



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**ANÁLISIS A LARGO PLAZO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL  
OLEAJE Y VIENTO EN EL LITORAL CANTÁBRICO**

**711-TES-CA-5774**

### Autor

**PEDRO JESÚS AGUILERA RIO**

### Tutors

**VICENÇ GRÀCIA GARCIA**

**FRANCESC XAVIER GIRONELLA COBOS**

### Departament

**DEPARTAMENT D'ENGINYERIA HIDRÀULICA, MARÍTIMA I  
AMBIENTAL**

### Intensificació

**ENGINYERIA MARÍTIMA**

### Data

**14 DE MAIG DE 2012**



# **ANÁLISIS A LARGO PLAZO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE Y VIENTO EN EL LITORAL CANTÁBRICO**

711-TES-CA-5774



## **MEMORIA**

Pedro J. Aguilera Rio

Tutores: Vicenç Gràcia Garcia y Francesc Xavier Gironella Cobos  
Barcelona, 14 de Mayo del 2012  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos



# ANÁLISIS A LARGO PLAZO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL OLAJE Y VIENTO EN EL LITORAL CANTÁBRICO

Autor: Pedro Jesús Aguilera Rio

Tutores: Vicenç Gràcia Garcia y Francesc Xavier Gironella Cobos

Palabras clave: Oleaje, Viento, Undimotriz, Eólica, Tendencias, Cantábrico

## RESUMEN

El litoral cantábrico es considerado como un mar de gran potencial energético. Hasta ahora, las características medioambientales (oleaje y viento) han sido consideradas invariantes. Estudios recientes en distintas zonas del litoral español y europeo muestran una tendencia no despreciable cuando estos valores son integrados en un largo periodo de tiempo. El objetivo de esta tesina es analizar la variabilidad temporal a largo plazo del campo de vientos y olas en el litoral cantábrico a partir de una base de datos y evaluar su impacto en su explotación como recurso energético, así como sus consecuencias en la ingeniería portuaria y costera.

El estudio parte de los datos generados en el proyecto HIPOCAS, utilizando 24 puntos SIMAR cercanos al litoral de estudio. Se han tratado los datos con programas estadísticos avanzados como son Origin, MathWave y el paquete estadístico XLSTAT.

La tendencia ha sido hallada realizando una regresión lineal de los datos ya filtrados por un filtro de pasa baja generado por una media móvil de 5 años. Para realizar el análisis se ha dividido el estudio en dos fases: estudio del oleaje y estudio del viento.

En el análisis del oleaje se ha caracterizado éste con los siguientes parámetros: la dirección porcentual del oleaje [%], altura significativa  $H_s$  [m], la energía del oleaje [kJ/m], el flujo de energía [kW/m], el número de temporales por dirección [%] y la altura significativa en temporal [m].

Por otro lado, en el análisis del viento, se ha tomado: dirección porcentual del viento [%] y potencia del viento [ $W/m^2$ ].

Con los resultados obtenidos se ha extraído una visión global de los cambios que están sucediendo en el litoral cantábrico en cuanto a tendencias. Se ha comprobado que existen unas tendencias generales en la variación del oleaje y del viento. Dichas tendencias han sido contrastadas mediante rosas de oleaje y datos empíricos. Asimismo se ha realizado un análisis espectral con periodogramas, para intentar hallar evidencias de la existencia de ciclos.

Una vez analizadas las tendencias generales tanto del viento como del oleaje, se ha realizado un análisis de la potencia undimotriz y eólica que se podría extraer en 3 puntos del litoral cantábrico especialmente distribuidos para ser representativos de las diversas circunstancias. Asimismo se ha estudiado su variación a lo largo del tiempo debido a las tendencias antes estudiadas.

Por último se presentan de forma detallada las conclusiones obtenidas en los diferentes ámbitos analizados en la tesina, así como futuras líneas de investigación que podrían utilizarse para futuras tesinas o tesis doctorales basadas en las experiencias que le han ido surgiendo al autor a lo largo de la realización del presente estudio.



