



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



Zonas de generación y climatología de los swells en las Islas Marshall.

Trabajo realizado por:

Paula Casal Rey

Dirigido:

Fernando J. Méndez Incera

Ana Cristina Rueda Zamora

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería Costera y Portuaria**

Santander, octubre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER



RESUMEN



1. MOTIVACIÓN

Los motivos que llevaron a la realización de este proyecto son los siguientes.

1. La actual caracterización del clima marítimo que se realiza en estudios de climatología del oleaje resulta insuficiente para regiones como las Islas Marshall, en las cuales pueden llegar al mismo tiempo hasta 10 swells.
2. El cambio climático, uno de los causantes de las severas inundaciones en esta región del Pacífico, está afectando a los patrones de circulación atmosféricos, responsables de la generación de oleaje, por lo que es de vital importancia el conocimiento de estos procesos para que las naciones insulares preparen sus estrategias de adaptación.
3. La navegación tradicional entre las islas Marshall la basan en una interpretación de la llegada de los swells, identificando a que distancia están de tierra mediante la observación de la obstrucción de la propagación de los mismos.

2. OBJETO DEL ESTUDIO

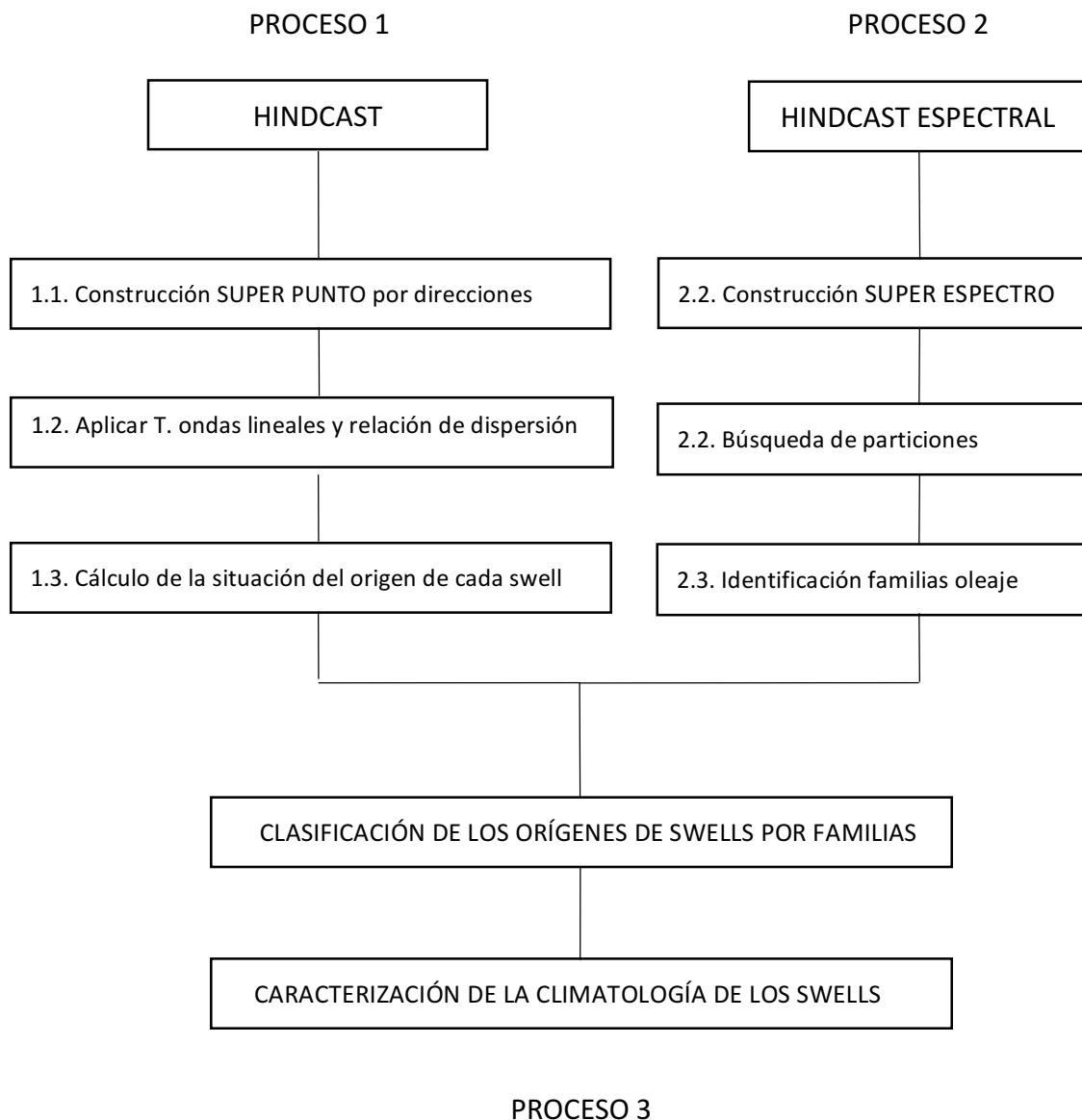
El fin de este estudio es determinar las zonas de generación de los swells que llegan a la Isla de Majuro, clasificarlas por familias y caracterizar la climatología de los swells, desarrollando una metodología para que los archipiélagos del pacífico puedan prever las inundaciones y puedan prepararse contra el cambio climático.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se propone se puede sintetizar de la siguiente manera:

1. Identificación del origen de los swells que llegan a Majuro.

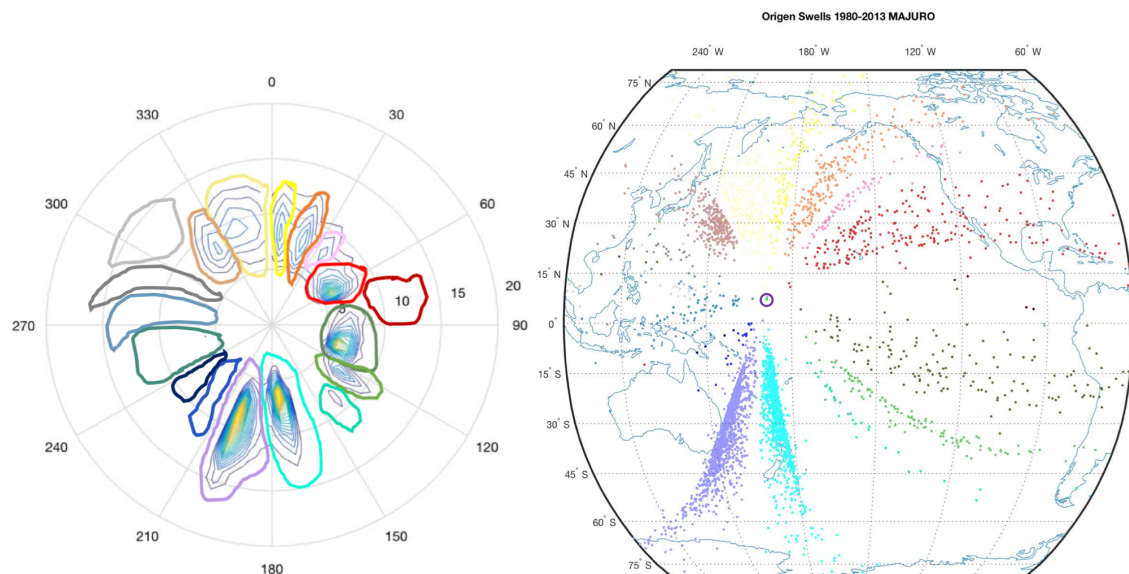
2. Validación de los orígenes e identificación de las familias de swells mediante datos espectrales.
3. Caracterización de la climatología de las distintas familias.



4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tras aplicar la metodología anteriormente descrita para el caso de Majuro (en las Islas Marshall) se han obtenido las distribuciones espaciales de los orígenes de los swells que llegaron a la isla entre los años 1980 y 2013.

Posteriormente estos han sido clasificados por familias obteniendo los siguientes resultados.



Espectro direccional de oleaje con las distintas familias identificadas y mapamundi con los orígenes de los swells clasificados.

La aplicación en la isla de Majuro concluye que a sus costas llegan un total de 20 familias de swells repartidas entre el hemisferio norte y el hemisferio sur. Estas son generadas principalmente por los vientos del oeste (localizados en latitudes extratropicales), por los vientos alisios tanto del norte como del sur y por los vientos generados en las regiones tropicales.

En resumen, se observa como el oleaje se genera y se propaga a lo largo del pacífico recorriendo distancias de más de 7000 km, agrupándose y llegando a las costas de una isla en forma de swells. Esta información es imprescindible para los archipiélagos del pacífico a la hora de prever el riesgo de inundación y adaptarse al cambio climático.

Observando la importancia que tiene la caracterización del oleaje a partir de la discretización espectral, el enfoque de futuras líneas de investigación está encaminado en realizar estadísticos de los eventos de tormenta para conseguir una mejor caracterización de las condiciones de oleaje y sus zonas de generación en los archipiélagos más vulnerables del Pacífico.

5. REFERENCIAS

Hanson, J.L.; Phillips, O.M. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2001, *18*, 277–293.

Hegermiller, C.A., J.A.A. Antolinez, A. Rueda, P. Camus, J. Perez, L.H. Erikson, P.L. Barnard, and F.J. Mendez, 2016. A wave spectrum-based approach to defining the predictor for statistical downscaling of local wave climate. *Journal of Physical Oceanography*, *47*, doi: 10.1175/JPO-D-16-0191.1.

Munk, W.H., Miller, G.R., Snodgrass, F.E., Barber, N.F., 1963. Directional recording of swell from distant storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 255 (1062), 505–584.

Pérez, J., M. Menéndez, F. J. Méndez, and I. J. Losada, 2014. ESTELA: A method for evaluating the source and travel-time of the wave energy reaching a local area, *Ocean Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0740-7>.

Portilla, J, 2012. Storm-Source-Locating Algorithm Based on the Dispersive Nature of Ocean Swells. *Avances*, 2012, Vol. 4, No. 1, Págs. C22-C36.



ABSTRACT

1. MOTIVATION

The reasons for doing this project are the following ones:

1. The characterization of marine climate normally performed in studies of waves climatology is insufficient for regions like Marshall Islands, which may have at the same time up to 10 swells.
2. Climate change, one of the causes of the severe floods in this pacific region, is affecting to the atmospheric circulation patterns, so it is very important to understand these processes for improvement of the insular nation adaptation strategies and preparation.
3. The traditional navigation between the Marshall Islands is based on the interpretation of the arrived swells, identifying the distance towards land with the observation of their propagation obstruction.

2. OBJECTIVE OF THE STUDY

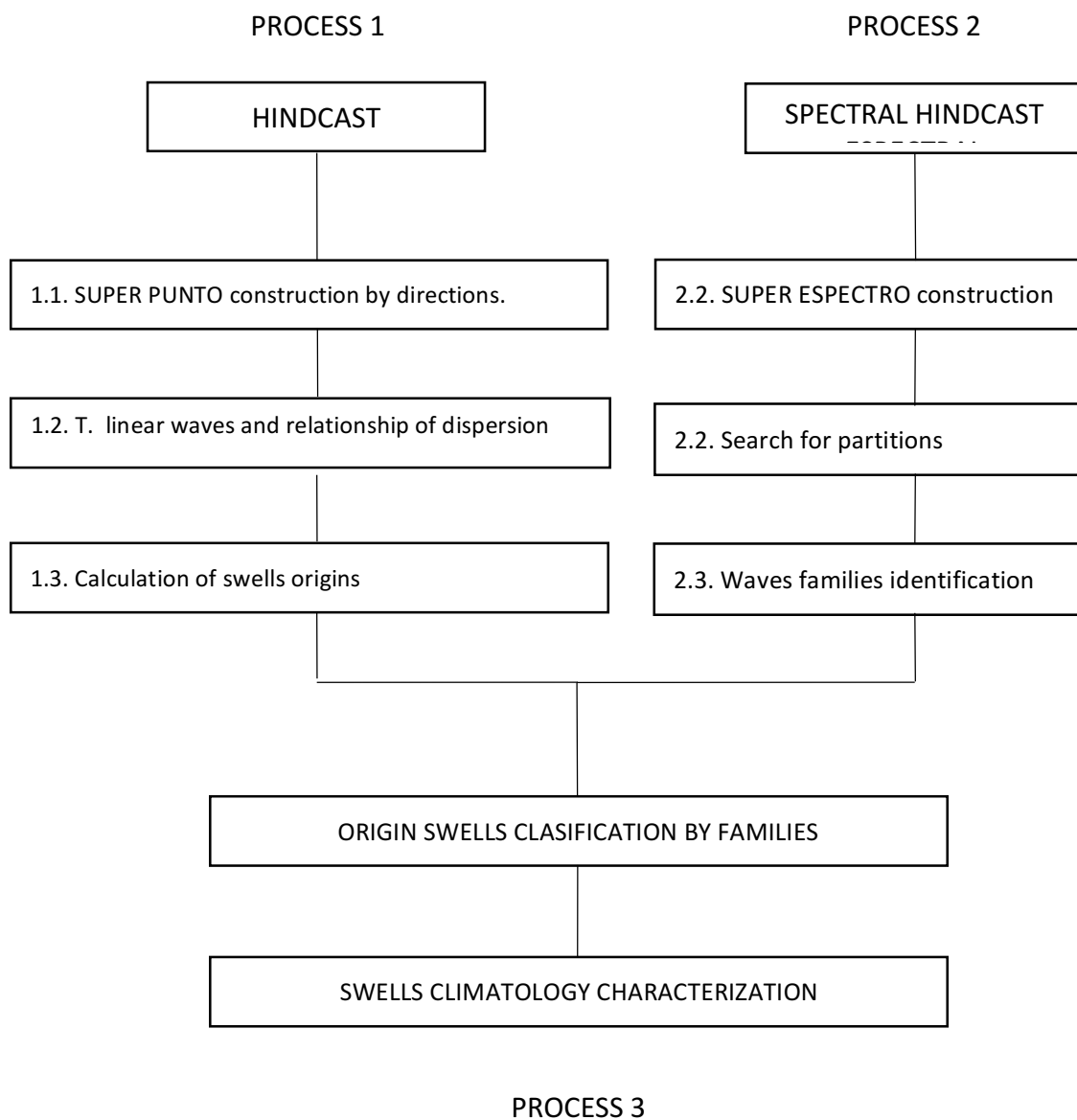
The purpose of this study is to determine generation zones of the swells that arrive at Majuro Island, their classification by swell families and the characterization of swell climatology, developing a methodology so that the archipelagos of the pacific can foresee the floods and be prepare for the climatic change.

3. METHODOLOGY

The proposed methodology can be summarized as follows:

1. Identification of the generation zones of the arriving swells at Majuro.

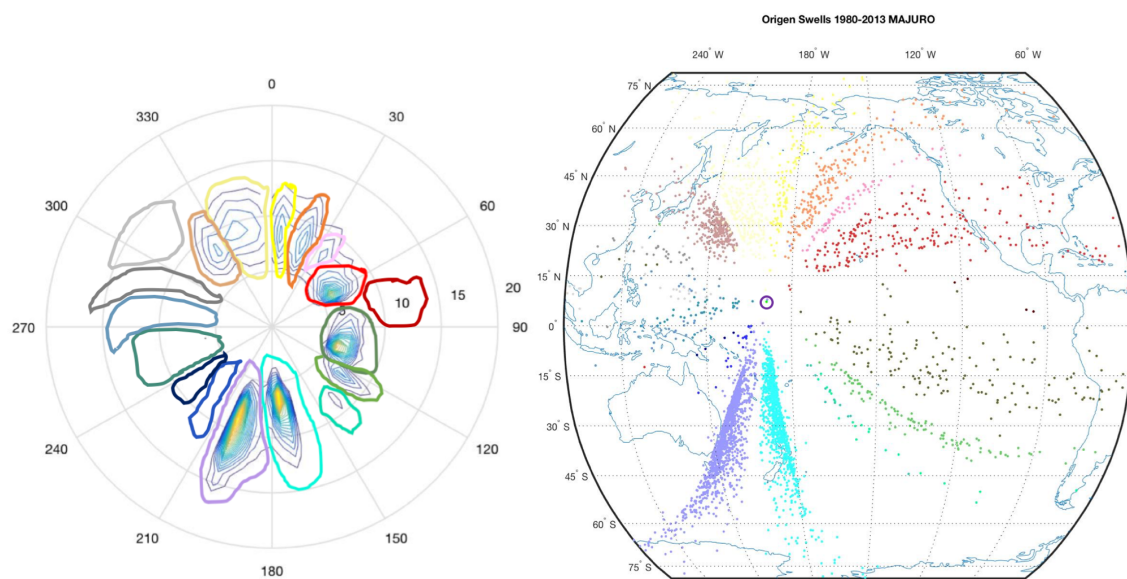
2. Validation of the generation zones and identification of the swells families with spectral data.
3. Characterization of the climatology of the different families.



4. RESULTS AND CONCLUSIONS

After applying the methodology described above for the study case of Majuro (Marshall Islands), we have obtained spatial distributions of the generation areas of swells that arrives to the island between the years 1980 to 2013.

Subsequently the swells have been classified by families obtaining the following results.



Directional wave spectra with the different families identified and world map with the classified swells origins.

This application in Majuro Island concludes that a total of 20 swell families arrive to its coasts coming from the northern hemisphere and the southern hemisphere. These swells are mainly generated by the westerly winds (located in extratropical latitudes), by the north and south trade winds and by the winds generated in tropical regions.

