

Evaluación de la viabilidad de una red de boyas en aguas indefinidas mediante modelación numérica en la costa del Pacífico de Costa Rica.

Trabajo realizado por:

Matías Adrián Chaves Herrera

Dirigido:

Fernando Javier Méndez Incera

Gabriel Díaz Hernández

Titulación:

**Máster Universitario
en Ingeniería Costera y
Portuaria**

Santander, mes de octubre del 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER



Contenido

Agradecimiento	4
Lista de símbolos	5
Resumen	7
1. Introducción.....	7
2. Metodología.....	7
3. Clima Marítimo	1
4. Análisis de resultados	2
4.1 Propagación.....	2
4.2 Validación.....	2
4.3 Mapas de correlación	3
5. Conclusiones.....	3
5.1 Futuras líneas de trabajo	3
1. Introduction	1
2. Methodology.....	1
3. Wave Climate	1
4. Results of analysis	2
4.1 Propagation	2
4.2 Validation.....	2
4.3 Correlation maps results	3
4.4 Best Scenario	3
5. Conclusions	3
5.1 Future lines of work	3
Capítulo 1 Introducción.....	0
1.1 Justificación	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estado del arte.....	1
1.3.1 Medición boyas en España.....	2
1.3.1 Base de datos de oleaje en España	2
1.4 Teoría de formación del Oleaje.....	4
1.4.1 Teoría lineal del oleaje	4
1.5 Metodología para la caracterización del clima marítimo a nivel costero	6
1.5.1 Calibración	1
1.5.2 Selección y clasificación estados de mar	2



1.5.3 Propagación.....	2
1.5.4 Selección de mallas	4
1.6 Estudios de Clima Marítimo en Costa Rica.....	5
1.6.1 Otros estudios similares de propagación en Centroamérica.....	7
Capítulo 2. Clima Marítimo.....	8
2.1 Localización.....	8
2.2 Análisis Direccional de oleaje	9
2.3 Régimen Medio.....	16
2.4 Régimen Extremal	22
2.4.1 Método de los máximos anuales o distribución (GEV)	22
2.4.2 Método de los valores de pico o distribución de Pareto (POT)	24
2.6 Conclusiones.....	26
Capítulo 3. Metodología.....	27
3.1 Estrategia Numérica.....	27
3.2 Batimetría.....	27
3.3 Forzamientos de oleaje y viento	28
3.4 Generación de la malla.....	29
3.5 Creación de Escenarios.....	31
3.5.1 Identificación de Boya más significativa	32
Capítulo 4. Análisis de resultados	33
4.1 Datos	33
4.2 Selección.....	33
4.3 Propagación.....	34
4.3.1 Malla 1.....	34
4.3.2 Malla 2.....	34
4.3.3 Malla 3.....	35
4.3.4 Malla 4.....	35
4.3.5 Malla 5.....	36
4.5 Reconstrucción.....	37
4.6 Validación.....	37
4.6.1 Consideraciones finales de la validación	43
4.5 Resultados mapas de correlación	43
4.5.1 Escenario 1	50
4.5.2 Escenario 2	53



4.5.3 Escenario 3	56
4.6 Conclusiones del capítulo	59
Capítulo 5. Conclusiones.....	60
5.1 Futuras líneas de trabajo	60
Bibliografía.....	61



Agradecimiento

Agradezco a Dios por lo que ha significado esta experiencia de vida, que siempre me levanto. A la Universidad de Costa Rica, y a Don Georges del IMARES que me dio esta oportunidad de estudio, a mi familia por el apoyo, a mis padres por la confianza y mis hermanas por las conversaciones. A los compañeros del máster por el trabajo en equipo. Y de entre todos a mi novia Tatiana, gracias bella por todo lo que me ayudaste en los momentos difíciles y por todo el apoyo.



Lista de símbolos

ETOPO	Earth Topography Digital Dataset. A global relief model of Earth's surface that integrates land topography and ocean bathymetry.
GEV	Función generalizada de extremos (Generalized extreme Value)
GOS	Base de datos de marea meteorológica (Global Ocean Surges)
GOT	Base de datos de marea astronómica (Global Ocean Tides)
GOW	Reanálisis de oleaje global de IH Cantabria (Global Ocean Waves)
IH Cantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
MaxDiss	Método de selección por máxima disimilitud
MDA	Máximum Dissimilarity Algorithm
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NMM	Nivel medio del mar
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OPPE	Organismo Público Puertos del Estado
POT	Peak Over Threshold
RBF	Método de interpolación de funciones de base radial (Radial Basis Function)
REDEXT	Red de boyas en aguas profundas del OPPE
REDMAR	Red de mareógrafos del OPPE
RMSE	Error medio cuadrático de los residuos (Root Mean Square Error)



SI	Índice de dispersión (Scatter Index)
WAM	Modelo numérico de generación de oleaje (WAVE Model)
WW III	Modelo numérico de generación de oleaje (Wave Watch III)

Lista de símbolos	
Dir	Dirección (del oleaje)
Hs	Altura de ola significativa
pdf	Función de densidad (probability density function)
Prob	Probabilidad
qn	Cuantil n
R²	Coefficiente de determinación
σ	Desviación estándar
Tm	Periodo medio del oleaje
Tp	Periodo de pico del oleaje
Tr	Periodo de retorno
W	Velocidad del viento (a 10 m)
Unidades	
g	Gramos / valor de la aceleración de la gravedad terrestre
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
m	Metros
mm	Milímetros
m/s	Metros / segundo
°	Grados sexagesimales

Resumen

Evaluación de la viabilidad de una red de boyas en aguas indefinidas mediante modelación numérica en la costa del Pacífico de Costa Rica.

Autor: Matías Adrián Chaves Herrera

Directores: *Fernando Javier Méndez Incera, Gabriel Diaz Hernandez*

Fecha de presentación octubre 2017

Palabras claves: Boyas virtuales, modelación numérica, reconstrucción de oleaje

1.Introduccion

El presente estudio es una referencia de investigación sobre la determinación de lugares idóneos para la creación de una red de boyas meteoceánicas. La información que se presenta es de gran utilidad para instituciones del sector de turismo, transporte marítimo, pesca, entre otras.

Estos tipos de estudios son vitales para el análisis de impacto ambiental, las operaciones marinas, la información turística, la publicidad regional y la protección a la población ante eventos que puedan atentar contra su bienestar.

Especialmente, en las infraestructuras costeras, el conocimiento del clima marítimo es imprescindible para su planificación y diseño, de modo que garantice una correcta funcionalidad, disminuya el costo y aumente la eficiencia.

Los datos instrumentales son necesarios para tener una descripción más detallada de la estadística del oleaje que sirva como base de datos para Costa Rica.

Así, el contar con una red de boyas para medición de variables oceanográficas en diferentes puntos estratégicamente colocados beneficiará el uso de dicha información para muchos fines, como los ingenieriles.

2. Metodología

La estrategia establecida para determinar las condiciones de oleaje alrededor de toda la costa del Pacífico es utilizar la metodología de *downscaling*, propuesta por Camus et al., 2009. Esta metodología se basa en la transferencia de una serie *hindcast* de

datos de aguas profundas hasta aguas someras.

La metodología puede ser adaptada con el siguiente procedimiento expuesto por Camus (2011):

- a) Caracterización de clima de olas en aguas profundas de bases de GOW para el área de estudio.
- b) Selección de un número limitado (subconjunto) de casos que son las más representativas de ola y viento horarios en aguas profundas.
- c) Propagación de los casos seleccionados de los estados más representativos del mar utilizando un modelo de propagación de onda.
- d) Reconstrucción de las series temporales utilizando un esquema de interpolación.
- e) Validación de los datos de onda costera con datos instrumentales.
- f) Caracterización del clima marítimo por medio del algoritmo de máxima verosimilitud.



Figura 2. 1.Esquema de metodología de Downscaling. (Camus P. et al 2011)



Se utiliza como programa para la propagación el IH-Propaga. Este software del IH Cantabria propaga el oleaje desde aguas profundas hasta la costa. Este es un programa que utiliza el modelo SWAN (Booij, 1999).

El punto (GOW) utilizado tiene las coordenadas: latitud = $8^{\circ} 0.000'S$ y longitud = $85^{\circ} 5.000'W$; serie temporal = 01 /02/1948 hasta 31/12/2015. Para la validación, se tiene registros de la boya ubicada en la cercanía de Cabo Blanco, latitud = $9^{\circ}32'3.92''N$ y longitud = $85^{\circ} 6'58.64''O$ con 20 metros de profundidad.

Mediante el SWAN se establece la hipótesis de utilizar el mismo punto de forzamiento en las esquinas de las mallas, con la característica de que las esquinas de las mallas deberán estar antes de la línea de aguas profundas; esto debido a que el punto GOW representa muy bien los estados de mar por toda la zona de aguas profundas. Antes de esta línea, la información de los puntos GOW pierde precisión, por lo tanto, las esquinas inferiores izquierdas serán las escogidas para la ejecución.

Para la determinación de la boya más importante se implementó la metodología propuesta por Zanca et al, (2015), el método se basa en evaluar espacialmente las características de la onda en 2 puntos. Se analizará la disminución del promedio de correlación de todos los 10 puntos y la boya que presenta el mayor cambio es la que mayor significancia tiene.

3. Clima Marítimo

El oleaje en la zona del Pacífico de Costa Rica es de tipo Swell, con grados de energías diferentes a lo largo de la costa. El clima marítimo del Pacífico de Costa Rica (en su mayor parte generado por las tormentas cerca de Nueva Zelanda es influenciado

debido al efecto de sombra de las Islas Galápagos. Este efecto de sombra causa que la altura de la ola se reduzca y que la dirección cambie; el mayor efecto se muestra en el área de la costa central del país.

La dirección predominante del oleaje procede de la dirección del tercer cuadrante; los oleajes más predominantes se encuentran en un rango del 180° a 240° , siendo el más predominante el SSO.

Las calmas (oleaje pequeño) tienen una frecuencia menor a 1%; por lo tanto, se desprecian estadísticamente. Se identificó que en los meses de septiembre a mayo se tienen las mayores alturas de ola, éstas se encuentran alrededor de los 2.5 m.

Se presentan 2 conjuntos energéticos de oleaje, uno con periodos de los 5s a los 10s, con una frecuencia menor a 1% y otros alrededor de los 15s a los 20s con una frecuencia de 40%. La media de la altura de ola es 1.49m, la del periodo pico no fue posible obtenerla y la dirección predominante es 200° . En cuanto a los períodos pico usuales están arriba de los 10.

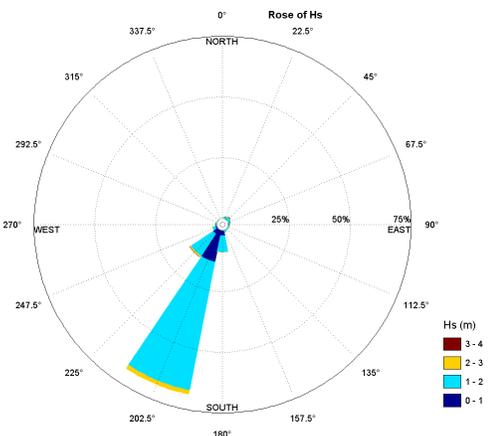


Figura 3. 1. Rosa de direcciones del punto GOW utilizado.



Tabla 1. Tabla de ocurrencia de direcciones

Orientación Inicial (°)	Orientación Final (°)	Probabilidad (%)
146.25	168.75	0.7
168.75	191.25	9.1
191.25	213.75	68.7
213.75	236.25	13.8
236.25	258.75	1.8

4. Análisis de resultados

4.1 Propagación

Se observa cómo el oleaje fue propagado en una de las mallas utilizando la propagación un con un H_s de 2.42, T_p de 14.3, 209° de dirección, 1.74 de velocidad de viento y 142 de dirección de viento.

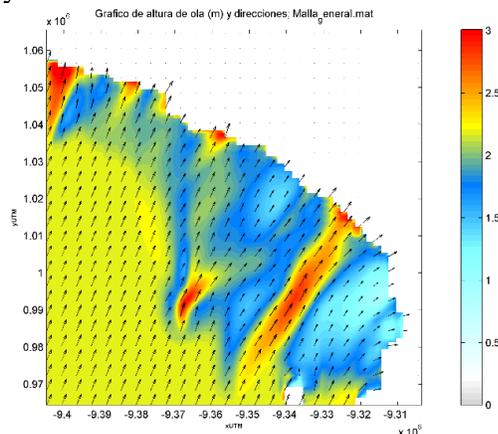


Figura 4.1. Propagación del oleaje en la malla 4 por el programa IHPropaga.

En todas las propagaciones (como se muestra en la figura 4.1) la batimetría, por sus irregularidades como bajos y elevaciones, genera el efecto de difracción y reflexión en varios puntos. Se puede ver también la concentración de oleaje tanto por la difracción como por la refracción en distintos puntos y por último, el asomeramiento del oleaje cuando llega a costa.

4.2 Validación

Se utilizó la serie de datos de las semanas 1 a 8 de julio para la validación. En

la figura 4.2 la serie de H_s de la fecha de la validación se observa cómo tanto la serie del punto GOW como la de la modelación no logran modelar los máximos o los oleajes más energéticos, probablemente esto es debido a que el punto de GOW no tiene un mejor forzamiento; a pesar de esto, el comportamiento de las líneas sí asemeja al comportamiento del registro del instrumento de medición.

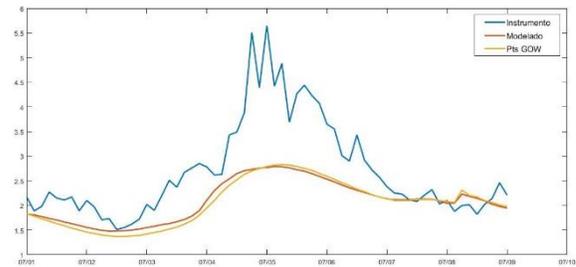


Figura 4.2. Serie de datos del punto GOW (amarillo), medición por instrumento (azul) y serie modelada (rojo).

En la figura 4.3 se muestra una gráfica de dispersión del resultado de la modelación con los datos del punto GOW con los datos instrumentales para la fecha de 1 a 8 de julio.

Para el caso de la dispersión con los datos de H_s se observa que se tiene una alta correlación de los datos (parámetro ρ) llegando casi a uno, la dispersión de entre los datos es de 0.33, siendo de una escala de 0 a 6 como su valor mínimo a máximo, se tiene un RMSE y un BIAS menor a 1 m resultando así una calidad de ajuste aceptable.

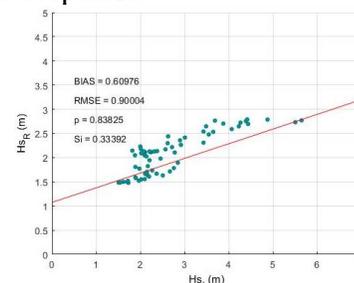


Figura 4.3. Gráfico de dispersión de la serie de altura de ola (H_s).

4.3 Mapas de correlación

Como se ve en la figura 4.4 se tiene una configuración de 10 boyas, 2 boyas por malla simulada, separadas estratégicamente antes de la línea de agua profunda ubicada a 980m de la costa.

Se realizaron diferentes configuraciones con estas diez boyas para determinar cuáles son la más efectivas, se realizaron 3 escenarios de red de boyas, escenarios de 2, 4 y 5 boyas respectivamente..

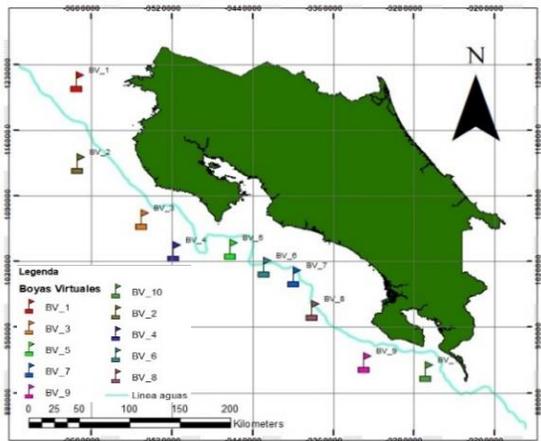


Figura 4.4.. Configuración de boyas virtuales para realización de escenarios.

La figura 4.5 muestra las correlaciones promedio de todas las boyas virtuales, así se pueden determinar las áreas donde se tiene menos correlación con la red de boyas, esto ayudará a determinar los lugares donde haya mayor o menor necesidad para instalar una boya.

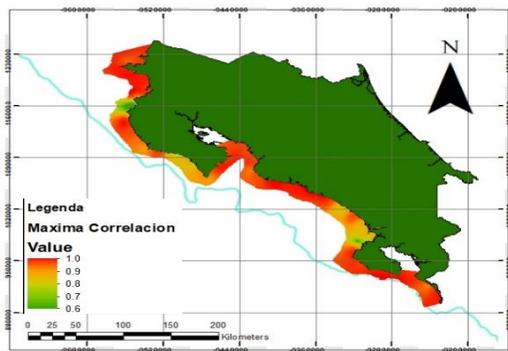


Figura 4.5.. Mapa de los valores máxima correlación.

4.4 Mejor Escenario

Para el mejor escenario se cuenta con 4 boyas (figura 4.6), utilizando los sistemas de información geográfica se obtiene la mayor área de cobertura que es la región de la boya 10, le sigue la de la boya 8, mientras que la de la boya 4 tiene menos área y la de la boya 2 es la más pequeña. La boya 10 es la de mayor significancia y con la mayor correlación.

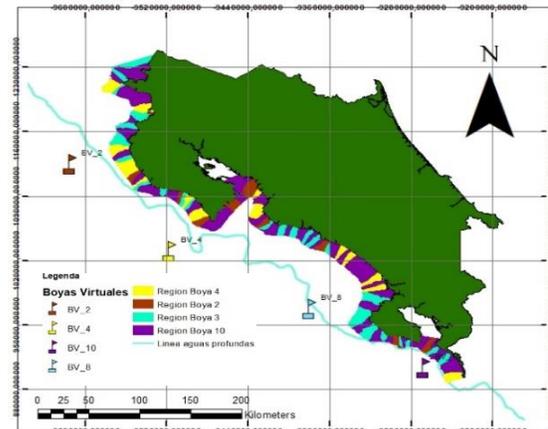


Figura 4.6.. Mapa de regiones de correlación del escenario de 4 boyas.

5. Conclusiones

Del análisis de escenarios de boyas se determinó que la configuración más favorable es de una de cuatro boyas, localizadas en la parte norte y sur de la línea de costa.

La boya numerada 10 es la posición más significativa para obtener las mayores correlaciones entre la boya y el clima marítimo de la costa debido probablemente a la cercanía de la línea de costa.

5.1 Futuras líneas de trabajo

Estudiar la viabilidad de estas propuestas de red según los costos de los instrumentos y la posible ganancia en actividades socioeconómicas.

Realizar una red de boyas centroamericanas para la búsqueda de mejores opciones de financiamiento, además de aportar información para los gobiernos de los países del uso y posibilidades de esta fuente de información.

Feasibility assessment of a buoy network on indefinite waters through numerical modeling on the Pacific coast of Costa Rica

Author: Matías Adrián Chaves Herrera

Directors: *Fernando Javier Méndez Incera, Gabriel Díaz Hernández*

Presentation date october 2017

Keywords: Virtual buoys, numerical modeling, wave reconstruction

1. Introduction

The present study is a research reference on the determination of ideal locations for the creation of a metocean buoy network. The information presented is of great use for institutions in the touristic, sea transportation and fishing areas among others.

These types of studies are vital for the analysis of the environmental impact, sea operations, touristic information, regional advertising, and population protection at events that could attempt against their wellbeing.

Especially in coastal infrastructures, the knowledge of maritime climate is essential for its planning and design, to ensure the correct functionality, decrease its cost and increase efficiency.

The instrumental data are needed to have a more detailed description of the statistics of the waves, which serve as a database for Costa Rica.

Thus, having a network of buoys measuring oceanographic variables in different strategically placed points will benefit the use of such information for many purposes, such as the coastal engineering.

2. Methodology

The strategy established to determine the wave conditions throughout the entire Pacific coast is to use the downscaling methodology proposed by Camus et al., 2009. This methodology is based on the transfer of a hindcast series of data from deep to shallow waters.

The methodology may be adapted with the following procedure exposed by Camus (2011):

- a) Base GOW deep water wave climate characterization for the study area.
- b) Selection of a limited number (subgroup) of cases, which are the most representative for waves and wind schedules on deep waters.
- c) Propagation of selected cases of the most representative sea conditions using a wave propagation model.
- d) Reconstruction of temporary parameter series of sea conditions in superficial waters using an interpolation scheme.
- e) Coastal wave data validation with instrumental information.
- f) Characterization of wave climate using a statistical technique such as the maximal plausibility algorithm.

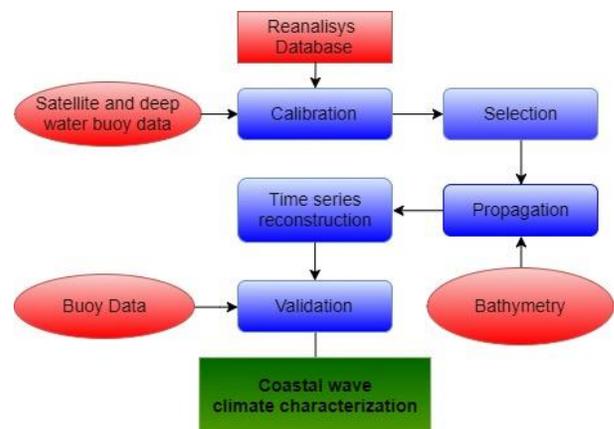


Figure 2. 1 Downscaling methodology Diagram. (Camus P. et al 2011)

The IH-Propaga program is used for the propagation. This IH Cantabria software propagates waves from deep waters to the coast. This program uses the SWAN (Simulating Waves Nearshores) (Booij, et al., 1999)

The spot selected has the latitude coordinates =8° 0.000'S and longitude =85° 5.000'W; temporary series =01 /02/1948 until 31/12/2015 (593160 records) (Image 2). For validation, there are records of the buoy located close to Cabo Blanco, latitude 9°32'3.92"N and longitude = 85° 6'58.64"O (Image 2) with 20 meters deep. The information is taken every 3 hours and there are 2 years of records (2014 and 2015).

The hypothesis of using the same forcing spot on the grids' corners is established in the SWAN model; the grids' corners ought to be before the deep water line, because the GOW spot represents the sea status really well throughout the whole deep water area. Before this line, the information of the GOW spots lose precision, therefore the far left corners would be chosen for the execution.

In order to determine the most important buoy, the methodology implemented was the one proposed by Zanca et al (2015). The method is based on spatial evaluation of the wave in 2 points. The decrease of the correlation average of all the 10 points will be analysed and the buoy showing the most changes would be the most significant one.

3. Wave Climate

The waves in Costa Rica's Pacific area are Swell type, with different degrees of energies along the coast.

The maritime climate in the Costa Rican Pacific (mostly generated by the storms near New Zealand) is influenced by the shadow effect from the Galapagos Islands. This shadow effect causes the wave height to be reduced and the wave direction to

change; the greatest effect is shown in the central coast area of the country.

The predominant wave direction moves on a W to WSW range (180° to 240°), it comes from the third quadrant's direction.

Calmed waves have a frequency lower than 1%, so they are statistically dismissed. From september to may the highest waves are shown, which are about 2.5 meters high.

There are 2 energetic wave groups: waves with periods from 5s to 10s, with a frequency lower than 1% and waves with periods around 15s to 20s, with a 40% frequency.

The average wave height is 1.49 m, the peak period was not possible to obtain, and for the direction, the predominant is 200 °. Regarding usually peak periods, they are above 10 s.

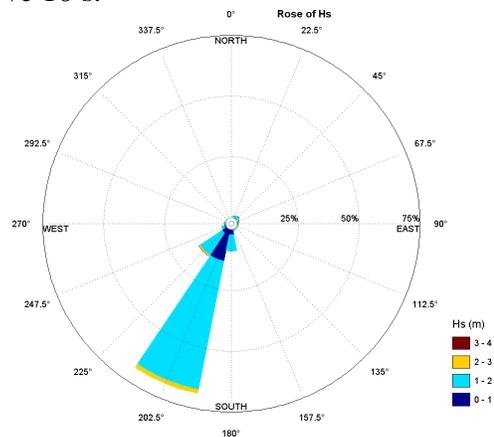


Figure 3. 1 Directional rose point for Hs of GOW point.

Table 1. Occurrence of direction

Initial Orientation (°)	Final Orientation (°)	Probability (%)
146.25	168.75	0.7
168.75	191.25	9.1
191.25	213.75	68.7
213.75	236.25	13.8
236.25	258.75	1.8



4. Results of analysis

4.1 Propagation

On image 4.1 it is observed how the waves were propagated in one of the grids, with an H_s of 2.42, a T_p of 14.3 and a 209° direction, 1.74 of wind velocity and 142 of wind direction. It can be seen how propagating around the outline starts with high H_s wave levels, where bathymetry performs physical processes such as the wave shoaling, where the wave decreases as it comes closer to the coast.

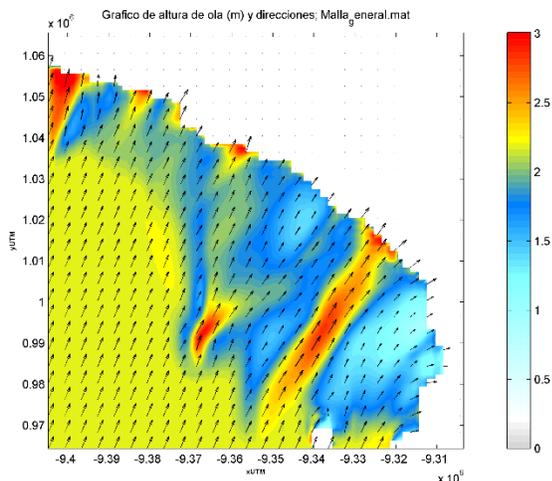


Figure 4.1. Propagation of waves in the 4 mesh by the IHPropaga program.

In all the propagations (as shown in Figure 4.1) the bathymetry creates the effect of diffraction and reflection at various points due to its irregularities, like low areas and elevations. It can also be seen the concentration of waves, due to both the diffraction and refraction at different points and finally, the shoaling effect of waves when they reach the coast.

4.2 Validation

The data series of the weeks 1 to 8 of July were used for the validation. In Figure 4.2, in the H_s series from the date of validation it is observed how both the series of the GOW point and the modeling ones fail to represent the highest or the most energetic waves; this is probably because the GOW point does not have a good

forcing, despite this, the behavior of the lines does show similar to the behavior of the measuring instrument's record.

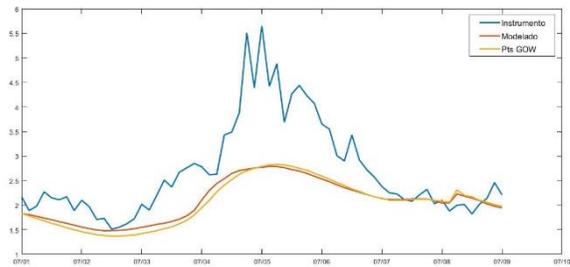


Figure 4.2. Data series of GOW (yellow), instrument measuring point (blue) and modeled (red).

Figure 4.3 shows a scatterplot of the modeling result with GOW point data and the instrumental data for the date of July 1 to 8. In the case of the scatterplot with the H_s data, it is observed a high correlation of the data (parameter ρ) reaching almost to one, the dispersion amongst the data is 0.33 which could be seen as low due to the 0-6 scale as its minimum to maximum value; and there is an RMSE and BIAS lower than 1 m therefore resulting a good quality adjustment.

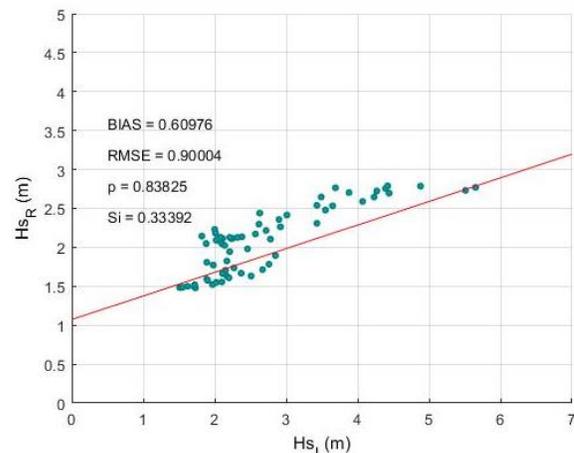


Figure 4.3. Scatterplot of wave height (H_s) series

4.3 Correlation maps results

As seen on image 4.4, there is a 10 buoy configuration, 2 buoys per simulated grid, strategically separated before the deep water line located 980 meters from the coast. Different configurations were performed with these 10 buoys to determine which were the most effective ones; 3 scenarios of buoy network were made: scenarios of 2, 4 and 5 buoys respectively.