# LONG-TERM ANALYSIS OF WAVES AND WIND IN THE CANTABRIAN COAST

Author: Pedro Jesús Aguilera Rio

Advisors: Vicenç Gràcia Garcia y Francesc Xavier Gironella Cobos

Keywords: Oleaje, Viento, Undimotriz, Eólica, Tendencias, Cantábrico

## ABSTRACT

The Cantabrian coast is considered an energy potential sea. So far, the environmental characteristics (waves and wind) have been considered invariant. Recent studies in different parts of the Spanish coast and Europe have non-negligible trends when these values are integrated over a long period of time. The aim of this thesis is to analyze the long-term temporal variability of the wind field and waves in the Cantabrian coast from a long parameters database and to assess their impact on energy resource exploitation as well as its impact on coastal and port engineering.

The study starts with the data generated in the project HIPOCAS, using 24 SIMAR points near the coast of study. We treated the data with advanced statistical programs such as Origin, MathWave and XLSTAT statistical package.

The trend has been found by performing a linear regression of the data and filtered by a lowpass filter generated by a 5 years moving average. For analysis the study has been divided in two phases: study of waves and wind study.

The waves analysis uses the following parameters: the percentage wave directions [%], significant wave height  $H_s$  [m], the wave energy [kJ/m], the energy flux [kW/m], the number of temporary waves [%] and temporary significant height [m].

On the other hand, the wind analysis uses: the percentage wind directions [%] and wind power [ $W/m^2$ ].

With the results obtained we can extract an overview of the changes that are happening in the Cantabrian coast in terms of trends. It was found that there are some general trends in the variation of the waves and wind. These trends have been tested through wave roses and empirical data. A spectral analysis has also been made with periodograms, to try to find evidence of the existence of cycles.

Having analyzed the general trends of the wind and the waves, there has been an analysis of wave and wind power that could be extracted from 3 points distributed along the Cantabrian coastline especially to be representative of the diverse circumstances. It also has studied its variation over time due to trends studied before.

Finally, we present in detail the findings obtained in the different areas analyzed in the thesis and future research that could be used for future theses or minor theses based on the experiences that have emerged to the author along the embodiment of the present study.



---

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Introducción.....</i>	1
1.2. <i>Objetivos y estructuración.....</i>	2
<b>2. BASES Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Teoría lineal del oleaje.....</i>	3
2.1.1. <i>Definición.....</i>	3
2.1.2. <i>Variables descriptivas.....</i>	3
2.1.3. <i>Hipótesis adoptadas.....</i>	4
2.1.4. <i>Planteamiento matemático.....</i>	5
2.1.5. <i>Solución matemática.....</i>	6
2.1.6. <i>Parámetros utilizados en el estudio .....</i>	8
2.2. <i>Teoría eólica .....</i>	12
2.3. <i>Fuentes de información del oleaje y el viento .....</i>	14
2.3.1. <i>Datos instrumentales .....</i>	14
2.3.1.1. <i>Red de Boyas Exteriores (REDEXT).....</i>	14
2.3.1.2. <i>Red de Boyas Costeras (REDCOS) .....</i>	16
2.3.2. <i>Datos visuales.....</i>	17
2.3.3. <i>Datos procedentes de simulaciones numéricas.....</i>	17
2.3.3.1. <i>Datos modelados WASA.....</i>	17
2.3.3.2. <i>Datos modelados SIMAR-44.....</i>	18
2.3.3.3. <i>Datos modelados WANA.....</i>	19
2.3.4. <i>Fuentes utilizadas en el presente estudio.....</i>	19
2.3.4.1. <i>Puntos SIMAR-44 utilizados.....</i>	20
2.3.4.2. <i>Datos instrumentales utilizados .....</i>	21
2.4. <i>Metodología de análisis .....</i>	21
2.4.1 <i>Análisis de la tendencia .....</i>	22
2.4.2 <i>Análisis de la periodicidad .....</i>	23