In summary, it is observed how the waves are generated and spreaded along the pacific travelling distances of more than 7000 km, grouping and reaching an island coast in swell form. This information is essential to anticipate flood risk and adapt to climate change.



After observing the importance of wave characterization based on spectral discretization, the focus of future research lines is aimed to perform statistics of storm events to get a better characterization of the wave conditions in the Pacific archipelagos and the improvement of identification of swell generation zones.

5. REFERENCES

Hanson, J.L.; Phillips, O.M. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2001, *18*, 277–293.

Hegermiller, C.A., J.A.A. Antolinez, A. Rueda, P. Camus, J. Perez, L.H. Erikson, P.L. Barnard, and F.J. Mendez, 2016. A wave spectrum-based approach to defining the predictor for statistical downscaling of local wave climate. *Journal of Physical Oceanography*, *47*, doi: 10.1175/JPO-D-16-0191.1.

Munk, W.H., Miller, G.R., Snodgrass, F.E., Barber, N.F., 1963. Directional recording of swell from distant storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 255 (1062), 505–584.

Pérez, J., M. Menéndez, F. J. Méndez, and I. J. Losada, 2014. ESTELA: A method for evaluating the source and travel-time of the wave energy reaching a local area, *Ocean Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0740-7>.

Portilla, J, 2012. Storm-Source-Locating Algorithm Based on the Dispersive Nature of Ocean Swells. *Avances*, 2012, Vol. 4, No. 1, Págs. C22-C36.



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



Zonas de generación y climatología de los swells en las Islas Marshall.

Trabajo realizado por:

Paula Casal Rey

Dirigido:

Fernando J. Méndez Incera

Ana Cristina Rueda Zamora

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería Costera y Portuaria**

Santander, octubre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
 - 1.1. MOTIVACIÓN
 - 1.2. CONOCIMIENTO DE LOS SWELLS EN EL PACÍFICO
 - 1.3. ESTADO DEL ARTE
2. METODOLOGÍA
 - 2.1. MARCO METODOLÓGICO
3. OBTENCIÓN DE LA ZONA DE GENERACIÓN DE LOS SWELLS
 - 3.1. INTRODUCCIÓN
 - 3.2. BASE DE DATOS
 - 3.3. ELABORACIÓN DEL SÚPER PUNTO
 - 3.4. CONTEXTO TEÓRICO
 - 3.5. DISCRETIZACIÓN ESPECTRAL
 - 3.6. DETERMINACIÓN DEL ORIGEN
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE SWELLS Y VALIDACIÓN DE LOS ORÍGENES
 - 4.1. INTRODUCCIÓN
 - 4.2. BASE DE DATOS
 - 4.3. ELABORACIÓN DEL SUPER ESPECTRO
 - 4.4. IDENTIFICACIÓN FAMILIAS SWELLS
 - 4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ORÍGENES
5. CLIMATOLOGÍA DE LOS SWELLS
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS



1. INTRODUCCIÓN



1.1. MOTIVACIÓN

Los motivos que llevaron a la realización de este proyecto son los siguientes.

1. La actual caracterización del clima marítimo que se realiza en estudios de climatología del oleaje no resulta adecuada para regiones costeras como las Islas Marshall, en las cuales puede llegar al mismo tiempo un oleaje multidireccional de hasta 10 swells. Por tanto, es necesario realizar un análisis espectral para poder comprender el oleaje local y sus zonas de generación.
2. El cambio climático, uno de los causantes de las severas inundaciones en esta región del Pacífico, está afectando a los patrones de circulación atmosféricos, responsables de la generación de oleaje, por lo que es de vital importancia el conocimiento de estos procesos para que las naciones insulares preparen sus estrategias de adaptación, ya que las Islas Marshall son uno de los archipiélagos del mundo más vulnerables al aumento del nivel del mar.
3. La navegación entre las islas Marshall la basan en una interpretación de la llegada de los swells, identificando a que distancia están de tierra mediante la observación de la obstrucción de la propagación de los mismos.

1.2. CONOCIMIENTO DE LOS SWELLS EN EL PACÍFICO

El oleaje tipo swell, o de mar de fondo, es aquel que tras ser generado por viento, se ha propagado cierta distancia, ordenándose e incluso llegando a ser un oleaje totalmente desarrollado cuando ya no puede acumular más energía.

En el océano pacífico, debido a sus grandes dimensiones y a la apenas existencia de tierra firme en toda su extensión, el oleaje se propaga recorriendo miles de kilómetros, llegando a la costa (en este caso a las Islas Marshall) en forma de oleaje swell. Esta propagación a través del océano ha sido verificada por varios investigadores a lo largo de la historia (*Munk et al., 1963; Delpey et al., 2010*), los cuales establecieron que en algunos casos el oleaje podía llegar a recorrer 20.000 km desde su origen de generación hasta la costa.

La llegada de estos swells a las islas ha sido analizada por los navegantes autóctonos y en ella han basado sus patrones de navegación: detectaban la proximidad a tierra observando las interrupciones de los swells.

En estas islas, los grupos de ondas cruzados viajan al abrigo del archipiélago, lo que a gran escala se traduce en la refracción del oleaje del este. En esencia, los navegantes identificaban los trenes de ondas cruzados; y según la fuerza relativa de los patrones de las ondas de radiación calculaban la distancia a tierra mientras que la trayectoria de los trenes indicaba la dirección a tierra.

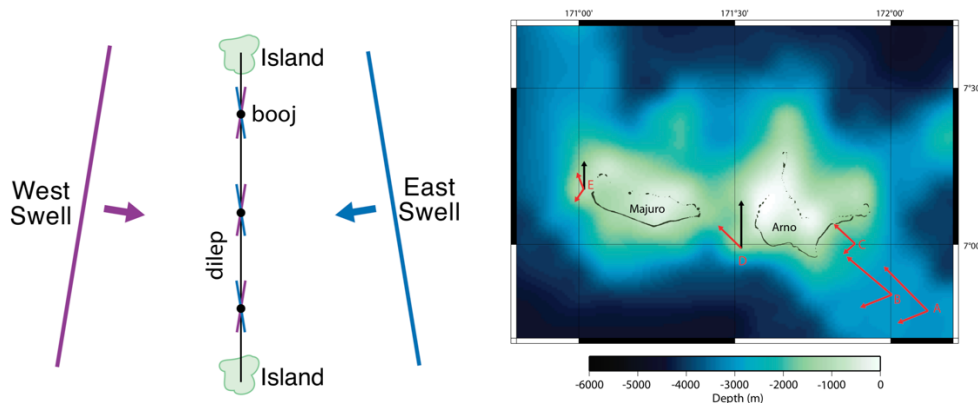


Figura 1. En la figura de la izquierda croquis del cruzamiento de los trenes de onda sobre los principios de navegación en las islas Marshall. En la figura de la derecha, isla de Majuro y Arno con el viento del este proyectado.

Por otro lado, a lo largo de la historia las Islas Marshall han sufrido una serie de inundaciones en las cuales no ha habido ningún tipo de previsión, ya que estas se produjeron en días soleados.

En principio estas inundaciones fueron asociadas a la marea astronómica o a ciclones tropicales cercanos a las islas. Además, se pensó que la causa podría estar relacionada con la rotura de las olas tipo sea de viento (*Longuet-Higgings y Stewart, 1964*), las cuales provocan una elevación de la superficie media del agua (wave set-up) que puede alcanzar hasta $1/3$ de la altura de ola incidente en la costa; fenómeno muy usual en las islas tropicales y subtropicales.

Las sospechas de que el oleaje swell podía ser el causante de estas inundaciones se basaron en el hecho de que acompañando a este tipo de oleaje viaja una componente de onda infragravitatoria, la cual es liberada cuando se produce la disipación del mismo (*Pomeroy et al., 2012*), causa probable del aumento del nivel del mar en las zonas mencionadas.

En base a esto, varias investigaciones fueron realizadas y tras un análisis de los fenómenos se determinó que la principal causa era los ciclones tropicales que generaban oleaje a cierta distancia de las islas y que esto empeoraría con la subida del nivel del mar consecuencia del cambio climático (*Hoeke et al., 2013*).

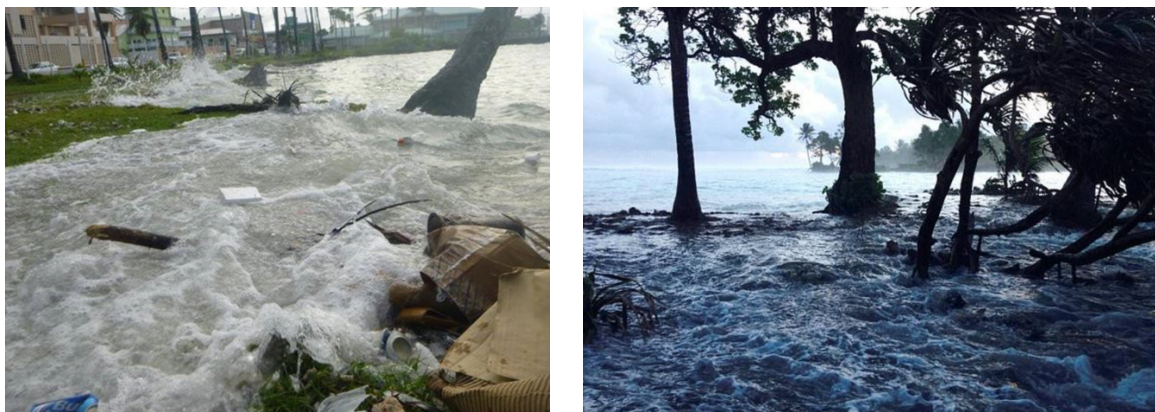


Figura 2. Ejemplos de los eventos de inundación en la Islas Marshall.

La falta de previsión ante las inundaciones en las islas del Pacífico a día de hoy puede ser debido a la lejanía de estas comunidades y por consiguiente mínimo impacto en los medios de comunicación, así como de la baja cantidad de observaciones y medidas de campo en las propias islas que conforman el archipiélago. Otra de las causas puede ser la extensión del área de influencia de los swells que llegan a estas costas.

También cabe destacar el hecho de que los mareógrafos, principal fuente de datos del nivel del mar, no tienen en cuenta la contribución de los swells en los niveles de mar extremos.

1.3. ESTADO DEL ARTE

La caracterización del clima marítimo a partir de los parámetros de onda es insuficiente para muchos estudios costeros, incluyendo aquellos enfocados en el asesoramiento a obras marítimas y aquellos que estudian la influencia del clima marítimo en la evolución de la costa a largo plazo. Este hecho incluye particularmente a los estudios basados en “downscaling” estadístico de campos atmosféricos a condiciones de oleaje local, el cual es multimodal en la mayoría de los casos. El “downscaling” se entiende como la técnica de pasar de datos de gran escala a pequeña escala en una localización determinada. Hay dos tipos de “downscaling”: estadístico y dinámico.

El “downscaling” dinámico se utiliza en modelos numéricos y está basado en anidar mallas de más a menos resolución.

En cuanto al “downscaling” estadístico, este se basa en las relaciones estadísticas entre un predictor (clima atmosférico) y un predictando (oleaje local). Este método tiene menos coste computacional que el anterior, pero necesita una gran base de datos como punto de partida.

En el caso del pacífico, la aparición de datos espectrales direccionales permite el desarrollo de modelos estocásticos, incluyendo parámetros multimodales del estado de mar. Los primeros estudios basados en esto corresponden a un “downscaling” estadístico basado en tipos de clima para predecir espectros de onda multimodales (*Rueda et al., 2017*).

Existe un método basado en información espectral que define las zonas de generación de los oleajes locales: ESTELA. Esta metodología aporta una representación objetiva del clima marítimo que afecta al oleaje local, basándose en solo dos parámetros: el flujo de energía efectiva y el tiempo que tarda en viajar dicha energía del oleaje (*Pérez et al., 2014*).

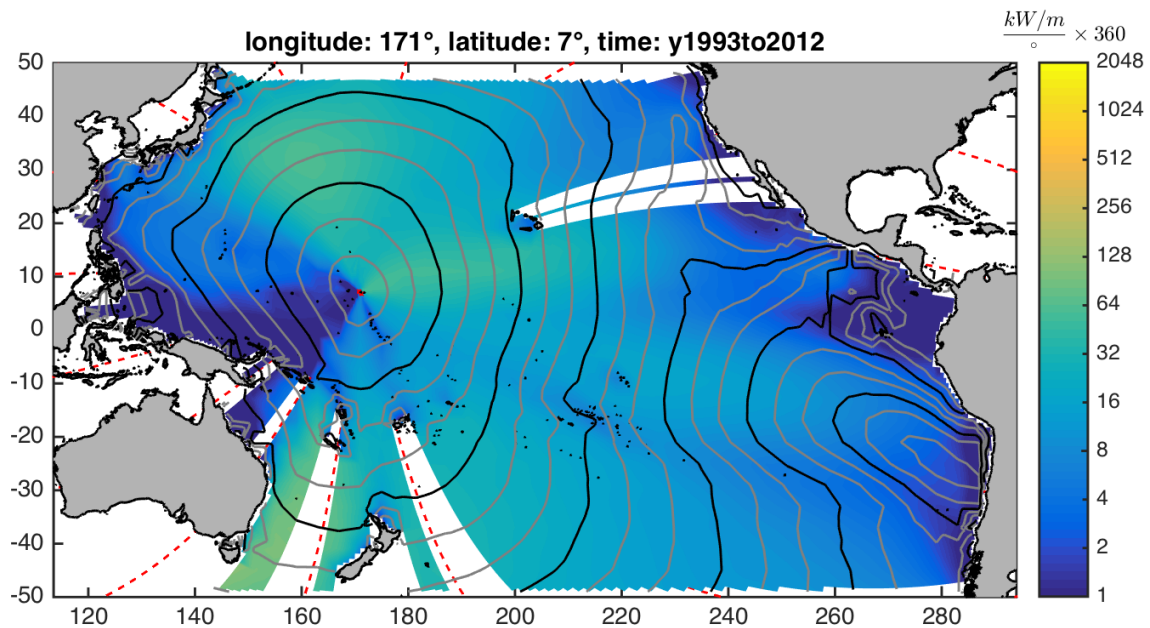


Figura 3. Resultado de ESTELA para la isla de Majuro desde 1993 hasta 2012 (Isocronas negras: cada 3 días).

Sin embargo, ESTELA no identifica los swells que forman parte del espectro direccional. Para la identificación de los swells, Portilla en el año 2012 publicó un artículo (Portilla, 2012) el cual se basa en la división del espectro del oleaje. Esto permite tener información clara de períodos y direcciones de propagación del oleaje. El primer paso es agrupar los swells según períodos y direcciones. De esta forma se encuentran los grupos de oleaje generados por la misma tormenta.

En cuanto a la determinación de las zonas de generación, uno de los primeros en descubrir el carácter dispersivo de las ondas fue Munk, el cual estudió como los swells generados en Australia y Nueva Zelanda viajaban a lo largo del pacífico hasta llegar a la costa de California (Munk et al., 1963). Esta naturaleza dispersiva permite extraer información sobre el origen de generación de un determinado swell a partir de mediciones en cualquier punto de su trayectoria de propagación.

Respecto a la identificación de las familias de oleaje, Portilla en el año 2015 publicó un artículo titulado "Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean". En el describe como a partir de particiones de datos espectrales y buscando picos de energía en los espectros analizando la frecuencia y la dirección, identifica las distintas familias de oleaje que conforman el espectro (Portilla et al., 2015).

1.4. OBJETIVOS

Las principales metas que posee el presente estudio son:

1. Analizar de forma automática los espectros direccionales de oleaje.
2. Determinar el origen de generación de los swells basándonos en la relación de dispersión.
3. Identificar las distintas familias de swells.
4. Caracterizar la climatología de los swells en base a los parámetros comunes por familias y en base a la frecuencia de aparición en la isla objeto de estudio.
5. Relacionar el origen de los swells con su llegada a la isla por familias, para así comprender mejor el oleaje a escala local: pasando de un oleaje unimodal a uno espectral, el cual refleja de forma más completa un estado de mar.



2. METODOLOGÍA



El objetivo del presente proyecto es desarrollar una metodología para la identificación, clasificación y caracterización de los swells que llegan a la isla de Majuro, en las Islas Marshall.

A partir de un hindcast en las inmediaciones de la isla se calcularán mediante un algoritmo la distancia y el origen de generación de cada swell, lo cual posteriormente se comparará con datos espectrales para validar dicha metodología e identificar las distintas familias de swells.

Por lo tanto, la metodología que se propone se puede sintetizar de la siguiente manera:

1. Identificación del origen de los swells que llegan a Majuro.
2. Validación de los orígenes e identificación de las familias de swells mediante datos espectrales.
3. Caracterización de la climatología de las distintas familias.

PROCESO 1

Para la identificación del origen de los swells se partirá de datos hindcast en una serie de puntos situados en las inmediaciones de la isla objeto de estudio.

El primer paso consiste en escoger ocho puntos alrededor de la isla, aplicando en cada uno de ellos un filtro direccional, de forma que cada punto represente (o solo tenga información de) una dirección. Una vez filtrado cada punto, se construye un SÚPER PUNTO que contenga para cada rango de dirección, la información filtrada de cada punto. De esta forma se consigue identificar de forma más minuciosa el oleaje que incide en la isla.