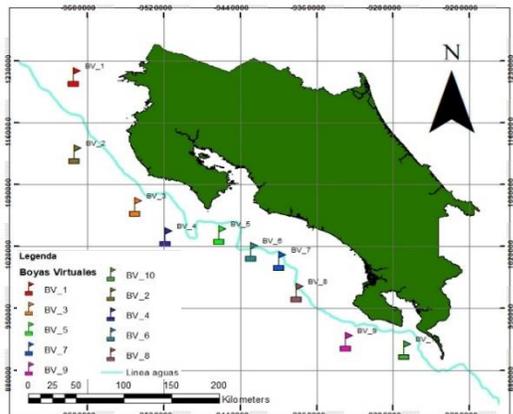


Figure 4.4.. Virtual buoy configuration.

Figure 4.5 presents the average correlations of all the virtual buoys; therefore the areas of lowest correlation with the buoy network can be determined. This would help determine the spots of greater need to install a buoy.

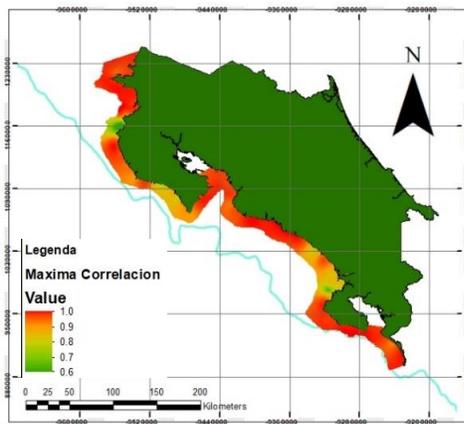


Figure 4.5. Correlation Map.

4.4 Best Scenario

The best buoys scenario (Figure 4.6) is a configuration of four buoys. Using the geographic information systems, to obtain the greater area of coverage, is the region of the number 10 buoy, followed by that of buoy 8, while buoy 4 has less area and buoy 2 is the smallest. The numbered buoy 10 is the most significant with the highest correlation.

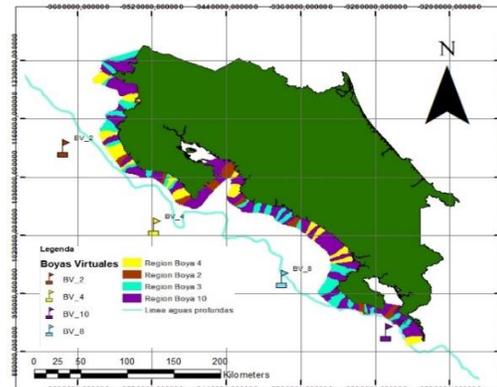


Figure 4.6.. Map of regions of correlation of the scenario of 4 buoys.

5. Conclusions

From the buoy scenario analysis, it was determined that the most beneficial configuration comprises one of four buoys located on the northern and southern areas of the coast line.

Buoy number 10 has the most significant position to obtain the best correlations between the buoy and the coast's maritime climate.

5.1 Future lines of work

Study the feasibility of these proposals according to the costs of the instruments and the possible profit in socio-economic activities.

Create a Central American buoy network in search of better financing options, besides providing information for the countries' governments regarding the use and possibilities of this kind of wave climate information.

Capítulo 1 Introducción

El presente estudio es una referencia de investigación sobre la determinación de lugares idóneos para la creación de red de boyas meteoceánicas. La información que se presenta es valiosa para instituciones del sector de turismo, transporte marítimo, pesca, entre otras.

Las boyas son instrumentos de medición meteoceánica, es decir, logran medir los parámetros de las interacciones en la atmósfera y en el océano. Estos parámetros, como altura de ola significativa, periodo pico, dirección del oleaje y datos de viento (magnitud y dirección) de una zona, son de vital importancia para saber las características que definen el estado de mar en un sitio en específico. Esto permite utilizar datos como base para muchas aplicaciones, modelaciones y análisis científico.

Este tipo de estudios es vital para el análisis de impacto ambiental, las operaciones marinas, la información turística, la publicidad y la protección a la población ante eventos que atenten contra ellos. Especialmente, en las infraestructuras costeras, el conocimiento del clima marítimo es imprescindible para su planificación y diseño, de modo que así se garantice una correcta funcionalidad, disminuya el costo y aumente la eficiencia.

La zona del Pacífico sur de Costa Rica posee parques nacionales y reservas biológicas. La actividad socioeconómica más importante es el turismo, le sigue el comercio con el intercambio de productos con Centroamérica. En esta región, una red de medición facilitaría la realización de actividades.

La información climática costera de Costa Rica es escasa y, por lo general, se emplea como informe para el estudio ambiental de estructuras portuarias en la costa como puertos, planes de ordenamiento y protección de la infraestructura marina. No obstante, estos estudios usualmente requieren cada vez más información sustentada en información instrumental que les permita tener una mejor exactitud de las condiciones oceánicas del lugar.

En países en desarrollo, las actividades portuarias crecientes tienen información cada vez más precisa, extensa y detallada, que permita a los ayuntamientos costeros, las instituciones y los puertos tomar decisiones puntuales para resolver gran cantidad de problemas.

En la gran mayoría de las regiones alrededor del mundo, los datos obtenidos de las mediciones en aguas poco profundas no son suficientemente largas para caracterizar el clima marítimo y obtener los parámetros de ola necesarios para la construcción o el diseño de las estructuras portuarias y de protección de la costa.

Para ayudar en esta problemática, los investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad Cantabria (IH Cantabria), mediante la metodología de regionalización o downscaling, ha logrado realizar una mejoría en los estudios costeros para las infraestructuras y la toma de decisiones en puertos.



La metodología se basa en el uso de series de datos provenientes de los programas de reanálisis de olas en aguas profundas, modelos de propagación en aguas someras, así como selección de datos y de técnicas de interpolación que permiten generar la serie de datos en aguas someras con igual longitud de la serie original de aguas profundas.

Esta información es necesaria para tener una descripción más detallada de la estadística del oleaje que sirva como base de datos para la puesta de boyas en Costa Rica.

1.1 Justificación

Esta investigación pretende que, al igual que en los países desarrollados, Costa Rica tenga caracterizado el clima marítimo de la costa del Pacífico y mediante boyas virtuales se simulen escenarios donde se logre instalar boyas para uso turístico, público o comercial.

1.2 Objetivos

- Realizar una recopilación de información de boyas existentes e investigación del uso que se les da a la información que se recibe distintas redes boyas que tiene en España.
- Analizar mediante modelos propagación configuraciones de boyas en aguas profundas para determinar la ubicación adecuada de estas.
- Evaluar la propagación para determinar y proponer configuraciones de red boyas en Costa Rica.

1.3 Estado del arte

La caracterización del clima marítimo, que es vital para entender procesos costeros basados en onda y diseño de estructuras costeras y costa afuera, requiere de la disponibilidad de series de datos a largo plazo. Cuando los datos existentes son escasos, las series de tiempo generadas sintéticamente ofrecen una alternativa práctica (Guanche et al, 2013).

Las medidas de la boya están raramente disponibles en el área de estudio. La boya más cercana boya se sitúa a kilómetros del punto de interés; por lo que no representa el clima local de la onda. Aun cuando estos registros están disponibles, generalmente hay datos faltantes y series de tiempo que no son lo suficientemente extensas para definir de manera correcta la distribución a largo plazo de parámetros de estado de diferentes mares (Camus et al., 2011)

Las series de boyas presentan una series de problemas; en primer lugar, hoy en día las series temporales no son, en general, suficientemente largas como para obtener la información requerida. Asimismo, dichas bases de datos no tienen la homogeneidad espacial requerida o no han sido sometidas al control de calidad necesario para garantizar que los resultados obtenidos a partir de los mismos puedan ser fiables (Bonanata et al, 2009).



En aguas profundas, las olas de viento no son afectadas por la batimetría. Sin embargo, en su propagación hacia la costa, las olas se transforman debido a la interacción con la batimetría, inducen variaciones en la altura representativa de ola y en la dirección de la onda media (Camus et al., 2012).

1.3.1 Medición boyas en España

España tiene una de las mejores mediciones de oleaje a nivel mundial; mediante su red de boyas, puede determinar el clima marítimo a nivel de costa con gran precisión y en tiempo real. Esto le permite estar a la vanguardia en transporte marítimo e innovación en aplicaciones a sistemas móviles; lo cual le permite ayudar a sectores comercial, turístico y recreativo.

1.3.1 Base de datos de oleaje en España

La información de las boyas de España se ha registrado desde 1973; mientras que bases de datos de medición escritas por marineros y registros de mareógrafos en papel pueden ubicarse en un periodo anterior al siglo XX. El inicio del programa de formación de un red boyas comienza en 1983 con el Programa de Clima Marítimo, donde se establece crear un banco de datos de acceso público, sencillo y continuo (Ruiz et al., 1995).

La mecánica en España fue instalar primero boyas escalares de medida de oleaje dentro del programa REMRO; en la actualidad, hay 21 boyas. Seguidamente, en 1992, se instalaron boyas para formar la Red de Mareógrafos (REDMAR), red que está compuesta por 15 mareógrafos acústicos SONAR y 4 mareógrafos de presión Andera.

El país también cuenta con la REDEXT, Red de Boyas de Aguas Profundas (Red Exterior). Está formada por las medidas procedentes de boyas tipo Wavescan o SeaWatch en zonas muy profundas (Figura 1.1). Las boyas tienen varios tipos de sensores, procesamiento estadístico, almacenamiento de datos y transmisión vía satélite.

Por último, el programa REMRO es una red de boyas escalares (Waverider) y direccionales; miden y registran continuamente el oleaje. Esta red se encuentra localizada lejos de la línea de costa. Algunas boyas se ubican en puntos de aguas poco profundas, con profundidades de entre 135 m y 1200 m; por lo tanto, las mediciones de oleaje de estos sensores no son influidas por efectos locales; lo cual proporciona series temporales de oleaje por parte de sus 18 boyas.

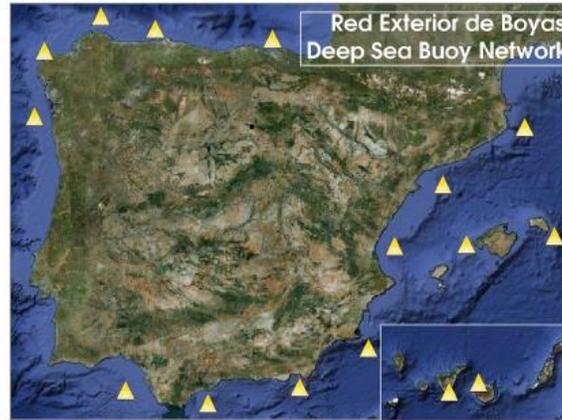


Figura 1.1 Puntos de localización de la Red Exterior de Boyas.

Dentro de la boya, se calculan los parámetros estadísticos de estado, tales como la dirección del viento, su velocidad y la altura significativa de ola. La recepción y el almacenamiento de estos datos es precedido por un control de calidad que garantiza la veracidad de los datos y que estos se han obtenido en condiciones de correcto funcionamiento de todos los equipos de medida. Este esquema de proceso se puede ver en la Figura 1.2.

Alrededor de 16 boyas escalares y direccionales recogen en cada registro una serie en bruto y un parámetro estadístico calculado en una serie de datos de oleaje, los cuales son almacenados a bordo de la boya y transmitidos vía satélite a la central de Puertos del Estado con periodicidad horaria.

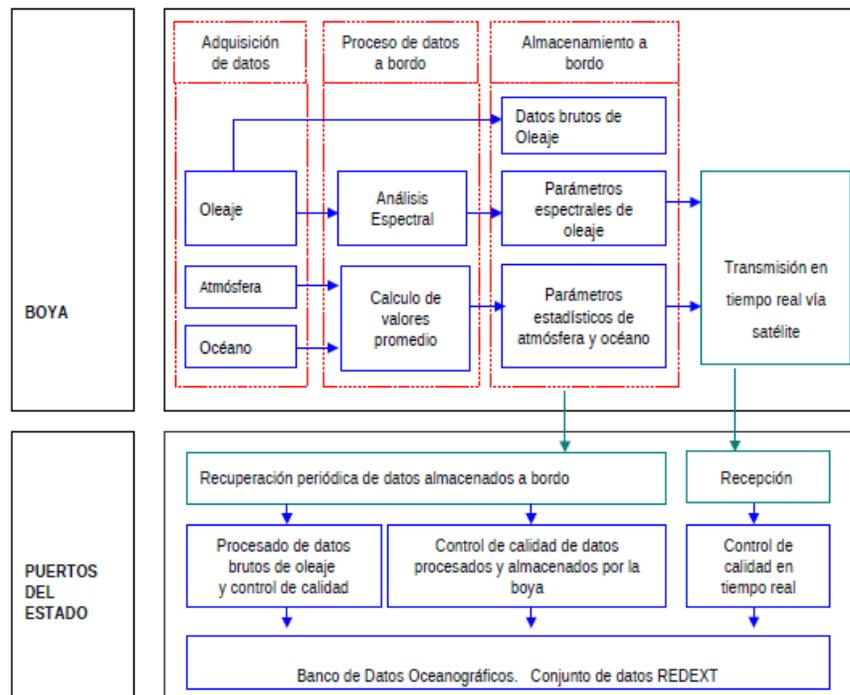


Figura 1.2. Organigrama de la transmisión de información de las boyas.



España cuenta con bases de datos de reanálisis que evalúan los cambios en las dinámicas marinas para analizar las tendencias de cambio en el clima marítimo. Estas bases de datos de calidad, de alta resolución espacial y con un periodo extenso permiten obtener los cambios previsibles en las costas españolas debidos al cambio climático (Tomás et al, 2004).

1.4 Teoría de formación del Oleaje

El oleaje es generado por el viento de una tormenta o borrasca en mar abierto que, debido a la aleatoriedad de las velocidades y las fuerzas del viento, puede abarcar un amplio rango de frecuencias. Estas frecuencias inician su viaje hasta la costa, mientras se acercan a la plataforma continental algunas de las ondas se agrupan para formar una onda larga. De esta manera, las olas llegan a ser medidas por las boyas en su viaje (Liu & Losada, 2000).

Las ondas en profundidades indefinidas no se ven afectadas por la batimetría. Sin embargo, a partir de que el tren de ondas comienza a propagarse en aguas más someras, comienza el efecto de refracción debido a la influencia de la batimetría o de las corrientes; o se difracta por las abruptas variaciones del fondo, tales como cañones submarinos o bajos (Liu & Losada, 2000).

La propagación de las ondas, que continúa su trayecto acercándose a la costa, irá perdiendo parte de su energía por efecto de la fricción en el fondo. Seguidamente, la amplitud de la onda aumenta y la longitud de onda se va reduciendo, dando lugar al rompimiento de las ondas (Liu & Losada, 2000).

En profundidades bajas, el frente de la onda se desplaza a una velocidad menor que la cresta de la onda, dando lugar a un volteo de la cresta. Este volteo abre espacio para el rompimiento de la onda y la disipación de la energía que lleva.

1.4.1 Teoría lineal del oleaje

El oleaje es el movimiento del agua en el mar. Es un fenómeno siempre presente y visto en todos los confinamientos abiertos del agua como océanos, bahías, piscinas y lagos. Para lograr su entendimiento, la mejor representación del oleaje es la aproximación mediante la teoría línea del oleaje, la cual es válida en los casos en que se cumplen sus suposiciones básicas. Existen muchas otras teorías con mayor complejidad, pero la diferencia de precisión entre ellas no es tan significativa para este tipo de estudio.

El oleaje se analiza mediante un proceso estocástico que debe cumplir propiedades tales como ser estacionario, esta condición establece que la estadística (media y varianza) se mantenga invariable durante el paso del tiempo.



Debido a que las condiciones de forzamiento del oleaje como el viento no son estacionarias, se asume que ocurren procesos instantáneos. A los tiempos donde se considera estacionario el proceso en estos intervalos, se les denomina estados de mar

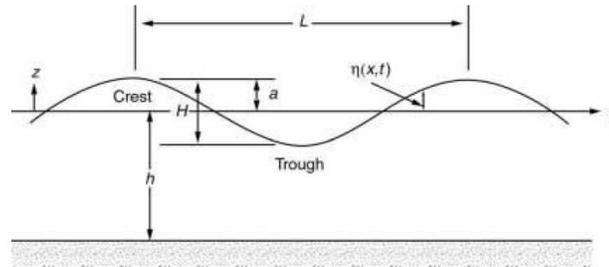


Figura 1.3 Esquema de onda del oleaje, Fuente: Dean y Dalrymple 1991.

En la figura 1.3 vemos una buena representación de la teoría lineal del oleaje donde se puede representar los parámetros como:

- Profundidad del agua (h): Distancia vertical desde el fondo marino hasta el nivel medio el mar (SWL).
- Altura (H): Distancia vertical de la cresta al seno de la ola.
- Longitud (L): Distancia horizontal entre dos crestas.
- Periodo (T): Lapso en el cual dos crestas sucesivas pasan por el mismo punto.
- Elevación de la superficie libre (η): Distancia vertical positiva (cresta) o negativa (seno) que toma la ola en relación con el nivel medio del mar (SWL), donde $z = 0$.
- Amplitud: Distancia vertical desde el nivel medio del mar hasta la cresta o el seno de la ola. Será equivalente a la mitad del valor de la altura de ola para olas sinusoidales.
- Velocidad (o celeridad) de propagación de la ola: Velocidad de propagación de la ola.

Ecuación de la dispersión

$$L = \frac{g}{2\pi} (T_p)^2 \tanh(kh) = L_0 \tanh(kh)$$

Ecuación de la onda estacionaria

$$\eta(x, t) = H * \cos(kx) * \cos(\sigma t)$$

En general los modelos de oleaje resuelven la ecuación de balance de energías,

$$\frac{\partial E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g_x} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g_y} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$



Los términos de esta ecuación representan energía de la ola en el tiempo, la propagación del oleaje y los efectos de refracción de oleaje. Otros términos resuelven el crecimiento y el decaimiento de la energía de la ola en la interacción no lineal (Lizano et al., 2001).

Los modelos numéricos que resuelven estas ecuaciones han sido clasificados como de primera, segunda y tercera generación. En los modelos de primera generación, cada componente espectral evoluciona independientemente de los otras componentes, la parte espectral evoluciona y crece independiente de las otras componentes (Alfaro, 2017).

En los de segunda generación, tratan mediante parametrizaciones de subsanar las carencias del intercambio no lineal de las componentes del espectro (Young, 1988); también la evolución independiente de los componentes individuales de olas proviene del acoplamiento a través de transferencia de energía no lineal (Lizano et al, 2001)

Los modelos de tercera generación no imponen una forma definida del espectro, es decir toman en cuenta su evolución, además la ecuación de transporte de energía y los términos no lineales se calcula completamente. (Hasselmann et al., 1985)

1.5 Metodología para la caracterización del clima marítimo a nivel costero

Para realizar una adecuada caracterización del clima marítimo en un lugar en específico, primero se debe consultar las bases de datos de oleaje disponibles, entre ellas están las provenientes de boyas, satélites, datos de reanálisis (hindcast) y registros de observación visual.

En la mayoría de los casos, la calidad y la cantidad de información instrumental es escasa o los datos presentan diferencias entre extensión, resolución y temporalidad entre otras. Es por ello por lo que los datos de reanálisis en aguas profundas permiten obtener una adecuada caracterización, mediante el traslado de la información de su punto de aguas profundas a la costa, punto objetivo.

Para contar con la mayor cantidad de datos representativos en el lugar, se debe recurrir a estrategias para tener una adecuada y larga serie de datos en el lugar; una de estas estrategias es la propuesta por el IH Cantabria.

Esta metodología se fundamenta en la traslación de la serie de datos de aguas profundas hasta la zona de interés. Antes de realizar esta traslación o mejor dicho propagación de estados de mar desde punto de información a la costa, se realiza una selección de los datos de registro del reanálisis.

Debido a que los registros usualmente van de 1960 hasta la actualidad, la cantidad de datos es amplia (57 años x 8766 estados de mar/año = 499 662 propagaciones). Realizar esta propagación en un computador tomaría demasiado tiempo y esfuerzo computacional, por lo cual se hace una selección de datos (Méndez F. 2016).



La metodología propuesta por el IH Cantabria es también conocida como *downscaling* o regionalización. Esto es una metodología que realiza los procesos de transformación y aumento de la resolución espacial, es decir, trata de generar series de datos de onda costera horaria emulando las características de las bases de reanálisis mediante el *downscaling* (técnica de interpolación) y así reduce el tiempo computacional.

Existen 3 metodologías de *downscaling* que se presentan a continuación (Camus et al, 2012):

1. *Downscaling* dinámico que se basa en acoplar los modelos numéricos de una resolución grande a una más de detalle, forzados por una misma serie de datos, el modelo general contiene al de detalle para formar las condiciones de contorno del modelo de detalle.

2. *Downscaling* estadístico involucra acoplar mediante funciones de transferencia, es decir los datos generados a partir de simulaciones numéricas acoplados con datos de instrumentación localizados en zonas cercanas a la costa.

3. *Downscaling* híbrido: se trata de unir ambas metodologías, se selecciona unos casos que representen el clima marítimo de la serie de reanálisis, para trasladar mediante aproximaciones matemáticas de una escala general a una de detalle. Esta es la metodología propuesta por el IH Cantabria.

El IH Cantabria desarrolló esta metodología con base en el uso de sus propias series de datos de reanálisis en aguas profundas, llamados puntos (GOW); los cuales, junto con los modelos de propagación y las técnicas de interpolación, permiten generar una nueva serie de datos en aguas someras. Estas técnicas de interpolación producen una serie de datos en aguas someras con la misma longitud de las de aguas profundas en el punto objetivo (Bonanata et al., 2009).

La serie de datos GOW son series de oleaje en aguas profundas provenientes de los programas de reanálisis existentes y disponibles por diversas instituciones alrededor del mundo (Figura 1.4). Estas son el resultado del empleo de modelos de generación y propagación del oleaje, como por ejemplo el WAVEWATCH III o el WAM, alimentados con datos de viento globales con duraciones de hasta 60 años.

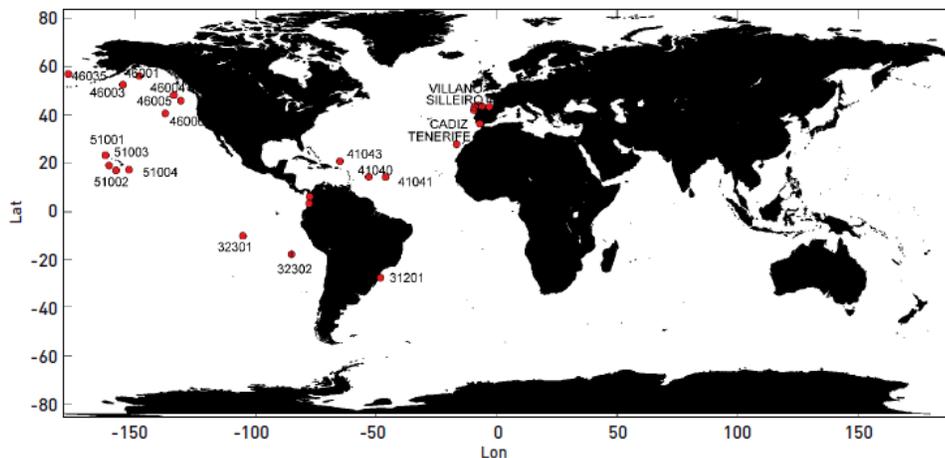


Figura 1.4. Algunas de las boyas utilizadas para la validación del reanálisis GOW.



La metodología propuesta para la transferencia de clima de ola de aguas profundas a aguas poco profundas consiste en un downscaling dinámico de un subconjunto representativo de las condiciones del estado del mar en aguas profundas o en áreas abiertas que se obtienen mediante un procedimiento de reducción de escala estadístico de aguas poco profundas (Camus et al., 2011).

El inicio de la metodología es el análisis del oleaje en aguas profundas. Una vez conocido o caracterizado el régimen medio y extremal del oleaje en el origen del dominio (puntos de las bases de datos GOW), se seleccionan y trasladan los estados de mar hasta la zona de interés (Camus et al., 2011).

Seguidamente, como los estados de mar tienen varias dimensiones (H_s , T_p , Dir , W , θ), para obtener la selección del dato representativo para la propagación, se aplica un algoritmo de máxima disimilitud (MDA) que permite extraer el subconjunto de representativos de estados de mar en aguas profundas (Camus et al., 2011).

La validación numérica de los resultados confirma la capacidad de la metodología desarrollada para reconstruir series de tiempo de estado de mar en aguas reducidas en un lugar en particular y calcular parámetros de clima espacial diferente de la onda con una reducción considerable en el esfuerzo computacional (Camus et al., 2011).

Esta metodología de transformación de una serie de aguas profundas hasta aguas someras es conocida también como metodología del hipercubo (Figura 1.5). Es una técnica ampliamente comprobada y validada a través de diversos estudios de la ingeniería costera, como diseño estructural, análisis y evaluación energética.

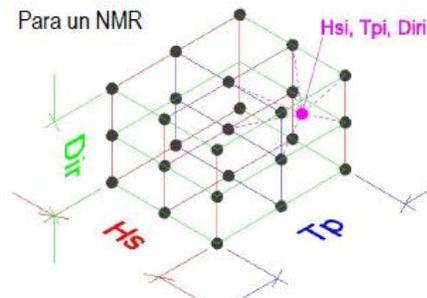


Figura 1.5. Representación del esquema del hipercubo, Fuente: Méndez, F. 2016

La metodología puede ser adaptada con el siguiente procedimiento, mostrado por Camus (2012):

- g) Caracterización de clima de olas en aguas profundas de bases de GOW para el área de estudio.
- h) Selección de un número limitado (subconjunto) de casos que son las más representativas de ola y viento horarios en aguas profundas.
- i) Propagación de los casos seleccionados de los estados más representativos del mar utilizando un modelo de propagación de onda.
- j) Reconstrucción de las series temporales de parámetros de estado del mar en aguas poco profundas utilizando un esquema de interpolación.



- k) Validación de los datos de onda costera con datos instrumentales.
- l) Caracterización del clima de la onda por medio de una técnica estadística como el algoritmo de máxima verosimilitud.

Para comprender los procesos de la Figura 1.7, se expone a continuación una explicación más detallada de estos procedimientos:

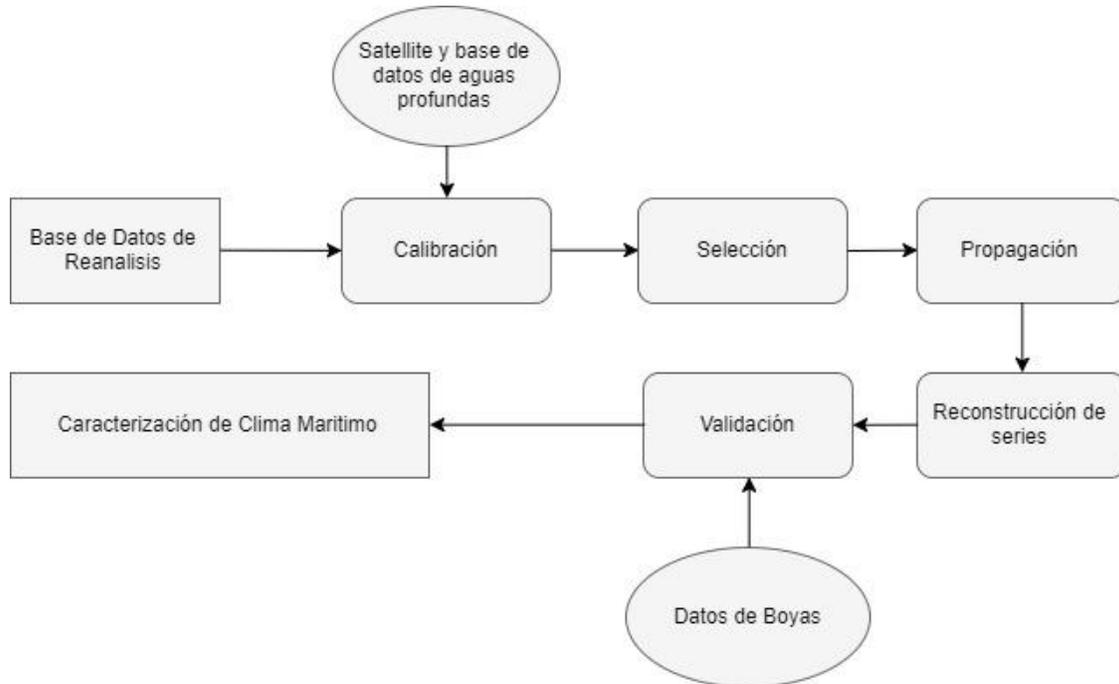


Figura 1.6. Esquema de procesos para la metodología de regionalización.