---

---

<b>3. ANÁLISIS DE LOS DATOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. <i>Análisis del oleaje .....</i>	26
3.1.1. <i>Direcciones .....</i>	26
3.1.2. <i>Altura de ola significativa.....</i>	33
3.1.3. <i>Energía del oleaje .....</i>	39
3.1.4. <i>Potencia del oleaje .....</i>	46
3.1.5. <i>Direcciones en temporal.....</i>	53
3.1.6. <i>Altura de ola significativa en temporal.....</i>	57
3.2. <i>Análisis del viento .....</i>	60
3.2.1. <i>Direcciones .....</i>	60
3.2.2. <i>Potencia del viento .....</i>	68
3.3. <i>Contraste de tendencias.....</i>	77
3.4. <i>Análisis espectral.....</i>	77
<b>4. IMPLICACIONES EN LA EXPLOTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.....</b>	<b>79</b>
4.1. <i>Energía undimotriz .....</i>	79
4.2. <i>Energía eólica .....</i>	84
<b>5. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
5.1. <i>Conclusiones.....</i>	87
5.2. <i>Estudios futuros.....</i>	89
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>

**ANEJOS**

*Anejo I. Localización de los puntos SIMAR 44*

*Anejo II. Localización de las boyas oceanográficas*

*Anejo III. Análisis de normalidad de los datos*

*Anejo IV. Resultados de los puntos SIMAR*

*Anejo V. Contraste de tendencias*

*Anejo VI. Contraste de los valores de potencia*

*Anejo VII. Periodogramas*

*Anejo VIII. Especificaciones técnicas WAVEDRAGON 7M*

---

*Anejo IX. Cálculos potencia undimotriz*

*Anejo X. Especificaciones técnicas RePOWER 6M*

*Anejo XI. Cálculos potencia eólica*



## 1. INTRODUCCIÓN I OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

El mar Cantábrico es el mar litoral del océano Atlántico que baña la costa norte de España y el extremo suroeste de la costa atlántica de Francia. Dicho mar forma la parte sur del golfo de Vizcaya y se extiende desde la punta estaca de Bares, en la provincia de La Coruña, hasta la ciudad de Bayona en las costas del departamento de Pirineos Atlánticos, en el País Vasco Francés.

En su parte más oriental, junto a las costas del País Vasco, recibe el nombre de golfo de Vizcaya o también de golfo de Gascuña. Baña 800 kilómetros de costa compartida por las provincias de La Coruña y Lugo (Galicia), Asturias, Cantabria, Vizcaya y Guipúzcoa (País Vasco), y Labort, ya en Francia .

Constituye un mar de transición entre los mares fríos del norte y los templados del trópico, lo que hace que en él habiten especies vegetales y animales de aguas frías.

Los fuertes vientos del noroeste que soplan sobre él tienen su origen en las bajas presiones centradas sobre las islas británicas y el mar del Norte en combinación con el anticiclón de las Azores. La distancia recorrida por el viento y el mantenimiento de su dirección y velocidad constantes hacen que se generen olas que oscilan entre 2,5 y 3 metros de altura, lo que origina un mar muy agitado. En condiciones muy particulares, más propicias en los meses de abril-mayo y septiembre-octubre, los vientos del oeste pueden alcanzar magnitudes de galerna con olas que llegan a superar los 9 m de altura.

A medida que nos aproximamos a la costa francesa las aguas van siendo más cálidas en verano (22-24°C) y más frías en invierno (10-12°C). Posee una salinidad media del 35%, aunque este dato varía mucho en función del régimen de lluvias imperante en la zona. Tiene una significativa amplitud de marea y es atravesado por la corriente del Golfo.

Fue bautizado por los romanos en el siglo I a. C. como Cantabricus Oceanus y en otras citas clásicas más antiguas aparece con el nombre de Britannicus Oceanus y Gallicus Oceanus.

Hasta ahora, las características medioambientales de oleaje y viento han sido consideradas invariantes a lo largo de dicho litoral. Sin embargo, estudios recientes en distintas zonas del litoral español y europeo muestran una tendencia no despreciable cuando estos valores son integrados en un largo periodo de tiempo.

Dichos cambios podrían en un principio estar asociados al cambio climático, que a parte del calentamiento global, implica cambios en otras variables como las lluvias y sus patrones, la cobertura de nubes y todos los demás elementos del sistema atmosférico. La naturaleza caótica de estos modelos hace que en sí tengan una alta proporción de incertidumbre, aunque eso no quita que seamos capaces de prever cambios significativos futuros que tengan consecuencias tanto económicas como sociales.