El segundo paso consiste en obtener la zona de generación de cada swell a partir de la teoría de ondas lineales y la relación de dispersión.

Por último, se determina la situación espacial del origen de cada swell a partir de geometría esférica.

PROCESO 2

Para la validación del anterior proceso se construirá un espectro, a partir de un hindcast de variables espectrales.

El primer paso es similar al primer paso del proceso 1; consiste en construir un SUPER ESPECTRO a partir seis puntos situados alrededor de la isla de estudio, partiendo de la base de que cada punto representa un sector de direcciones determinada.

Una vez montado el SUPER ESPECTRO, se buscan los picos de energía locales, los cuales constituirán las nuevas particiones. Aplicando la función WATERSHED contenida en el programa Matlab se identificarían las distintas familias de swells que inciden en la isla.

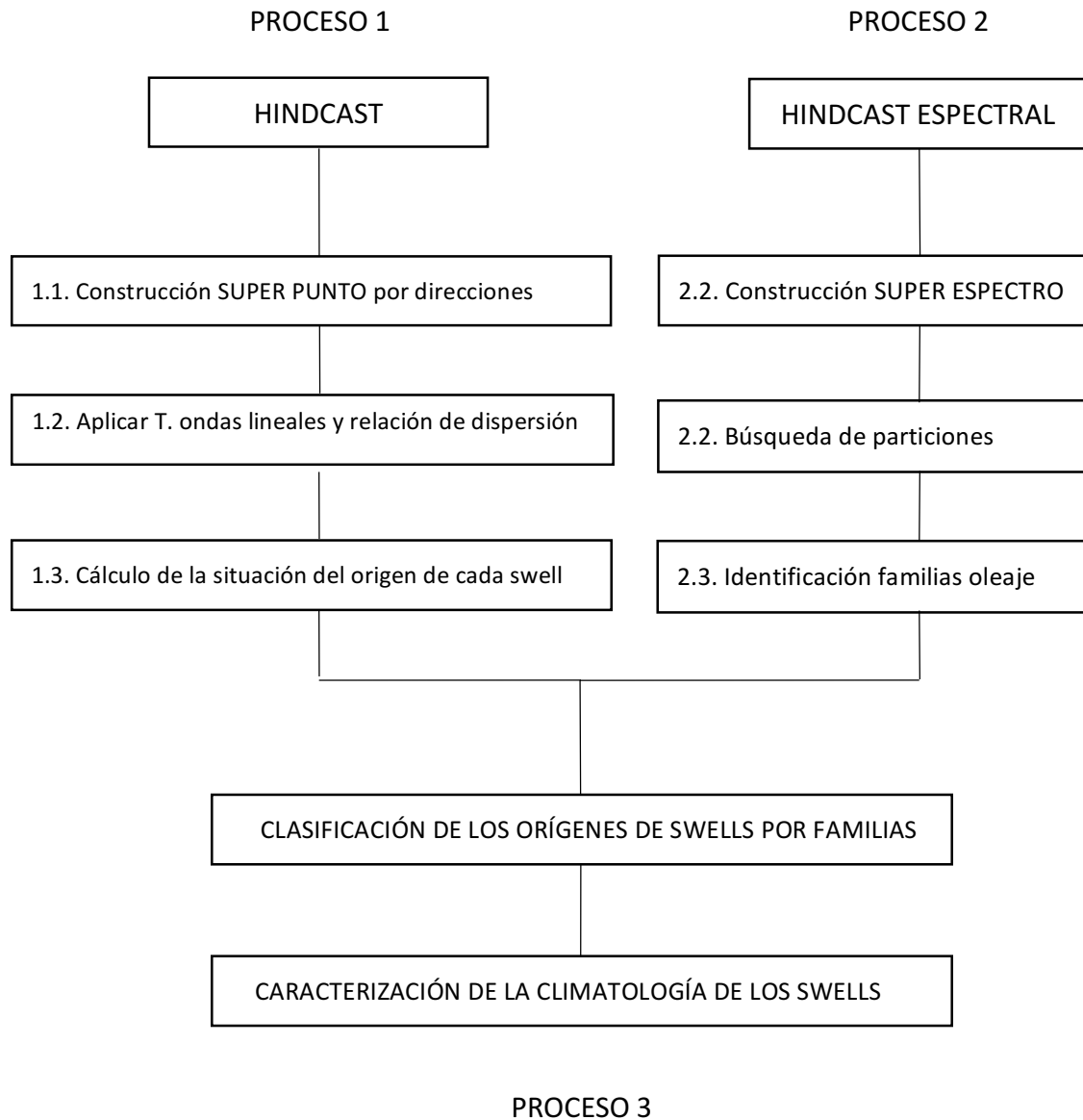
Por último, se valida la situación espacial de los orígenes y se clasifican por familias de oleaje.

PROCESO 3

Una vez obtenidos el origen de los swells y su clasificación por familias, se procede a realizar una climatología de los swells de forma mensual, analizando los datos obtenidos.

2.1. MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se muestra esquemáticamente la metodología explicada anteriormente.





3. OBTENCIÓN DE LA ZONA DE GENERACIÓN DE LOS SWELLS

3.1.INTRODUCCIÓN

El proceso consistente en determinar el origen de los swells es un proceso inverso, el cual partiendo de un hindcast en las inmediaciones de la isla, calcula el instante y el lugar donde se generaron cada uno de los swells individuales que llegan a la isla. Este proceso se basa en el algoritmo de localización de fuente de generación de las tormentas basado en la naturaleza dispersiva del oleaje oceánico (*Portilla, 2012*) y en el análisis de los espectros direccionales de oleaje en los océanos (*Hanson and Philips, 2001*).

3.2. BASE DE DATOS

La base de datos utilizada para este proyecto es CSIRO, un hindcast resultado de usar el WaveWatchIII v4.08 forzado con una base de datos CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) de vientos horarios entre 1979 hasta 2017. La base de datos resultado contiene información en 3683 puntos con una resolución de 0.4 x 0.4 grados con una serie de mallas anidadas de 18 hasta 10 kilómetros en el Oeste del pacífico y Australia. El espectro está discretizado en 29 frecuencias exponencialmente espaciadas desde 0.038 Hz hasta 0.5 Hz y 24 direcciones con una resolución constante de 15 grados. Esta base de datos fue desarrollada por una asociación entre el Centro Australiano de Investigación Climática (CAWCR), la oficina de meteorología y Csiro (Durrant et al., 2013).

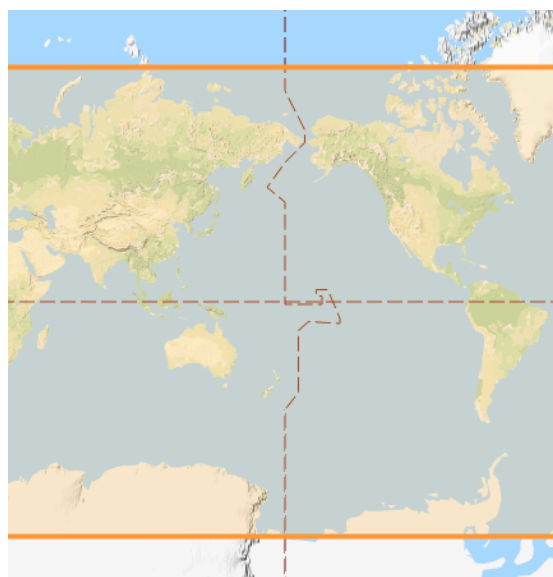


Figura 4. Dominios de la base de datos CSIRO.

3.3. ELABORACIÓN DEL SUPER PUNTO

Partiendo de la base de datos anteriormente descrita, se procede a construir un SUPER PUNTO que contenga información de todas las direcciones posibles, representativo del oleaje incidente en la isla de Majuro.

Para su construcción se escogieron 8 puntos alrededor de la isla (de la base aportada con 70 puntos) colocados estratégicamente para que cada uno contenga información representativa de la dirección en la que está orientado respecto a la isla. Así, dividiendo una circunferencia en 8 sectores, cada sector representa 45° .

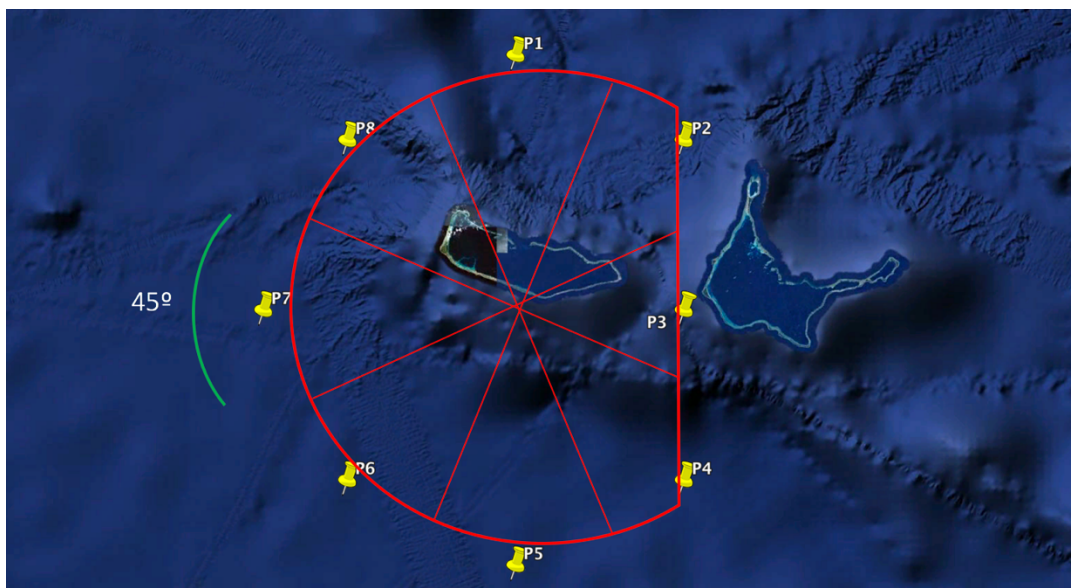


Figura 5. Mapa con los puntos seleccionados alrededor de la isla de Majuro y sectores direccionales a los que representan.

Una vez seleccionados los 8 puntos y determinadas las direcciones a las que van a representar, se filtra la información que contienen, siendo válida solo la referente al sector direccional que representan. Finalmente, toda esa información se junta en una matriz, la cual conformará el SUPER PUNTO.

En cuanto a la información que contiene, de la base de datos se cogen 3 particiones de altura de ola referente a swells, junto con sus correspondientes direcciones y períodos. Por tanto, el SUPER PUNTO contendrá 24 particiones (8 puntos con 3 particiones en cada uno).

3.4. CONTEXTO TEÓRICO

En primer lugar, se sabe que una misma familia de swells comparte frecuencia y dirección, por lo que es factible identificarlos a partir del período de pico y de la dirección aportados en las distintas particiones que ofrece la base de datos.

Por otro lado, se puede asegurar que la frecuencia del oleaje está directamente relacionada con el tiempo que tarda en llegar un swell a su destino, en este caso Majuro, pero esta relación no es lineal, ya que los datos contienen ciertas incertidumbres. Estas incertidumbres tienen dos posibles fuentes: la discretización del modelo fuente tanto espectral como espacialmente y el hecho de que las tormentas no son fenómenos estáticos.

Con todo, se aplica la teoría lineal, más concretamente la relación de dispersión, la cual relaciona la frecuencia angular con el número de onda y la profundidad del agua. En profundidades indefinidas, el término kd tiende a infinito, por lo que la tangente hiperbólica converge a 1. Lo cual significa que en profundidades indefinidas la frecuencia angular solo depende del número de onda.

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (1)$$

$$\omega^2 = gk \quad (2)$$

En cuando a la velocidad de propagación de una onda, la definición es tal que así:

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} \quad (3)$$

En el caso de un oleaje monocromático, esto corresponde a la celeridad de fase, la cual se tiene a partir de la relación de dispersión.

$$Cp = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (4)$$

$$Cp = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{w} = \frac{g}{2\pi f} \quad (5)$$

Donde la ecuación 5 está referida a la celeridad de fase en profundidades indefinidas.

En el caso de darse una superposición de olas, con una frecuencia mínimamente diferente y en la misma dirección, la celeridad de ese grupo de olas se calcula de la siguiente manera:

$$Cg = \frac{\partial w}{\partial k} = nc \quad (6)$$

Donde:

n: número de olas.

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (7)$$

En profundidades indefinidas $n = \frac{1}{2}$, por lo tanto la celeridad de grupo queda tal que así:

$$Cg = \frac{g}{4\pi f} \quad (8)$$

Siguiendo la línea del razonamiento, se concluye que la celeridad de grupo es inversamente proporcional a la frecuencia del grupo, por lo que las olas de baja frecuencia son las que viajan más rápido, las denominadas ondas dispersivas.

Para un evento de viento concreto, localizado en el tiempo y en el espacio, la frecuencia de onda dominante en una localización distante aumenta linealmente a lo largo del tiempo, siendo inversamente proporcional a la distancia recorrida (*Hanson and Philips, 2001*).

$$\frac{df}{dt} = m_{ft} = \frac{g}{4\pi d} \quad (9)$$

Son muchos los eventos de onda que se comportan así en los océanos (*Munk et al, 1963*). Esta naturaleza dispersiva permite extraer información sobre el origen de un determinado grupo de ondas a partir de mediciones a lo largo de su propagación. El cálculo de la distancia a la que se encuentra ese origen se determina a partir de la siguiente expresión.

$$d = \frac{g}{4\pi m_{ft}} \quad (10)$$

Determinando el tiempo de generación cuando $f=0$, a partir de:

$$t_0 = \frac{-b}{m_{ft}} \quad (11)$$

Donde:

b : intersección de $f(t=0)$ para un swell.

3.5. DISCRETIZACIÓN ESPECTRAL

Un espectro de oleaje $S(f)$ representa la energía del oleaje por unidad de área, en función de la frecuencia de las ondas y promediada en el tiempo. El área que define la curva, momento de orden cero, representa lo energético que es el oleaje. De este concepto se extrae el parámetro que mejor representa la severidad del oleaje; la altura de ola de orden cero (H_{m0}).

$$H_{m0} = \sqrt{4m_0} \quad (12)$$

Si el oleaje presenta un espectro de banda estrecha (en el cual predominan los swells, o frecuencias bajas concentradas alrededor de un valor) se asume que H_{m0} es prácticamente igual a la altura de ola significativa o $H_{1/3}$ (altura de ola media del tercio de las mayores olas en un estado de mar).

En cuanto a la generación del oleaje, este nace debido a la energía que le confiere el viento a la superficie del mar. No obstante, cuando se propaga, este lo hace a partir de su propia energía. Por tanto, en un punto cualquiera del océano la superficie libre del mar estará compuesta por oleaje generado localmente por viento (oleaje tipo SEA) y por el oleaje propagado hasta ese punto desde otra zona de generación (oleaje tipo SWELL). Resulta difícil separar ambas componentes en un registro de superficie libre, por lo que se recurre a los espectros. En ellos, ambas componentes del oleaje se pueden diferenciar atendiendo a las frecuencias o períodos del espectro, en el cual las bajas frecuencias corresponderán a oleajes desarrollados (SWELLS) mientras que las altas frecuencias serán representativas de oleajes más jóvenes (SEA).

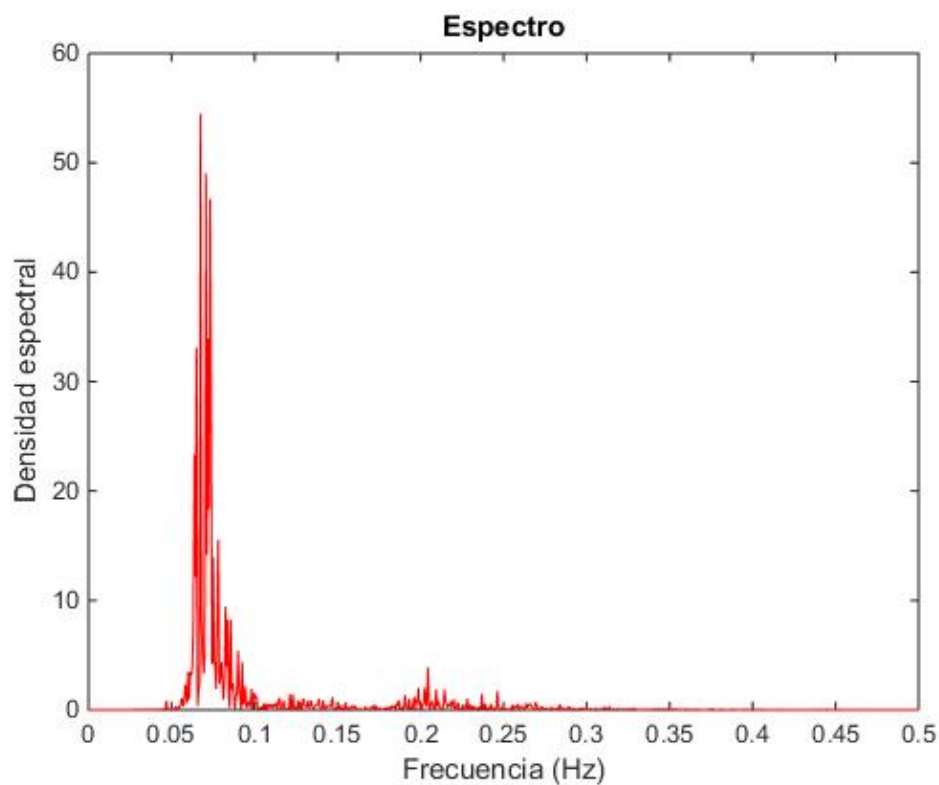


Figura 6. Ejemplo de un espectro $S(f)$ con oleaje tipo swell y oleaje tipo sea.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que las olas en el océano no siguen necesariamente la dirección del viento que las generó, por lo que es necesario representar un espectro en el que haya, además, información direccional. Se recurre por tanto, a una función de densidad espectral direccional $S(f, \theta)$, la cual representa la energía promediada en el tiempo por intervalos de frecuencia y dirección.

