved December 10, 2011.

8. Anexo I

Caso 1 (Hs = 1m, Tp = 10s, Dir = 290º)

Las siguientes figuras muestran estadísticas de altura de ola y superficie libre. En la parte izquierda superior la altura de ola máxima, debajo la altura de ola media y la última es la variación de la altura de ola. En la parte central superior se muestra la superficie libre máxima, debajo la superficie libre media, y en último la variación. En la parte derecha se ven dos acercamientos de la superficie libre y media y de la altura de ola media.

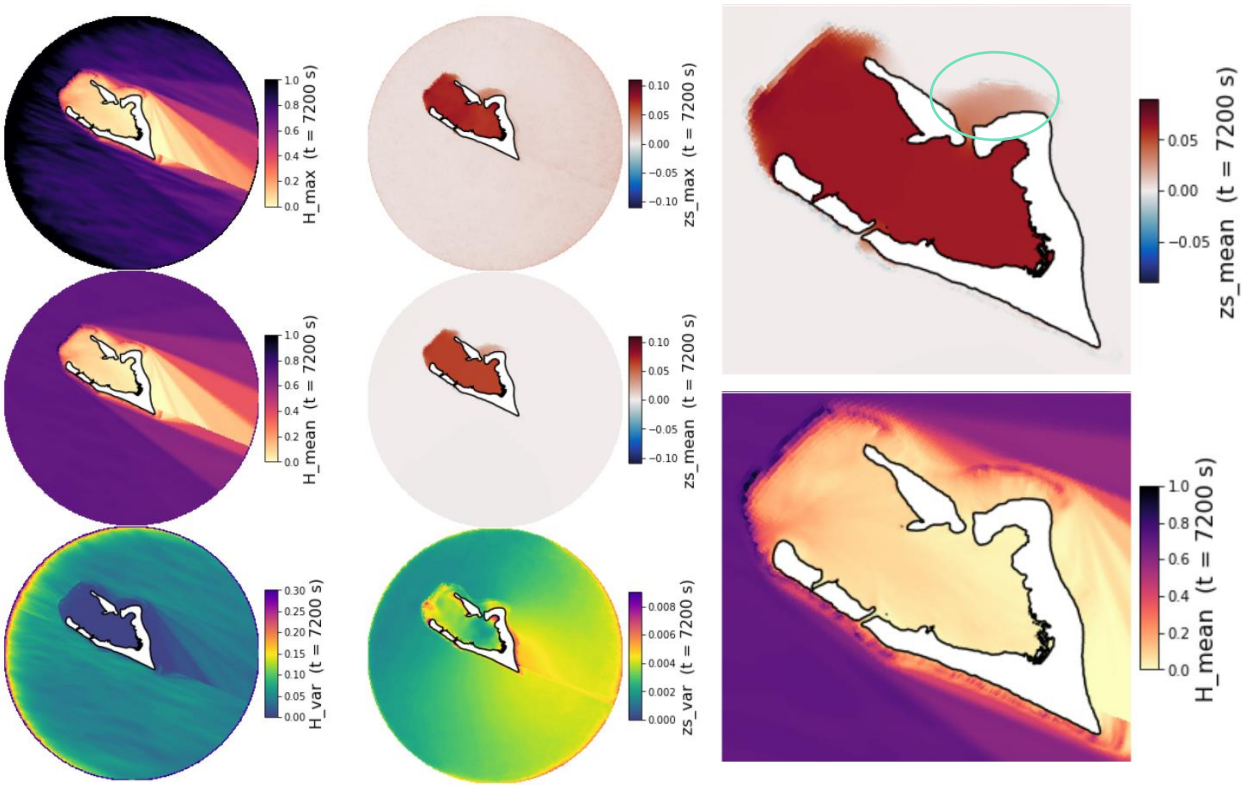
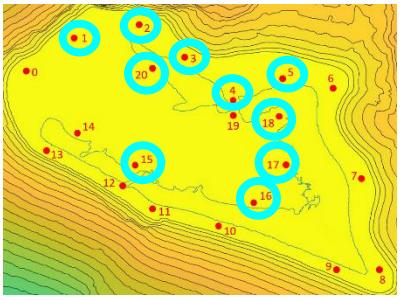


Ilustración 39: Propagaciones con Xbeach para el caso 1.