Desde el punto de vista de la ingeniería portuaria y costera, es muy importante conocer si dichas tendencias existen a lo largo del Mar Cantábrico.

Su conocimiento nos ayudaría en diferentes ámbitos, como son:

- Previsión a largo plazo del transporte de sedimentos y perfil de equilibrio de las playas cantábricas.
- Correcto dimensionamiento de los diques de abrigo de los puertos cantábricos (en el litoral cantábrico encontramos cinco de las 28 Autoridades Portuarias del Sistema portuario español: Avilés, Bilbao, Gijón, Pasajes, Santander) así como control de su operatividad.
- Dimensionamiento y localización de proyectos de extracción de energías renovables (undimotriz y eólica) que previsiblemente se irán instalando en el litoral cantábrico en los próximos años.

### **1.2. Objetivos y Estructuración**

El objetivo de esta tesina es analizar la variabilidad temporal del campo de vientos y olas en el litoral cantábrico a partir de una base de datos y evaluar su impacto en costas, puertos y en su explotación como recurso energético.

Para presentar de forma progresiva el proceso seguido en la presente tesina desde la obtención de los datos hasta la presentación de conclusiones ésta se ha estructurado de la siguiente manera:

- *Capítulo 1: Introducción y objetivos.* En este capítulo se da una idea de lo que será la tesina acompañada de una breve introducción.
- *Capítulo 2: Bases y metodología.* En este apartado se muestran las herramientas de que se han dispuesto para desarrollar la tesina. La teoría aplicada y las fuentes de información. Posteriormente en el punto método, se explica cómo se tratan los datos de que disponemos para posteriormente poderlos analizar.
- *Capítulo 3: Análisis de los datos.* Este capítulo es la parte central de la tesina. Estudiamos la normalidad de los datos, analizamos las tendencias, intentamos extraer comportamientos y analizamos posibles periodicidades. Asimismo contrastamos las tendencias con datos actuales de las Boyas de Estaca de Bares, Cabo de Peñas y Bilbao Vizcaya
- *Capítulo 4: Implicaciones en las energías renovables.* En este capítulo se analizan las consecuencias de las tendencias encontradas en la extracción de energías alternativas eólica y undimotriz.
- *Capítulo 5: Conclusiones y estudios futuros.* En el punto final de la tesina se engloban todos los resultados obtenidos para poder tener un conocimiento en conjunto más amplio. Asimismo quedarán definidas todas las consecuencias fruto de las tendencias presentes en oleaje y campo de vientos. Por último se establecerán las líneas para futuros estudios.
- *Referencias bibliográficas.* Se listan los libros y estudios consultados, así como se referencia su aparición en el redactado del estudio.
- *Anejos.* Se reúnen tablas, gráficas y otros elementos que dan soporte a los cálculos de la tesina.

## 2. BASES Y METODOLOGÍA

### 2.1. Teoría lineal del oleaje

#### 2.1.1. Definición

A lo largo de los análisis que se realizarán en la actual tesis, se utilizará la teoría lineal del oleaje. La teoría lineal del oleaje es una aproximación al problema de la caracterización del oleaje únicamente válida en los casos en que se cumplen las suposiciones básicas que ésta implica.

Si bien existen otras teorías más complejas de orden superior, para el análisis que se llevará a cabo no son necesarias dichas aproximaciones, pues únicamente supondrían una mayor complicación matemática que no traería asociada una mayor precisión significativa en los resultados obtenidos.