Con todo, la división espectral consiste en determinar subconjuntos que representan el oleaje tipo sea y el oleaje tipo swell de forma individual. Cada sistema se describe mediante los siguientes parámetros:

$$H, T_p, \theta$$

Finalmente, la identificación de los swells individuales consiste en formar grupos de particiones de oleaje que posiblemente fueran generadas por la misma fuente. Esto se realiza agrupando series de particiones de oleaje con frecuencias y direcciones similares. Partiendo de estas hipótesis, se ha realizado un código con el programa MATLAB en el cual introduciendo las particiones del SUPER PUNTO, se obtiene una matriz con ejes:

$$f, \theta, tiempo$$

El rango de división de las frecuencias es de 0.0071 s-1 y el de la dirección de 15°.

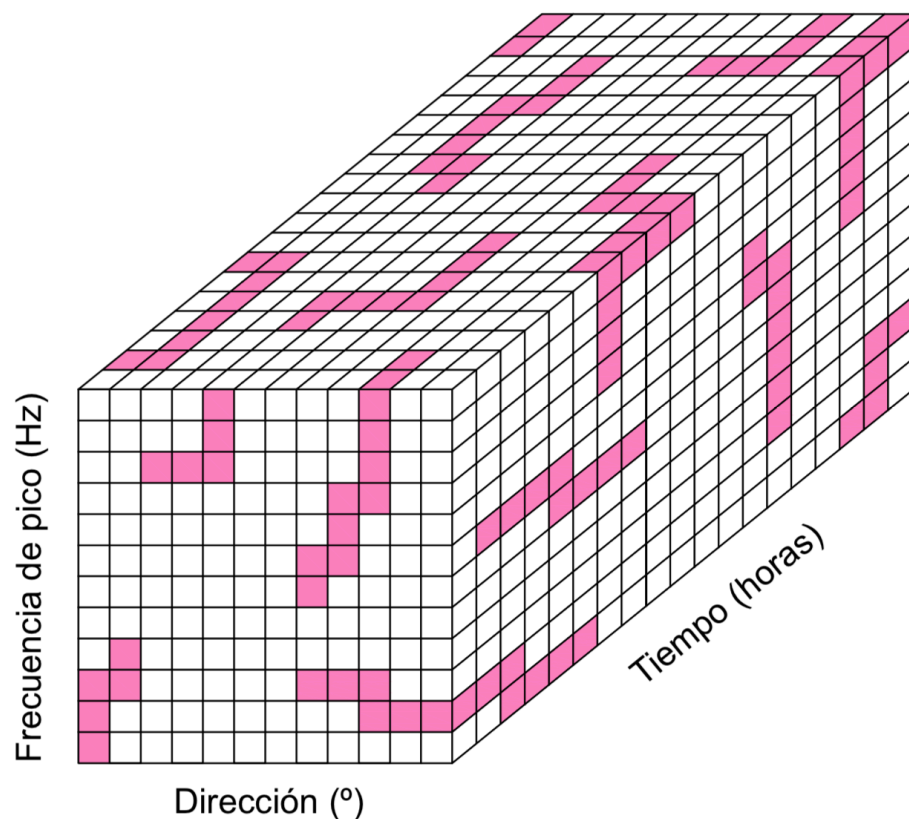


Figura 7. Croquis de la matriz que contiene las particiones del SUPER PUNTO.

Uno de los problemas que presenta el algoritmo es que, al realizar una matriz, no reconoce que la dirección 0° es la misma que 360° , por tanto, para no afectar a la información comprendida en esos rangos, se ha decidido realizar esa separación en la dirección que menos energía presente.

Para determinar esa dirección de corte, se realiza un espectro direccional.

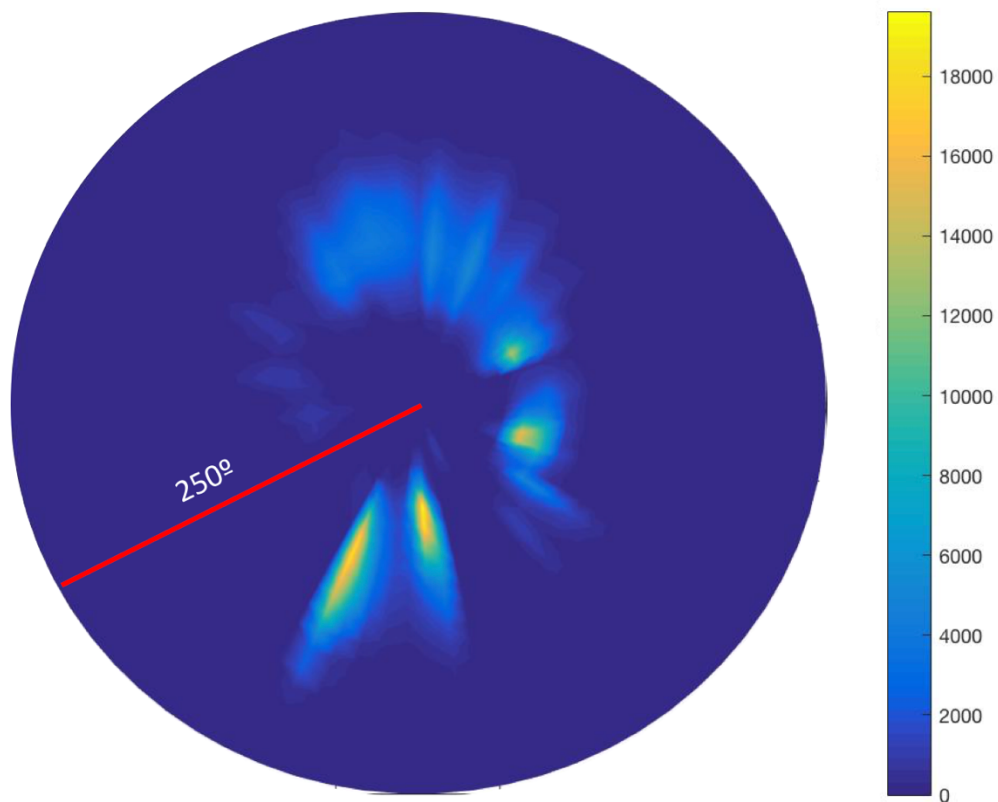


Figura 8. Espectro direccional del período de pico con el ángulo de menor energía identificado.

De la figura 8 se puede concluir que la dirección que presenta menos energía es el ángulo 250° .

Una vez determinado el corte y realizada la matriz, se buscan los grupos que tienen características similares, los cuales constituirán las nuevas particiones.

Con los grupos de swells ya identificados, se guardan los parámetros asociados a ellos.

$$(H, f_p, \theta)$$

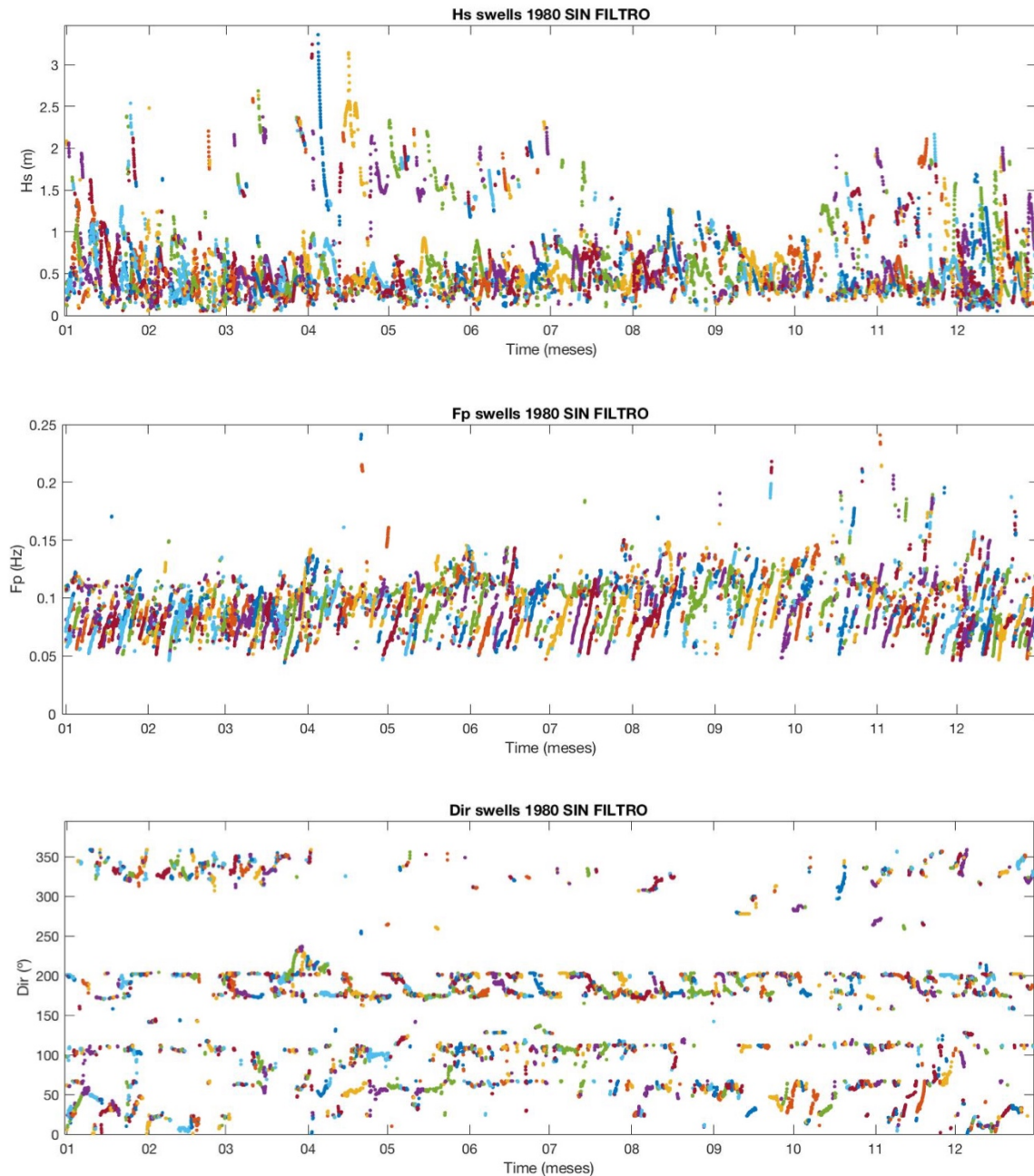


Figura 9. Series temporales de la altura de ola significativa, la frecuencia de pico y la dirección de cada swell identificado con el código en el año 1980, en la isla de Majuro.

Como se puede observar en la figura 9, los diferentes colores representan los distintos grupos de swells encontrados. En el caso de la frecuencia de pico, las frecuencias con tendencia creciente son las que representan los swells, basándonos en lo dicho anteriormente sobre los espectros. También se puede observar como hay swells que el código identifica como varios swells pequeños, debido a un salto temporal de más de 1 hora. Por tanto, se aplicarán una serie de filtros a los swells encontrados.

Estos filtros consistirán en limitarse a identificar swells con frecuencias de tendencia ascendente y aquellos que duren más de 12 horas para que los resultados sean representativos. Aplicando los filtros, las series temporales quedan tal que así.

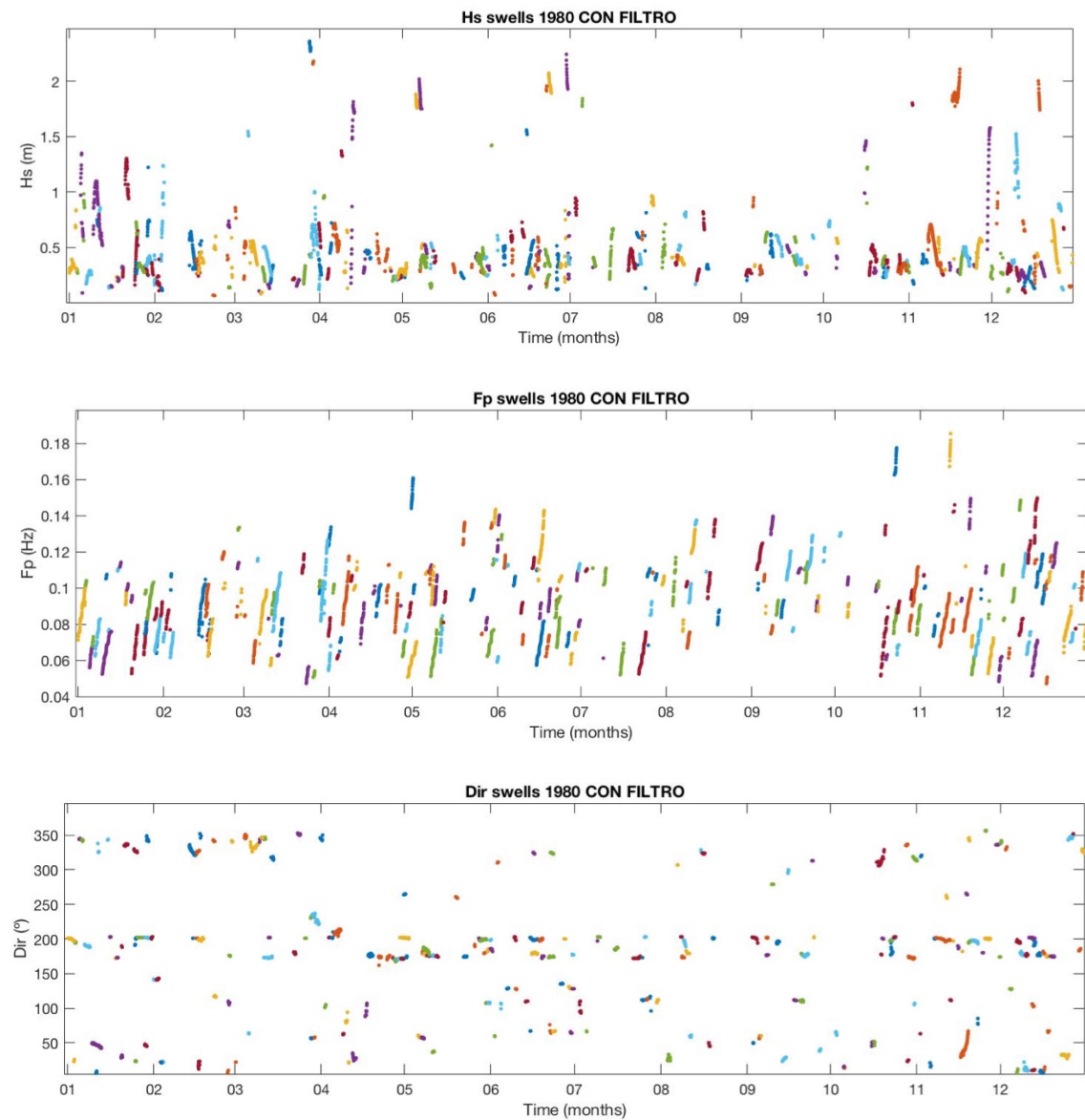


Figura 10. Series temporales de la altura de ola significativa, la frecuencia de pico y la dirección de cada swell al pasar por los filtros anteriormente descritos en el año 1980, en la isla de Majuro.

Con la aplicación de los filtros, nos aseguramos de que los swells identificados corresponden a oleaje generado a cierta distancia y que se ha propagado cierto tiempo.