1.5.1 Calibración

A pesar de que la base de datos de reanálisis ofrece un detalle del clima marítimo que proporciona series continuas de largo tiempo y con buena cobertura espacial, se requiere una calibración paramétrica mediante la media direccional de la onda para corregir alturas representativas de ola. Esto debido a que los modelos de reanálisis presentan inexactitud por la inadecuada descripción de campos de viento y la insuficiente resolución espacial-temporal (Mínguez et al., 2011).

Esto puede ser realizado con datos instrumentales de un satélite y utilizando el siguiente modelo expresado matemáticamente como (Mínguez et al. 2011):

$$H_S^C = a^R(\theta)[H_S^R]^{b^R(\theta)}$$

Donde

- H_s es altura de ola.
- R significa del reanálisis, por lo tanto, altura de ola de reanálisis.
- C significa calibrado, por lo tanto, es la altura de onda significativa corregida.
- $a^R(\theta)$ y $b^R(\theta)$ son parámetros dependientes de la media direccional de la ola (θ) proveniente del reanálisis.



1.5.2 Selección y clasificación estados de mar

El método que se utiliza para la selección de series de oleaje de indefinidas a reducidas es el algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss o MDA), mediante este se identifica un subconjunto llámese “M” que represente la mayor diversidad posible del total de la base de N datos (Camus et al., 2010).

El algoritmo comienza seleccionando un dato que se destaque del origen de la base (Figura 1.7); luego pasa al siguiente subconjunto, donde se tiene los datos que representen la mayor disimilitud de los datos del inicio (IH Cantabria, 2011).

Este mismo proceso se realiza iterativamente y, en cada secuencia, se toma el dato seleccionado que tiene la mayor disimilitud, hasta obtener un grupo de datos representativos de cada subgrupo (IH Cantabria, 2011).

Así pues, se pretende tener número M de vectores $\{v_1, \dots, v_M\}$ de los datos que representen a toda la comunidad de una muestra de datos $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ compuesta por N vectores n-dimensionales (IH Cantabria, 2011).

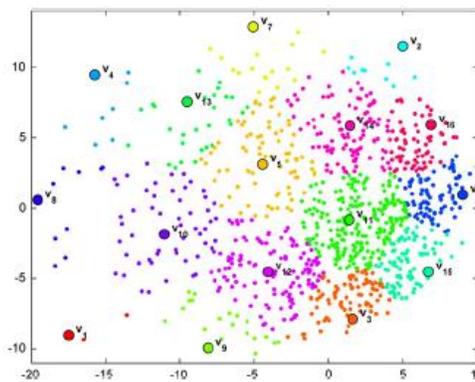


Fig. 4. Maximum dissimilarity selection.

Figura 1.7. Representación de la selección de Máxima disimilitud.

1.5.3 Propagación

Para la propagación o transformación del oleaje hay que entender una serie de conceptos, que existen dos clasificaciones de modelos al transformar el oleaje. Los primeros son los modelos que resuelven la fase, utilizan ecuaciones no estacionarias basadas en la conservación de la masa y la cantidad de movimiento integrada en vertical. Los segundos son los modelos promediados en la fase que se basan en la conservación de la energía espectral (Liu & Losada, 2000).

Subsecuentemente, existen dos grandes grupos dentro de los modelos de propagación que resuelven la fase; un grupo realiza una simulación de flujos en superficie, y los otros la ejecutan mediante la teoría de propagación de ondas (Liu & Losada, 2000).



Los de flujos en superficie resuelven mediante simplificaciones las ecuaciones de Navier-Stokes o las de Boussinesq, resolviendo los procesos físicos de rotura, agitación y la interacción ola a ola. Los modelos de teoría de propagación de ondas utilizan la ecuación de pendiente suave o “mildslope”. La diferencia entre ellos es la restricción de las ecuaciones que se refleja en el tiempo computacional (Liu & Losada, 2000).

El modelo matemático seleccionado para la propagación es el modelo SWAN (Simulating WAVesNearshore) desarrollado por Deltares, Holanda, que tiene por ecuación la conservación de la acción de onda que promedia la fase (Booij et al 1999)

Además, este modelo de tercera generación, al ser un modelo energético, simula muy bien la generación de oleaje por viento y la particularidades de los fenómenos provocados por la batimetría como la rotura del oleaje (IH Cantabria, 2011).

Como es completamente espectral, es posible propagar el oleaje en todas las direcciones y frecuencias. Esto permite sobreponer ondas aleatorias en diferentes direcciones; por ejemplo, un swell sobrepuesto por un mar de viento local (Bonanata et al., 2009).

Su ecuación es de transporte de energía, es decir, la energía que va variando en el tiempo y en el espacio se compensa con las salidas y las entradas de energía al sistema (Lizano et al., 2001)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\Omega N}{\partial \Omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{Energia_{total}}{\omega}$$

$$N = E(\sigma, \theta; x, y, t)$$

N es acción de la ola, C es el grupo de olas en propagación, $\omega (=2\pi f)$ es la frecuencia angular de ola, θ es la dirección de la ola, x o y es el vector posición de la ola, t es el tiempo, U (m/s) la velocidad de corriente promedio, k es número de onda y $\Omega = \omega + k * U$

En esta ecuación, se da el cambio de la densidad de acción de ola a ola; la propagación en el espacio de acción de ola somerización por profundidad; la refracción (por corrientes y profundidad); la transferencia de energía a través de las interacciones no lineales ola-ola (quadruetas y triadas); el decaimiento de las olas; la fricción y la disipación por whitecapping; y el rompimiento de la onda por la profundidad (Lizano et al, 2001).

La principal ventaja de SWAN es facilidad con trabajar con distintos tipos de mallas, sean ortogonales o cartesianas. Por el contrario, su limitación más importante es el no modelar muy bien la difracción y de no poder resolver adecuadamente la reflexión del oleaje.

El SWAN ha sido validado y verificado con éxito en una gama de experimentos complejos de campo y de laboratorio. También ha sido muy importante en estudios de ingeniería costera, sobre los procesos de transmisión, bloqueo de olas por corrientes y disipación por whitecapping sobre batimetrías reales, entre otros.

1.5.4 Selección de mallas

La selección de mallas va en función del área a propagar y de la localización del nodo del punto de reanálisis. Existen varios ejemplos de diferentes estudios que pueden ayudar a seleccionar la malla para diferentes estudios.

En la Figura 1.9 vemos como Camus (2012) para la cobertura de la costa Atlántica de España se planteó una serie de mallas generales (malla G) con una resolución espacial de $0.010 \times 0.008^\circ$ (1,11 km x 0,89 km). A estas mallas se le han anidado unas mallas más cercanas a costa (Mallas M) con una mayor resolución espacial de $0.0050 \times 0.004^\circ$ (0,555 km x 0,444 km),

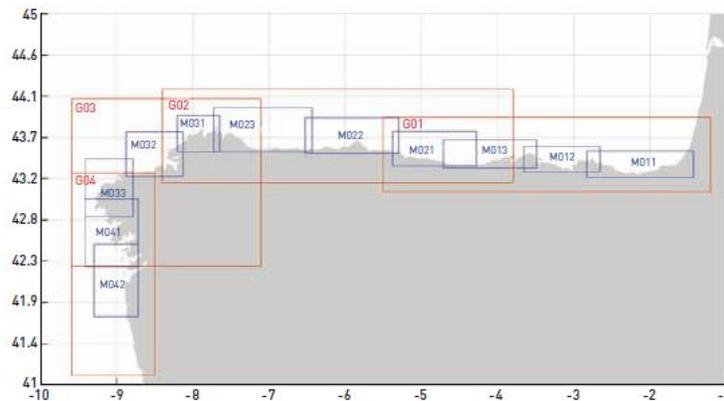


Figura 1.8 Esquema de malla anidada propuesta por Camus (2012) para la costa atlántica de España.

Bonanata (2009) para simular los procesos de propagación en las proximidades de la desembocadura de Barra do Furado, se crearon 3 mallas de cálculo anidadas, con resoluciones distintas. La malla exterior (M1) malla curvilínea con un espaciado de 1000 m, las mallas M2 y M3 mallas ortogonales regulares, con espaciado de 320 m y 60 m, respectivamente.

Royero (2006) en un estudio preliminar del impacto del oleaje de huracanes en Colombia se utilizó el modelo SWAN, con una la malla computacional tiene 10° de longitud oeste y 7° de latitud norte con una resolución de 250 m para la malla más gruesa y para las más fina 50 m.

Tomzin (2013) utilizo el modelo SWAN para representar la propagación del oleaje en regiones del pacifico en Panamá, utilizando una grilla de una dimensión de 282 km x 245 km del Golfo de Panamá, con un espaciamiento de $\Delta x = \Delta y = 1000$ m. para así cubrir el área de estudio por un total de 282 x 245 nodos.

Alfaro (2017) para el Golfo de Nicoya en Costa Rica, extensión de alrededor de 100 Km x 100 Km realizo una malla de $Dx = Dy = 180$ m, dando así 435 x 436 nodos de malla computacional.

1.6 Estudios de Clima Marítimo en Costa Rica

El oleaje proveniente del pacífico es un oleaje con una dirección predominante, períodos del orden de los 15 s que se define como un oleaje desarrollado, cuya zona de generación se encuentra a miles de kilómetros (Alfaro, 2017) .

Los oleajes más característicos de Costa Rica son generados por las tormentas de la antártica con un fetch de 9000 Km, generado cerca de Nueva Zelanda, después de generado el oleaje se propaga, se da un proceso de agrupamiento de las distintas frecuencias y direcciones (Alfaro, 2017) .

Se desarrolla así un oleaje que lleva consigo una onda larga, después cerca de los galápagos, el oleaje es difractado, disminuyendo su energía y generando un efecto de sombra (figura 1.10) que da lugar a variaciones del oleaje a lo largo de la costa Pacífico de Costa Rica .(Alfaro, 2017) .

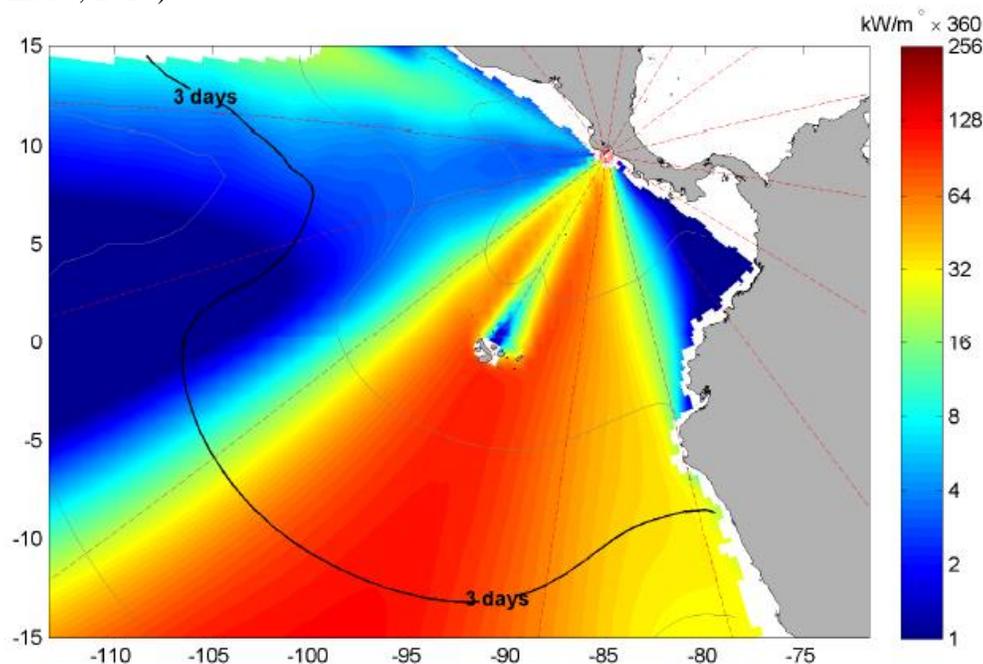
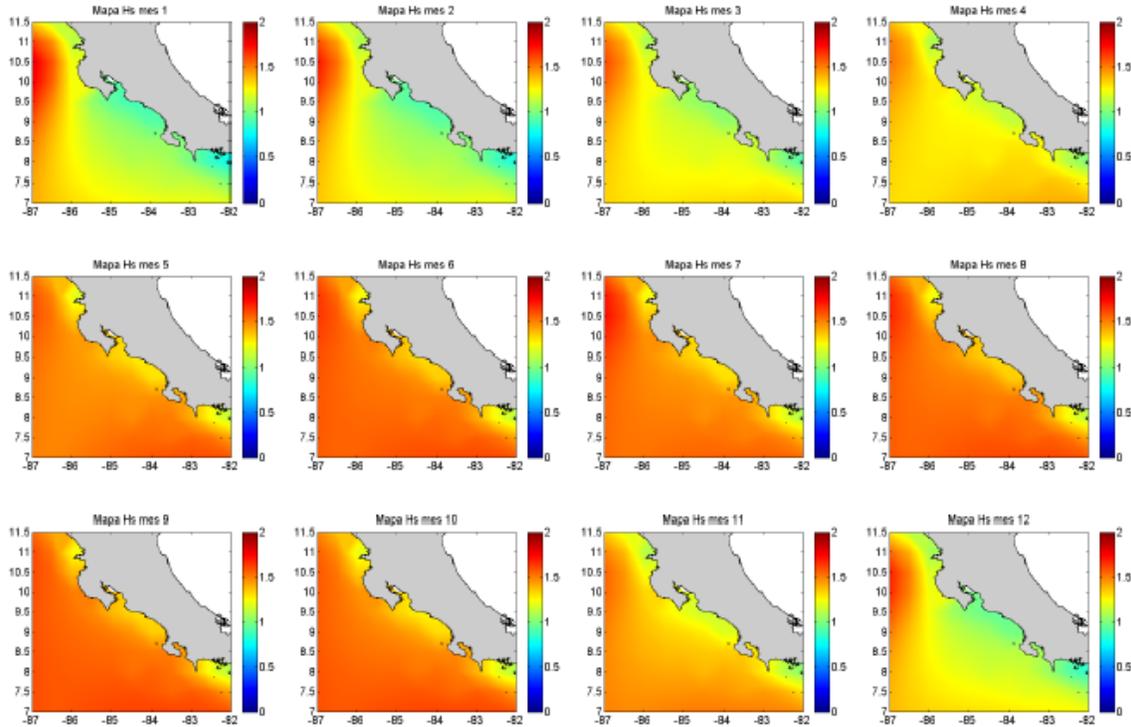


Figura 1. 9 . Zona de generación de oleaje que afecta a Costa Rica. Fuente: H. Alfaro 2017.

También Alfaro (2017) explica en la figura 1.11 que los oleajes con menos energía suceden en los meses de época seca de diciembre a abril, mientras que los más energéticos se dan en los meses restantes de mayo a noviembre esto coincide con la estación seca y lluviosa de costa rica y con los veranos inviernos del hemisferio sur.



*Figura 1.10. Mapas del parámetro H_s medio distribuida durante los meses del año.
 Fuente: H Alfaro 2017.*

Según Alfaro 2017 define el oleaje del pacifico es unimodal, de H_s bajos de octubre a marzo, H_s altos en los meses entre abril a septiembre, períodos del orden de los 15 s o mayores y poca dispersión de energía en diferentes frecuencias.

Alfaro (2017) explica en su trabajo la importancia de la afectación de la onda infra gravitatoria en las costas del Pacífico de Costa Rica para la construcción de estructuras costeras o análisis de las inundaciones costeras. Esta puede representar hasta un 30% de los eventos de rebase en la costa.

En otro estudio (Lizano, 2016), se establece que en la zona norte de la costa, a lo largo de las configuraciones topográficas del golfo de papagayo, donde las montañas cierran el paso del viento se generan frentes fríos que producen “mar de viento”, que vencen las calmas de la zona.

También, el viento local generado sobre la región norte de la costa, dependiendo su intensidad o del tiempo en el que sopla, con poca la energía del oleaje entrante remoto, se produce oleaje predominante que se dirige hacia mar adentro de la costa en esta región (Lizano, 2016).

En el Pacífico, Lizano (2016) definió que “hay dos grupos identificables de olas: una de períodos más largos, y otro grupo de períodos más cortos, las de mayor altura, y menos frecuentes, son de períodos cortos, muy probablemente de generación local, algunas asociadas a tormentas tropicales cercanos a nuestras costas”.



Costa Rica como cualquier otro país en los trópicos tiene la influencia de los ciclones tropicales que generan también un oleaje significativo, tanto desde incidencia local como lejana. La época de estos ciclones es en verano donde el agua es más caliente, el aire es succionado hacia el centro de baja presión.

Es importante mencionar que en el Pacífico sur y central de Costa Rica el viento cambia de dirección en mayo, cuando los vientos alisios se debilitan y la brisas marinas oestes ecuatoriales comienza a hacerse presentes en nuestro país (Govaere, 2009).

Geovare (2009), determino que el oleaje de la costa pacífica es de tipo swell y para las aplicaciones ingenieriles el espectro se aproxima a un espectro frecuencial tipo JONSWAP, siendo el valor de $\gamma=7$.

Por último, durante el invierno en el hemisferio norte del Pacifico, tormentas pueden adquirir energía suficiente como para alcanzar a generar oleaje que llegue a las costas del norte y hay que indicar que el oleaje de mayor incidencia durante el año es el oleaje del suroeste. (Govaere, 2009)

1.6.1 Otros estudios similares de propagación en Centroamérica

Se han realizado otros estudios similares en de caracterización de clima en la cercanía de Costa Rica, en mar pacifico se han propuesto acercamiento al problema de caracterización del oleaje.

Entre ellos está propuesto por Tomazin et al (2014) realizaron una modelación para obtener una mejor resolución de los procesos locales a la salida de los esclusas de los canales de Panamá, utilizo información de olas del reanálisis dado por la NOAA/NCEP Wavewatch III, calibrando con información satelital, para análizancasis de los valores extremos se usó la GEV (Generalized Extreme Value), como selección de datos utilizo el método de máxima verosimilitud y para la propagación se utilizó el modelo SWAN.

Royero et al (2006) en su estudio para determina del impacto del oleaje de huracanes en Colombia utilizo el modelo SWAN, mediante batimetría Etopo 2 con 2 grados de resolución, un campo de vientos; propago haciendo uso de Swan, con una resolución de la malla general de 250 m y para la de detalle 50 m. Determinaron que con la corrida estacionaria se realiza una buena aproximación del oleaje y que la malla era un tamaño que permite que los vientos no van a cambia mucho en dirección o en magnitud.

Capítulo 2. Clima Marítimo

2.1 Localización

Para realizar una caracterización del clima marítimo en profundidades indefinidas, se analizarán los datos obtenidos a partir del punto GOW, se identificarán las direcciones predominantes, la identificación de calmas, los regímenes medios de los datos de altura de ola en conjunto con el periodo medio y los regímenes extrémos.

Las características del punto GOW (figura 2.1) obtenido tiene las coordenadas latitud = $8^{\circ}7'22.62''N$ y longitud = $85^{\circ}57'55.91''O$; serie temporal = 01 /02/1948 hasta 31/12/2015 (593160 registros). Para la validación se tiene registros de boya ubicada en la cercanía de Cabo Blanco, latitud = $9^{\circ}32'3.92''N$ y longitud = $85^{\circ}6'58.64''O$ con 20 m de profundidad, datos se toman cada 3 horas y se tiene con 2 años de registro 2014 y 2015.



Figura 2.1. Localización Puntos GOW y Boya

Mediante el programa AMEVA (Análisis Matemático y Estadístico de Variables Medioambientales) se ha utilizado la aplicación de AEVA (Análisis Estadístico de Variables Ambientales) del IH Cantabria, con ella se realizarán representaciones graficas de los estados de mar ingresados como parámetro de altura de ola, periodo y dirección. Mediante la misma se logra además realizar un análisis estadístico de estas variables oceánicas.

Un claro ejemplo de estas graficas es la siguiente figura 2.2 donde observa el régimen medio en el punto GOW para la altura de ola significativa y el periodo medio. Se observan en cuando a la altura de ola significativa, esta toma valores entre 0.2 y 2 m, pudiendo llegar a los 3 m, también se puede ver periodos medios que varían entre 1 segundo y los 10 s, y que en algunos puntos más altos se pueden llegar hasta a superar los 20 s.

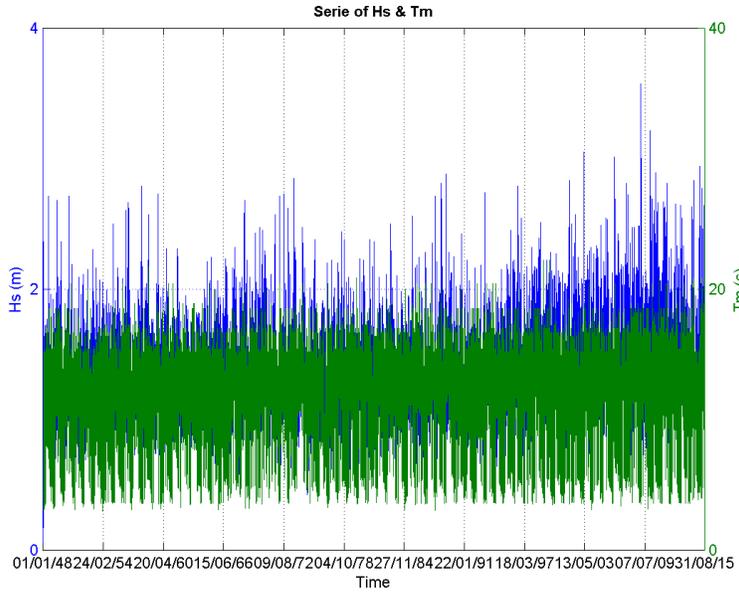
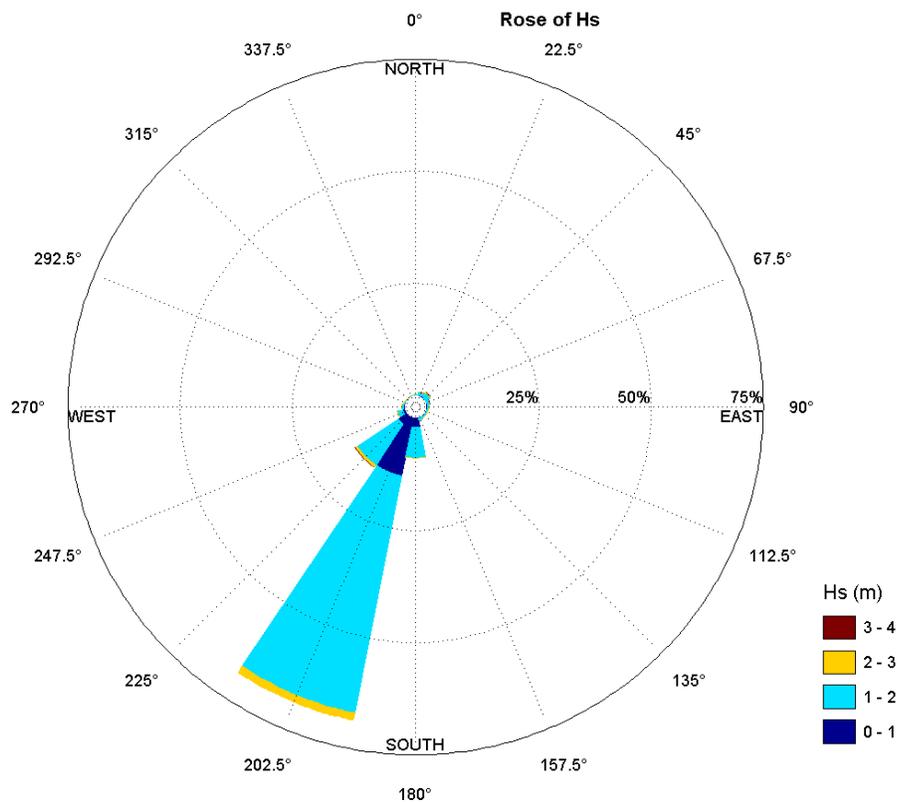
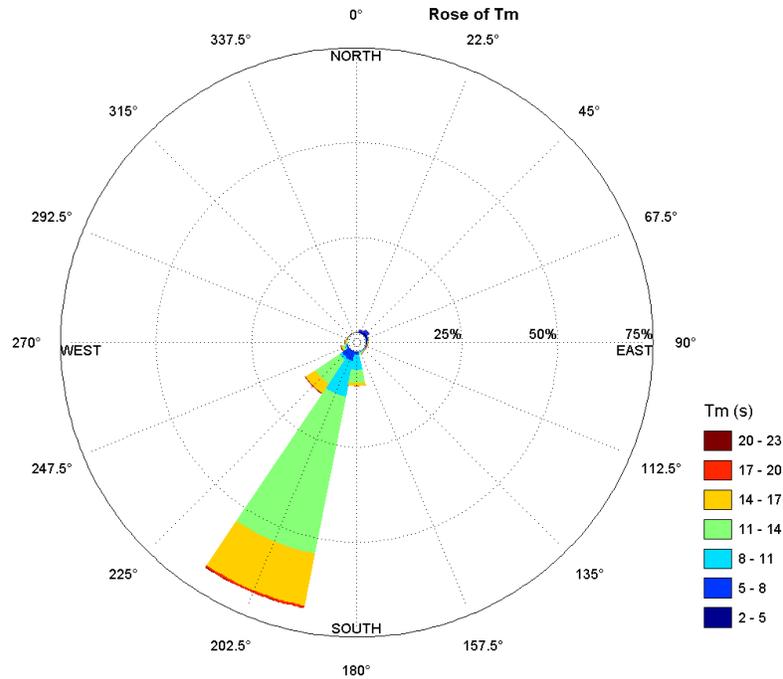


Figura 2. 2 Representación temporal de Hs y Tm

2.2 Análisis Direccional de oleaje



a)



b)

Figura 2.3. Representación de las rosas direccionales del oleaje (a) y periodo medio(b).