#### 2.1.2. Variables descriptivas

La descripción física que realiza la teoría lineal del oleaje abarca la forma que toma la superficie del agua basándose en cuatro parámetros básicos (Figura 2.1):

- Altura (H): Distancia vertical de la cresta al seno de la ola.
- Longitud (L): Distancia horizontal entre dos crestas.
- Periodo (T): Lapso de tiempo en el cual dos crestas sucesivas pasan por el mismo punto.
- Movimiento del fluido bajo la ola

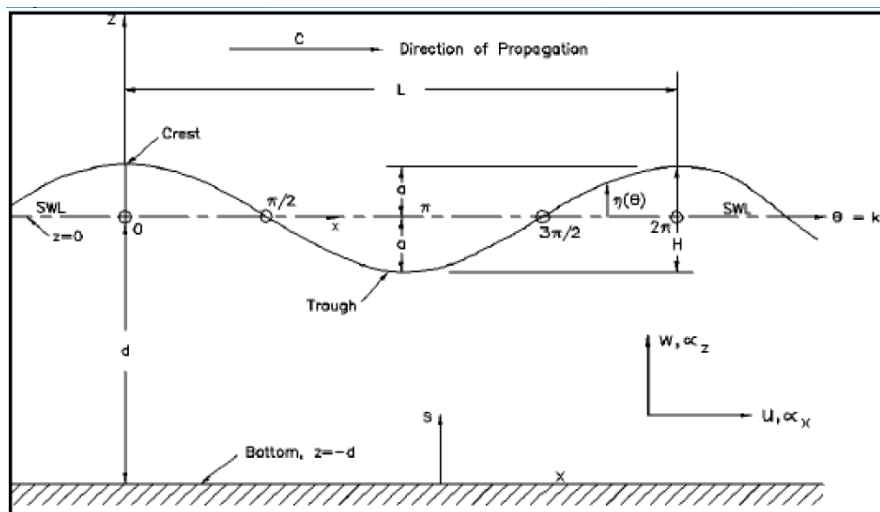


Figura 2.1. Parámetros básicos de la teoría lineal

Junto a éstos 4 parámetros, existen otros tantos que nos ayudarán en el análisis. Los más significativos son los siguientes:

- Profundidad del agua ( $h$ ): Distancia vertical desde el fondo marino hasta el nivel medio del mar (SWL).
- Elevación de la superficie libre ( $\eta$ ): Distancia vertical positiva (cresta) o negativa (seno) que toma la ola en relación al nivel medio del mar (SWL), donde  $z = 0$ .
- Amplitud ( $a$ ): 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 ( $c$ ): Velocidad de propagación de la ola. También conocida como celeridad de fase en contraposición a la celeridad de grupo, que será presentada posteriormente.

$$c = \frac{L}{T} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

- Frecuencia o velocidad angular ( $\omega$ ): Es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se designa mediante la letra griega  $\omega$ . Su unidad en el Sistema Internacional es el radián por segundo (rad/s).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{rad}{seg} \right]$$

- Componentes horizontal y vertical del vector velocidad ( $u, w$ ): Describen la posición en cada instante de tiempo  $t$  de las partículas de agua componentes de la ola.
- Gravedad ( $g$ ): Es una de las cuatro interacciones fundamentales. Origina la aceleración que experimenta un objeto en las cercanías de un objeto astronómico. También se denomina interacción gravitatoria o gravitación. Su valor vendrá dado por:

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

- Densidad del agua ( $\rho$ ): Es la magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. Se expresa como la masa de un cuerpo dividida por el volumen que ocupa. En el caso del agua de mar, tomaremos

$$\rho = 1027 \frac{kg}{m^3}$$

- Potencial de velocidad ( $\bar{V}$ ): Es el campo de velocidad dado por el gradiente dado por un gradiente de la función escalar  $\phi$ . Es decir

$$\bar{u} = \bar{\nabla} \phi$$

$$\begin{cases} u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{cases}$$

### 2.1.3. Hipótesis adoptadas

Como ya se ha dicho anteriormente, la Teoría Lineal del oleaje es una simplificación para facilitar la caracterización de éste.

Es por ello, que para poder aplicar dicha teoría deben cumplirse una serie de hipótesis.