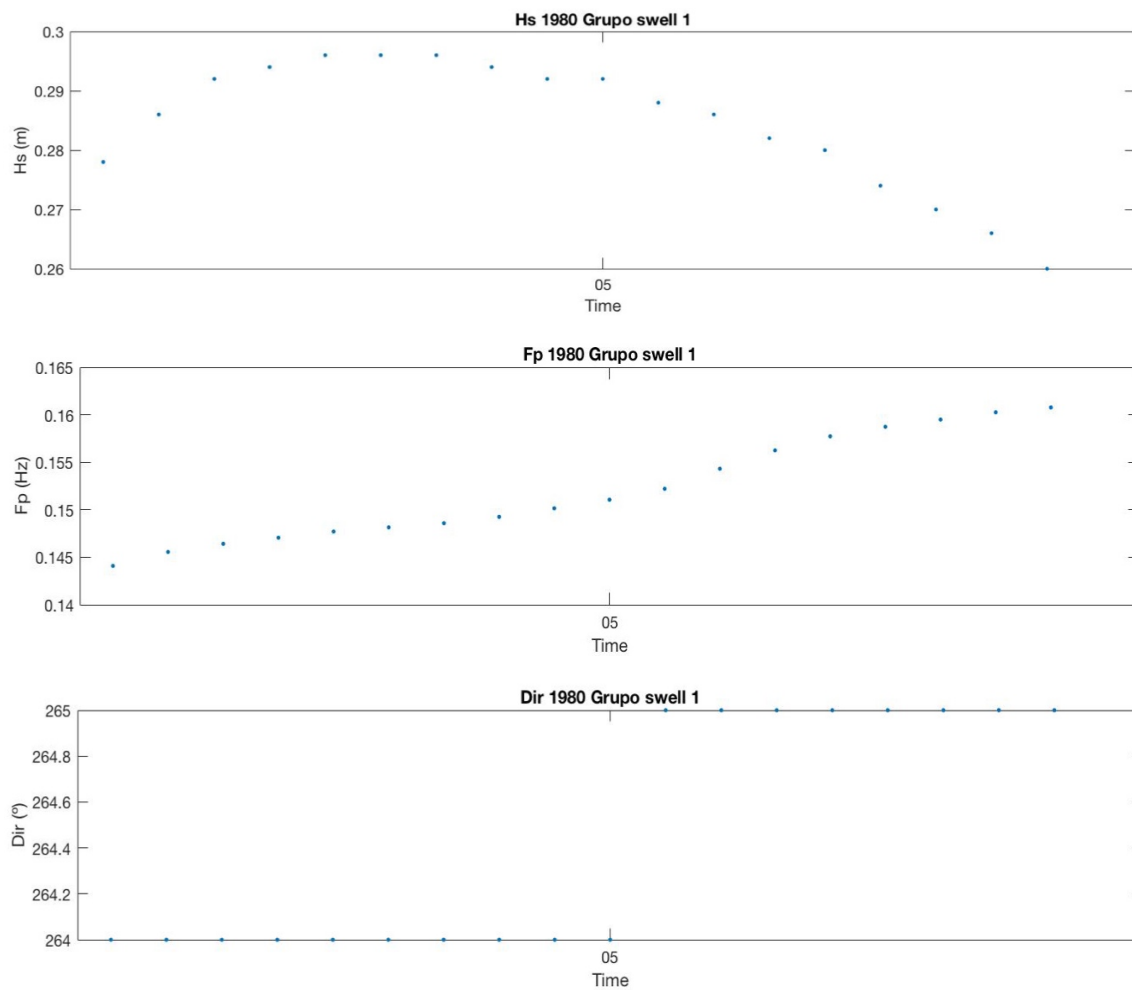


Figura 11. Swell identificado en Majuro el 30 de abril de 1980.

En el anterior ejemplo (figura 11), el código ha identificado un swell con una duración de 18 horas, cuya dirección se encuentra entre 264-265° y cuya frecuencia está en torno a los 1.5 Hz, lo que indica que el oleaje se generó a una distancia considerable respecto a la isla de Majuro.

3.6. DETERMINACIÓN DEL ORIGEN

Una vez identificados los diferentes swells se procede a calcular la distancia a su origen de generación. Para ello nos basamos en la relación de dispersión, anteriormente descrita, y más concretamente en la frecuencia y en el tiempo, los cuales están relacionados mediante la ecuación 9.

En el caso del parámetro “frecuencia”, se ha utilizado la frecuencia media, debido a que no se están analizando eventos extremos, sino de carácter medio. Sin embargo, la base de datos aportada (CSIRO) no incluye particiones de período medio, sino de período de pico; por lo que se ha aplicado la siguiente expresión para obtenerlo, y así poder usar la frecuencia media.

$$T_p = T_m 1.411 \gamma^{-0.07972} \quad (13)$$

Donde:

γ : parámetro que hace referencia al tipo de espectro, en este caso *Pearson Moscovitz*; igual a 1 suponiendo un oleaje totalmente desarrollado.

Con todo, se aplican las ecuaciones descritas con anterioridad en el contexto teórico, y que se resumen en las siguientes.

$$\frac{df}{dt} = m_{ft} = \frac{g}{4\pi d} \quad (9)$$

$$d = \frac{g}{4\pi m_{ft}} \quad (10)$$

$$t_0 = \frac{-b}{m_{ft}} \quad (11)$$

La variable que necesitamos determinar para poder calcular la distancia y el tiempo de generación es el módulo que relaciona la frecuencia media con los rangos de tiempo (m_{ft}) el cual se calcula de la siguiente manera:

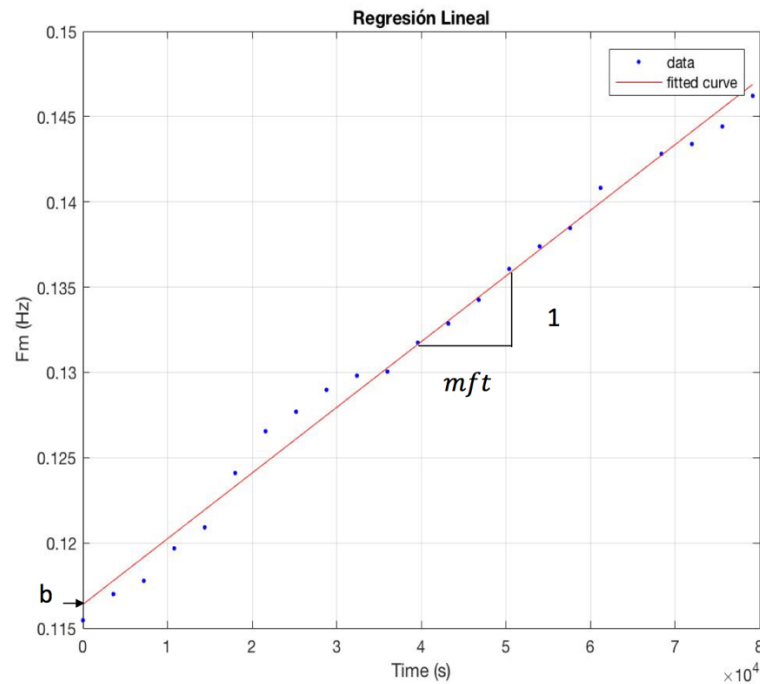


Figura 12. Regresión lineal de la relación entre los rangos de tiempo que tarda el swell en llegar a la isla y su frecuencia media.

De esta forma, el algoritmo nos devuelve un origen en tiempo y en espacio para cada swell.

Finalmente, se determina la distribución espacial del origen de donde provienen los swells. Esto se realizará basándonos en geometría esférica, tomando la dirección de propagación como la media de cada grupo, para indicar la trayectoria del círculo máximo de la tierra por el que viajan las olas.

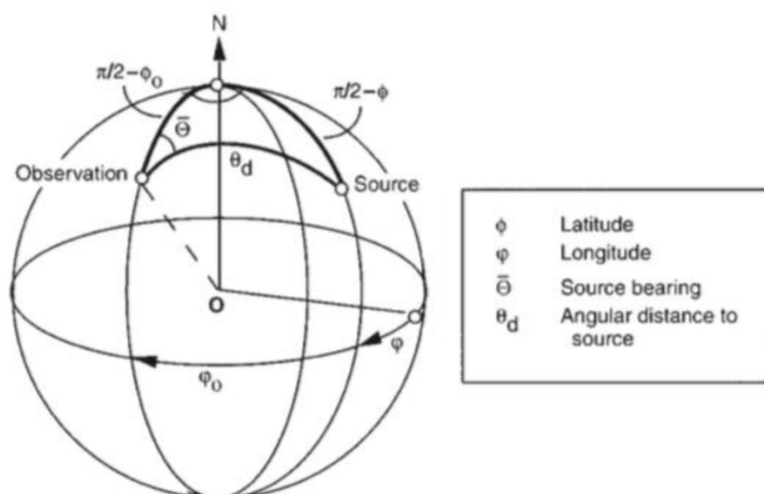


Figura 13. Croquis sobre cómo aplicar la geometría esférica para, en este caso, hallar el origen de los swells.

Por último, se representan espacialmente los orígenes de los swells observados en la isla de Majuro (7.166, 171.1668) durante el período 1980:2013.

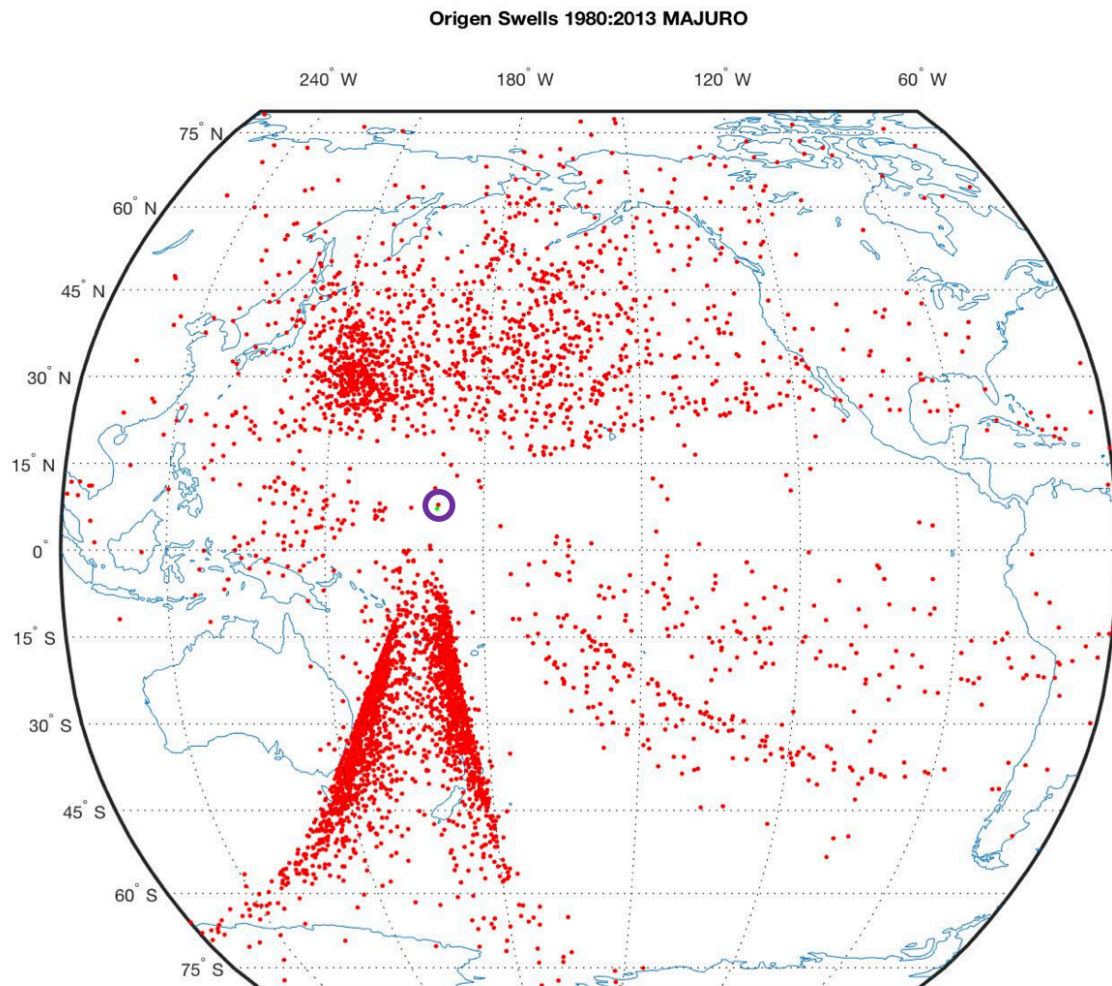


Figura 14. Mapamundi en la proyección del océano pacífico, con la distribución de los orígenes del oleaje swell que llega a la isla de Majuro.

Como se puede observar en la figura 14, el origen de los swells se sitúa principalmente a lo largo de la costa noreste de Asia, costa noroeste de América del Norte, entre Australia y Nueva Zelanda, y de la Polinesia Francesa.

No obstante, hay algunos puntos situados en tierra. Esto puede estar debido a ciertas incertidumbres en los parámetros de regresión lineal, asociadas al conjunto de datos. Estas incertidumbres pueden relacionarse a que las tormentas no son estáticas y a la discretización del modelo.

Además, es importante destacar las obstrucciones que se producen por la localización de las islas de Australia, Nueva Zelanda, Fiji y la Polinesia francesa.

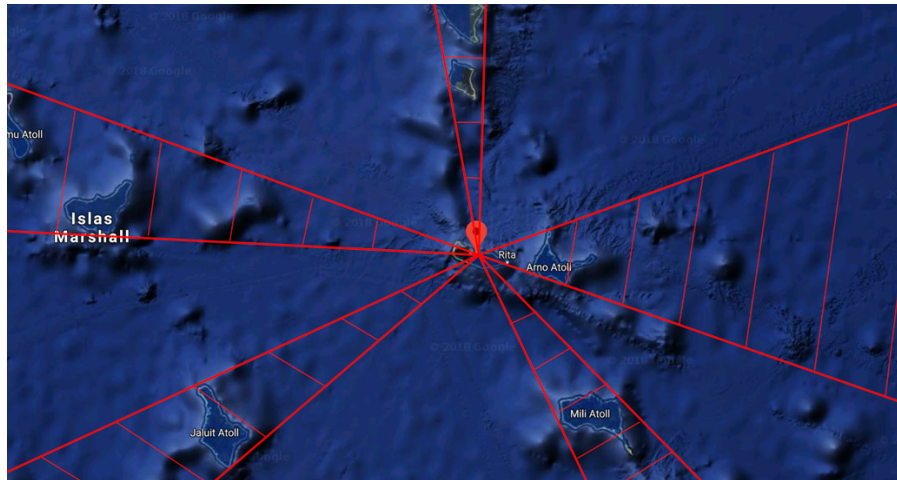


Figura 15. Captura de la aplicación google earth donde se pueden ver las obstrucciones a nivel local del oleaje en los alrededores de Majuro.

Las obstrucciones que se producen a nivel local también se ven reflejadas en el mapa de las zonas de generación (figura 15).

También se observa como hay puntos de origen situados entre las latitudes 0° y 15° S, zonas tropicales en las cuales no se genera oleaje. Estos orígenes pueden ser el resultado de un mal ajuste de la regresión lineal entre los rangos de tiempo y la frecuencia media (figura 12).

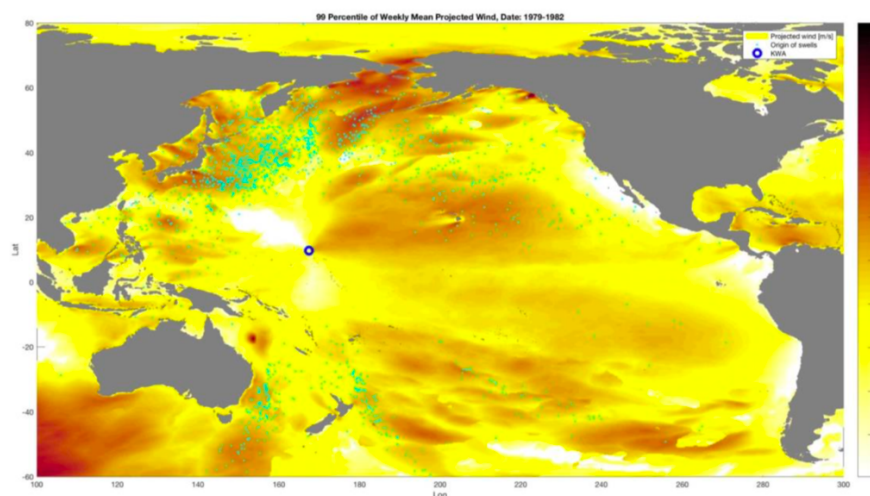


Figura 16. Mapa del percentil 99 del viento medio proyectado en el océano pacífico.

En la figura 16 se puede observar como en las latitudes anteriormente mencionadas no hay viento como para generar oleaje.

Otra forma de representar los orígenes de los swells sería con una representación en coordenadas polares que representase el período de pico en función de las direcciones.

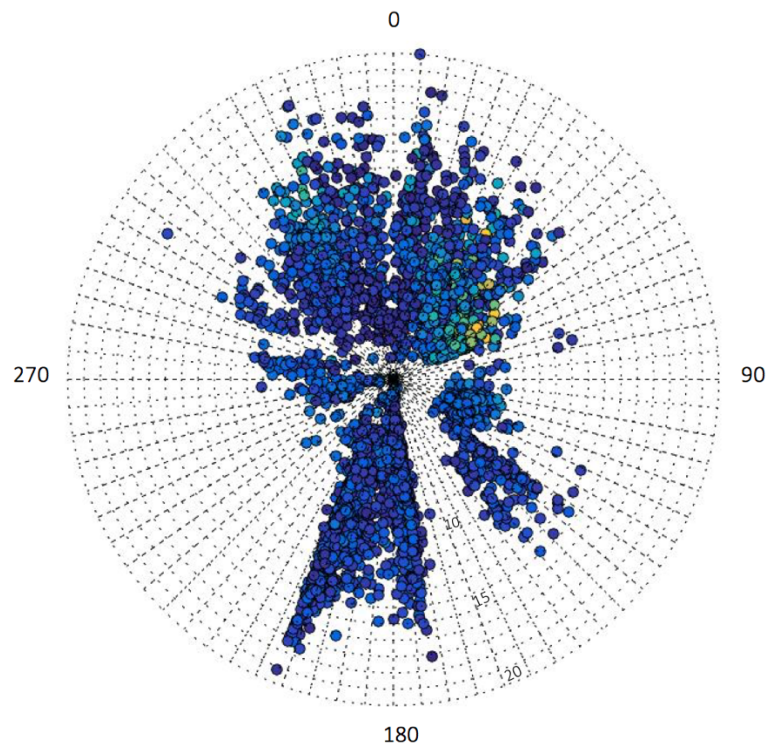


Figura 17. Representación en polares del período de pico del oleaje en la costa de Majuro.