Para este caso, se han seleccionado los siguientes puntos para analizar:



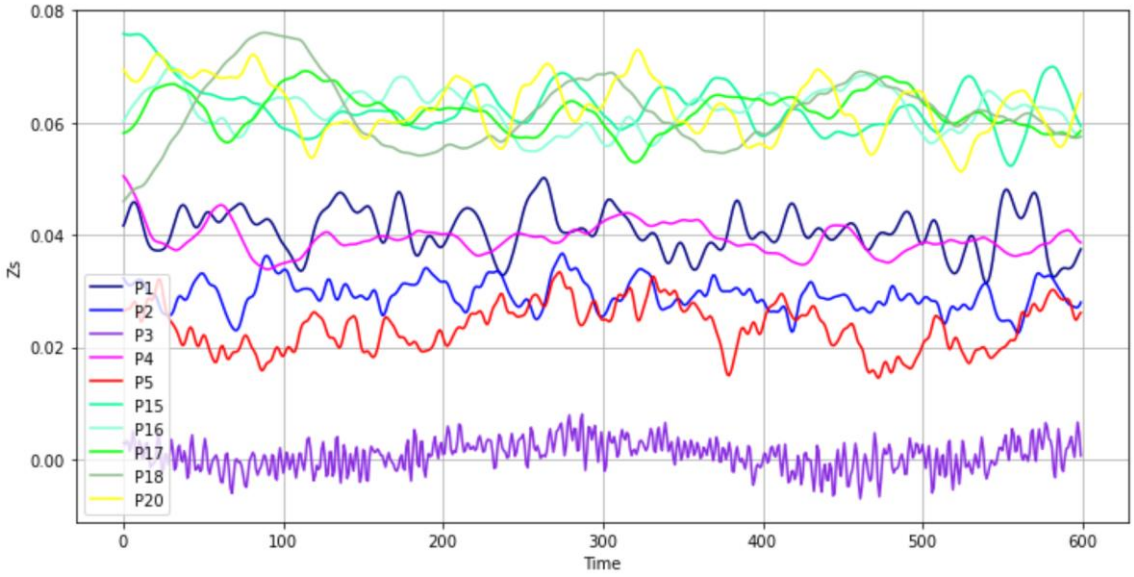


Ilustración 40: Superficie libre de los sensores para el caso 1.

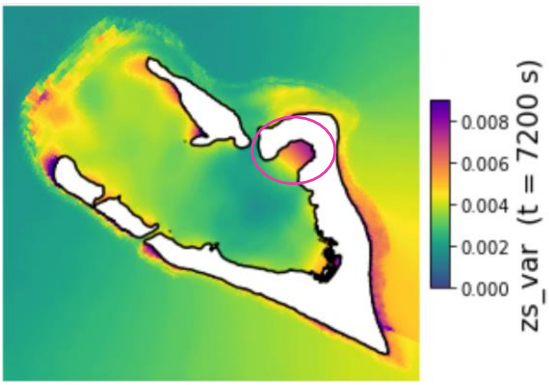
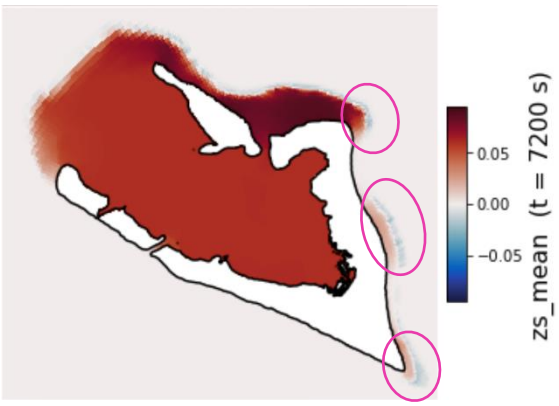
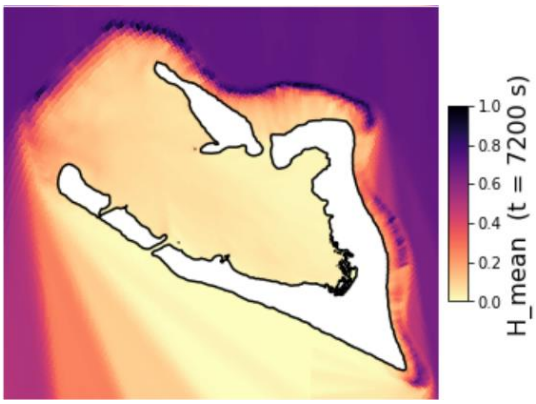


Ilustración 41: Acercamiento de la varianza de superficie libre para el caso 1. El círculo rosa corresponde a la zona de la pequeña cuenca donde se encuentra el punto 18.