Tabla 1 Tabla de ocurrencia de las direcciones de oleaje

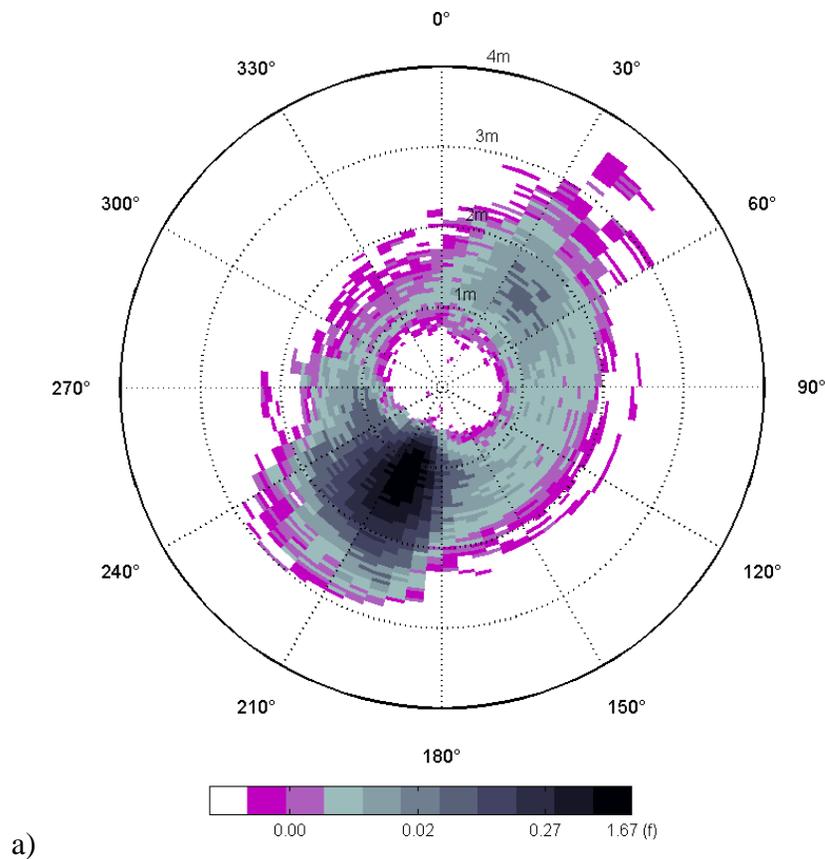
Orientación	Dir.Inicial (°)	Dir.Final (°)	Proab. Dir (%)
N	348.75	11.25	0.3
NNE	11.25	33.75	0.9
NE	33.75	56.25	1.5
ENE	56.25	78.75	0.8
E	78.75	101.25	0.5
ESE	101.25	123.75	0.4
SE	123.75	146.25	0.4
SSE	146.25	168.75	0.7
S	168.75	191.25	9.1
SSO	191.25	213.75	68.7
SO	213.75	236.25	13.8
OSO	236.25	258.75	1.8
O	258.75	281.25	0.7
ONO	281.25	303.75	0.2
NO	303.75	326.25	0.1
NNO	326.25	348.75	0.1
TOTAL, EVENTOS (593160)			100

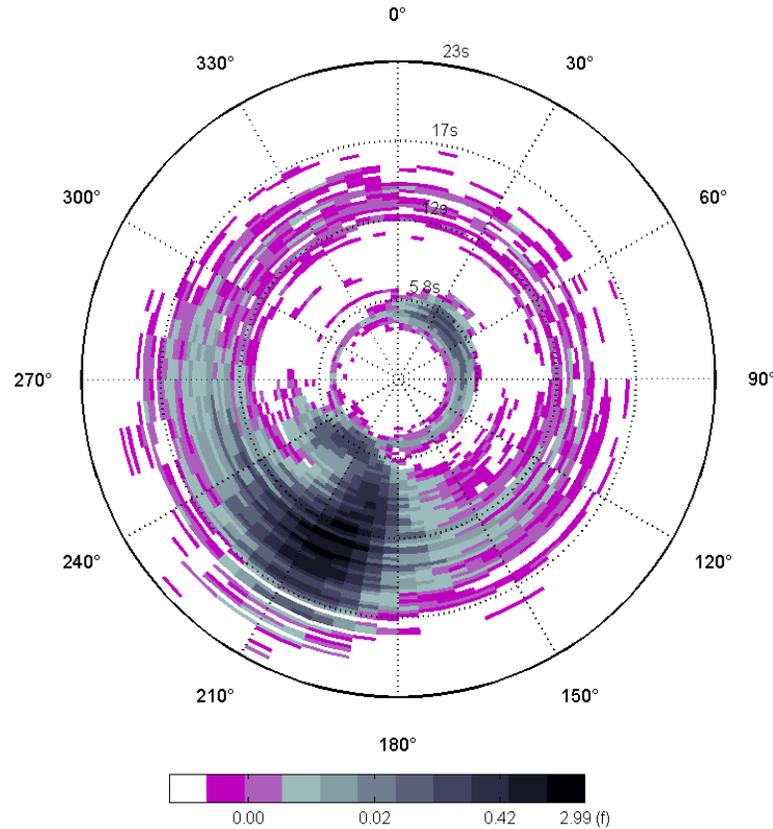


De los datos en el punto GOW seleccionado para este estudio, se obtiene la rosa de oleaje (Figuras 2.3 a y b) y la tabla de ocurrencia direccional (Tabla 1). En ella, se puede apreciar cómo el oleaje predominante en aguas profundas proviene del SSO con una probabilidad del 68.7%, seguidos por los oleajes que provienen del SO con una probabilidad de 13.8%.

La siguiente dirección con alto porcentaje es la S con 9%, después el oleaje de OSO en conjunto con NE tiene una participación de 1.5% y 1,8%; mientras que todos los demás oleajes son de un porcentaje menor al 1%.

Los oleajes dominantes van del S al OSO. Los principales son los temporales que vienen del SSO, con *fetch* proveniente de Nueva Zelanda. También, aparecen unos oleajes de NE con *fetch* de tormentas del norte, los demás son oleajes de vientos locales.





b)
 Figura 2.4 Representación de las rosas direccionales de probabilidad del oleaje(a) y periodo medio(b).

De las figuras 2.4 (a y b), se puede observar que existen mayores probabilidades de que las alturas de ola estén en torno a 1.5 m y 12 s en la dirección predominante 210° N (con respecto al Norte). Sin embargo, aunque con una menor probabilidad existen oleajes que pueden alcanzar los 3 m de altura y más de 12 s.

También, se manifiesta una relativamente baja probabilidad de oleajes en todas las direcciones con periodos 12 s con alturas de los 1 m hasta los 2 m que podrían identificarse como periodos de calma. Además, hay una mayor probabilidad de que los estados del mar en el punto de GOW provengan de direcciones entre 180° y 240°.

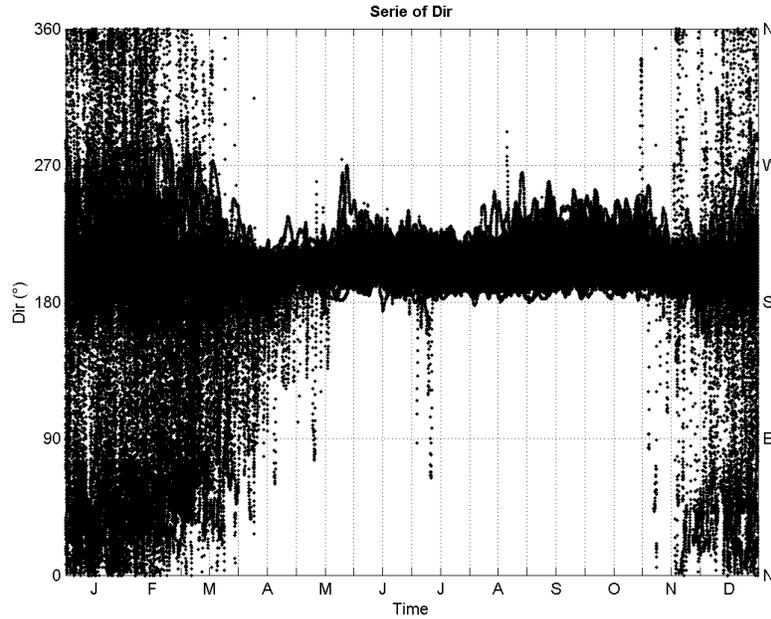


Figura 2.5 Representación mensual de la dirección de oleaje.

Tabla 2. Tabla de ocurrencias de oleaje por sectores y por meses.

	Direcciones						Total % Eventos
	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300	300-360	
Enero	1.15	0.34	0.43	5.72	0.70	0.18	8.53
Febrero	0.80	0.40	0.49	5.29	0.65	0.13	7.77
Marzo	0.30	0.40	0.54	6.96	0.31	0.03	8.53
Abril	0.01	0.05	0.25	7.94	0.01	0.00	8.25
Mayo	0.00	0.01	0.03	8.47	0.03	0.00	8.53
Junio	0.00	0.00	0.01	8.24	0.01	0.00	8.25
Julio	0.00	0.00	0.02	8.51	0.00	0.00	8.53
Agosto	0.00	0.00	0.01	8.47	0.05	0.00	8.53
Septiembre	0.00	0.00	0.00	7.98	0.15	0.00	8.13
Octubre	0.00	0.00	0.00	8.26	0.14	0.00	8.40
Noviembre	0.07	0.01	0.06	7.93	0.05	0.01	8.13
Diciembre	0.42	0.16	0.28	7.32	0.17	0.05	8.40
Total, Porcentaje	2.75	1.38	2.11	91.07	2.28	0.41	100.00

En la Figura 2.5, se observa la concentración de puntos en los oleajes con dirección entre 120 a 240 durante todo el año. Además, se presentan varias concentraciones de puntos en los meses de noviembre a mayo donde los oleajes provienen de distintas direcciones, en especial del E y NE; estos oleajes, como se aprecia en la tabla de ocurrencia (Tabla2), no pasan de los 3% de ocurrencia y las direcciones de 180 a 240 tienen una incidencia de 91.07%.

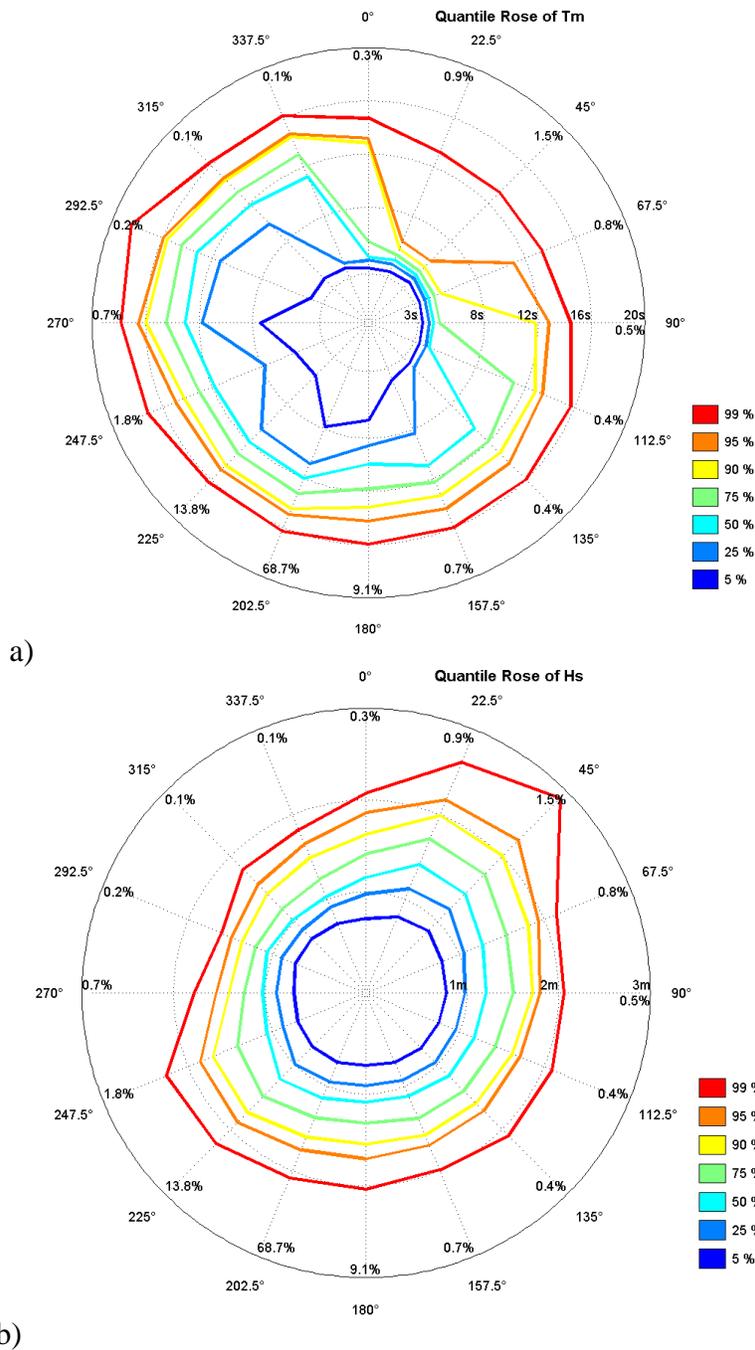


Figura 2.6. Rosas direccionales de cantiles correspondientes al periodo medio y a la altura de ola.

En la rosa de los cuantiles (Figura 2.6), se observa que los percentiles del 99% están entre los 45 y 250 grados. Los distintos colores que indican los percentiles desde el 5% hasta el 99% cubren gran área de la gráfica, lo cual responde a una gran cobertura de todas las direcciones del oleaje.

El 60.7% de las veces las olas tienen una dirección de incidencia SSO. El radio de la rosa representa en un caso la altura de ola y en otro el periodo medio. En el caso de la altura de ola, se observa que la mayor parte de los casos tiene una altura de ola menor a 1 m hasta casi los 3 m. En el periodo medio, la mayoría de los casos se corresponden con un periodo menor a 3 s, llegando hasta los 18 s. La circunferencia de los periodos más altos abarca a casi todas las direcciones.

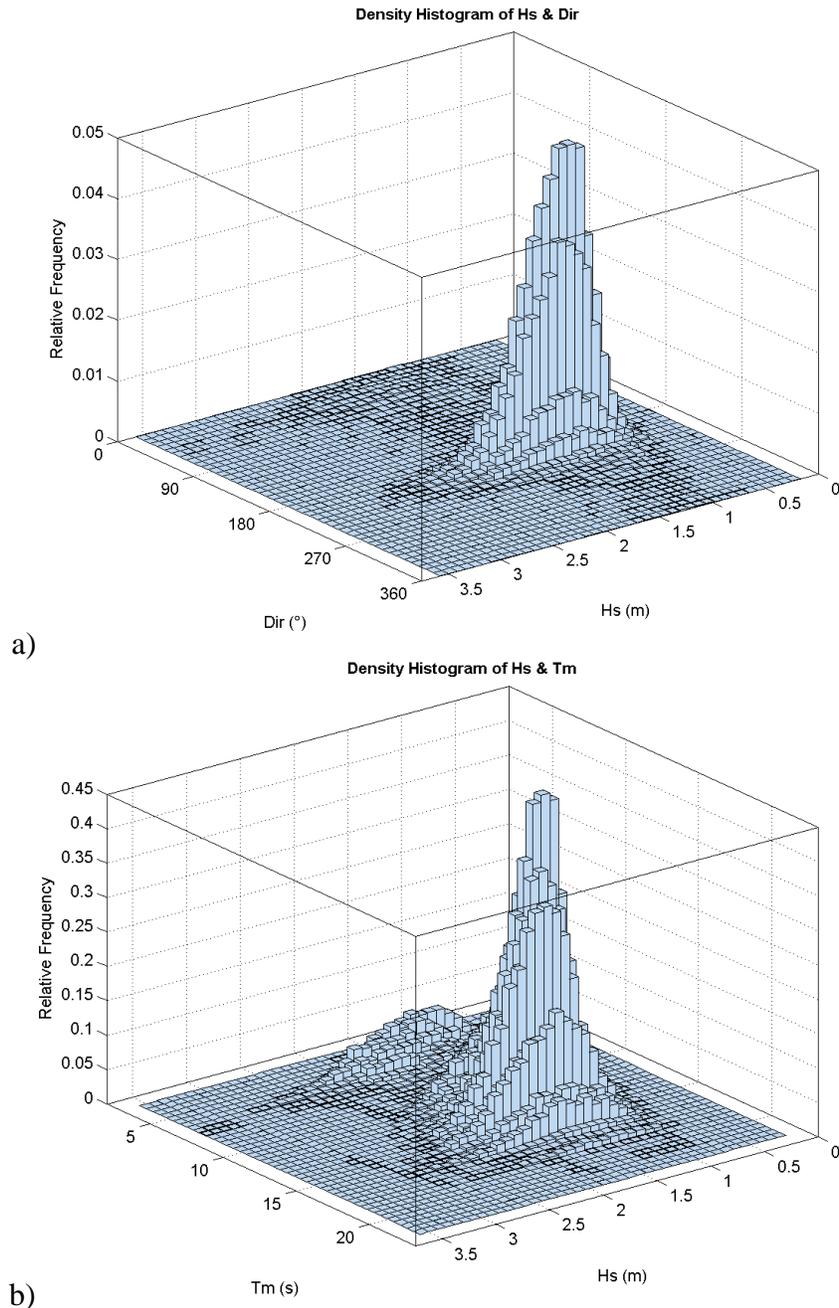


Figura 2.7 Histogramas de densidades de Hs-Dirección (a) y Hs-Tm (b)



A partir de la Figura 2.7, se puede apreciar que la mayor concentración de energía se da para una dirección de incidencia de alrededor de los 200° N con un pico para alturas de ola de menos de 1.5 m. Para direcciones de incidencia menores a 180° , la energía es menor o prácticamente nula, así como para direcciones mayores a los 270° N.

Además, en los histogramas en 3D se representa las alturas de ola en relación con el periodo medio. Se observa, al igual que en el histograma anterior, que las alturas de ola más frecuentes son aquellas menores a 1.5 m, y tienen un periodo medio asociado de 10 a 15 segundos; incluso aparece una pequeña concentración de energía con centro en 2 m y periodos menores de 5 a 10 segundos.

2.3 Régimen Medio

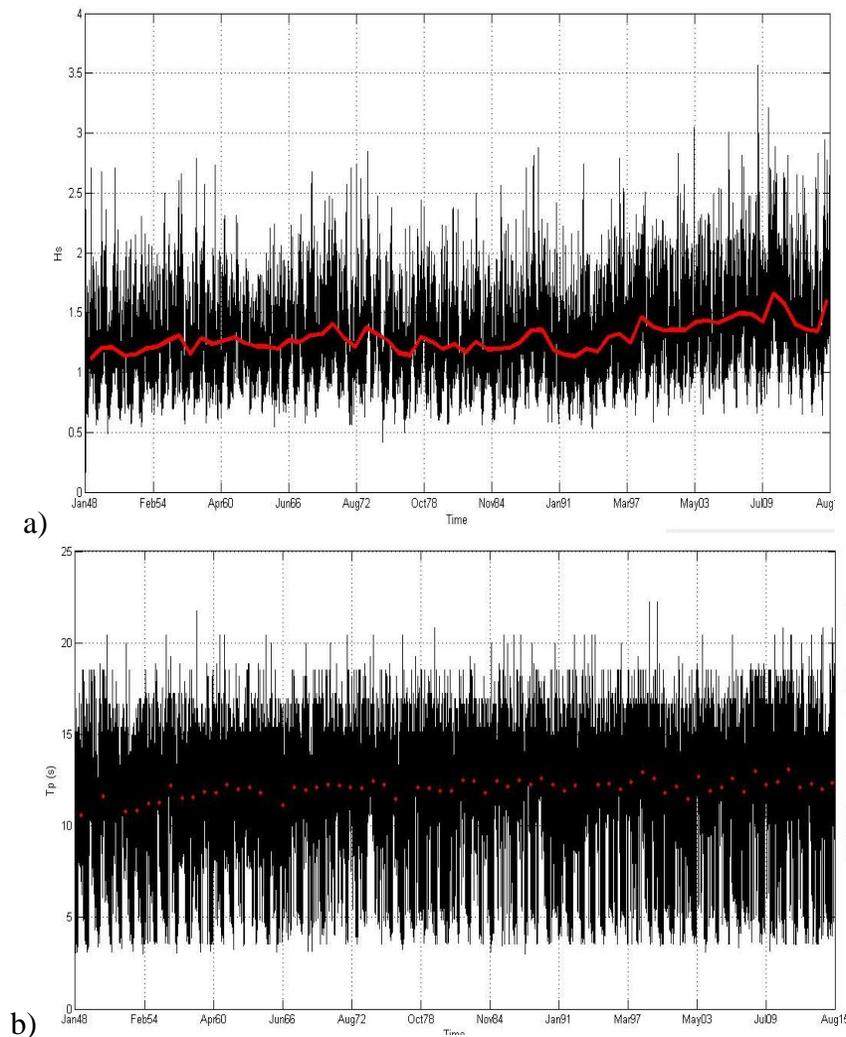
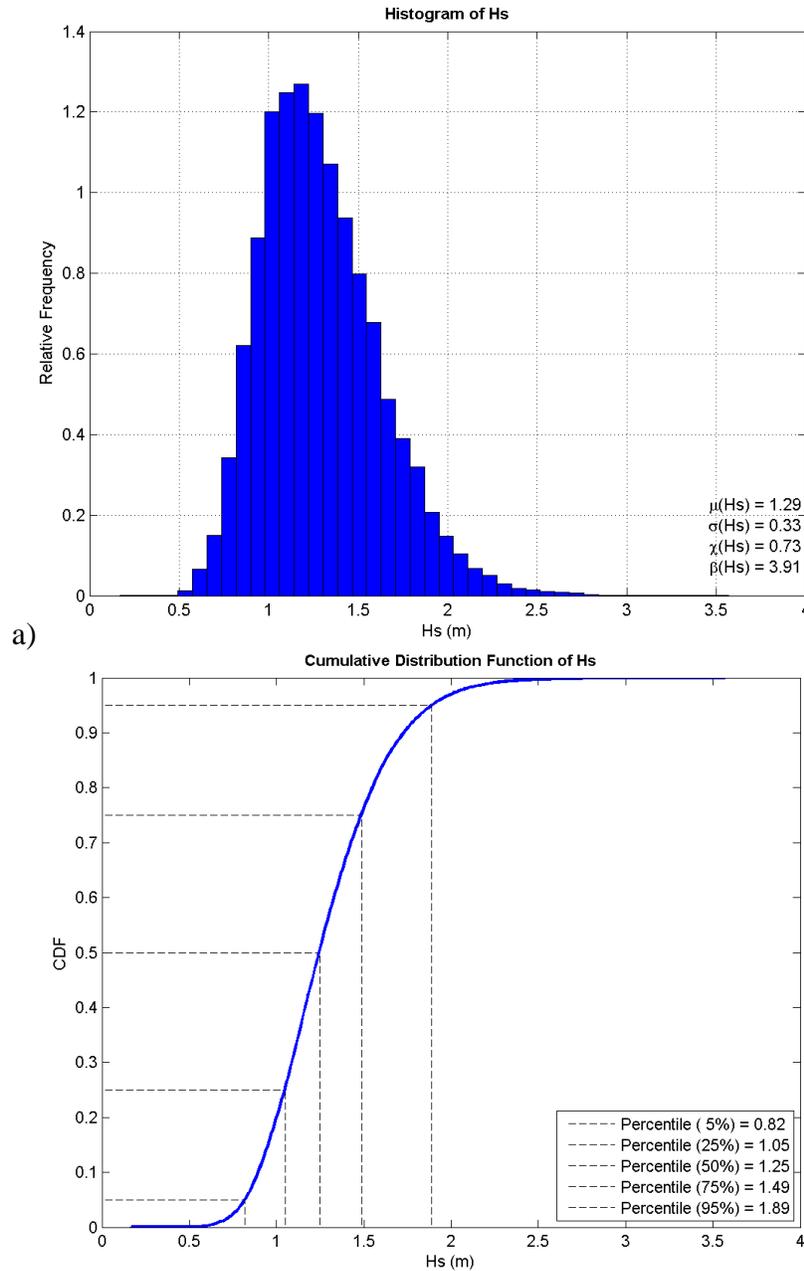


Figura 2.8 Serie temporal de H_s (izquierda) y T_m (derecha).

En cuanto a la Figura 2.8, estas series van desde el año 1948 hasta 2015. Se observa que las alturas de ola significantes van de los 0.5 hasta los 3 m con un evento en el 2009 de 3.5 m. La media (línea roja) ha venido aumentando a partir del 2000, pero manteniéndose en un rango de 1 a 1.5 m. En cuanto a los periodos, se observa que estos mantienen un comportamiento cíclico manteniéndose entre los 10 y los 15 s.



b) *Figura 2. 9.Histograma (a) y función de distribución acumulada (b) de Hs.*

El histograma y la función de distribución acumulada (figura 2.9) permiten identificar la altura de ola significativa más probable. Esta altura de ola más probable toma un valor de aproximadamente 1.25 m. La altura de ola media (μ) es de 1,29 m. La altura de ola significativa máxima, que es de 3.5 m, tiene una probabilidad de ocurrencia casi nula.

La función de distribución acumulada proporciona información de los distintos percentiles. Se encuentra que la altura de ola para el percentil del 75% no supera 1.49 m; mientras que el percentil del 95% no supera los 1.89.

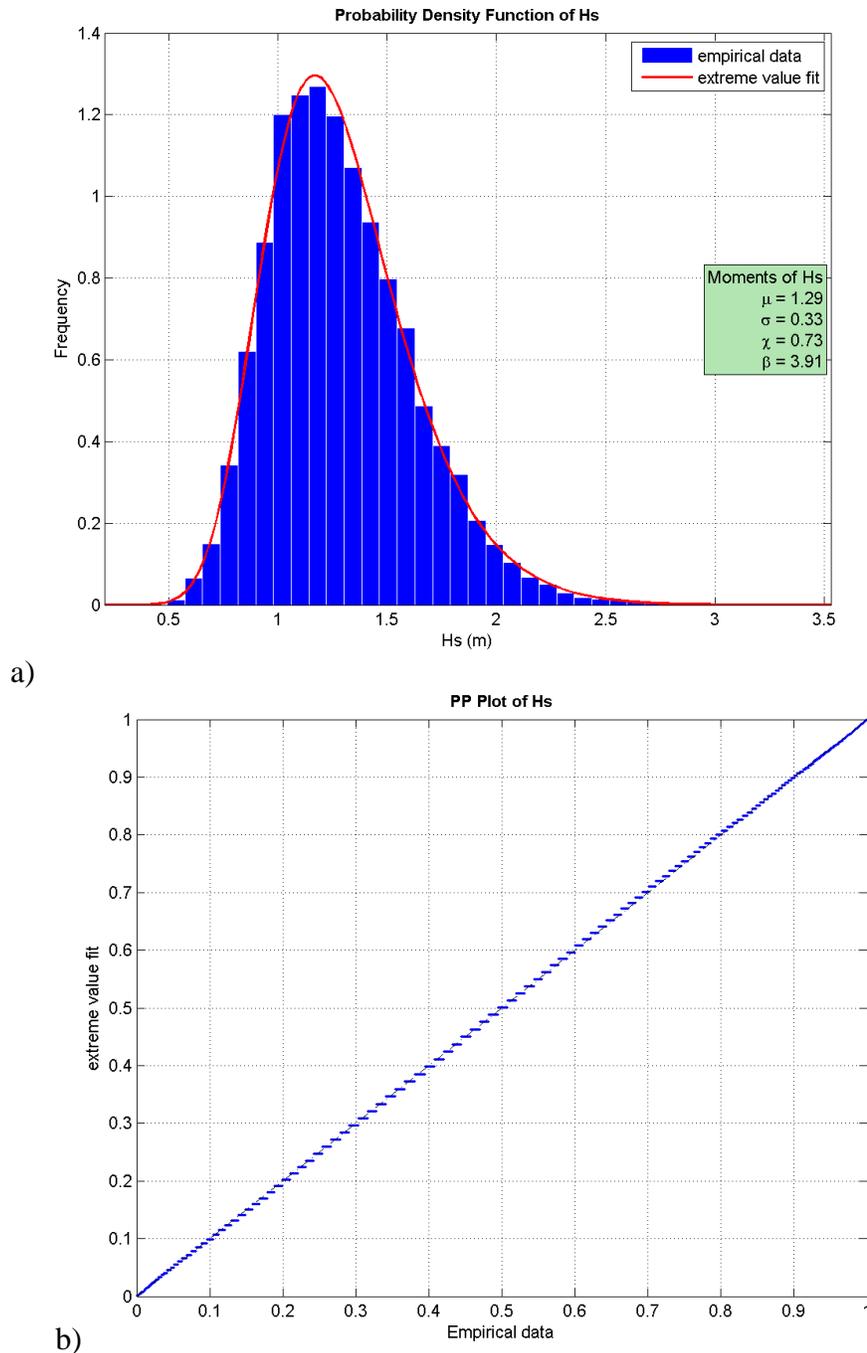


Figura 2.10. Histograma de densidad acumulada, empírico en conjunto con el ajustado (a) y PP plot (b).

Para la caracterización del régimen medio, se ha procedido a realizar la comprobación de cuál es el mejor ajuste para la variable Hs. La función a la que más se ajusta la altura de ola significativa es a una distribución de valor extremo.

Se ve en el histograma (figura 2.10 a) que la función tiene simetría positiva, que la cola por la parte de la derecha es mayor que por la parte izquierda y todas las variables de momentos de Hs son positivas.

Puede verse en la figura la forma de ajuste a los datos empíricos del histograma, la función de distribución acumulada, así como el PP plot (figura 2.10 b) que relaciona los valores estimados con los empíricos y cómo estos valores se asemejan mucho a la recta que se obtiene.