A partir de este gráfico (figura 17) podemos ver como los swells con períodos más largos son los que provienen del sur, mientras que los que tienen períodos más cortos proceden del este y del oeste. Además, es importante destacar las obstrucciones que se producen por la localización de las islas de Australia, Nueva Zelanda, Fiji y la Polinesia francesa.



4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE SWELLS Y VALIDACIÓN DE LOS ORÍGENES

4.1. INTRODUCCIÓN

El proceso consiste en, partiendo de datos espectrales, formar un SUPER ESPECTRO con el cual validar la ubicación de los orígenes de los swells (determinado en el apartado anterior) e identificar las distintas familias de swells que conforman el espectro para, finalmente, clasificar los orígenes espaciales por familias.

4.2. BASE DE DATOS

La base de datos espectral utilizada para este proyecto es CSIRO, un hindcast resultado de usar el WaveWatchIII v4.08 forzado con una base de datos CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) de vientos horarios entre 1979 hasta 2017. La base de datos tiene las mismas características que la usada en el apartado 3. Recordar que el espectro está discretizado en 29 frecuencias exponencialmente espaciadas desde 0.038 Hz hasta 0.5 Hz y 24 direcciones con una resolución constante de 15 grados.

4.3. ELABORACIÓN DEL SUPER ESPECTRO

Partiendo de la base de datos anteriormente descrita, se procede a construir un SUPER ESPECTRO que contenga información espectral de todas las direcciones posibles, representativo del oleaje incidente en la isla de Majuro.

Para su construcción se escogieron 6 puntos alrededor de la isla (de la base aportada con 7 puntos) de forma que cada uno contenga información representativa de la dirección a la que está orientado. Así, dividiendo una circunferencia en 6 sectores, cada sector representa 60 °.

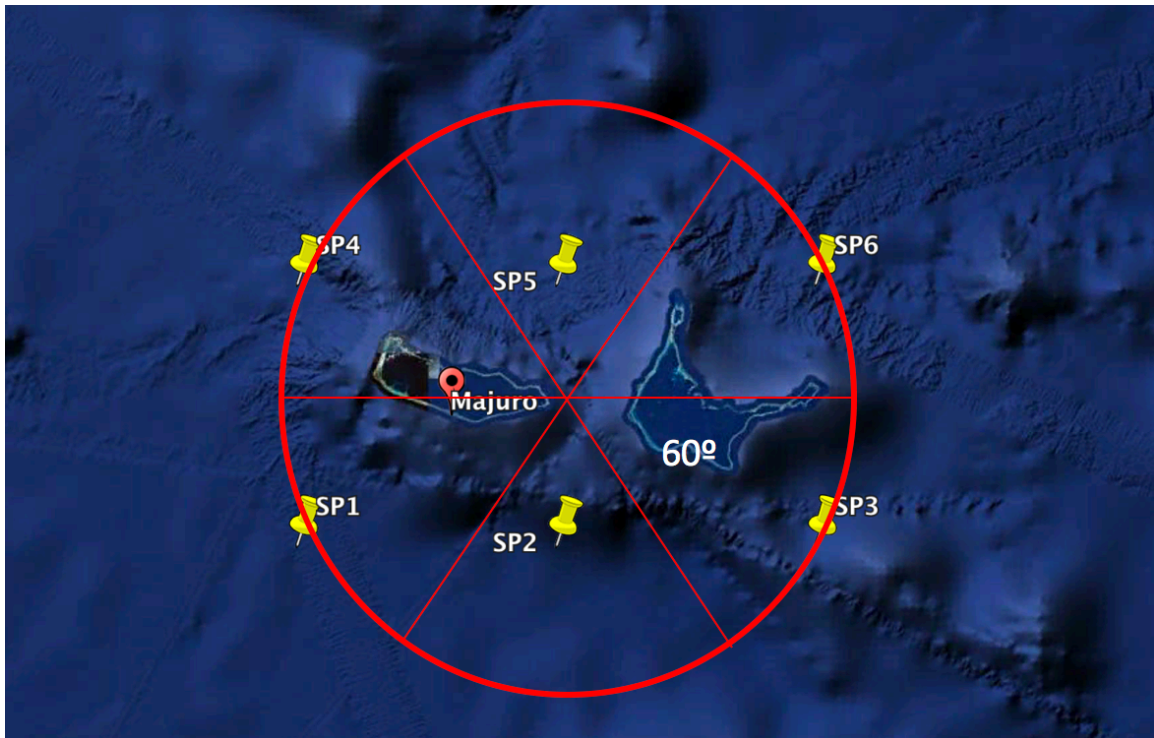


Figura 18. Mapa con los puntos seleccionados alrededor de la isla de Majuro y sectores direccionales a los que representan.

Una vez seleccionados los 6 puntos y determinadas las direcciones a las que van a representar, se filtra la información que contienen (energía y frecuencia), siendo válida solo la referente al sector direccional que representan. Finalmente, toda esa información se junta conformando el SUPER ESPECTRO.

4.4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE SWELLS

El espectro del oleaje es la distribución de la energía en una serie de rangos de frecuencia y direcciones. En el existen diferentes sistemas de oleaje, entre los cuales se encuentran las familias de swells.

En el SÚPER ESPECTRO del oleaje, con sus particiones iniciales, se procede a buscar las familias de swells. Para ello se aplica la técnica de particiones espectral, en la cual el espectro es tratado como áreas de cuencas invertidas. Esta técnica consiste en realizar un

algoritmo que analice los picos del espectro, agrupando todos los picos que están cerca o ascienden al mismo pico local y convirtiéndolos en una nueva partición.

A continuación, se determinan los rangos de frecuencias y direcciones en los que se quiere discretizar el espectro, para así, determinar el número de ocurrencias del oleaje en cada celda, y finalmente construir una distribución de densidad de probabilidad.

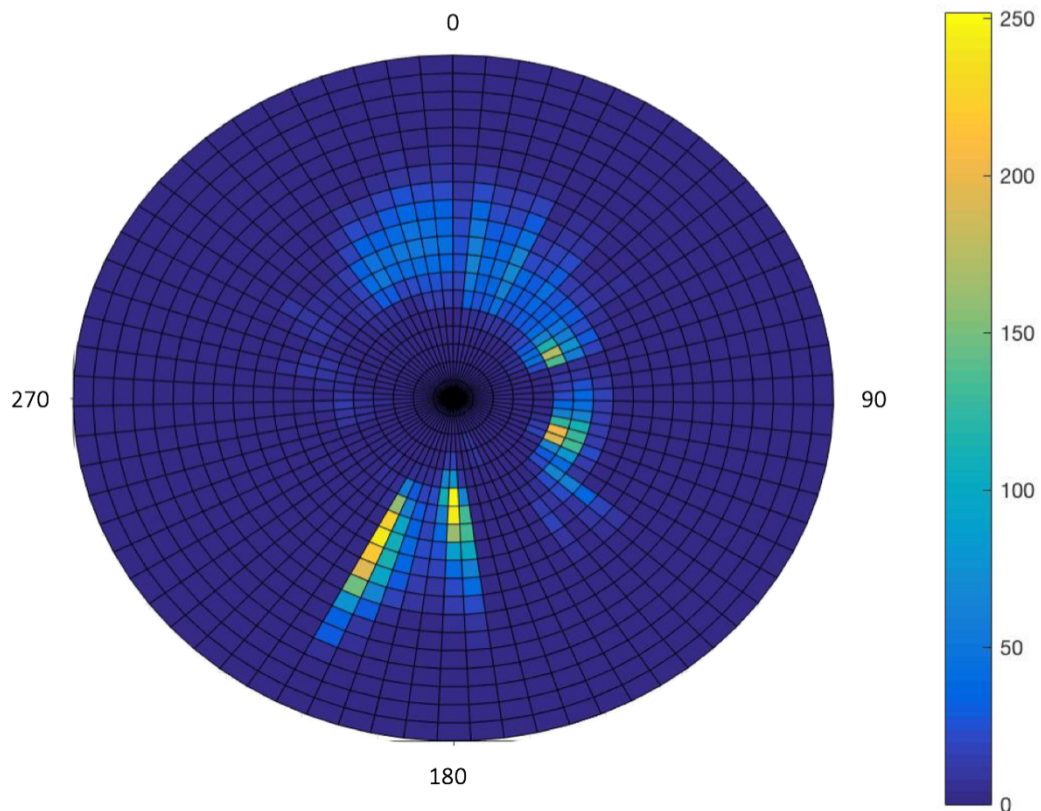


Figura 19. Histograma o función de densidad de probabilidad por direcciones y períodos de pico.

Finalmente, para hallar las distintas familias de swells se introduce la distribución de probabilidad en una función de Matlab (watershed) la cual identifica las cuencas invertidas, separando al oleaje por familias.

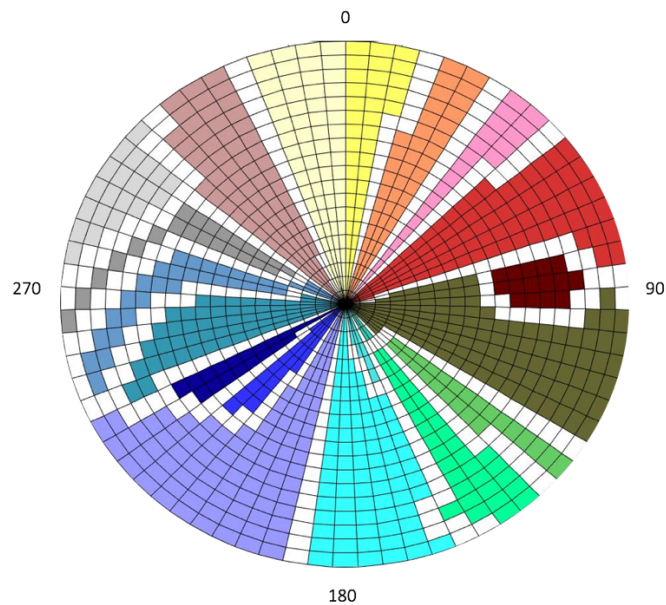


Figura 20. Histograma tras aplicar la función watershed, con las distintas familias identificadas por colores.

Se obtiene un total de 20 familias de swells, separadas por direcciones y período, con una discretización de 5° (dirección) y 1 segundo (período).

En la figura anterior (figura 20) se puede observar como hay direcciones en las que se haya más de una familia de swells, debido principalmente a la existencia de varios sistemas atmosféricos en una misma trayectoria, y a que estos no tienen un carácter estático.

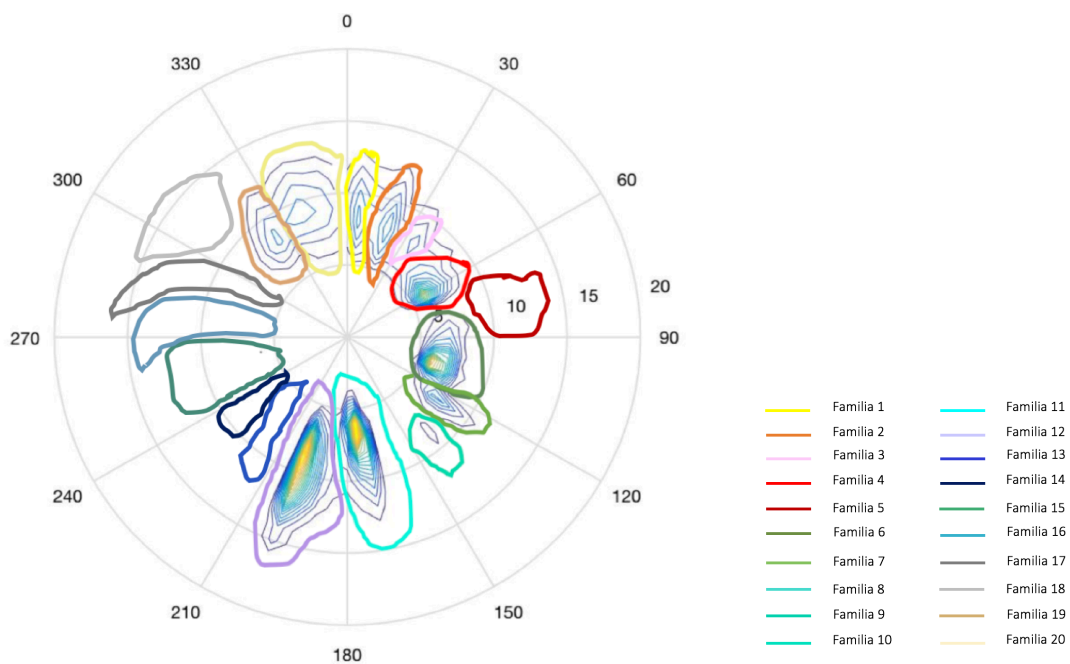


Figura 21. Espectro direccional de oleaje con las familias identificadas por colores.

4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ORÍGENES

Los datos obtenidos en el proceso de identificación de las familias de oleaje, son extrapolados a la localización de los orígenes de los swells (determinados en el apartado 4). Para ello se estudiarán los rangos de direcciones y de período de pico de cada familia, y se relacionarán con el período de pico medio y la dirección media de cada swell, clasificando de esta manera las zonas de generación de swells por familias de características similares.

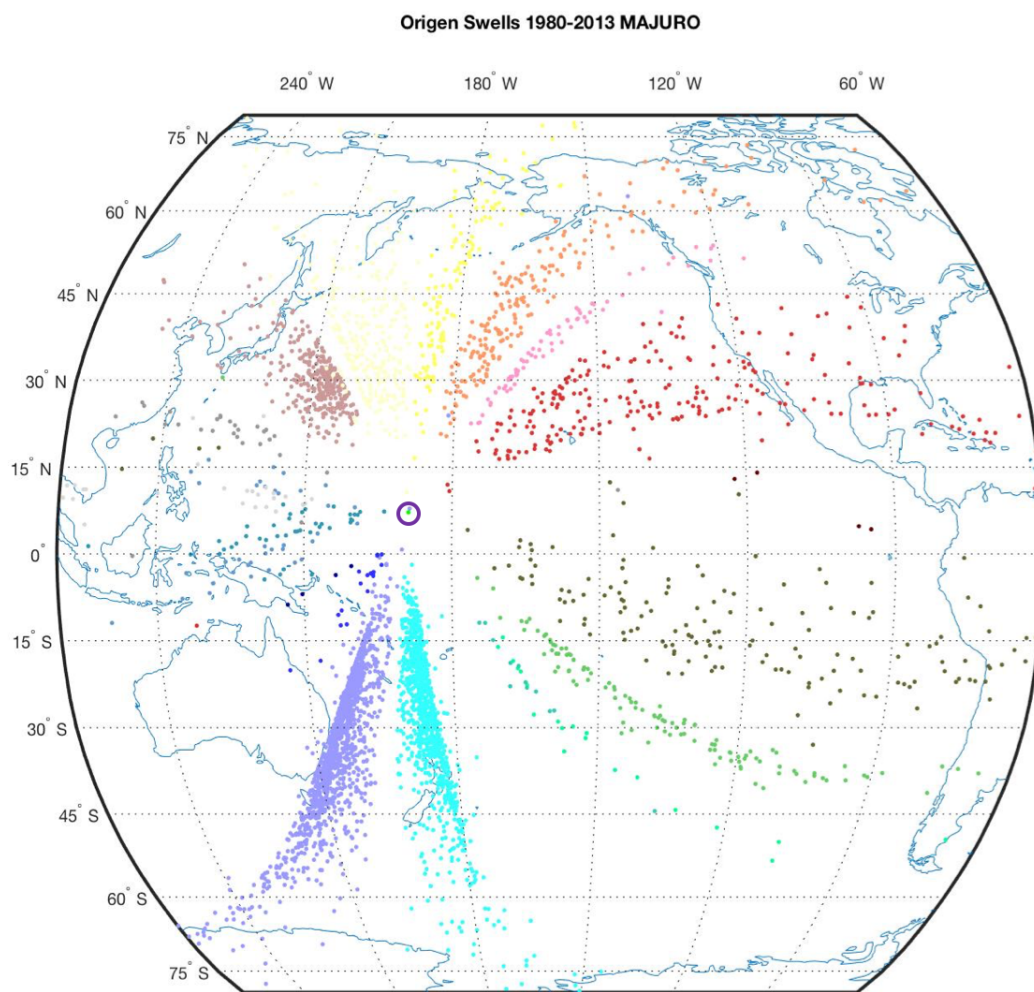


Figura 22. Mapamundi con la distribución espacial de los orígenes de los swells clasificados por familias.

Como se puede observar en la figura anterior (figura 22), las familias quedan perfectamente definidas. Al oeste de Majuro, es donde se produce la mayor mezcla de familias, cumpliendo con lo establecido a partir de la función watershed.

A continuación se incluye un mapa de ESTELA en el cual se representa la energía del oleaje en dirección a Majuro en el período de tiempo de 1993 a 2012.