Caso 2 (Hs = 1m, Tp = 10s, Dir = 0º)





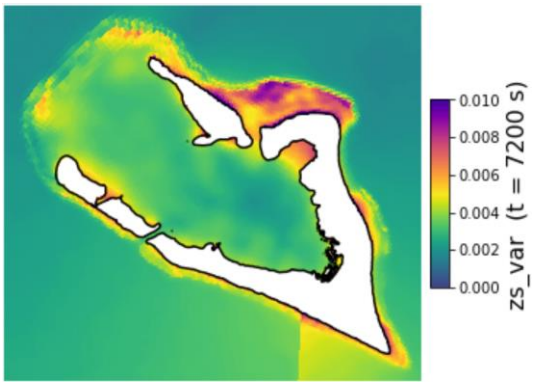


Ilustración 42: Propagaciones con Xbeach para el caso 2. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre.

Para este caso, se han seleccionado los siguientes puntos para analizar:

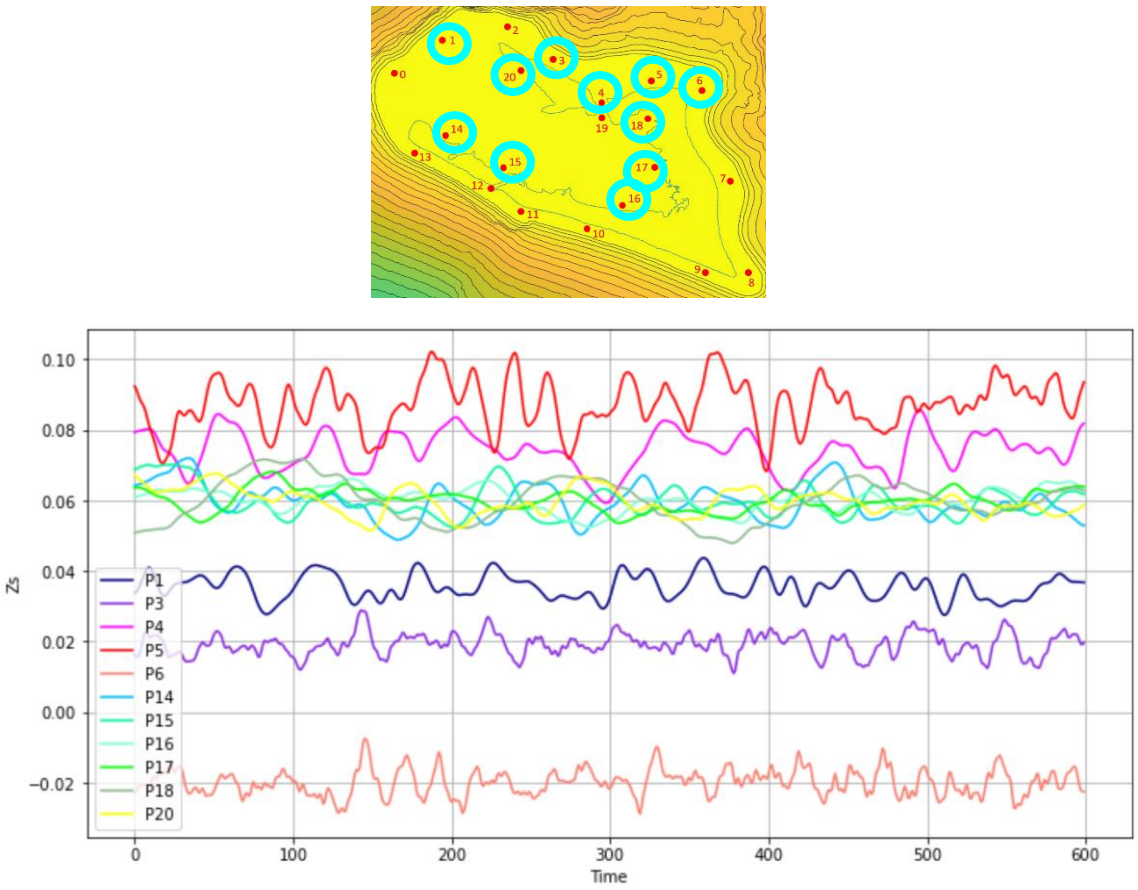


Ilustración 43: Superficie libre de los sensores para el caso 2.