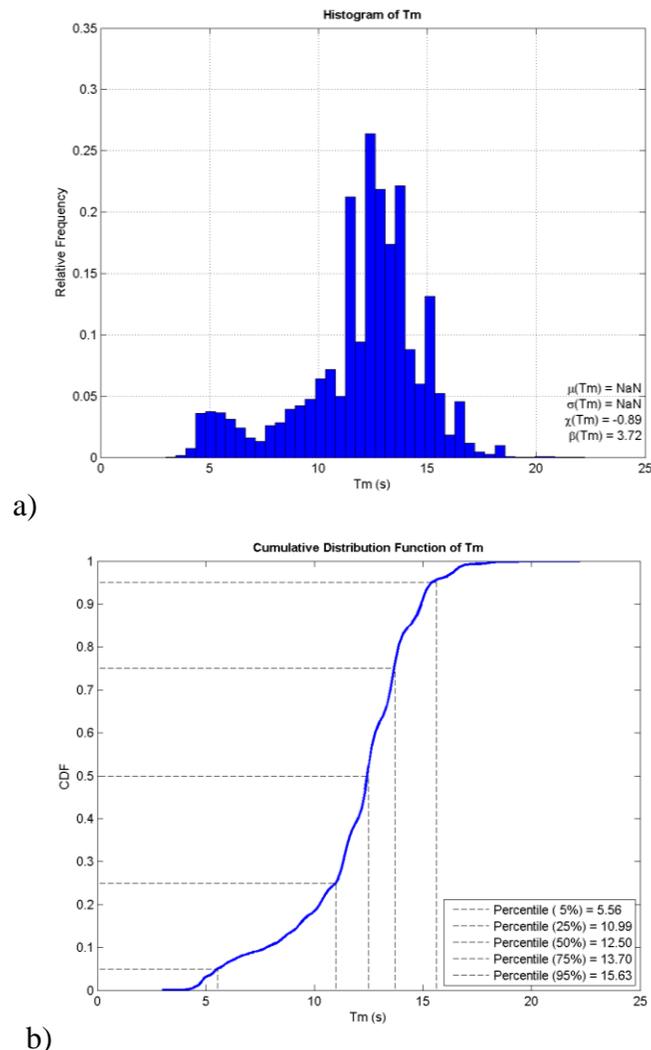


Figura 2. 11. Histograma (a) y función de distribución acumulada (b) de Tm

De la misma forma, se presenta el histograma del Tm y la función de distribución acumulada (figura 2.11 a y b). En este caso puede observarse ciertas irregularidades, se tiene frecuencias de valores de Tm que van aumentando y disminuyendo, no se tiene un crecimiento-decrecimiento constante en el histograma de Hs.



Así bien, como el periodo pico más probable toma valores alrededor de 12 s, la media no pudo ser calculada por la alta variabilidad de los datos. A partir de la función de distribución acumulada, se establece que para el percentil del 75 % no supera los 13.70 s mientras que el percentil del 95% no supera los 15.63 s. No se logró determinar una función que logre ajustar los datos como en el caso de la altura de ola.

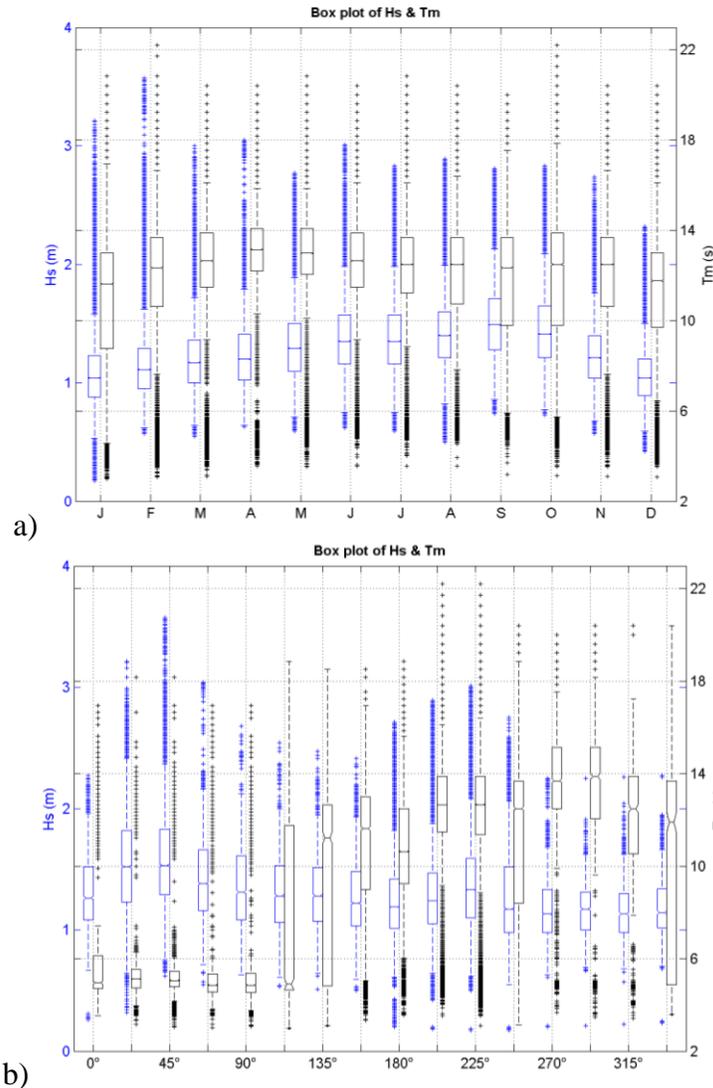


Figura 2.12. Diagrama de cajas mensual (a) y por sectores (b).

En el diagrama de cajas mensual (figura 2.12 a) que se observa en la izquierda de la figura, se representan mes a mes los percentiles del 25%, del 50% y del 75%, así como la distribución de los máximos y mínimos. En ellos se observa una leve variación en altura de ola en los meses de mayo a noviembre.

Para los periodos, sus medias se mantienen relativamente en la misma zona, solo que las cajas de septiembre a febrero son más grandes y, por lo tanto, tienen mayor cantidad o variabilidad de datos.

En el diagrama de cajas por sectores (figura 2.12 b), se representa la misma información, esta vez clasificada en función de la dirección de incidencia, donde los mayores valores de periodo medio están entre las direcciones 200°N y 270°N grados.

En el caso de las alturas de olas, las mayores se ubican en direcciones de entre los 0°N y los 45° N. En las direcciones de los 200°N a los 270°N, hay mayor periodo con aturas de ola medias)

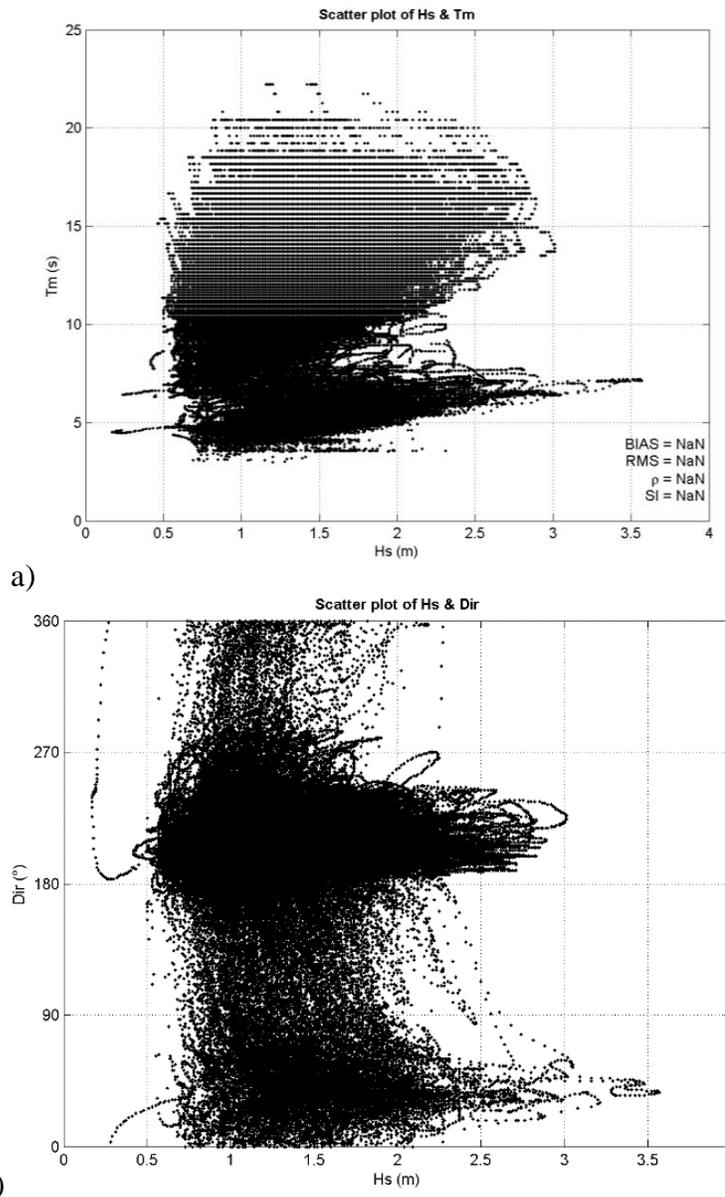


Figura 2. 13. Representación Tm vs Hs (a) y representación Tm vs dirección (b)

La figura 2.13 (a) muestra mediante una nube de puntos la relación entre las distintas variables. En la nube de puntos de la izquierda, se visualiza la relación entre la altura de ola significativa y periodo medio; se observa varias zonas vacías que corresponden a los oleajes de la onda larga (revisión). Hay una mayor concentración de puntos para alturas de ola grandes y periodos en el entorno de 5 a 10 s.



En la Figura 2.13 (b), se observa que las mayores alturas del oleaje se dan en una dirección de incidencia de entre 180 y 270 grados; mientras que en el resto de direcciones el valor del periodo medio es más o menos constante, hasta estar en la zona de los 45 grados donde vuelve a tener bastantes concentraciones de puntos; todo esto en el entorno entre 1 a 2.5 de Hs.

2.4 Régimen Extremal

2.4.1 Método de los máximos anuales o distribución (GEV)

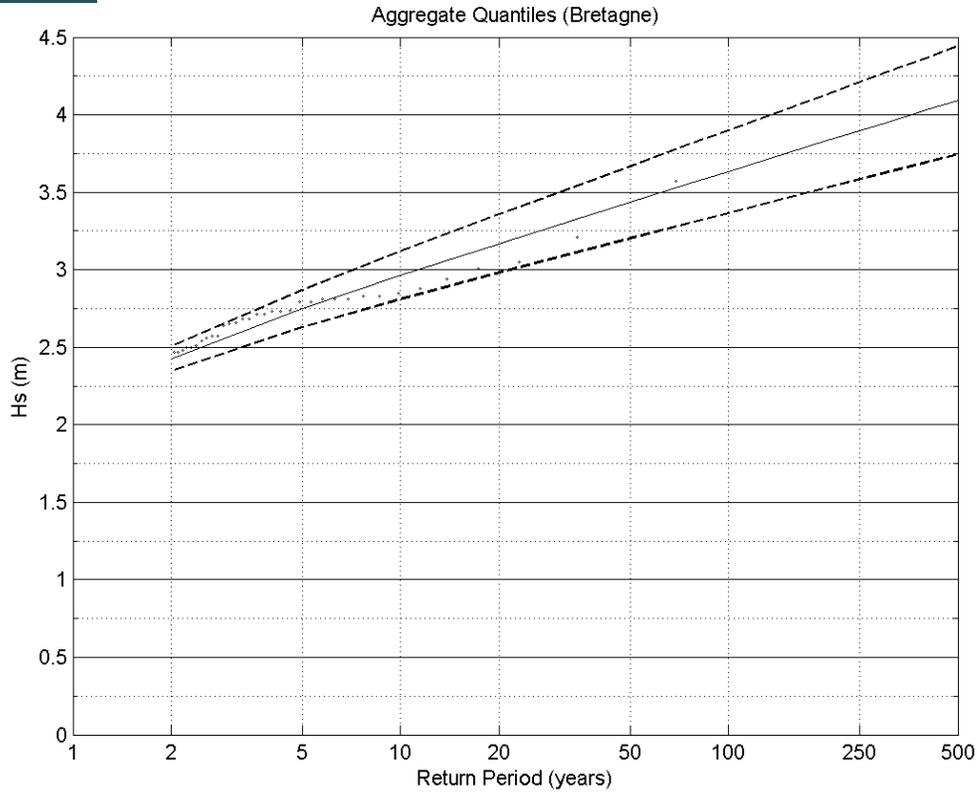
Primeramente, se utilizará la distribución generalizada de valor extremo (GEV), utilizando la variable de Hs t teniendo en cuenta una independencia diaria de 3 días donde ase independicen los eventos. Se utilizarán los intervalos anuales de una serie temporal de datos.

Para realizar este proceso primero, se obtiene el valor máximo correspondiente de la altura de ola, que se almacena en una variable, así como el tiempo correspondiente en el que se produce. Una vez obtenida la serie de valores máximos, se procede a hacer el análisis GEV, que da como resultado un valor de gamma negativo.

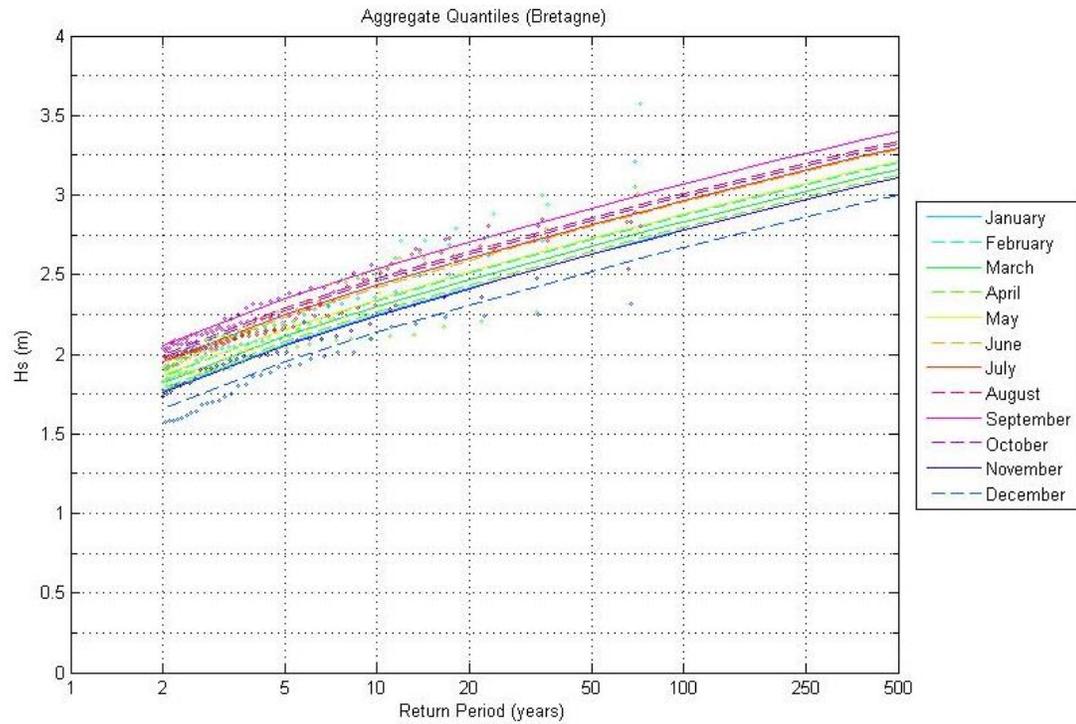
$$\begin{aligned}\beta &= 1.772 \\ \alpha_0 &= -1.200 \\ \gamma_0 &= -0.095495\end{aligned}$$

En la Figura 2.14a, se representa la gráfica de cuantiles agregados. Esta función se ajusta mejor conforme los puntos que corresponden con los valores empíricos de los máximos se acercan a la línea. Las líneas de puntos representan los intervalos de confianza del ajuste del 95%. De esta forma se observa que la altura de ola para un periodo de retorno de 100 años será de 3.5 m.

En la figura 2.14 b, se encuentra la misma gráfica de función de ajuste, pero esta vez para cada máximo mensual, donde los mayores máximos los tienen septiembre y octubre, meses cuando suceden las mayores tormentas y ciclones en el Pacífico.



a)



b)

Figura 2. 14. Distribución de periodos de retorno de la altura de ola; anual (a) y mensual (b).

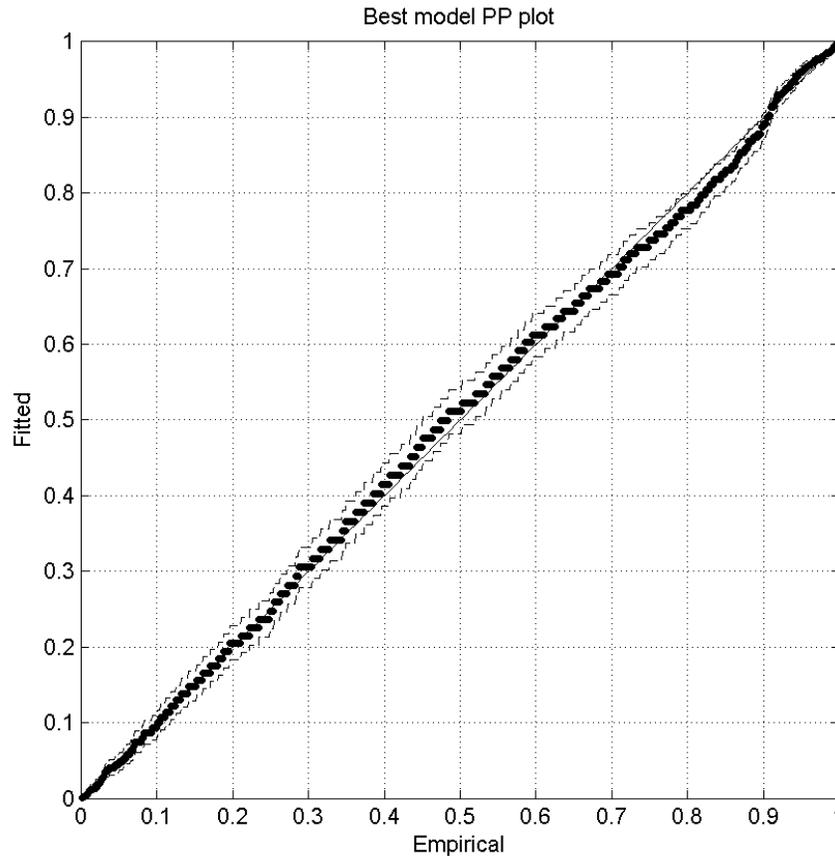
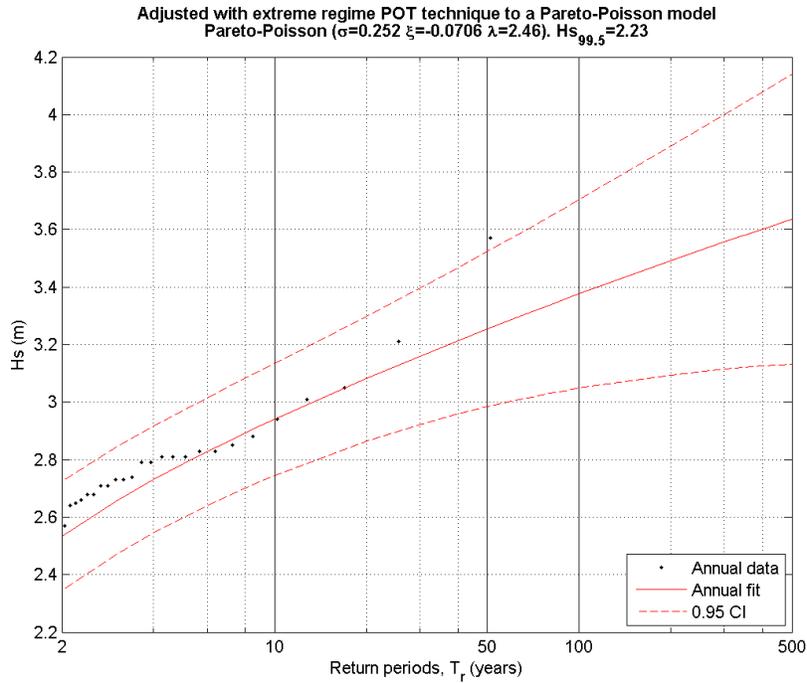


Figura 2. 15. PP Plot de la distribución GEV

En la Figura 2.15, se observa la gráfica probabilidad-probabilidad (PP Plot) de la distribución GEV, en la que se muestran los valores empíricos junto con aquellos obtenidos mediante el ajuste. Las parejas de valores se encuentran en el entorno de la diagonal y las líneas punteadas, que representan los intervalos de confianza, son muy regulares.

2.4.2 Método de los valores de pico o distribución de Pareto (POT)

En este caso en vez de obtener los máximos anuales, se establece un umbral a partir del cual se toman los valores de la variable que se encuentran por encima de dicho umbral. El umbral que se coge es aquel correspondiente al del percentil del 99.5%, que en este caso corresponde a una altura de ola de 2.23 m. Una vez obtenidos los valores de POT, así como los tiempos a los que corresponde, se procede a ajustar el modelo de máximos a Pareto-Poisson.



a)

b)

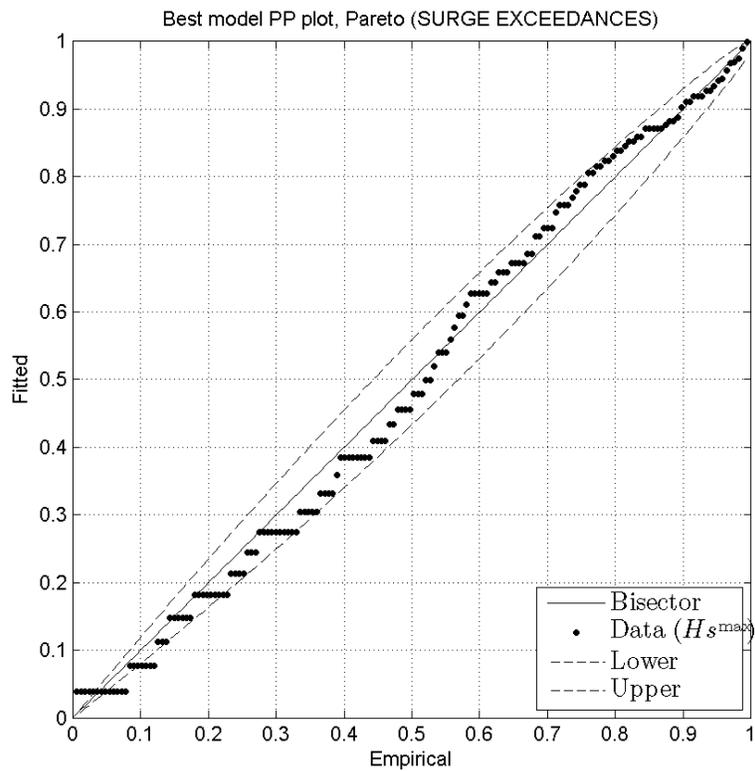


Figura 2. 16. Distribución de periodos de retorno de la altura de ola, H_s (a) y PP Plot (b) con Modelo Pareto-Poisson



En el ajuste, se toma el umbral que se ha utilizado para el POT. De esta forma se representa en la figura la distribución de los máximos correspondientes. Los valores para los distintos periodos de retorno son los mismos que los obtenidos mediante el modelo generalizado.

La Figura 2.16 (a) muestra que para un periodo de retorno de 100 años el valor de la altura de ola esperado es igual que en el caso anterior, 3.4 m. En la figura 2.16 (b) de la derecha, se observa el PP Plot para el ajuste de Pareto-Poisson; en este gráfico, se ve que las primeras parejas de valores se ajustan muy bien a la distribución tanto para valores menores como valores mayores.

2.6 Conclusiones

El oleaje en la zona de pacifico de Costa Rica es de tipo Swell, con grados de energías diferentes a lo largo de la costa debido al efecto de sombra de las Islas Galápagos. Su dirección predominante procede de la dirección del tercer cuadrante; los oleajes más dominantes se encuentran en un rango del 180° a 240° , siendo el más predominante el SSO.

Las calmas tienen una frecuencia menor a 1%; por lo tanto, se desprecian estadísticamente. Se identificó que en los meses de septiembre a mayo se tiene las mayores alturas de ola, estas se encuentran alrededor de los 2.5 m.

Se presentan 2 conjuntos energéticos de oleaje, uno con periodos de los 5 a los 10, con una frecuencia menor a 1%. y otros alrededor de los 15 a los 20 con una frecuencia de 40%. La media de la altura de ola es 1.49, la del periodo pico no fue posible obtenerla y la dirección predominante es 200° . En cuanto a los periodos pico usuales están arriba de los 10.



Capítulo 3. Metodología

3.1 Estrategia Numérica

La estrategia establecida para determinar las condiciones de oleaje alrededor de toda la costa del Pacífico es utilizar la metodología de regionalización o *downscaling*, propuesta por Camus et al., 2012. Esta metodología se basa en la transferencia de una serie *hindcast* de datos de aguas profundas hasta aguas someras.

Para ello se debe analizar las bases de datos de reanálisis en el área de estudio, seleccionar un número limitado de casos que son los más representativos del oleaje en conjunto con los de viento en aguas profundas, propagación de los casos seleccionados utilizando un modelo de propagación de onda, reconstrucción de las series temporales de parámetros de estado del mar en aguas poco profundas y, por último, validación de los datos de onda costera con datos instrumentales.

Se utilizará como programa para la propagación el IH-Propaga. Este *software* del IH Cantabria propaga el oleaje desde aguas profundas hasta la costa. Este es un programa que utiliza el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshores) (Booij, 1999), el cual es de tercera generación y realiza estimaciones de los parámetros de oleaje producidos por las olas. Como cualquier modelo numérico, requiere de información de entrada; en este caso una batimetría, las mallas numéricas y los forzamientos del oleaje con viento.

3.2 Batimetría

Para la regionalización, uno de los factores primordiales es la batimetría, la cual debe ser lo suficientemente detallada en relación con las dimensiones del problema a analizar y abarcar la zona de estudio, donde se muestren los puntos de interés y los puntos críticos de la simulación como bajos y las difracciones debidas a bajos.

La batimetría empleada es proveniente del proyecto ETOPO (Figura 3.1), que es un conjunto de datos operado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Estos datos se pueden representar como un modelo de elevación digital global (DEM) de la superficie terrestre que incluye batimetría del océano y topografía de la tierra. Tiene una resolución por celda de unos 1,8 km.

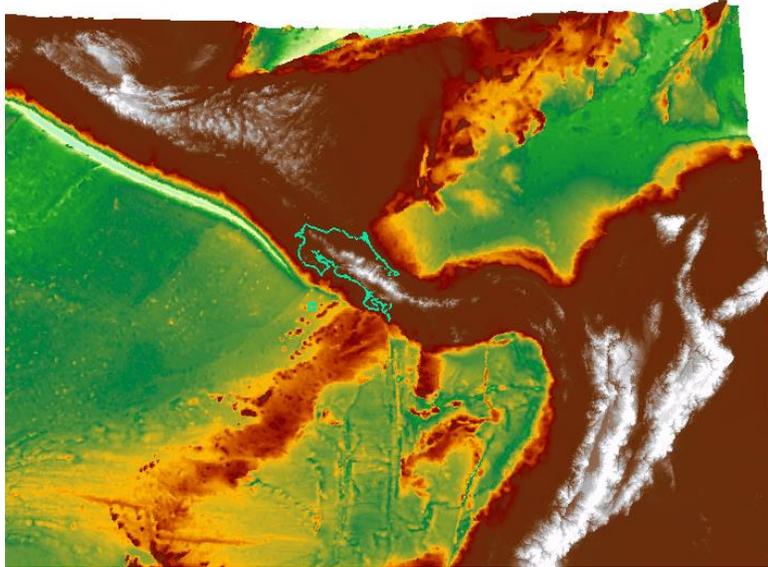


Figura 3.1. Batimetría de la zona

3.3 Forzamientos de oleaje y viento

En el presente estudio, se utilizarán las bases de series de datos de reanálisis del oleaje Global Ocean Wave (GOW) proporcionado por el IH Cantabria, teniendo un registro desde 1948 hasta el 2015. Esta base de datos cuenta con una resolución de 1.5° en longitud y 1° en latitud, logrando así abarcar una gran extensión global y homogeneidad de datos para cualquier zona de aguas abiertas por el mundo.

El punto seleccionado tiene las coordenadas latitud = 8° 0.000'S y longitud = 85° 5.000'W; serie temporal = 01 /02/1948 hasta 31/12/2015 (593160 registros) (Figura 3.3). Para la validación, se tiene registros del perfilador acústico tipo AWAC ubicado en la cercanía de Cabo Blanco, latitud = 9°32'3.92"N y longitud = 85° 6'58.64"O (Figura 3.2) con 20 metros de profundidad, los datos se toman cada 3 horas y se cuenta con 5 meses de registro (18 de junio a noviembre del 2015).

El AWAC es un perfilador acústico de corrientes y medidor de oleaje direccional mediante el método de seguimiento acústico de la superficie AST (Acoustic Surface Tracking), de la marca NORTEK (Alfaro, 2017).



Figura 3.2. Localización de los puntos del sensor y del punto GOW.



Figura 3.3. Sensor AWAC puesto en Cabo Blanco.

Los datos de viento son traídos del reanálisis global y de alta resolución CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) generadas por el NCEP. Este reanálisis CFSR viene del período desde 1979 hasta marzo del 2011, con una resolución espacial de 0.3° , tomando datos cada hora. Este reanálisis asimila datos de satélite para tener un mejor ajuste de la condición de viento en el océano como en la superficie terrestre

3.4 Generación de la malla

Para la regionalización o *downscaling*, usualmente, se requiere de una malla detallada anidada a una malla general, para así abarcar las variaciones de las condiciones locales de batimetría, oleaje y viento de la zona. Esta malla general puede ser de cientos de kilómetros y la de detalle de alcanza unas decenas de kilómetros.