A continuación se presentan dichas hipótesis:

- 1) El fluido se comporta de forma homogénea, pudiéndose considerar incompresible. Es decir, su densidad puede ser considerada constante.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

- 2) Se desprecia la tensión superficial.
- 3) Se desprecia el efecto de Coriolis.
- 4) La presión en la superficie libre es uniforme y constante.
- 5) Fluido no viscoso (inviscido).
- 6) Fluido Irrotacional. Junto con la condición 5) definen las condiciones de fluido ideal, ambas esenciales para poder introducir el potencial de velocidad.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x}$$

- 7) Fondo plano e impermeable. Define la condición cinemática de contorno en el fondo
- 8) La ola no interactúa con ningún otro movimiento del fluido.
- 9) No hay pérdida de energía. Se propaga sobre enormes distancias sin perder energía.
- 10) Oleaje plano (crestas largas) en dos dimensiones (x, z).
- 11) Altura de ola es muy pequeña en relación a su longitud y la forma es invariante en el espacio y en el tiempo. Esta simplificación linealiza la solución.

En el presente proyecto, dichas hipótesis se cumplen, dado que trabajamos en aguas profundas, donde todas las hipótesis planteadas anteriormente tienen validez.

#### 2.1.4. Planteamiento matemático

Una vez planteadas las hipótesis, procedemos a la definición matemática del problema. Obviamente dichas hipótesis tendrán una implicación matemática directa, que se presenta a continuación:

- La suposición de un fluido no viscoso e irrotacional (fluido ideal) conlleva la existencia de un potencial de velocidad.
- Un fluido ideal debe satisfacer la ecuación de continuidad de la masa

Es decir, dichas implicaciones, llevadas al campo matemáticos implican:

- En los términos de componentes de velocidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- En los términos del potencial de velocidad (Ecuación de Laplace)

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

- La ecuación de gobierno presenta un valor en la frontera.

Asimismo, hay varias condiciones de contorno en el dominio del problema que afectan la forma y complejidad de la solución de la ecuación de Laplace. Éstas son

- Condición de contorno del fondo
  - I. Dado que el fondo es impermeable el fluido no circulará a través del fondo.
  - II. La velocidad vertical en el fondo es nula.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{en\ z=-h} = 0$$

- Condición cinemática de contorno en la superficie libre
  - I. La velocidad de la partícula de fluido normal a la superficie libre es igual a la velocidad de la superficie libre.
  - II. La partícula se mueve con la superficie libre.

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{en\ z=\eta} = 0$$

- Condición dinámica de contorno en la superficie libre
  - I. Dicha condición queda expresada como la ecuación de Bernoulli: La presión en la superficie libre es constante.

- II. Este requerimiento viene de la suposición de que la presión atmosférica sobre el fluido es por si misma constante.
- III. Por último, la tensión superficial es nula en la interfase agua-atmósfera

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta \Big|_{en z=\eta} = f(t)$$

Por otro lado, implica que la ola tendrá periodicidad tanto en el espacio como en el tiempo.

$$\begin{cases} \Phi(x, t) = \Phi(x + L, t) \\ \Phi(x, t) = \Phi(x, t + T) \end{cases}$$

### 2.1.5. Solución matemática

Si además de las suposiciones presentadas anteriormente podemos añadir unas nuevas suposiciones adicionales simplificativas:

- Las ecuaciones diferenciales parciales de las condiciones de contorno en la superficie libre no se pueden resolver.
- Son no lineales y ocurren en  $z = \eta$ , que es inicialmente una incógnita
- La teoría lineal se deriva de aplicar las suposiciones simplificativas relacionadas con las condiciones de la superficie libre:
  - La altura de ola  $H$  es muy pequeña con respecto a la longitud de la ola y con respecto de la profundidad
  - $H \ll L$  y  $H \ll h$
  - Los términos no lineales que contienen los productos de los términos del orden de  $H$  se pueden despreciar en comparación con los términos lineales de orden  $H$ .
  - Las condiciones de contorno de superficie libre se pueden aplicar al nivel del agua en reposo ( $z = 0$ )

Entonces las condiciones de contorno linealizadas se reducen a:

Condición cinética de contorno en la superficie libre:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad en z = 0$$

Condición dinámica de contorno en la superficie libre:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - g\eta = 0 \quad en z = 0$$

Y por lo tanto la descripción física del oleaje vendrá dada por la siguiente expresión, que representa una onda sinusoidal, periódica y progresiva viajando en la dirección  $x$ :

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - \omega t)$$

Donde  $\eta$  es la forma de la superficie libre,  $k$  es el número de onda,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $L$  es la longitud de onda y  $T$  es el periodo.