El punto 6, aunque se encuentra en la zona exterior, es negativo ya que coincide con una zona de setdown, como se ve el mapa de superficie libre media.

Caso 3 (Hs = 1m, Tp = 10s, Dir = 230º)

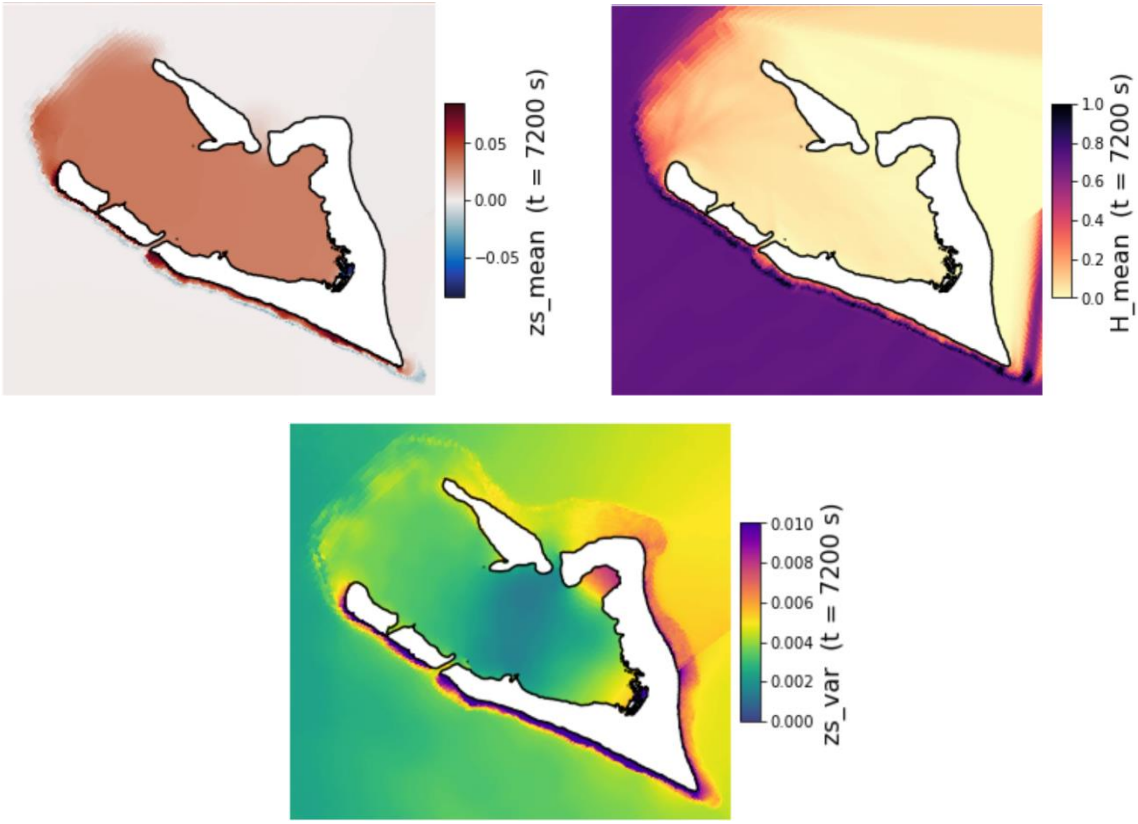


Ilustración 44: Propagaciones con Xbeach para el caso 3. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre.