Para este caso, se propone realizar una sectorización diferente de la zona. La costa del Pacífico de Costa Rica tiene una longitud de 1 290 m, con una orientación noroeste y la línea costa rectilínea tiene 475 metros con una dirección N45W (Figura 3.4).

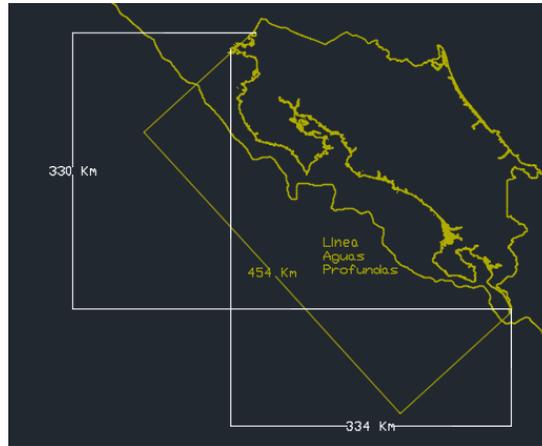


Figura 3.4. Geometría de la costa pacífica.

Como hipótesis para la realización de las mallas, se plantea la división de la zona en estudio en 5 o 6 subáreas para que de esta se pueda reducir los tiempos computacionales. A cada una de estas, se le hará un tipo de malla rectangular alrededor de los 100 x 100 km para abarcar la mayor cantidad de área.

Debido a la geometría y orientación de Costa Rica, en casi todos los casos, la malla se interpolará entre sí para lograr una mejor cobertura de la zona (Figura 3.5). Se espera que los mapas de Hs en las 5 mallas sean suficientes para determinar las características de clima marítimo que se necesiten para determinar los puntos de cobertura para las boyas.



Figura 3.5. Sectorización de la costa.

Mediante el SWAN se puede incluir varios puntos de forzamiento o utilizar uno en una locación específica e indicar que en los bordes de las mallas se reproduzca la información del forzamiento; en este caso, se decide utilizar la segunda opción.



La hipótesis es utilizar el mismo punto de forzamiento en las esquinas de las mallas, con la característica de que las esquinas de las mallas deberán de estar antes de la línea de aguas profundas; esto debido a que el punto GOW representa muy bien los estados de mar por toda la zona de aguas profundas. Antes de esta línea, la información de los puntos GOW pierde precisión, por lo tanto, las esquinas inferiores izquierdas serán las escogidas para la ejecución.

Se utilizará un mismo punto GOW de estados de mar en cada una de las mallas o en el punto de generación. De esta manera, se unificará el uso de un único punto GOW y la configuración de la malla será más sencilla para mejorar la velocidad de cálculo (Figura 3.6).

Se utilizará una ejecución estacionaria; es decir, el modelo numérico realizará las iteraciones correspondientes para encontrar la solución sin tener en cuenta el tiempo que requiere para ello, en conjunto con la opción de N-se-W, donde cada lateral de la malla será una representación con la información de oleaje.

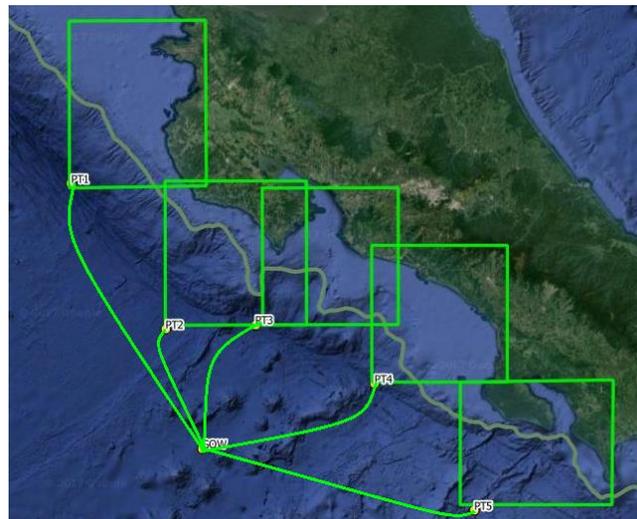


Figura 3.6. Visualización del uso del mismo punto GOW para los forzamientos de las mallas.

3.5 Creación de Escenarios

Para la creación de los escenarios se obtuvo la reconstrucción de datos de clima marítimo de la costa, espaciados por 10 Km (figura 3.7), estos puntos estratégicamente colocados junto a los datos de boyas virtuales fueron obtenidos para después compararlos entre si



Figura 3.7. Puntos de reconstrucción del oleaje.

3.5.1 Identificación de Boya más significativa

Para la determinación de la boya más importante se realizó la metodología propuesta por (Zanca et al 2015), el método se basa en evaluar espacialmente las características de la onda en 2 puntos.

Esta metodología busca evaluar donde se encuentran las zonas donde la onda varía poco en grandes extensiones no es necesario aumentar la densidad de observaciones. Por el contrario, si la onda varía en pequeñas extensiones si es necesario aumentar el número de puntos de medición de oleaje.

Zanca utilizó los puntos de la red de boyas actuales y con los puntos de la modelación que asigno a lo largo de la costa observo la correlación que tenían, evaluó los parámetros más representativos como altura de ola, periodo medio, periodo medio y dirección. Interpolo las correlaciones en un área determinada, áreas con baja correlación son las zonas donde hay mayor vacío de información y requiere de un nodo de medición.

Zanca también encontró de cada punto reconstruido la correlación más fuerte asignada de entre las 35 boyas instaladas. Para determinar cuál boya tiene la mayor correlación aun punto se procede a obtener el promedio máximo de correlación de todas las boyas, al quitar una y al comparar las medias máximas sin la boya, la que mayor disminuye su media es la boya más significativa del punto.

Basado en esta metodología, se procede a realizar una comparación de correlaciones entre las boyas virtuales y los puntos reconstruidos a lo largo de la costa, comparando quien tiene la mayor correlación se procede a asignar ese punto a la boya correspondiente de la red.

Para determinar la boya más significativa de la red propuesta, se analizará la disminución del promedio de correlación de todos los 10 puntos y la boya que presenta el mayor cambio es la que mayor significancia tiene.

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1 Datos

De la figura 4.1 se muestran las series temporales de los parámetros de clima marítimos del punto GOW desde 1957 a 31 agosto de 2015. Se observa un comportamiento continuo en cada parámetro.

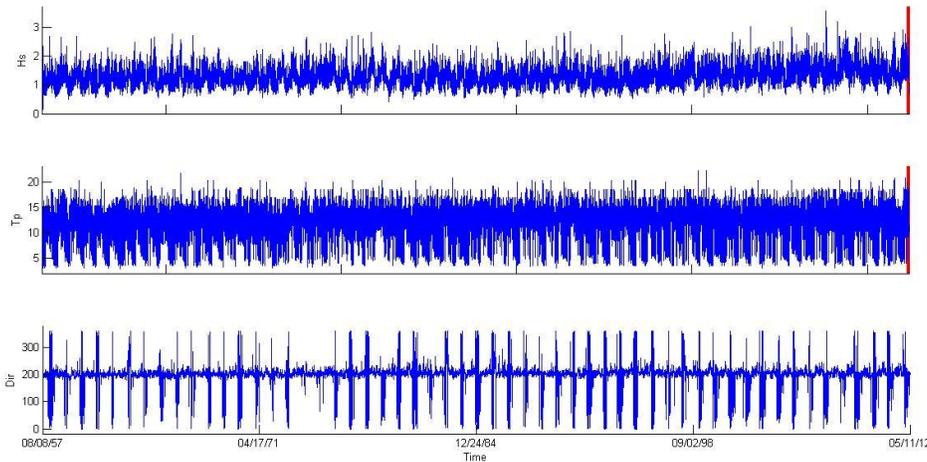


Figura 4.1. Series temporales de Hs, Tp y Dirección del punto GOW

Del análisis de clima marítimo se logra identificar las direcciones predominantes, los periodos usuales y las alturas de ola mínimas para ingresar estos datos a la clasificación MaxDiss.

4.2 Selección

Primeramente, se el programa de IH Hipercubo MAXDISS. Se obtiene 153 puntos al largo de la costa más 10 puntos de asignación a las boyas virtuales y 2 puntos para validación se tiene 165 puntos. De la reconstrucción de oleaje mediante el algoritmo MAXDISS se obtiene el siguiente hipercubo que muestra la selección de los puntos más representativos de la serie de oleaje del punto GOW, en este caso se seleccionó 150 puntos (figura 4.2).

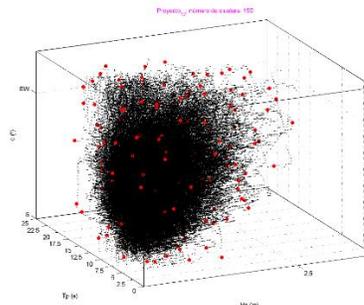


Figura 4 2. Hipercubo de la selección efectuada.

4.3 Propagación

En el siguiente apartado se observará como el oleaje fue propagado en cada uno de los casos, utilizando la propagación un con un H_s de 2.42, T_p de 14.3, 209° de dirección, 1.74 de velocidad de viento y 142° de dirección de viento.

4.3.1 Malla 1

En la propagación de la malla uno (figura 4.3) vemos como debido a las irregularidades de la batimetría y sus bajos presente aparecen zonas de concentración o refracción del oleaje, se observa como el oleaje va invariado hasta alrededor de la cota 1000 donde ya la batimetría hace influencia en el oleaje, también se observa levemente el proceso de difracción por cabos en la costa generando disminución de oleaje en las zonas subsiguientes a estos.

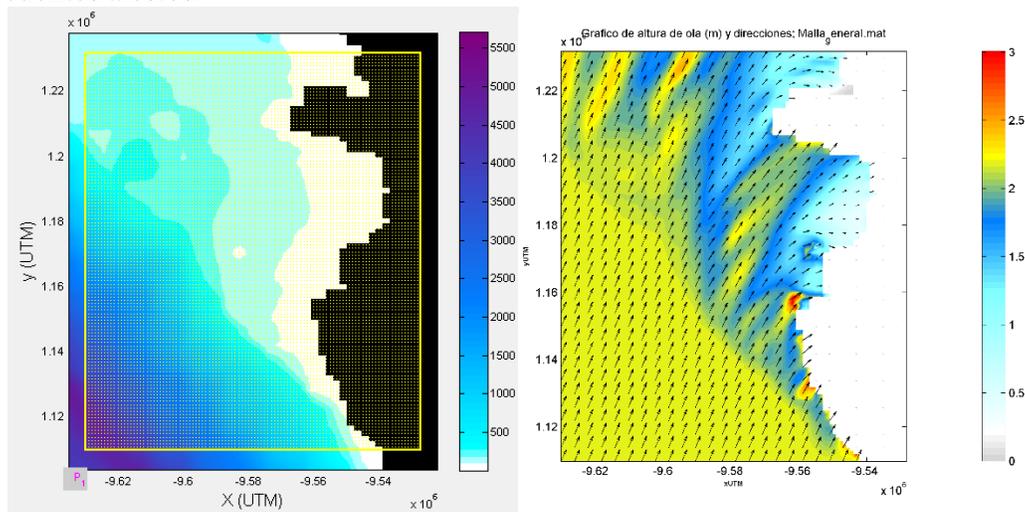


Figura 4.3. Propagación realizada en la malla 1

4.3.2 Malla 2

En la malla 2 (figura 4.4) observamos que, para esta dirección y otras direcciones predominantes, se da una concentración del oleaje perpendicular a la batimetría, entre más cercano este el oleaje a ser perpendicular a la batimetría mayor será la refracción. Además, se observan unas zonas de divergencia del tren de olas donde se atenúa la altura de ola.

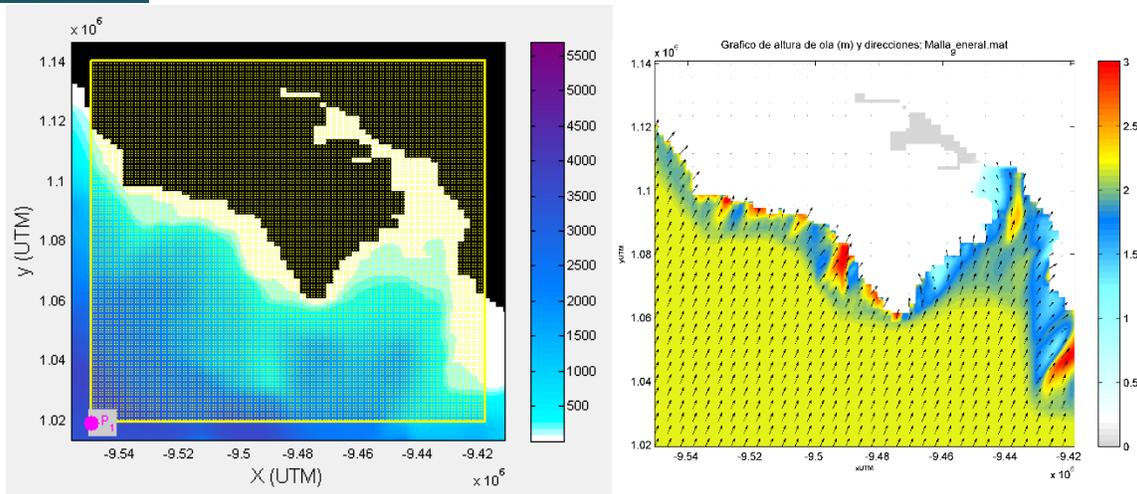


Figura 4.4. Propagación realizada en la malla 2

4.3.3 Malla 3

En la malla 3 (figura 4.5) se caracteriza por una zona donde existe una serie de bajos y cabo submarino, donde suscitan 2 áreas refractadas del oleaje hacia la costa, conforme se asomera se concentran para formar una sola área con oleaje concentrado y con bastante energía.

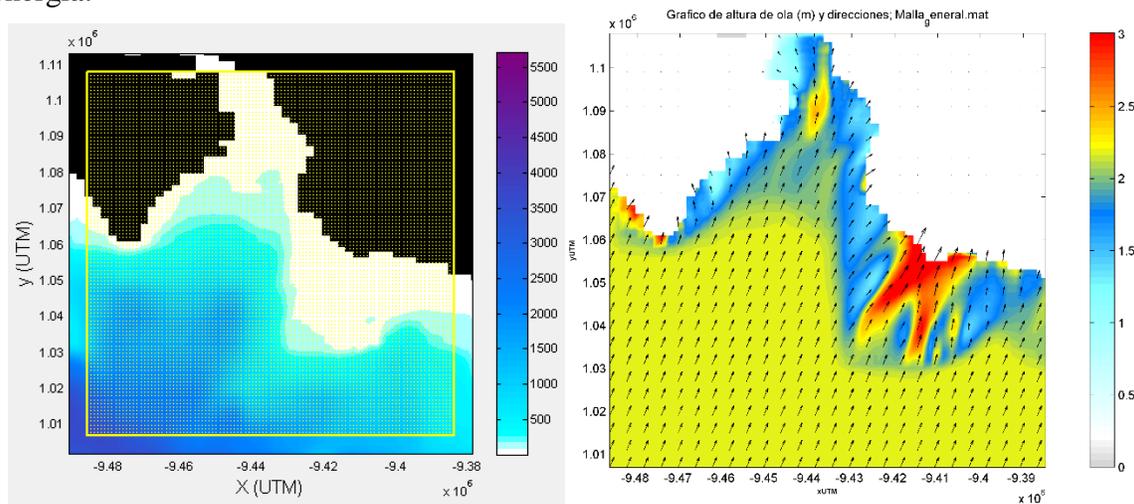


Figura 4.5. Propagación realizada en la malla 3

4.3.4 Malla 4

Para el caso de la malla 4 (figura 4.6) encontramos una serie de levantamientos o pequeñas montañas submarinas que realizan el efecto de difracción y reflexión en varios puntos, en el centro vemos la refracción de un oleaje que es disipado en 2 al poparse con este levantamiento. Se puede ver que entre 2 levantamientos se aprecia la concertación de oleaje tanto por la difracción como por la refracción y por último el asomeramiento del oleaje.

En esta malla se suscita además que los oleajes predominantes llegan perpendicular a la costa, formando como en la malla 2 un efecto de zonas de más energía al toparse con cabos de la costa y zonas de menos energía debido a playas.

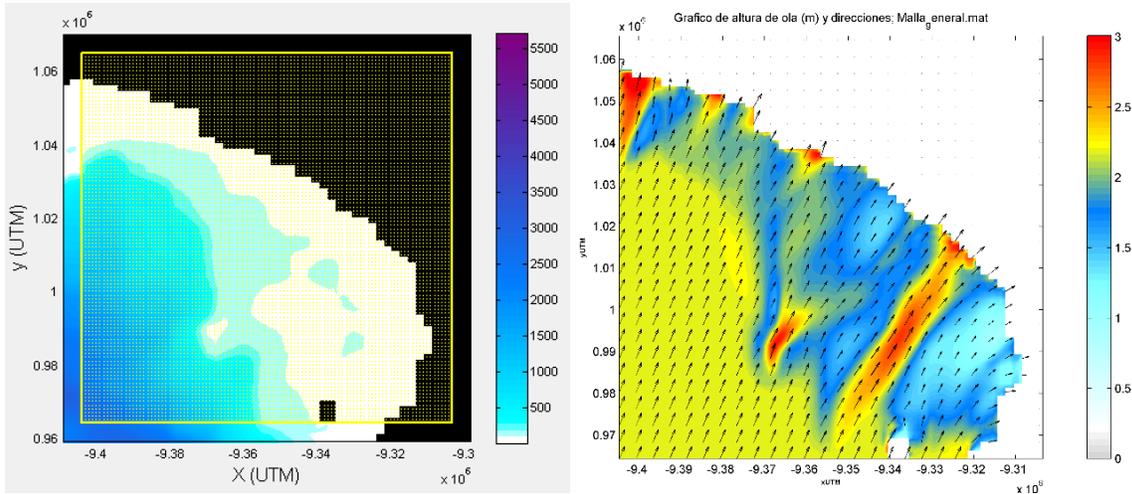


Figura 4.6. Propagación realizada en la malla 4.

4.3.5 Malla 5

La malla 5 (Figura 4.7) la línea de aguas profundas está muy cerca de la costa lo que provoca que la propagación le suscite el proceso de asomeramiento en muy corta distancia lo que provoca altos oleajes en esta zona. Al también tener la mitad de su área costera perpendicular a lo oleajes incidente se observan pequeñas zonas de refracción, en la otra mitad tiene una orientación diferente lo que ayuda a no tener este tipo de refracción. Cabe destacar la zona noroeste donde se observa la difracción del oleaje debido a la geometría de la línea de la costa.

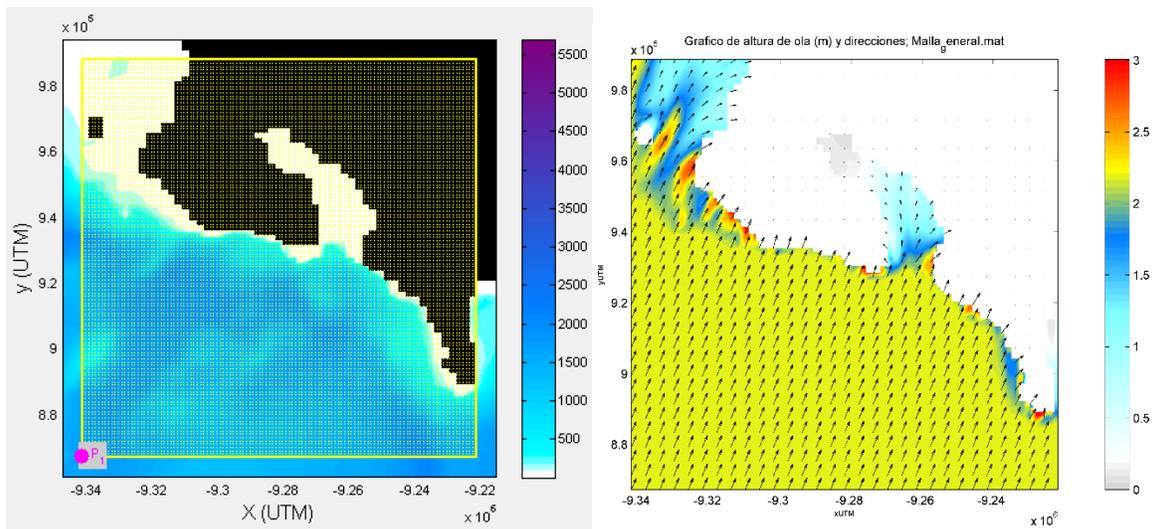


Figura 4.7. Propagación realizada en la malla 5

4.5 Reconstrucción

Seguidamente con los resultados de la modelación se seleccionan puntos que estén 10 km de distancia uno de otro para reconstruir el oleaje mediante el programa IH Hiper cubo MAXDISS.



Figura 4 8. Visualización de los puntos RBF y las boyas virtuales.

4.6 Validación

Para la validación se utiliza información obtenida de la simulación y su respectiva reconstrucción de los estados de mar de modelo para compararlos con los datos del instrumento de medición de dos diferentes semanas y determinar la diferencia entre ambas series.

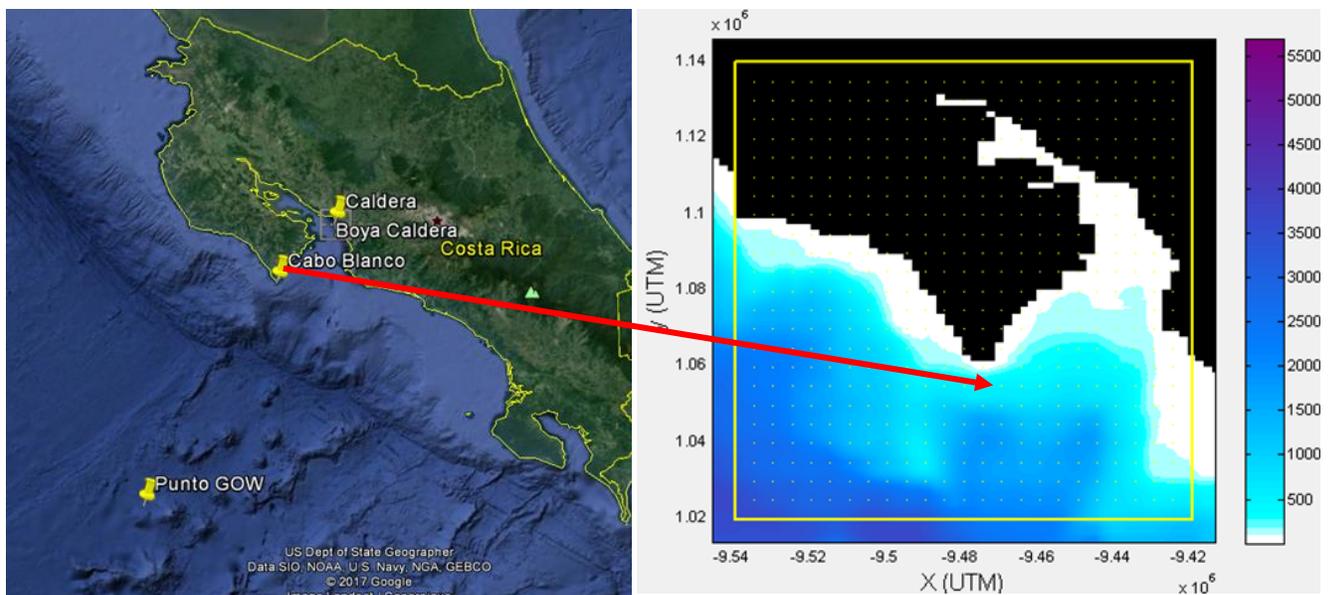


Figura 4 9. Localización de la boya y la mallas 2 que contienen el punto de reconstrucción.



El análisis de validación es mediante los parámetros estadísticos entre los datos simulados con los puntos de reconstrucción (RBF) con el sensor en Cabo Blanco (figura 4.9), determinando el error medio cuadrático RMSE, el BIAS, covarianza y el SI.

Se realizó la extracción de datos reconstruidos del maxdiss y de la boya, se ajustó la serie en la fecha de 1/7/2014 a 8/7/2014, se obtiene así de toda la serie a pasar (65 datos de Hs, Tp y Dir).

En la figura 4.10 vemos la comparación del registro de los parámetros de oleaje Hs, Tp, y Dirección de casi un año (2014) de la boya con la respectiva serie de datos de la reconstrucción, se observa como en ambas series los tres parámetros son similares, su comportamiento de tendencia al crecimiento o decrecimiento es semejante.

En cuanto a periodo vemos que en tanto los periodos más altos y los más bajos logra representar mejor que en el caso de la altura. En cuanto a la serie de direcciones se mantiene los datos en el rango dominante de las direcciones realizando una tendencia muy semejante a la registrada solamente que en algunos casos la simulada es menor a la registrada.

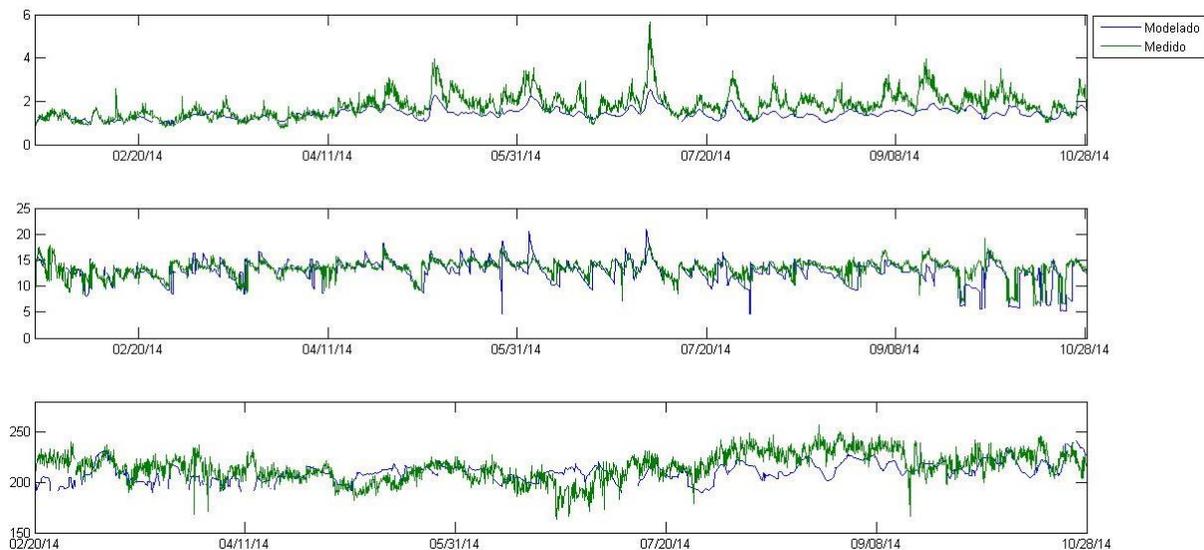


Figura 4 10..Series de datos Hs, Tp, Dir de las series reconstruidas por maya 2 vs registro Boya Cabo Blanco para todo el año 2014

En la figura 4.11, observamos la serie de datos de la semana, 1 a 8 de julio, semana de comparación usada también por Alfaro (2017), donde en este caso para la altura de ola significativa (Hs) vemos que sus valores mínimos los modela relativamente bien, pero el evento de mayor magnitud no logra representarse bien, se observa que en los periodos de mayor energía no logra llegar a la misma magnitud que los representados en la serie.

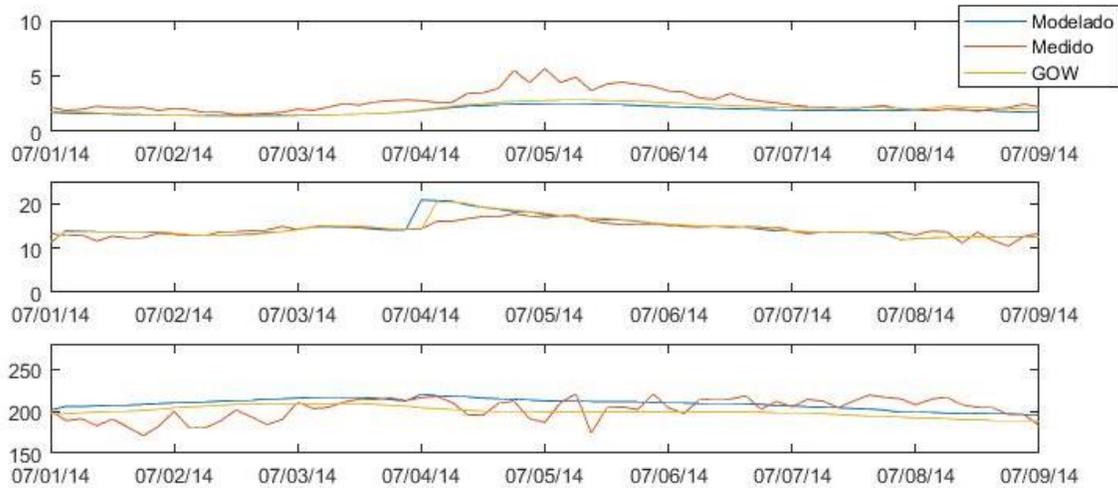


Figura 4 11. Serie de Hs, Tp, Dir del 1 al 8 de julio del 2014.