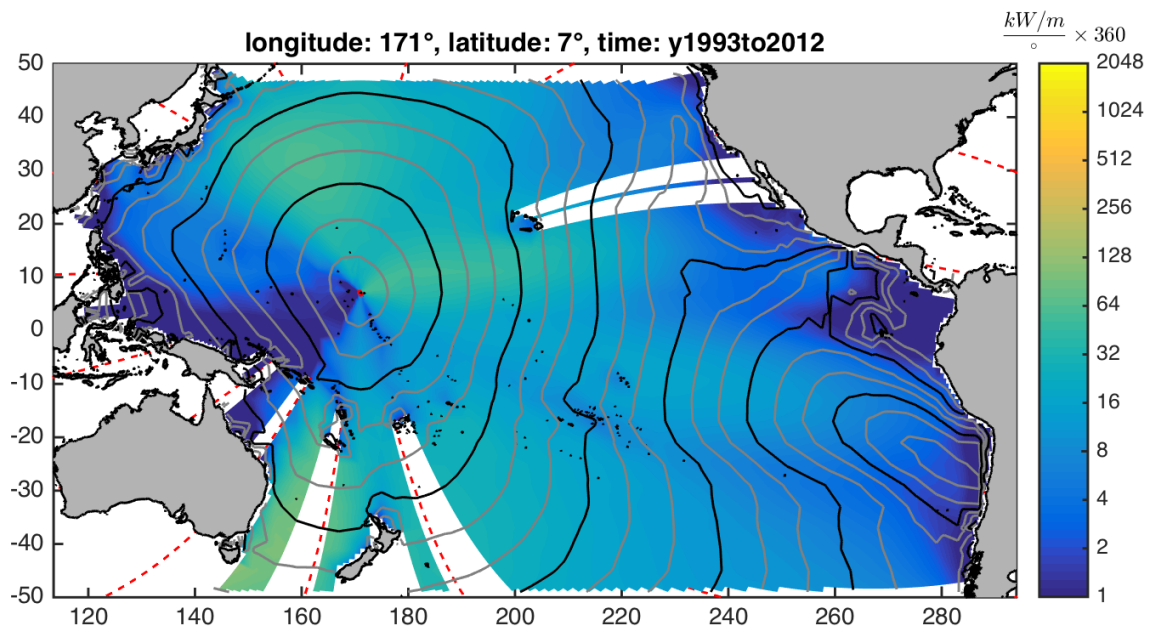


Figura 23. Resultado de ESTELA para la isla de Majuro desde 1993 hasta 2012.

Como se puede observar en la figura anterior (figura 23), la localización de las zonas de generación, e incluso los patrones espaciales de algunas familias quedan definidos a partir de ESTELA, por lo que se concluye que la determinación de los orígenes y la posterior clasificación de los swells está correctamente ejecutada.



4. CLIMATOLOGÍA DE LOS SWELLS

La obtención del origen de los oleajes swells que llegan a Majuro, y su posterior clasificación por familias permiten realizar una caracterización de la climatología de estos fenómenos.

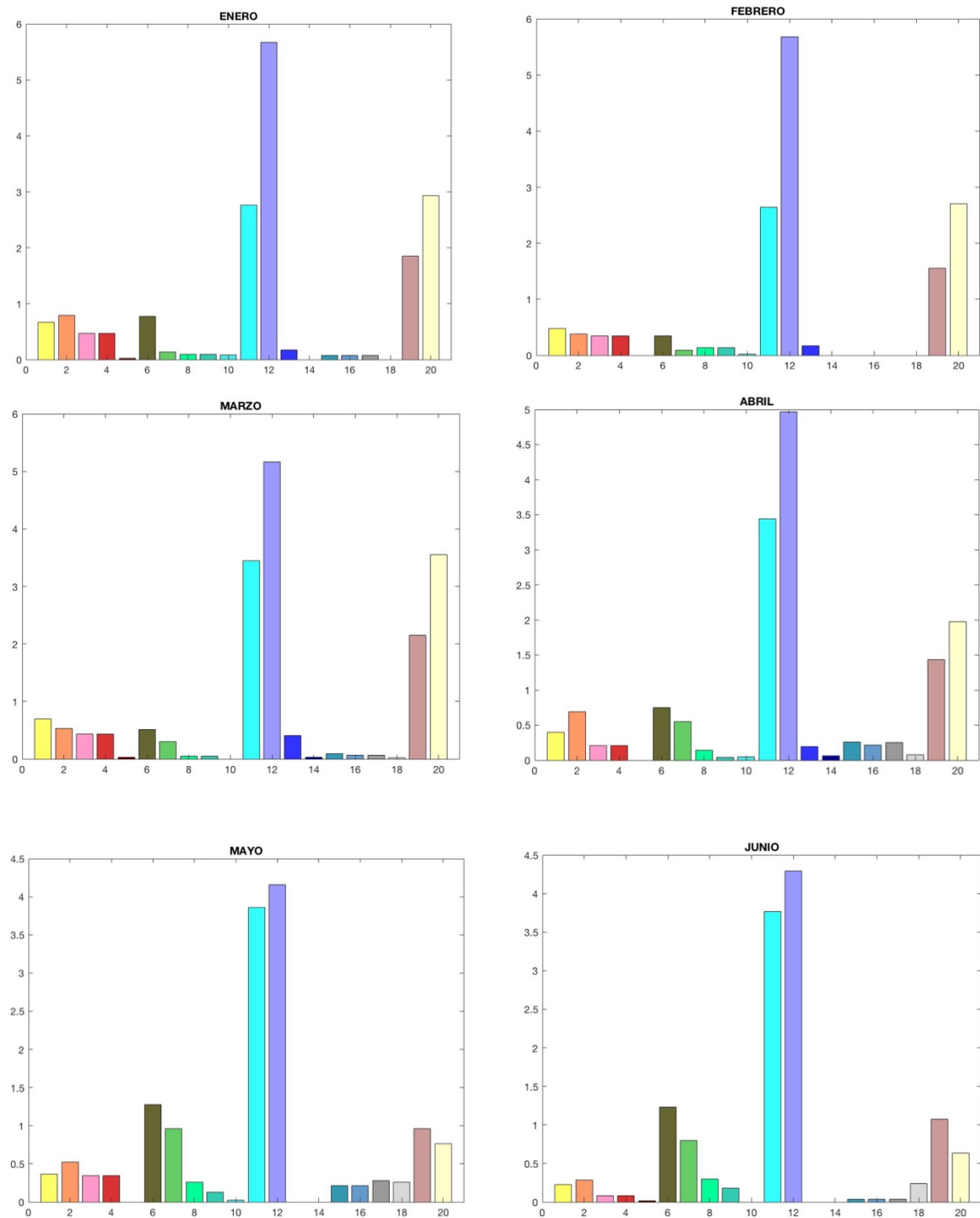


Figura 24. Gráficos mensuales que representan el número de días por mes que llegan oleajes a la isla de Majuro, clasificados por familias (1-20) y promediado anualmente.

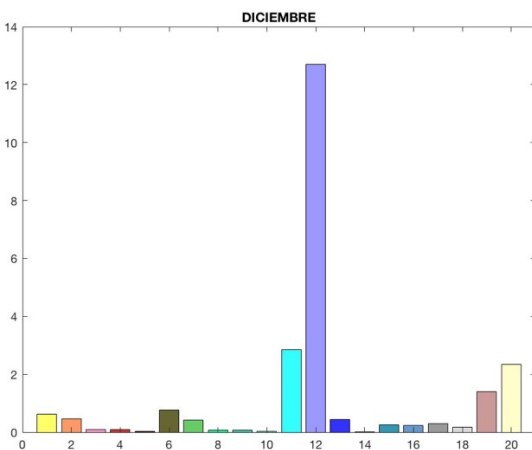
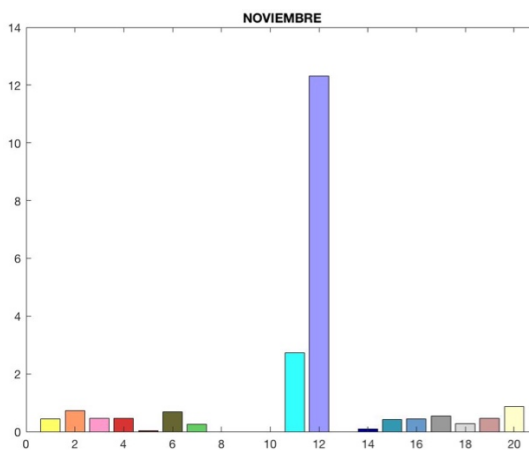
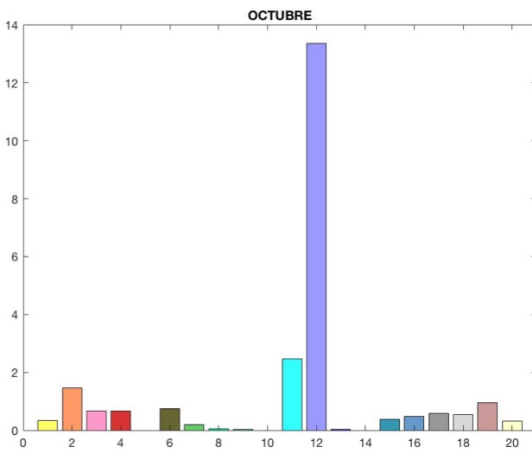
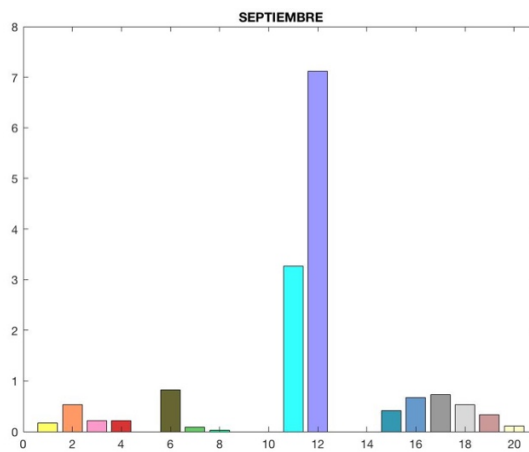
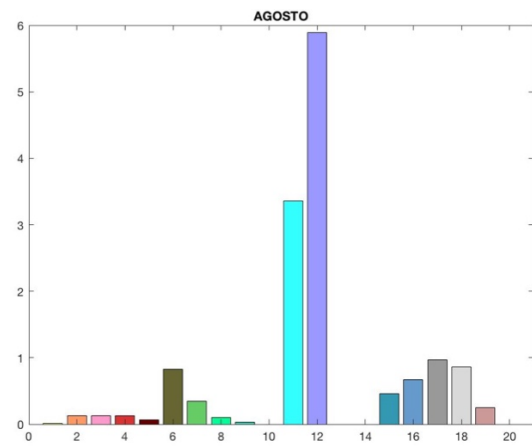
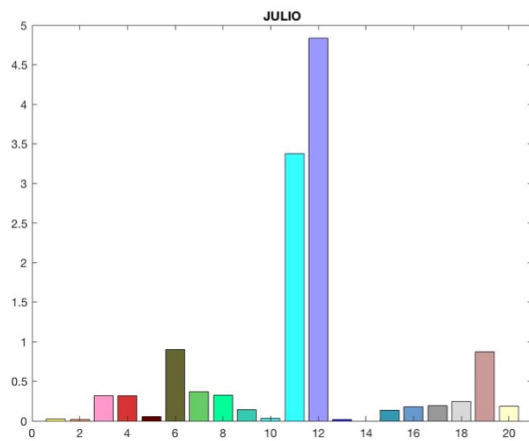


Figura 25. Gráficos mensuales que representan el número de días por mes que llegan oleajes a la isla de Majuro, clasificados por familias (1-20) y promediado anualmente.

Como se puede observar en las gráficas anteriores (figura 24 y 25), las familias de swells más frecuentes a lo largo de los meses y con más ocurrencia en número de días son las que provienen de Australia y Nueva Zelanda (familias 11 y 12). Esto puede ser debido a los vientos del oeste, más concretamente a los “40 rujientes” y los “50 furiosos”, vientos que soplan entre las latitudes 40 y 50º de forma constante provocando unas condiciones de oleaje adversas durante todo el año debido a la casi inexistente tierra de por medio en su trayectoria (figura 26).



Figura 26. Mapamundi con la trayectoria de los “40 rujientes” y los “50 furiosos”.

Las siguientes familias más frecuentes, son las procedentes de la costa norte de Asia (familias 19 y 20), las cuales aparecen en prácticamente todos los meses, disminuyendo significativamente en los meses de agosto a noviembre. El oleaje procedente de esta zona está generado por los vientos del oeste, propios de esas latitudes, los cuales soplan prácticamente todo el año.

Más al sur, se encuentran las familias de oleaje generadas por los tifones de la costa de Japón (figura 27), las cuales están presentes significativamente de julio a octubre (familias 16 a 18).

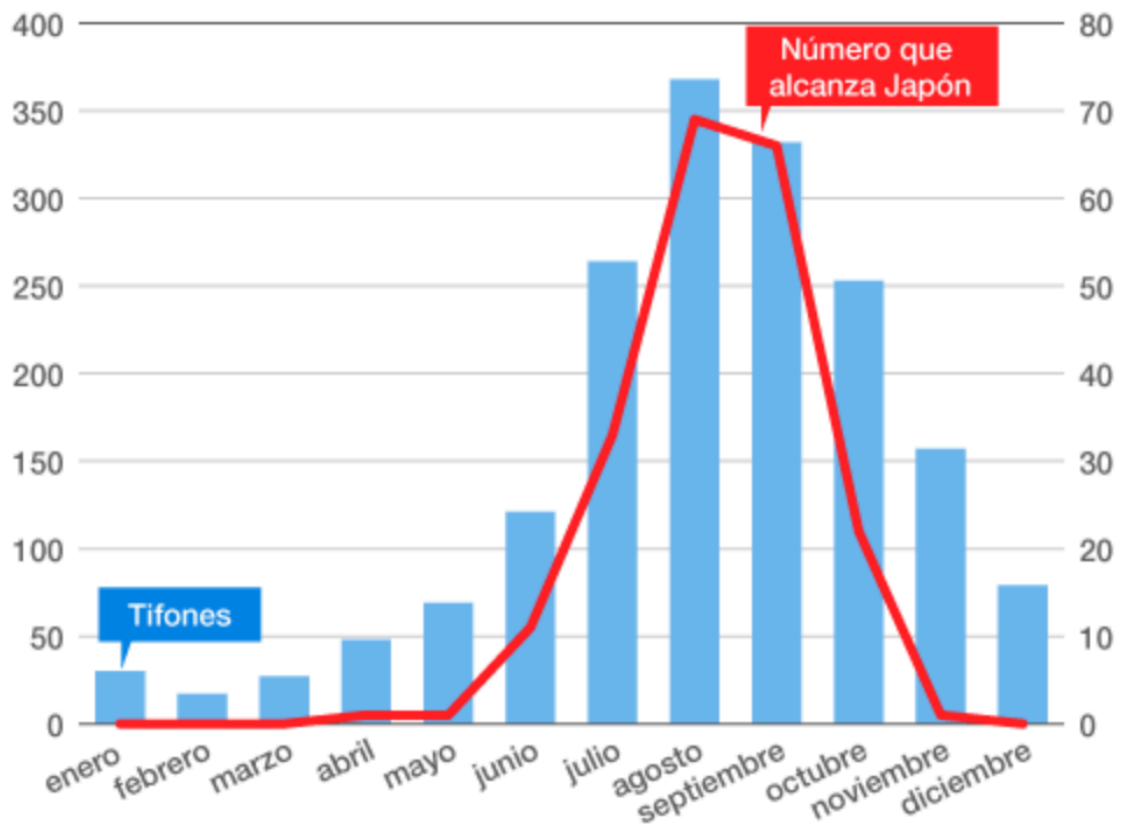


Figura 27. Gráfico sobre la estacionalidad de los tifones que alcanzan Japón.

En cuanto a las familias de oleaje relacionadas con los vientos alisios (del norte y del sur) estas aparecen de abril a septiembre, debido a la mayor frecuencia de estos vientos en verano (familias 3 a 8).

Por último, los oleajes generados en la región Norte del pacífico (familias 1 y 2), los cuales presentan una mayor ocurrencia durante los meses de enero a julio, son generados por ciclones formados en la Baja Aleutiana (Aleutian Low) la cual es más intensa en los meses de invierno, disipándose casi por completo durante el verano.

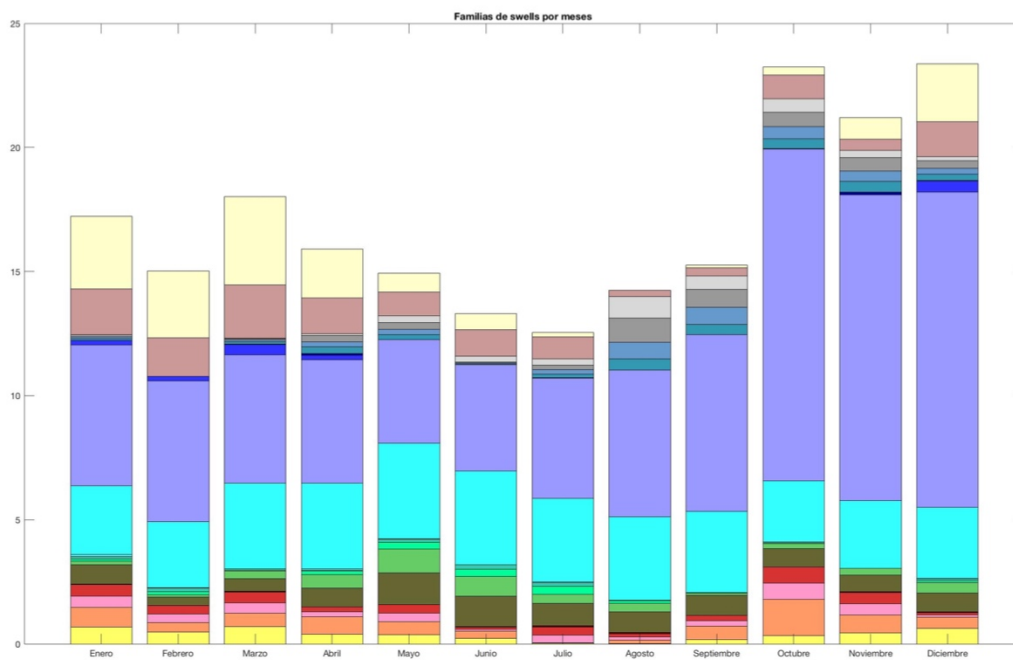


Figura 28. Gráfico mensual, resumen de los anteriores, donde se representan por familias y por meses el número de días de aparición de los swells, promediado anualmente, en la isla de Majuro.