Para este caso, se han seleccionado los siguientes puntos para analizar:

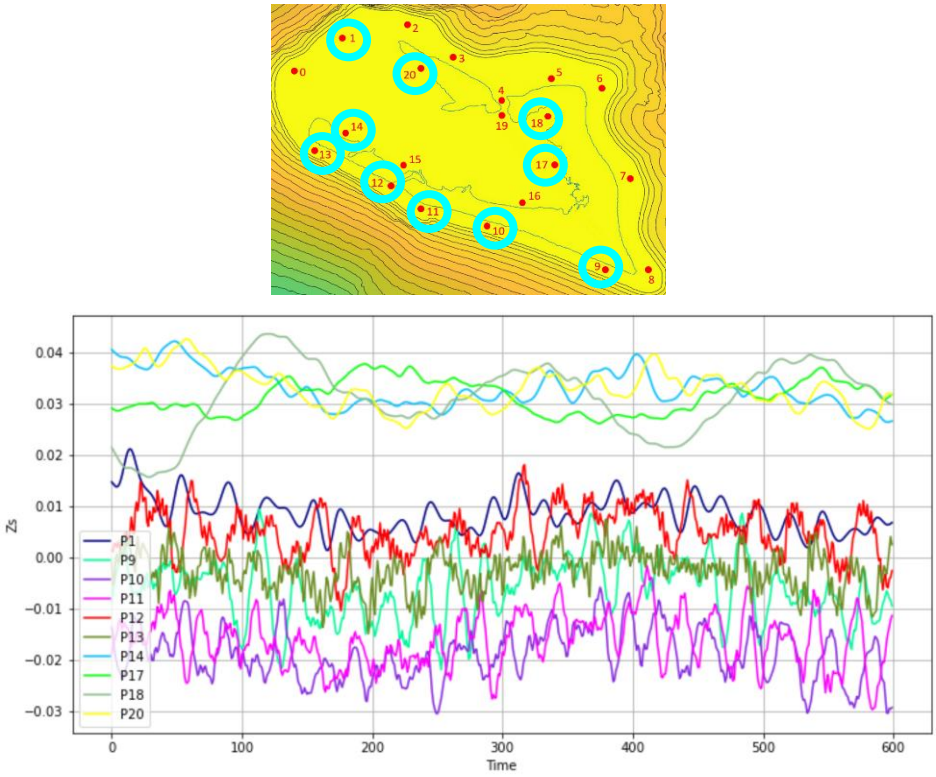


Ilustración 45: Superficie libre de los sensores para el caso 3.

Caso 4 (Hs = 1m, Tp = 10s, Dir = 335º)