Para realizar la validación es necesario recurrir a parámetros estadísticos que nos indiquen como se está comportando la serie de datos, el BIAS nos indica la diferencia de 2 series de datos, el RMSE que nos indica la exactitud entre los datos, la correlación de Pearson mide la asociación entre dos variables y el SI o RSI mide la dispersión de los puntos respecto a la recta bisectriz.

Sus ecuaciones se presentan a continuación:

- La desviación simétrica $BIAS = \bar{x} - \bar{y}$
- El error medio cuadrático $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} (x_i - y_i)^2}$
- Correlación de Pearson $\rho = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}$
- Índice residual de dispersión $Si = \frac{RMSE}{\bar{x}}$

En la figura 4.12 vemos la serie de Hs de la fecha de la validación, vemos como tanto serie de el punto GOW como la de la modelación no logran modelar los máximos o los oleajes más energéticos, esto muy probablemente debido a que el punto de GOW no tiene mejor forzamiento, a pesar de todo esto el comportamiento de las líneas si asemeja al comportamiento del registro del instrumento de medición.

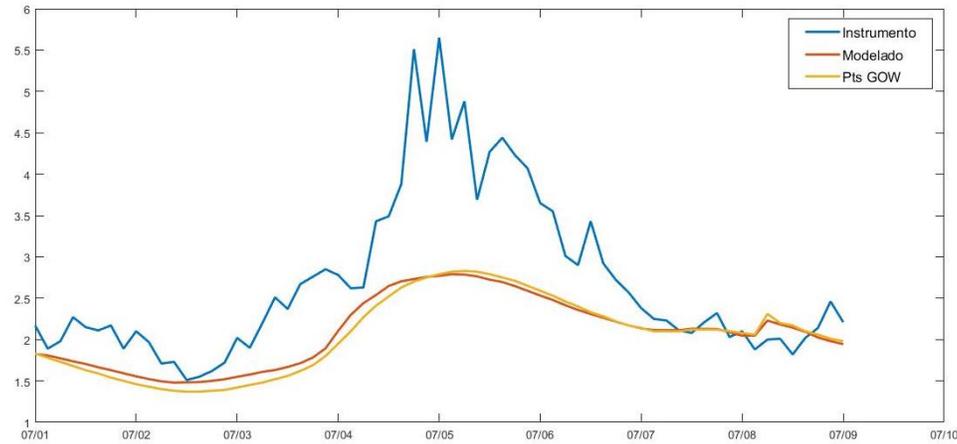


Figura 4 12. Serie de datos H_s del punto GOW, modelación y medición por boya.

En la figura 4.13 se muestra una gráfica de dispersión de resultado de la modelación con los datos del punto GOW con los datos instrumentales para la fecha de 1 a 8 de julio. Para el caso de la dispersión con los datos de H_s se observa dispersión de los entre los puntos, la mayoría de los puntos de los puntos se encuentran por encima de la línea de mejor ajuste por lo que, así como vimos en la figura anterior hay datos de la modelación que no se parecen a los de la medición.

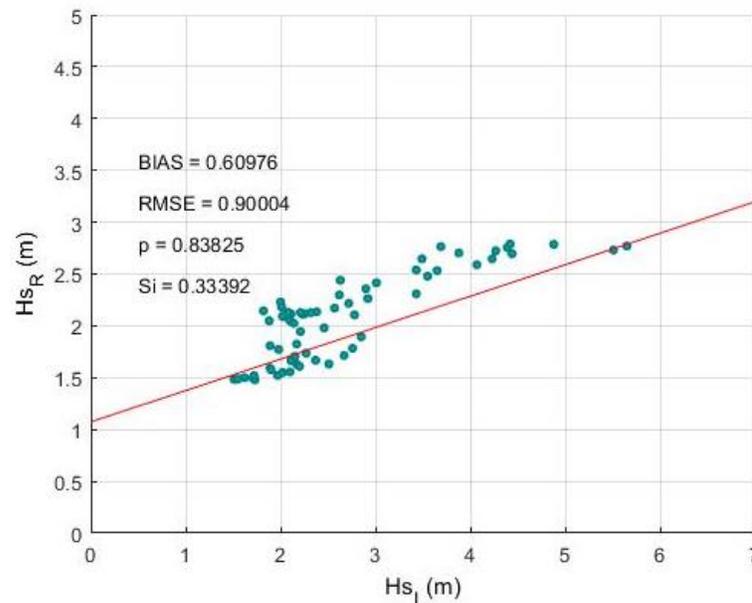
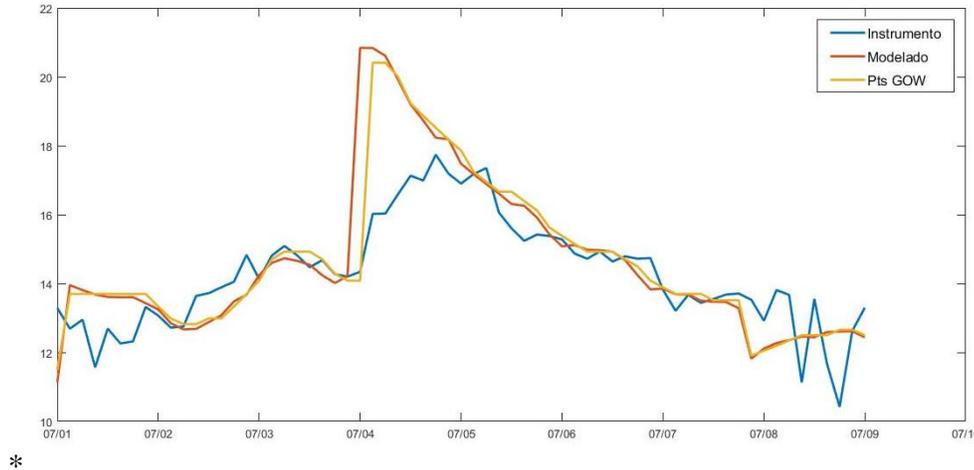


Figura 4 13. Gráficos de dispersión de H_s .

En la figura 4.14 vemos la serie de datos de T_p , a diferencia de lo encontrado con H_s se observa que los datos de T_p en los casos de máximos estos son sobre estimados por el punto GOW. Para lo demás se observa una tendencia semejante en cada caso.



*
 Figura 4 14 Serie de datos T_p del punto GOW, modelación y medición por boya.

En la figura 4.15 en la gráfica de dispersión se observa que la mayoría de los datos si se encuentra cerca de la línea de ajuste solo siendo algunos que están levemente afuera de la línea de mejor ajuste.

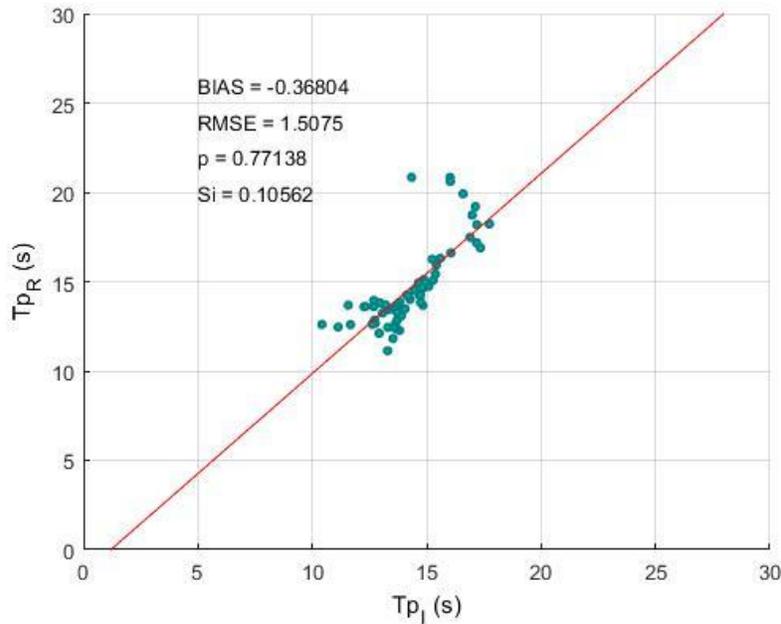


Figura 4 15. Gráficos de dispersión de T_p .

En la figura 4.16 vemos como la serie de datos de los datos modelados siguen una misma tendencia a los del registro de la boya, no obstante, no logra tomar ni lo datos mínimos o los máximos.

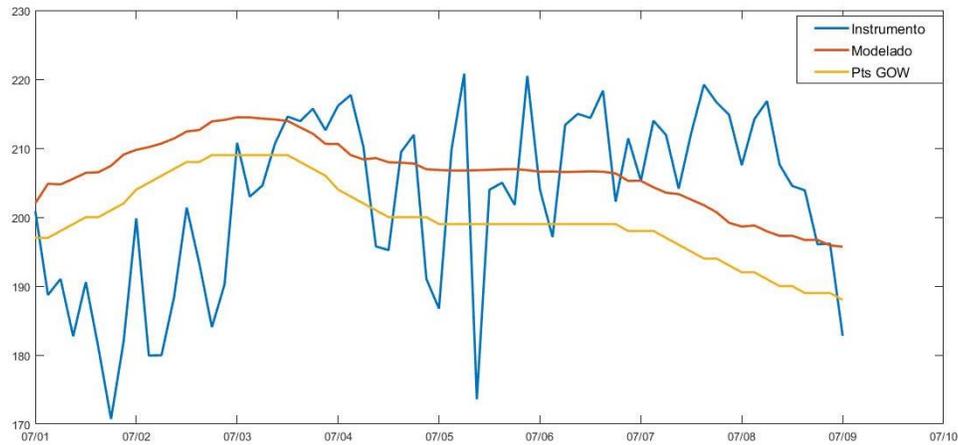


Figura 4 16. Serie de datos Dir del punto GOW, modelación y medición por boya.

En la figura 4.17 en la gráfica de dispersión de la dirección si se observa un agrupamiento de los datos, pero la línea de mejor ajuste queda horizontalmente de manera que los datos tienen bastante variación.

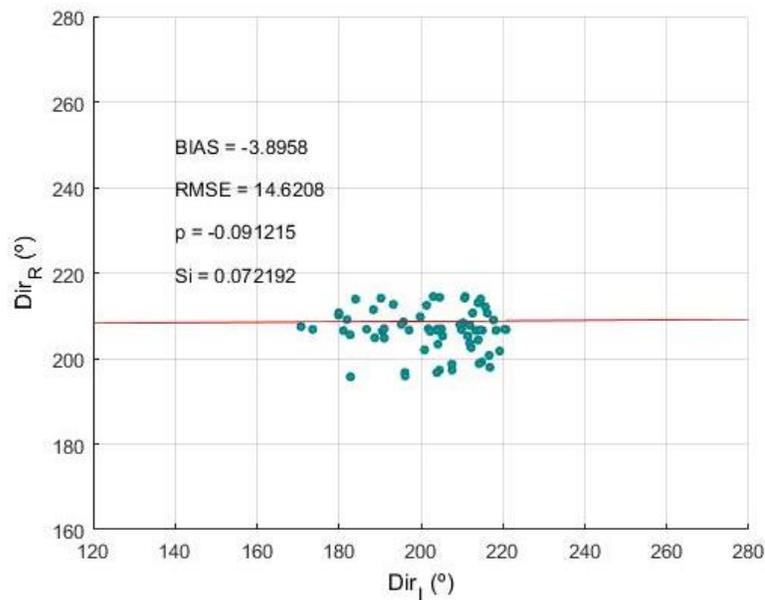


Figura 4 17. Figura 4 18. Gráficos de dispersión de Dir

En la tabla 3 se resumen los estadísticos obtenidos de los parámetros de Hs, Tp y Dir de lo modelado y lo medido. Para el caso de Hs vemos como se tiene una alta correlación de los datos (parámetro ρ) llegando casi a uno, la dispersión de entre los datos es de 0.33 siendo estando de 0 a 6 de rango como su valor mínimo a máximo; es por ello que se tiene un RMSE y un BIAS menor a 1 m dando así una calidad de ajuste aceptable.



Para el caso de T_p se tiene una correlación de 70%, una dispersión de datos de 0.1, para RMSE se tiene un valor bajo para el rango de valores de 0 a 30 s, en cuanto al BIAS vemos un valor negativo esto a como se vio en la figura 4.14 los valores de la modelación son mayores a los medidos.

Analizando los datos de la dirección vemos estos como un ajuste pobre, ya que la dispersión está por debajo de 0.1 además de ser una correlación negativa, la dispersión se acerca mucho a cero lo que indica una relación débil entre los datos, en cuanto al BIAS y RMSE lo encontramos en valores bajos esto debido a que sus medias son muy parecidas; así como se observó en la figura 4.16 se comprueba su comportamiento en que sobre estima en los valores bajos y sub estima en los altos.

Tabla 3. Parámetros descriptores estadísticos

	Hs (m)	T_p (s)	Dir (°)
BIAS	0.61	-0.368	-3.9
RMS	0.9	1.5	14.62
ρ	0.84	0.77	-0.09
SI	0.33	0.10	0.072

4.6.1 Consideraciones finales de la validación

Comparando los datos modelados con los instrumentos podemos concluir que la modelación se ajusta en un porcentaje aceptable a los datos de la medición en Cabo Blanco, el principal error se debe a la falta de forzamiento o energía en el punto GOW para modelar de una mejor manera lo máximos.

Además, para realizar una mejor propagación se podría utilizar mayor cantidad de puntos GOW además de utilizar datos satelitales para calibrar los datos de partida.

4.5 Resultados mapas de correlación

Como se ve en la figura 4.19 se tiene una configuración de 10 boyas, 2 boyas por malla simulada, separadas estratégicamente antes de la línea de agua profunda ubicada en la cota 980m. Estas realizaron diferentes configuraciones con estas diez boyas para determinar cuáles son la más efectivas para realizar 3 escenarios de red de boyas, escenarios de 2, 4 y 5 boyas respectivamente.

Del mapa de correlaciones promedio podemos determinar las áreas donde menos se tiene correlación con la red de boyas, esto ayudara a determinar los lugares donde mayor o menor necesidad se requiera para poner una boya.



Para el caso de la máxima correlación por altura de la ola (figura 4.20) se identifican varias áreas donde la correlación es menor a los 0,85, estas zonas se caracterizan donde la forma del país cambia, como curvaturas, estas zonas probablemente debido a la batimetría que en su relación con los efectos de refracción y asomeramiento provocan estos cambios.

La zona donde mayor correlación se obtiene es en la zona central, el extremo norte y sur. Para el caso norte, como se mencionó en el clima marítimo es una zona con oleaje bajos, y constantes cambiando solo en las épocas de tormenta del hemisferio norte. Para los casos central y sur la línea del pie esta perpendicular a las direcciones predominantes de los oleajes por la altura de ola no cambia y se mantienen constante dando así una mejor correlación.

Para el caso de las correlaciones por dirección se ve como las mayores correlaciones se obtiene donde la línea de costa es perpendicular a la dirección de oleaje dominante, se ve también como casi la mayoría de la zona tiene una correlación mayor a los 0.9, solo en zonas como bahías es donde disminuye la correlación.

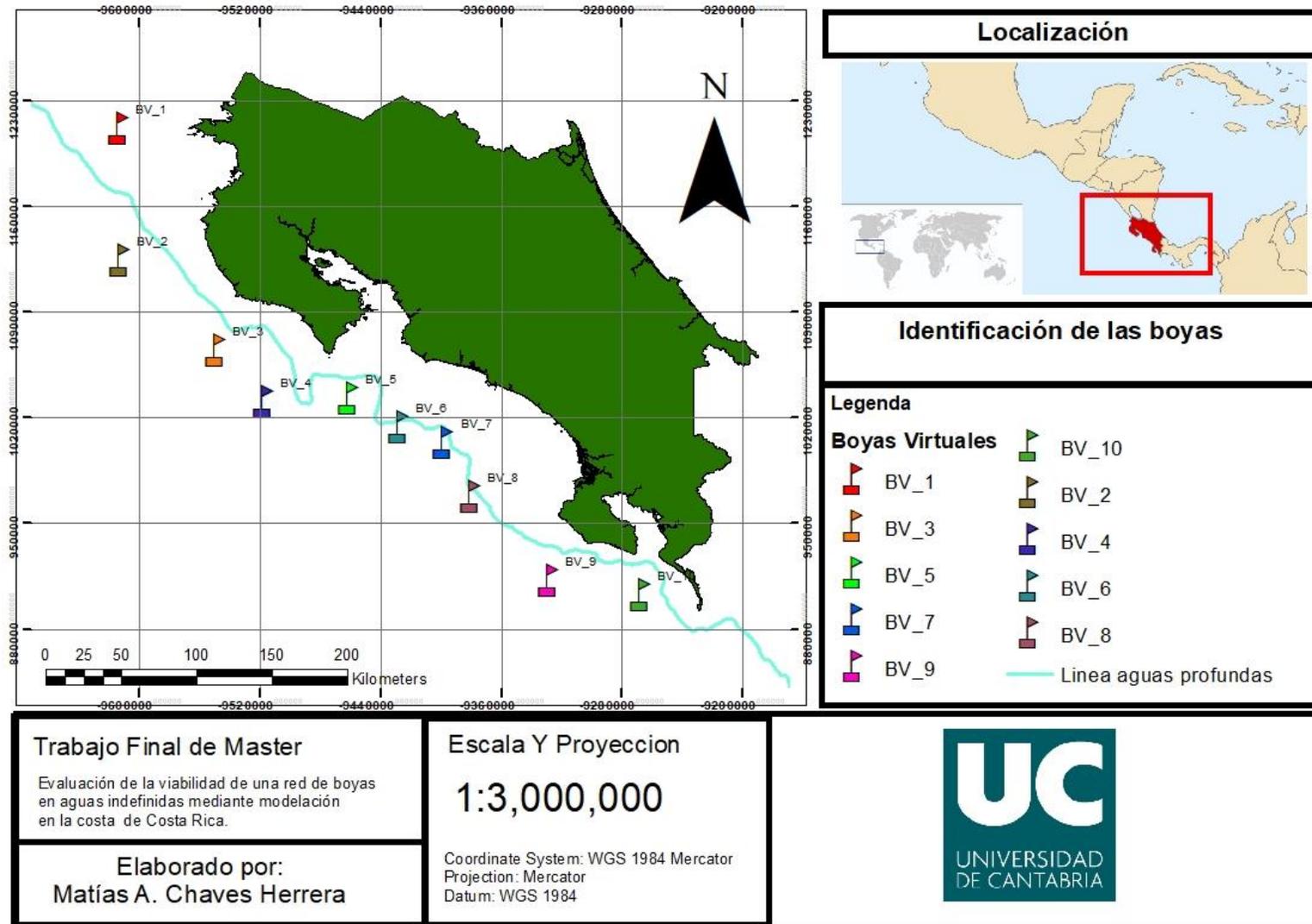


Figura 4 19. Mapa de localización de las Boyas.

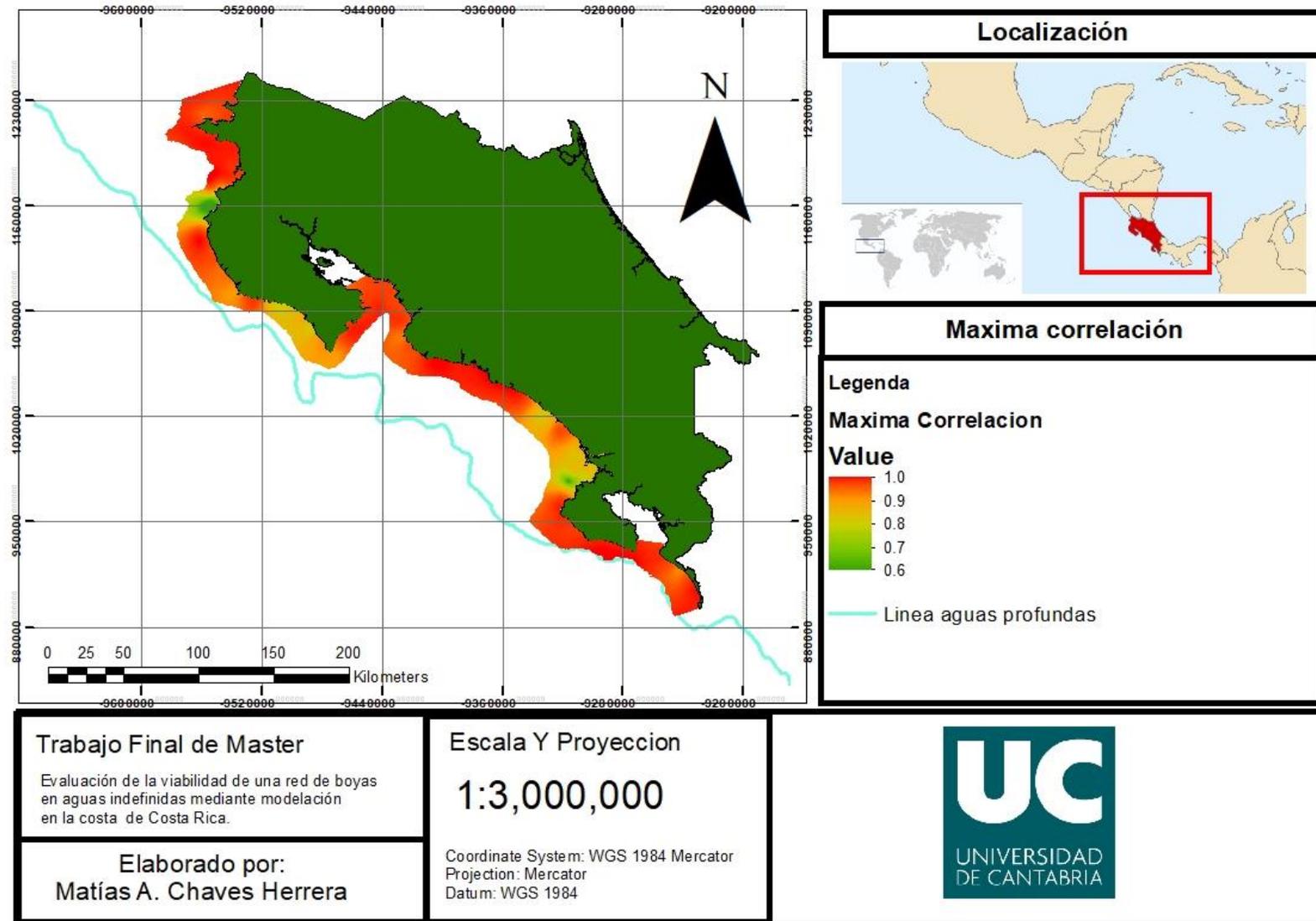


Figura 4 20. Interpolación de los valores de correlación de altura de ola.



Para determinar las configuraciones se procede a realizar el análisis de boyas más significantes, la más significativa boya de la red se obtiene removiendo cada boya individualmente y calculando el promedio máximo de correlación de la red restante. La boya que causo el mayor decaimiento del promedio máximo es la que mayor significancia tiene en la red.

De la tabla 4 observamos la asignación de colores a las cada una de las boyas. En la tabla 5 vemos los porcentajes de correlación media para todos los puntos por boya para ambos casos, correlación de altura de ola y de dirección, cabe destacar que esta correlación es la misma para ambos casos siendo de 0.95 aproximadamente.

Como se puede ver en la tabla 5 columnas 3 y 6, se indica la correlación media cuando se quita una boya, en las columnas 4 y 7 se tiene el porcentaje de disminución que se obtiene al quitar una boya del promedio general, como se trata de un set de 10 boyas que representa el 100% al quitar una se disminuye en un 10% en todos los casos.

También debido a que los porcentajes de correlación son similares en todos los puntos reconstruidos, las diferencias serán de pocos decimales, no obstante, mediante el cálculo de porcentaje de disminución se podrá compara de mejor manera la disminución.

Ordenando estos valores de porcentaje de disminución se logra obtener la tabla 3 la cual indica las boyas con correlación más significativa, para el caso de la dirección de oleaje la boya más significativa es la 5, para la altura de ola es la 3. De igual forma podemos obtener las boyas con menos aporte a la red de las 10 boyas para ambos casos, estas son las boyas 7, 6 y 9 que en ambos casos ocupan las ultimas casillas.

Siguiendo analizando la tabla 3 vemos como al apartar la boya más significativa y las 3 menos significantes podemos comparar las restantes boyas para efectuar una selección de boyas para los escenarios de red de boyas.

Así pues, vemos como las boyas 2,4,8,10, 5 y 1 presenta casi el mismo grado de importancia en ambos casos (dirección y altura de ola). Realizado unas pruebas se decide realizar 3 escenario para analizar la mejor red.

Como ya se obtuvo las boyas más significantes se procede a seleccionar un primer escenario con 2 boyas, un segundo escenario con 4 boyas y un tercero con 5 boyas. Para el de 2 con las boyas 2 y 8; para el segundo boyas 2, 4, 8 y 10; para el tercero caso 4, 2, 5,8,10.



Tabla 4. Representación del color a la red de boya.

Color	Boya
Rojo	B1
Café	B2
Naranja	B3
Amarillo	B4
Verde	B5
Verde oscuro	B6
Azul	B7
Celeste	B8
Violeta	B9
Morado	B10

Tabla 5. Tabla resumen de los valores de correlación

Boya	Correlación media altura de ola (todas las boyas)	Correlación media de altura de ola al ser removida	Porcentaje de disminución al quitar la boya	Correlación media dirección de ola (todas las boyas)	Correlación media de dirección de ola al ser removida	Porcentaje de disminución
B1	0.94689	0.852196	10.001%	0.94689	0.89572	10.003%
B2		0.852200	10.000%		0.89576	9.998%
B3		0.852161	10.005%		0.89573	10.001%
B4		0.852201	10.000%		0.89573	10.001%
B5		0.852203	10.000%		0.89564	10.010%
B6		0.852221	9.998%		0.89578	9.996%
B7		0.852214	9.999%		0.89579	9.995%
B8		0.852179	10.003%		0.89576	9.998%
B9		0.852290	9.991%		0.89577	9.997%
B10		0.852174	10.003%		0.89574	10.000%



Tabla 6. Ordenamiento de las boyas según la correlación más significativa.

Ordenamiento ascendente según correlación de dirección	Ordenamiento ascendente según correlación de altura de ola
B5	B3
B1	B10
B3	B8
B4	B1
B10	B2
B8	B4
B2	B5
B9	B7
B6	B6
B7	B9



4.5.1 Escenario 1

En los escenarios realizados para tanto la altura de ola como para dirección vemos el área de cobertura obtenida por una interpolación. Se observa como los oleajes que más se correlacionan con la boya 8 son las donde se el oleaje con dirección predominante es perpendicular a la línea de costas.

Es por ello por lo que el clima marítimo en zonas donde los oleajes entran con dirección sur- oeste son mejor representados por la boya 8, las demás zonas donde los oleajes entran perpendicularmente por otras direcciones serán captados mejor por una boya cerca del punto de la boya 2.

Se observa en la figura 4.21 y 4.22 como la mayor cobertura de zonas es la boya 8, donde volviendo a la tabla 3 vemos como en ambos casos el 8 está con mayor correlación a de la boya 2.