En el gráfico (figura 28), resumen de los anteriores gráficos mensuales, se puede observar la estacionalidad que presentan las distintas familias de swells. El oleaje generado en el hemisferio norte cumple con los patrones de estacionalidad, al ser más frecuente en los meses comprendidos de septiembre a junio, y disminuyendo significativamente en los meses de verano. Sin embargo, el oleaje procedente del hemisferio sur no sigue claramente los patrones de estacionalidad, en los cuales se establece que los meses de calmas son los comprendidos en el invierno. En particular, el oleaje proveniente del este de Australia incluso aumenta en los meses de invierno con respecto a las demás familias.

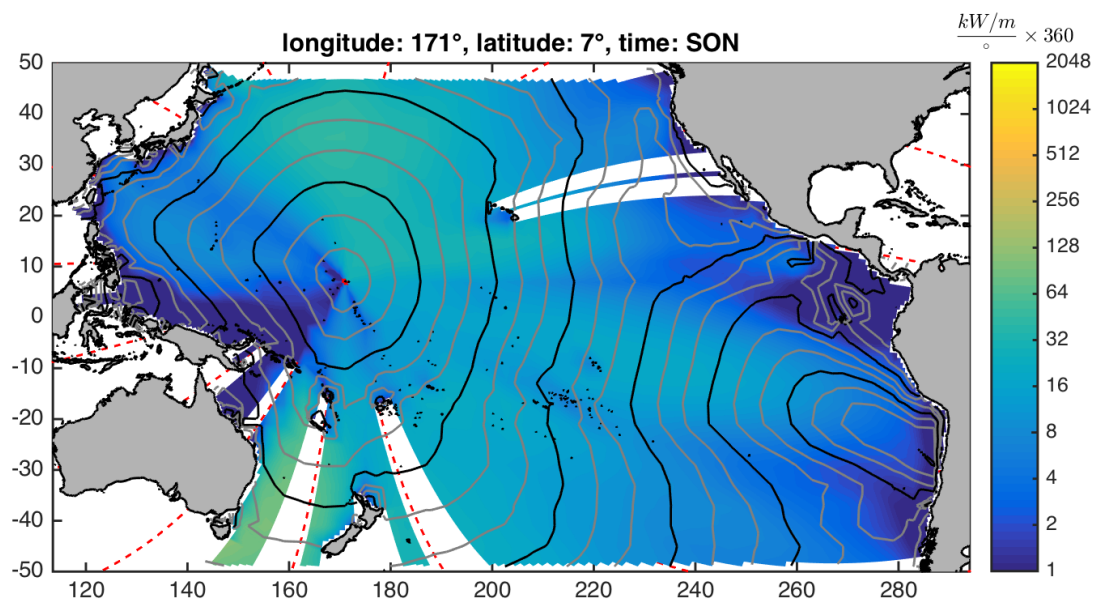


Figura 29. Mapa de ESTELA (Pérez et al, 2014) para la isla de Majuro en los meses de septiembre a noviembre.

Apoyándonos en el mapa anterior (figura 29), el cual contiene información sobre la energía del oleaje presente en los meses de septiembre a noviembre, se justifica la mayor frecuencia de swells procedentes de Australia en estos meses, debido a la acumulación de energía que se puede observar en la zona.

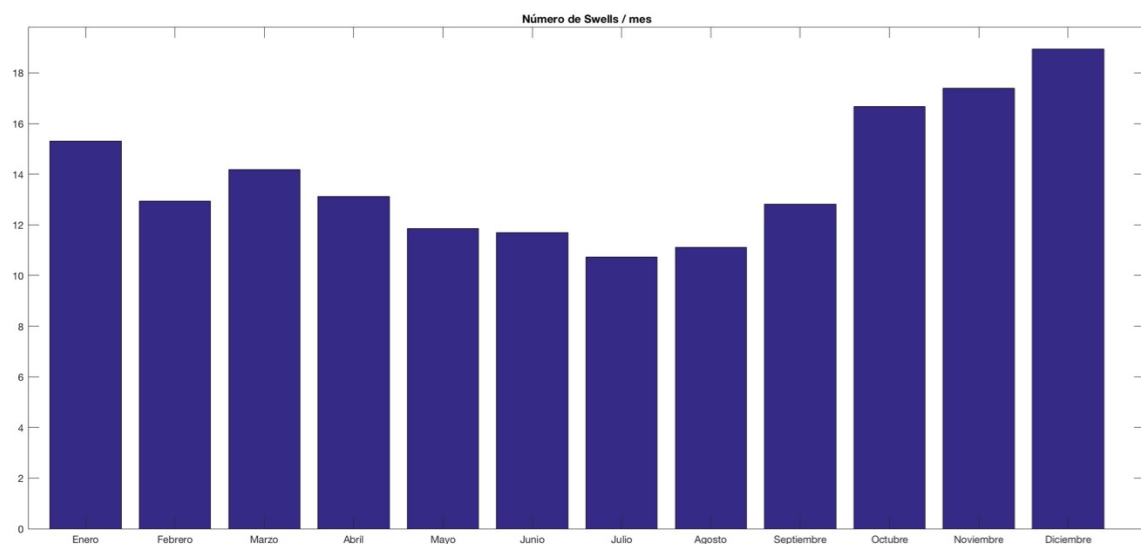


Figura 30. Gráfica mensual que representa el número de swells que llegan cada mes a la isla de Majuro, promediado anualmente.

En cuanto al número de swells que llegan a la costa de Majuro durante un año medio, en la gráfica anterior (figura 30) se observa que los meses con mayor número de eventos corresponde a la estación de invierno, mientras que durante los meses de verano estos disminuyen casi en un 40%.

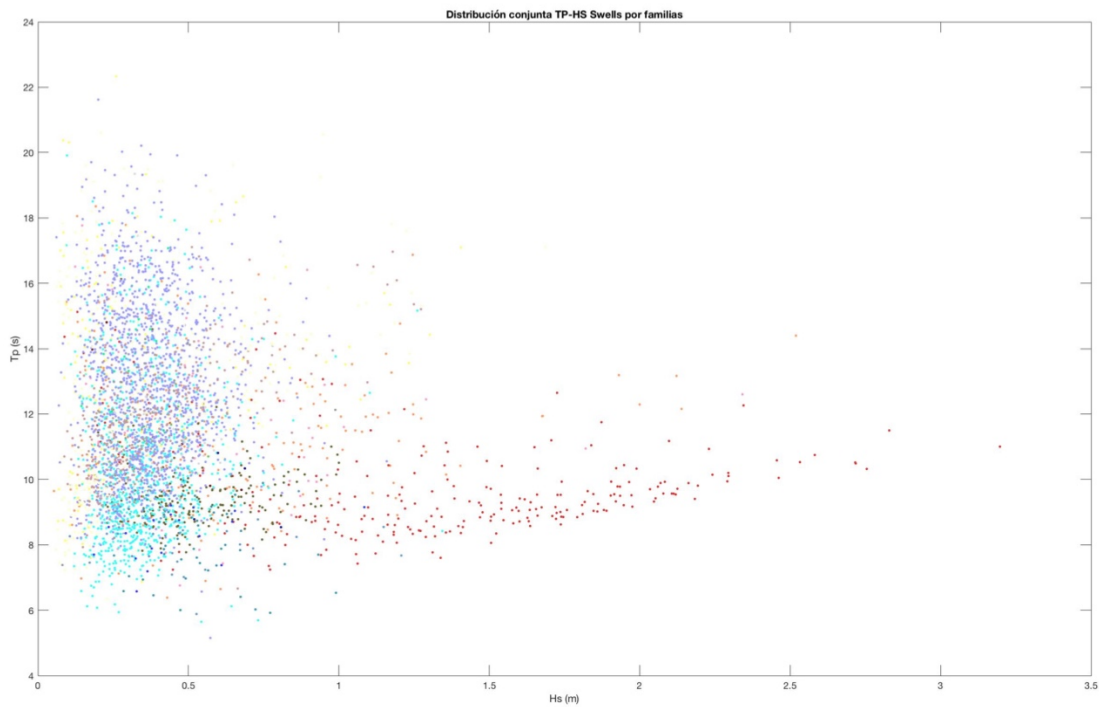


Figura 31. Distribución conjunta del período de pico medio frente a la altura de ola media de los swells que llegan a la isla de Majuro.

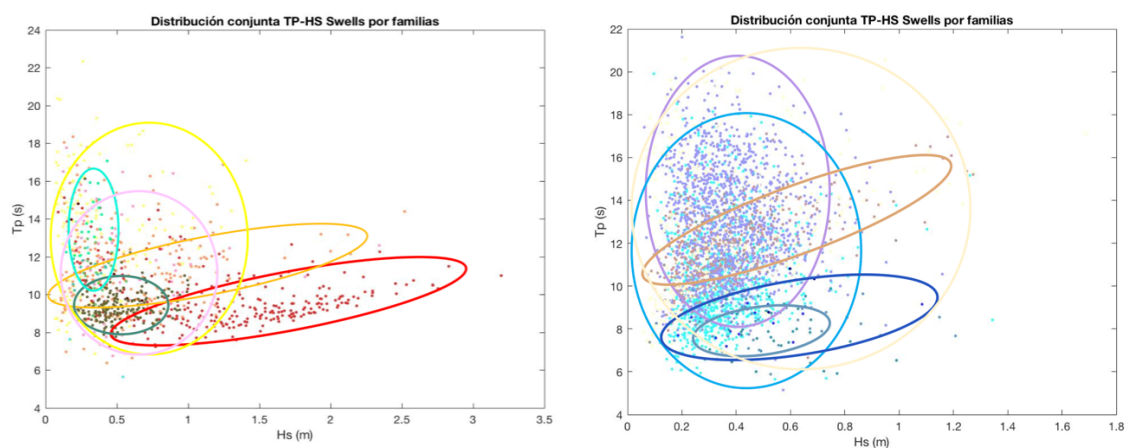


Figura 32. Distribución conjunta del período de pico medio frente a la altura de ola media dividida en dos, con 10 familias en cada gráfico.



Para caracterizar mejor el período y la altura de ola de las distintas familias, se ha hecho una distribución conjunta de ambas variables (figura 31 y 32). En ella se puede apreciar como las familias generadas por los alisios del norte (familias 2, 4, 5 y 6 / naranja, rojo, granate y verde) presentan unos períodos bajos representando las mayores alturas de ola que llegan a la isla con valores de hasta 3 metros.

En el caso de los oleajes provenientes del sur (familias 11 y 13 / azul, lila, azul oscuro), estos presentan períodos más altos, de hasta 20 segundos, con alturas de ola que rara vez superan 1 metro.

En cuanto a los oleajes provenientes del oeste (familias 16 a 18 / grises), la altura de ola no llega a superar 1 metro, con períodos comprendidos entre 8 y 14 segundos.

Las familias de oleajes que provienen del norte (familias 20, 1 y 3 / amarillos y rosa) son las que presentan mayor variedad, con períodos de 8 a 20 segundos y valores de altura de ola entre 0.25 y 1.5 metros.



5. CONCLUSIONES



La identificación de las zonas de generación de los swells y su posterior caracterización climatológica por familias tienen como objetivo entender el oleaje local y poder predecirlo en base al estudio de la distribución espacial de los orígenes de los swells.

Para ello se ha desarrollado una metodología basada en el carácter multidireccional de los swells que llegan a la isla de Majuro. Esto incluye la construcción de un SUPER PUNTO y de un SUPER ESPECTRO dotados de la mayor cantidad de información direccional, a partir de los cuales se desarrolla un algoritmo de rastreo de los swells.

El rastreo de swells ha sido desarrollado a partir de una discretización espectral por frecuencias y direcciones de la base de datos. Una vez identificados se ha aplicado la relación de dispersión y geometría esférica para llegar a la identificación del origen, tanto espacial como temporal de los distintos swells.

La determinación de las distintas familias se ha llevado a cabo a partir de la identificación de los picos de energía del espectro direccional, por frecuencias y direcciones similares.

Esta metodología se complementa con ESTELA, aportando más información acerca de las distintas familias de swells y su sentido físico.

La aplicación en la isla de Majuro concluye que a sus costas llegan un total de 20 familias de swells repartidas entre el hemisferio norte y el hemisferio sur. Estas son generadas principalmente por los vientos del oeste (localizados en latitudes extratropicales), por los vientos alisios tanto del norte como del sur y por los vientos generados en las regiones tropicales.

En resumen, se observa como el oleaje se genera y se propaga a lo largo del pacífico recorriendo distancias de más de 7000 km, agrupándose y llegando a las costas de una isla en forma de swells. Esta información es imprescindible para los archipiélagos del pacífico a la hora de prever el riesgo de inundación y adaptarse al cambio climático.

Sin embargo, el oleaje swell es más difícil de modelar que el oleaje de viento, debido a que durante el proceso de advección puede llegar a sufrir la interacción con otros fenómenos no presentes en el modelo (corrientes, turbulencia, contacto con la atmósfera...). Por lo tanto, es necesario analizar estos procesos de advección para su futura inclusión en los modelos numéricos.

El enfoque de futuras líneas de investigación está encaminado en, a partir de datos espectrales, realizar estadísticos de los eventos de tormenta para conseguir una mejor caracterización de las condiciones de oleaje y sus zonas de generación en los archipiélagos más vulnerables del pacífico.



6. REFERENCIAS



Durrant, T; Hemer, M; Trenham, C; Greenslade, D (2013): CAWCR Wave Hindcast 1979-2010. V7. CSIRO. Data Collection.

Genz, J., J. Aucan, M. Merrifield, B. Finney, K. Joel, and A. Kelen. 2009. Wave navigation in the Marshall Islands: Comparing indigenous and Western scientific knowledge of the ocean. *Oceanography* 22(2):234–245, doi:10.5670/oceanog.2009.52.

Hanson, J.L.; Phillips, O.M. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2001, 18, 277–293.

Hegermiller, C.A., J.A.A. Antolinez, A. Rueda, P. Camus, J. Perez, L.H. Erikson, P.L. Barnard, and F.J. Mendez, 2016. A wave spectrum-based approach to defining the predictor for statistical downscaling of local wave climate. *Journal of Physical Oceanography*, 47, doi: 10.1175/JPO-D-16-0191.1.

Hoeke Ron K., Kathleen L. McInnes, Jens C. Kruger, Rebecca J. McNaught, John R. Hunter, Scott G. Smithers, 2013. Widespread inundation of Pacific islands triggered by distant-source wind- waves. *Global and Planetary Change*, 2013, 108, 128-138.

Leo H. Holthuijzen, 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 31-55.

Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research* 11, 529–562.

Munk, W.H., Miller, G.R., Snodgrass, F.E., Barber, N.F., 1963. Directional recording of swell from distant storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 255 (1062), 505–584.

Munk, W., Sargent, M., 1948. Adjustment of Bikini Atoll to waves. *Transactions American Geophysical Union* 29 (6), 855–860.

Perez, J., M. Menéndez, F. J. Méndez, and I. J. Losada, 2014. ESTELA: A method for evaluating the source and travel-time of the wave energy reaching a local area, *Ocean Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0740-7>.

Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., Van Dongeren, A., Moore, C., 2012. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117 (C11), C11022.

Portilla, J, 2012. Storm-Source-Locating Algorithm Based on the Dispersive Nature of Ocean Swells. *Avances*, 2012, Vol. 4, No. 1, Pags. C22-C36.



Portilla, J, Ana Lucía Caicedo, Roberto Padilla-Hernández, Luigi Cavalieri, 2015. Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean. *Ocean Modelling*, 2015, Vol. 92, No. 1, Pags. 149-168.

Portilla, J, F.J. Ocampo-Torres, J. Monbaliu, 2009. Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell. *American Meteorological Society*. Pags. 107-122.

Rueda, A., C. A. Hegermiller, J. A. A. Antolinez, P. Camus, S. Vitousek, P. Ruggiero, P. L. Barnard, L. H. Erikson, A. Tomas, and F. J. Mendez, 2017. Multiscale climate emulator of multimodal wave spectra: MUSCLE- spectra, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, doi:10.1002/2016JC011957.

Snodgrass, F. E., G. W. Groves, K. F. Hasselmann, G. R. Miller, W. H. Munk, and W. H. Powers, 1966. Propagation of ocean swell across the Pacific. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 259A, 431– 497.