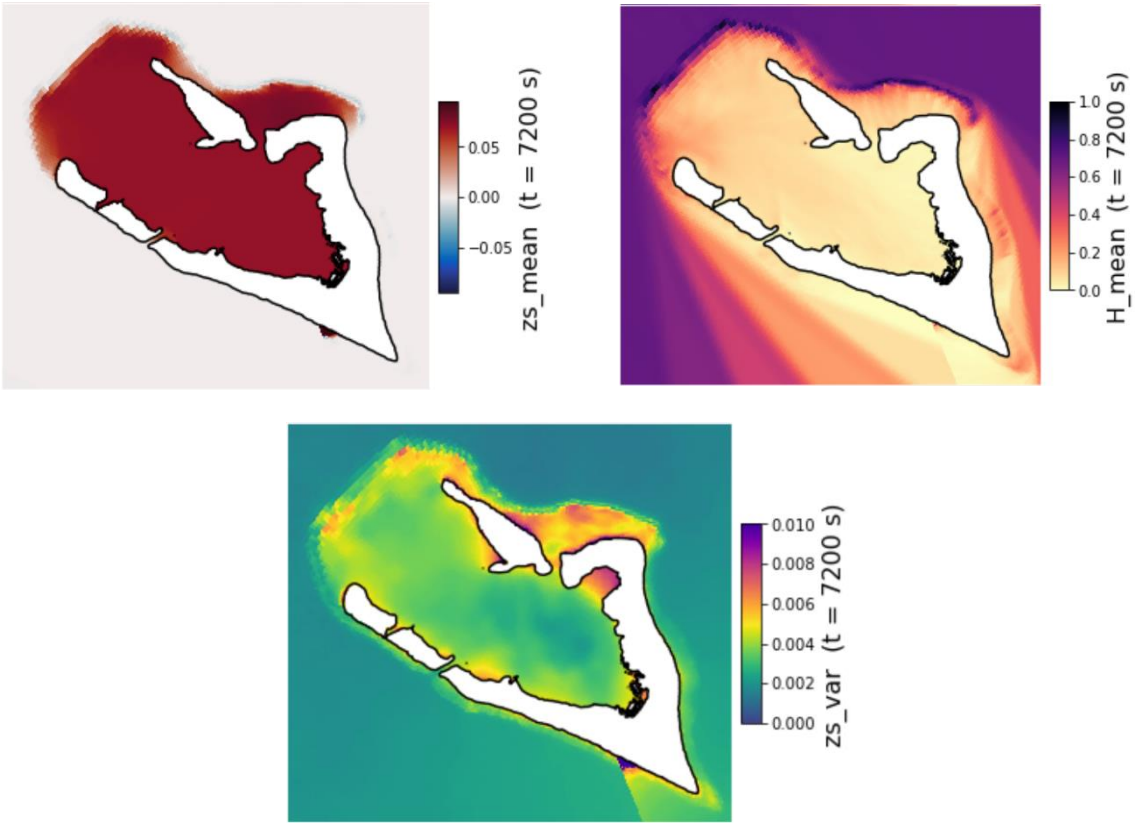


Ilustración 46: Propagaciones con Xbeach para el caso 4. Arriba a la izquierda, superficie libre media; arriba a la derecha, altura de ola media; abajo variación de la superficie libre.

Para este caso, se han seleccionado los siguientes puntos para analizar:

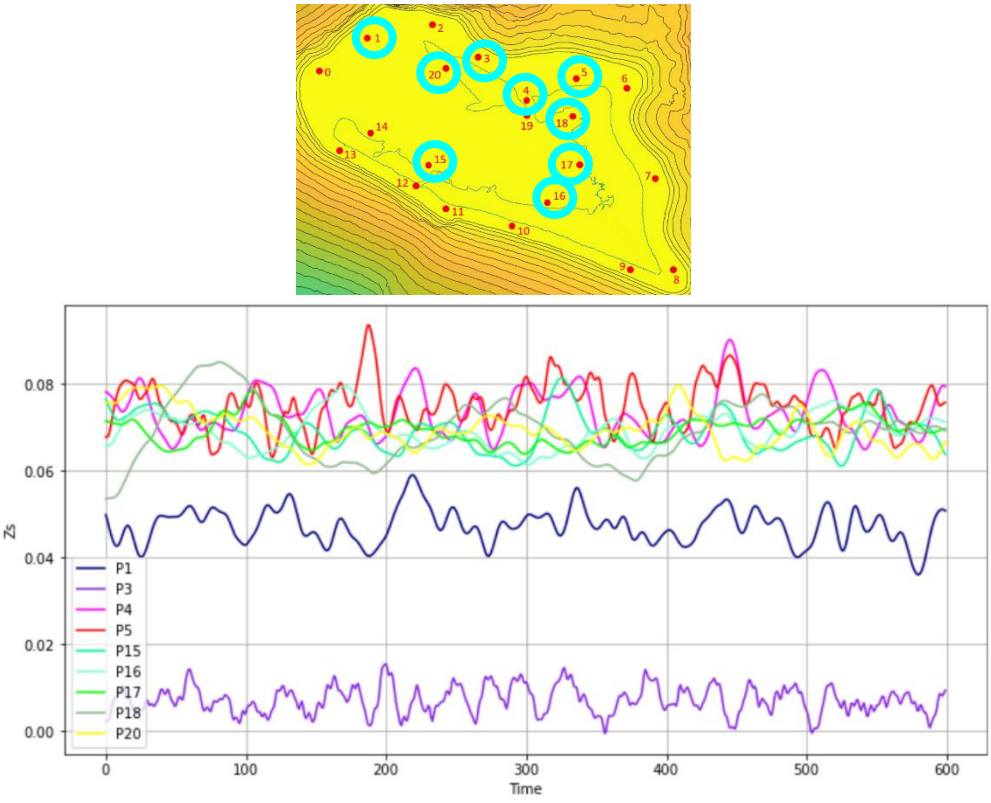


Ilustración 47: Superficie libre de los sensores para el caso 4.