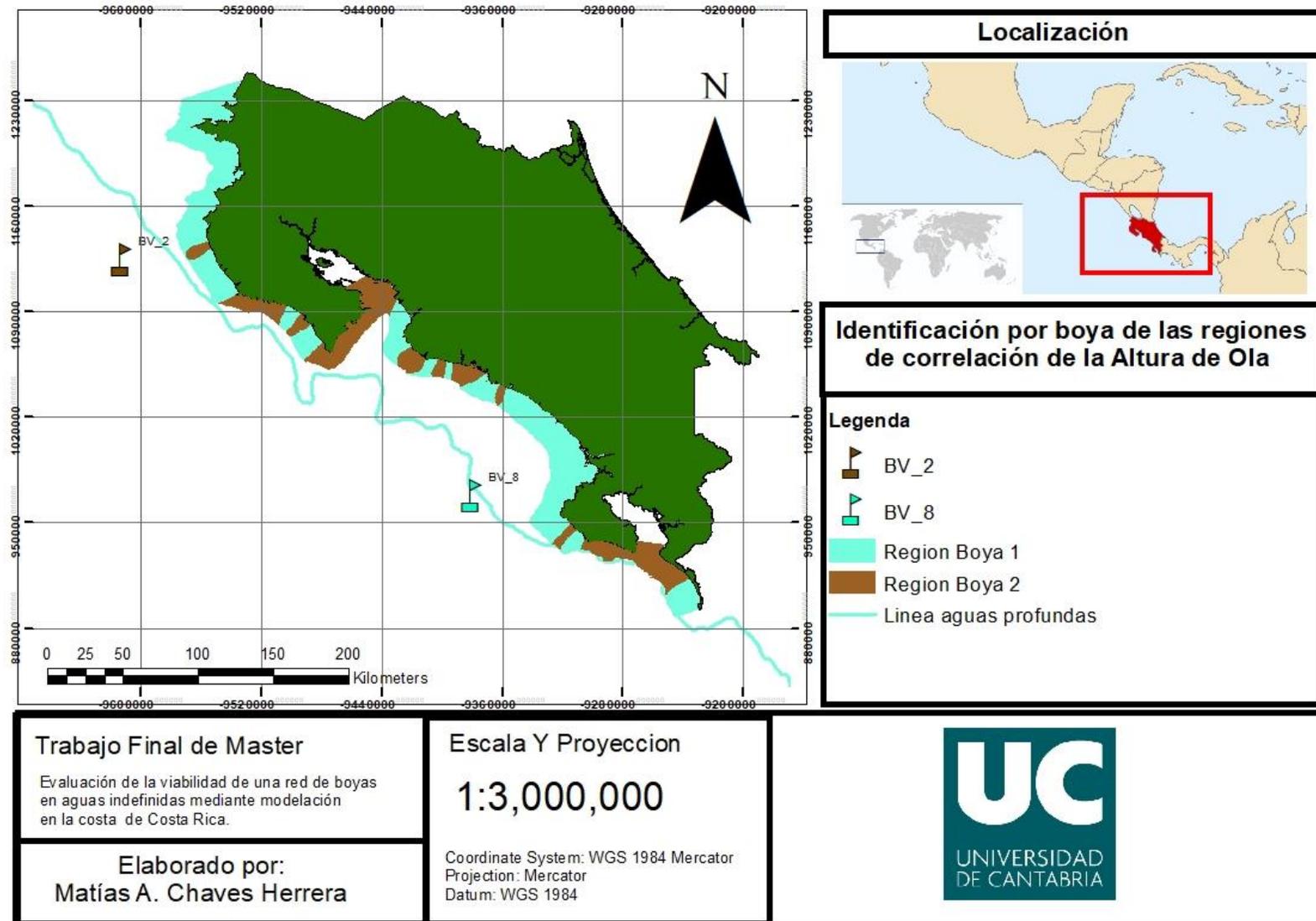


Figura 4 21. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de la altura de ola escenario 1.

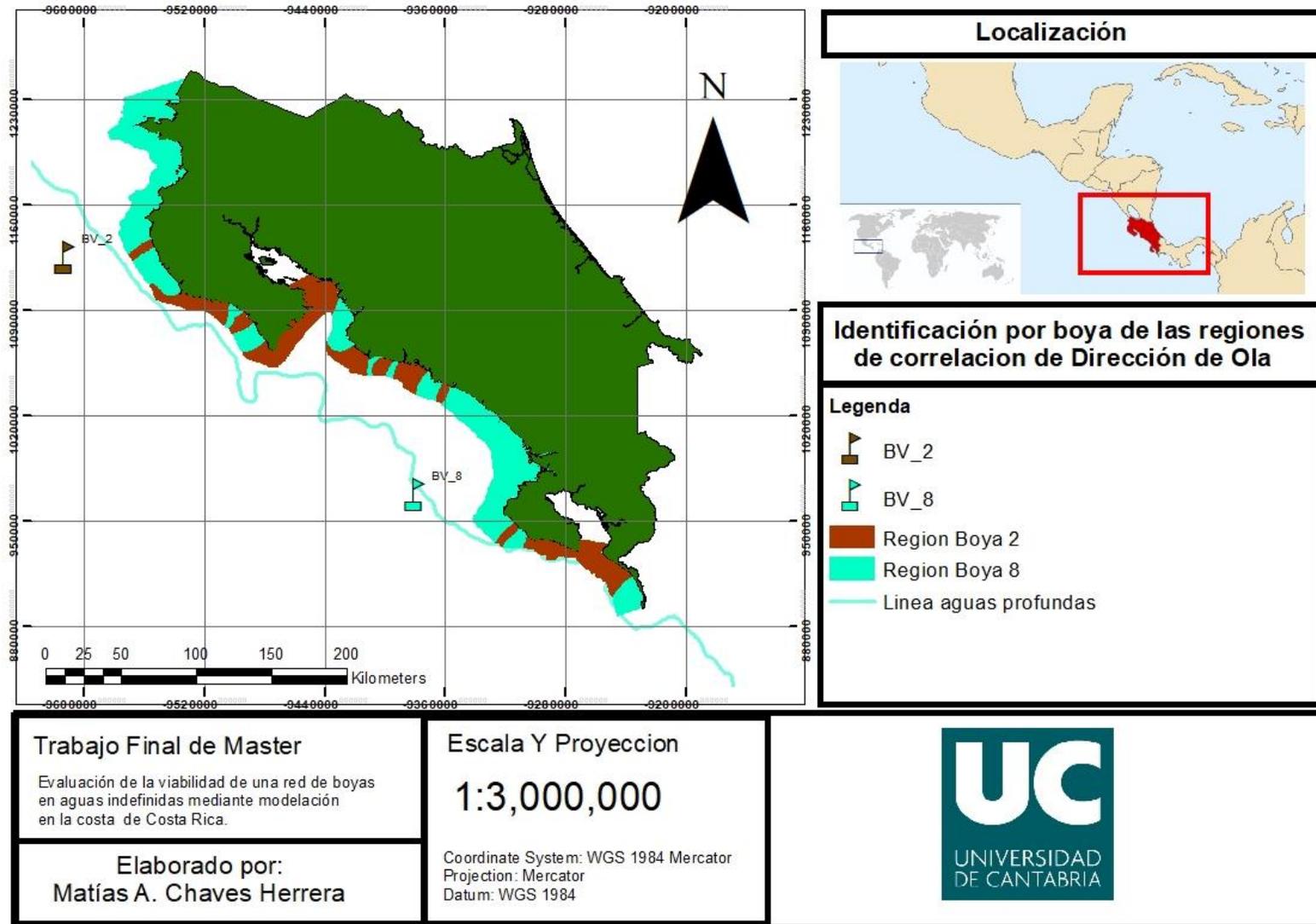


Figura 4 22. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de dirección de la ola escenario 1.



4.5.2 Escenario 2

Para el escenario 2 el cual se aumentó el doble el número de boyas sigue predominando una, en este caso la boya 10, le sigue la boya 8 sigue teniendo bastante dominancia, sigue la amarilla y de ultimo la boya 2 con la menor representación.

De ambos mapas (figuras 4.23 y 4.24) podemos observar en ciertas regiones aparecen divisiones muy seguidas y áreas muy pequeñas aquí la correlación entre los puntos de muestro con las boyas tenían una alta exactitud entre si siendo la diferencia en decimales muy pequeños.

La región amarilla es escaza en ambos mapas, para el mapa de altura de ola se observa que correlaciona muy bien los oleajes de la parte norte de la costa, zona de más importancia turística.

Para obtención de la dirección de ola las boyas 10 y 8 logran cubrir casi toda la totalidad de la costa, este puede ser debido a encontrarse en la parte más al sur el efecto sobra de la isla galápagos no afecta tanto logrando así determinar con mejor exactitud los oleajes provenientes de nueva Zelanda.

En el caso de la figura 4.24 vemos que toda la costa está bastante dividida por las boyas, esto indicaría que para una mejor obtención del dato de altura de ola es requerido una red con esta cantidad de boyas.

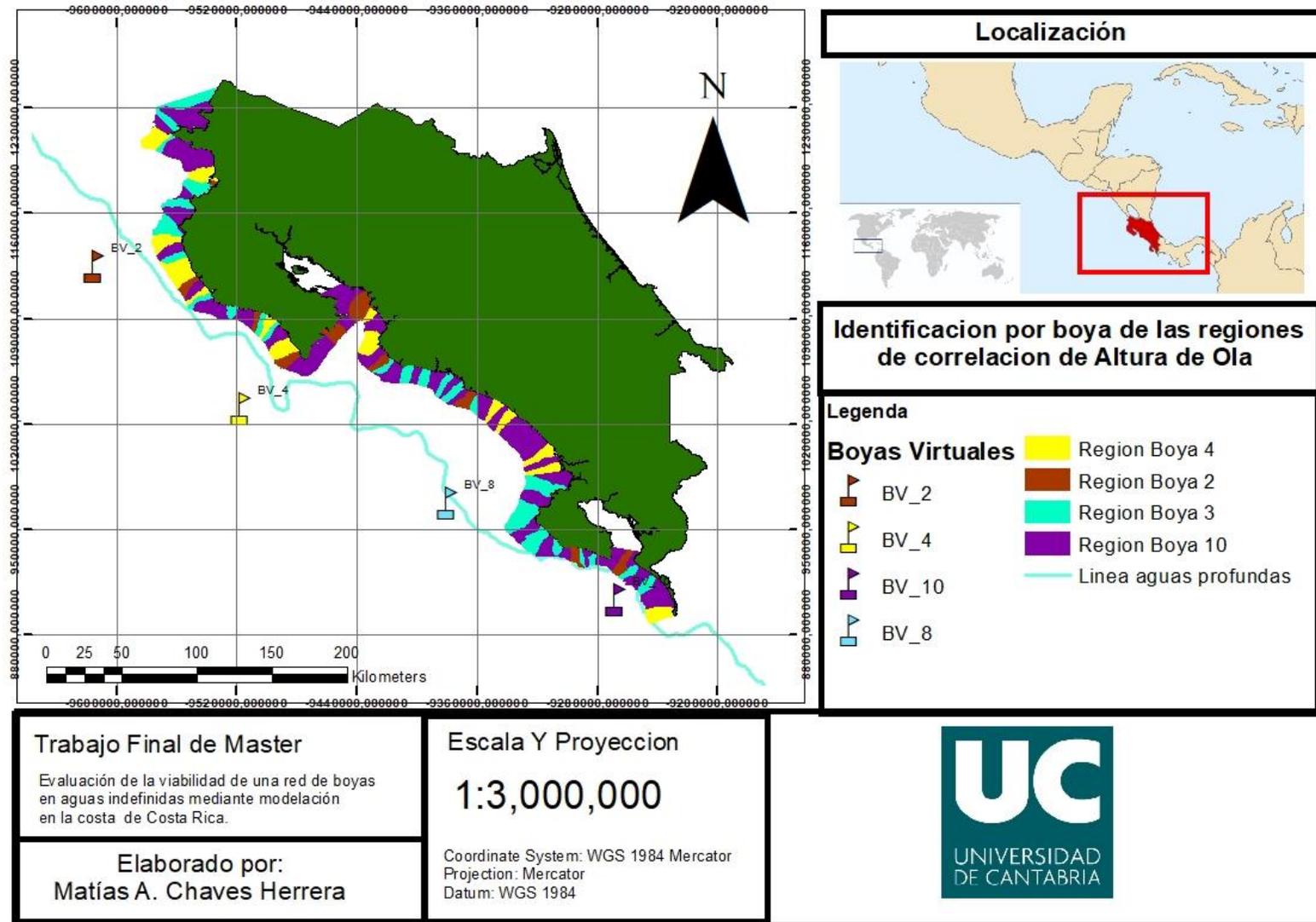


Figura 4 23. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de la altura de ola, escenario 2.

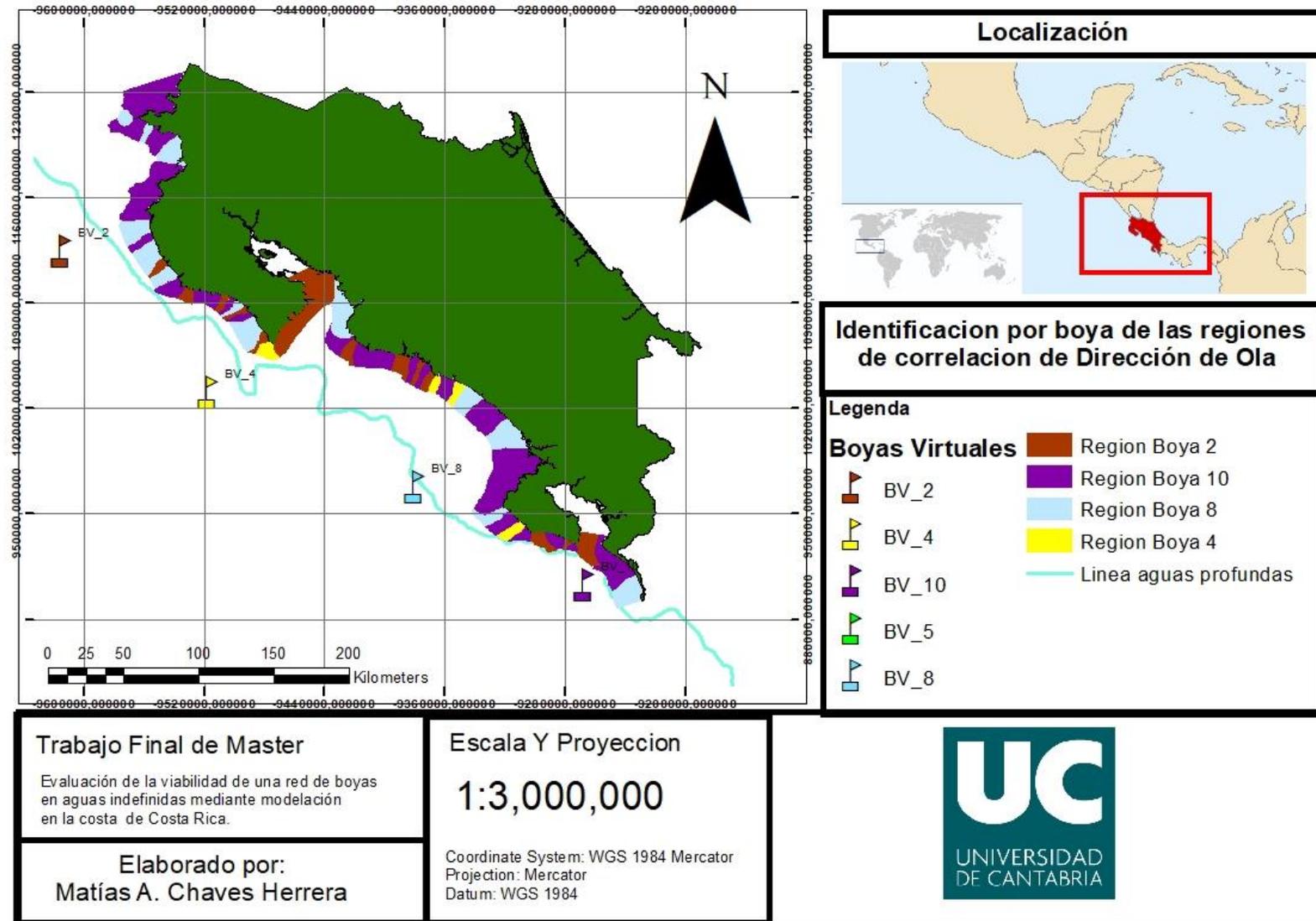


Figura 4 24. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de la dirección de ola, escenario 2.



4.5.3 Escenario 3

Para el escenario 3 que cuenta con 5 boyas (figura 4.25) vemos como en ambos mapas es difícil notar una dominancia por una boya, utilizando los sistemas de información geográfica, obtenemos que para el caso de la figura 4.25 la mayor área la obtenido que la región de la boya 10 tiene más cobertura, le sigue la de la boya 2; la 5 junto con la 8 tiene la misma área y la boya 4 es la más pequeña.

Para el caso del mapa de direcciones (figura 4.26) la mayor de igual forma es la boya 10, seguido por la boya 8, la 2 y por último la región de la boya 4. Cabe destacar que de la región de la boya 5 fue traslapada por las otras boyas con correlación mayor.

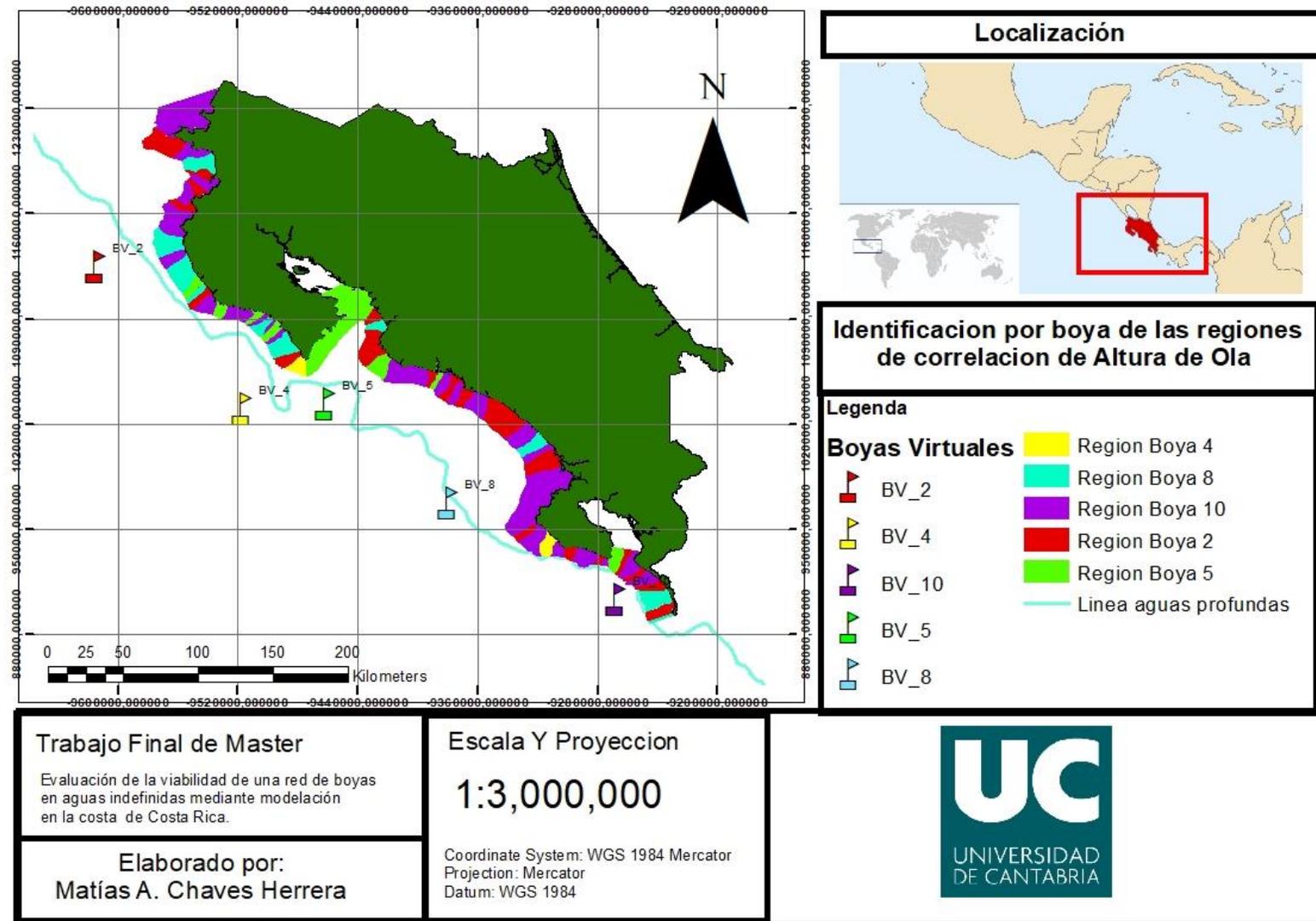


Figura 4 25. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de la altura de ola, escenario 3.

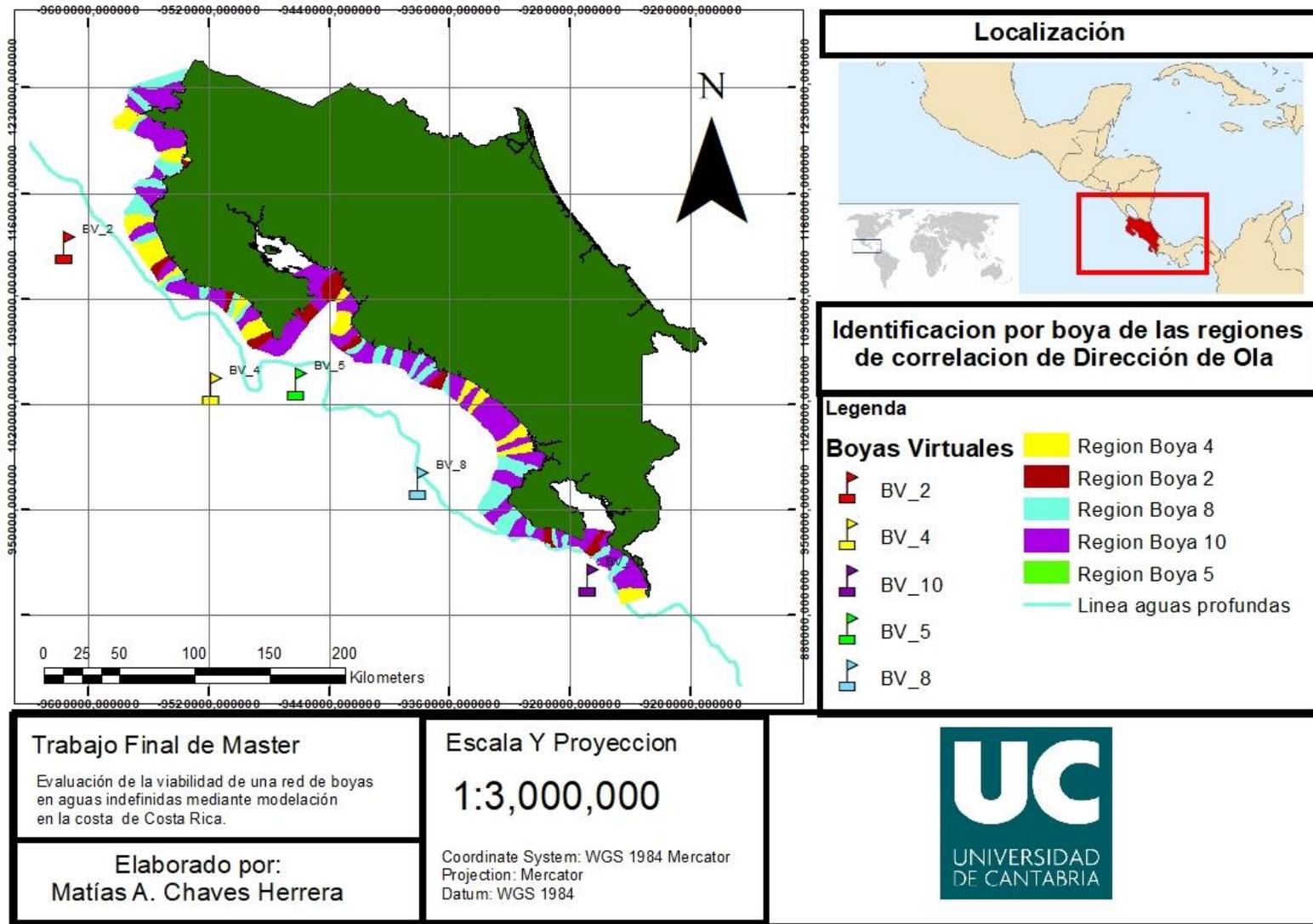


Figura 4 26. Mapa de la identificación de las regiones de correlación de la dirección de ola, escenario 3.

Tabla 7. Correlación media para los casos de dirección y altura de ola.

Escenario	Correlación Media Dirección	Correlación Media Altura de ola
1	0.99507	0.94704
2	0.99520	0.94705
3	0.99514	0.94699

4.6 Conclusiones del capítulo

Mediante la configuración de 3 tipos de escenario para la representación de los datos principales de clima marítimo como lo son la altura de ola y la dirección se encuentra que el sobrepasar las 5 boyas provoca que una de las boyas solape a otra lo que indica que lo máximo que debería tener como modelo de red es una de 5 o menos boyas para cubrir la costa pacífica.

Realizando un promedio de correlaciones por escenario se observa que a pesar de tener el mismo valor el escenario de 4 boyas es el ideal para lograr una amplia cobertura de los parámetros de oleaje.

Teniendo una configuración del escenario con 2 boyas es posible tener un buen margen de correlación de los estados de mar, ya que en la configuración espacial que se propone se logra que entre las boyas logre abarcar lo las principales direcciones y altura de olas.

Del caso de poner una boya, la boya virtual 10 ha demostrado en los dos escenarios ser una opción adecuada para obtener adecuadamente los parámetros de dirección y altura de ola.

Capítulo 5. Conclusiones

Investigando el estado de arte de red de boyas en España, vemos que es una red amplia que logra abarcar distintos enfoques de caracterización de clima marítimo, desde aguas profundas con la REDEXT para proporcionar a los usuarios de forma gratuita el estado en tiempo real de condiciones de clima Marítimo.

El clima marítimo de Costa Rica es influenciado por el efecto sombra de la isla galápagos donde su mayor efecto está en la costa central del país, lo que atenúa la altura de ola en esa zona y cambia las direcciones del oleaje generado de tormentas cerca de Nueva Zelanda.

También del clima marítimo, se tienen vientos locales que logran dominar a la calma y producir oleaje en varias direcciones. La dirección predominante de oleaje va en un rango del S al OSO, por tanto, la instalación de las boyas debe ir adecuadas a estas direcciones predominantes.

De análisis de escenarios de boyas se determinó que la configuración más favorable es de una de cuatro boyas, localizadas en los en la parte norte y sur de la línea de costa.

La boya numerada 10 es la posición más significativa para obtener las mayores correlaciones entre la boya y el clima marítimo en la costa, esto probablemente debido a la cercanía con la línea de aguas profundas.

Mediante una técnica de reconstrucción de oleaje se obtuvo una serie de datos nueva basada en los datos de reanálisis GOW que pueden servir para uso de estudios, investigaciones y consultas con fines ingenieriles, recreacionales o protección al medio ambiente.

5.1 Futuras líneas de trabajo

Estudiar la viabilidad de estas propuestas de red según los costes de los instrumentos y la posible ganancia en actividades socioeconómicas.

Realizar una red de boyas centroamericana para la búsqueda de mejores opciones de financiamiento, además de aportar información para los gobiernos de los países del uso y posibilidades de esta fuente de información.

Bibliografía

- Alfaro, H. (2017). Estudio de la dinámica del oleaje en el litoral pacífico de costa rica: metodologías de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo. *unican*.
- Bonanata, R., Medina, R., Silveira, L., & Benedet, L. (2009). Metodología para la caracterización del clima marítimo en un punto cerca de la costa a partir de una serie de datos en aguas profundas, 1–14.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1 . Model description and validation, *104*, 7649–7666.
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011a). 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>
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2012). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, *72*, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.09.002>
- Govaere, G. (2009). Zonificación marítima del Golfo Dulce. VI CONGRESO INTERNACIONAL AMIP 2009-08-10.
- Guanche, Y., Mínguez, R., & Méndez, F. J. (2013). Climate-based Monte Carlo simulation of trivariate sea states. *Coastal Engineering*, *80*, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.05.005>
- Hasselmann. (1985). Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum . Part II : Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models, 1378–1391.
- IH Cantabria. (2011). Evaluación del potencial de la energía de las olas. Estudios Técnicos PER.
- Liu, F., & Losada, J. (2000). El modelado matemático de la propagación del oleaje en ingeniería de costas :, 37–46.
- Lizano. (2001). Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México, *8*(1), 40–49.
- Lizano, O. (2016). Climatología del viento y oleaje frente,. *Ciencia y Tecnología*, *25*(1-2): 43-56, 2007 .
- Ruiz, A., Nistal, A., Pérez, B., Huerta, M., Ruiz, M. I., Nieto, J. C., & Serrano, O. (1995). Base de datos de clima marítimo en España, *2*(Abril), 75–88.
- Mendez F. Apuntes del curso Ondas, Oleaje y Nivel de mar. Master En Ingeniería de Costa 2016.
- Tomás, A., Méndez, F. J., Medina, R., & Losada, I. J. (2004). Bases de datos de oleaje y nivel del mar , calibración y análisis : el cambio climático en la dinámica marina en España.
- Young. (1988). A Shallow Water Spectral Wave Model. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, *93*(1), 5113–5129