Dicha descripción abarca la forma de la superficie del agua, es decir, su altura (distancia vertical de la cresta al seno) y longitud (distancia horizontal entre dos crestas).

Con dicha descripción, el potencial de velocidad vendrá dado por las expresiones

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

Y de la misma forma obtendremos la relación de dispersión, que describe la forma en la que un campo de oleaje con muchas frecuencias se separará o dispersará debido a las diferentes celeridades de las frecuencias componentes.

$$\omega^2 = gk(\tanh(kh))$$

Donde h es la profundidad,  $\omega$  describe la fase y k describe el número de onda.

De dicha relación de dispersión se deduce que la velocidad de propagación de la ola (también llamada velocidad de fase) puede relacionarse con su periodo y longitud: mientras mayor sea su longitud, mayor será su velocidad de propagación. Recordar que la distancia cubierta por la ola durante un periodo es igual a la longitud L.

$$c = \frac{gT}{2\pi} (\tanh(kh))$$

Con todo lo obtenido, podemos igualmente hallar las funciones que describen las velocidades con el tiempo de las partículas.

Su componente horizontal vendrá dada por:

$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t)$$

Mientras que su componente vertical lo hará con:

$$w = \frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\sinh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

Se observa que describen un flujo oscilatorio, las características del mismo son:

- Las velocidades son periódicas en x y t.
- Las partículas describen trayectorias cerradas y por lo tanto u y w son conocidas como velocidades orbitales. Esto implica que no hay un transporte de masa.
- Las ecuaciones expresan las velocidades a cualquier distancia del fondo (z+h).
- Las funciones hiperbólicas sinh y cosh como función de z implican que la magnitud de la velocidad (y el diámetro de las trayectorias) va decreciendo exponencialmente con la profundidad.
- Las trayectorias son circulares en aguas profundas y elípticas en aguas intermedias /someras.

Por otro lado, las aceleraciones de las partículas vendrán dadas por las funciones siguientes.

- Componente horizontal de la aceleración:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha_x = \frac{g\pi H}{L} \cdot \frac{\cosh k [k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$

- Componente vertical de la aceleración:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha_z = -\frac{g\pi H}{L} \cdot \frac{\sinh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t)$$

Dichos resultados pueden observarse en la Figura 2.2.

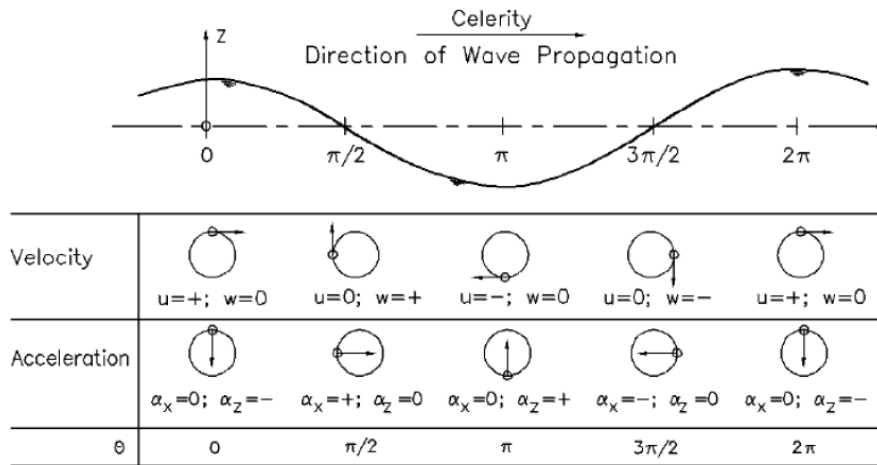


Figura 2.2. Velocidad y aceleración en el movimiento del oleaje

Asimismo, de todas las formulaciones obtenidas, se deduce que los movimientos para olas lineales, son los orbitales circulares en aguas profundas, elípticos en aguas intermedias y casi planos en aguas someras.

Estos resultados pueden observarse gráficamente en la Figura 2.3

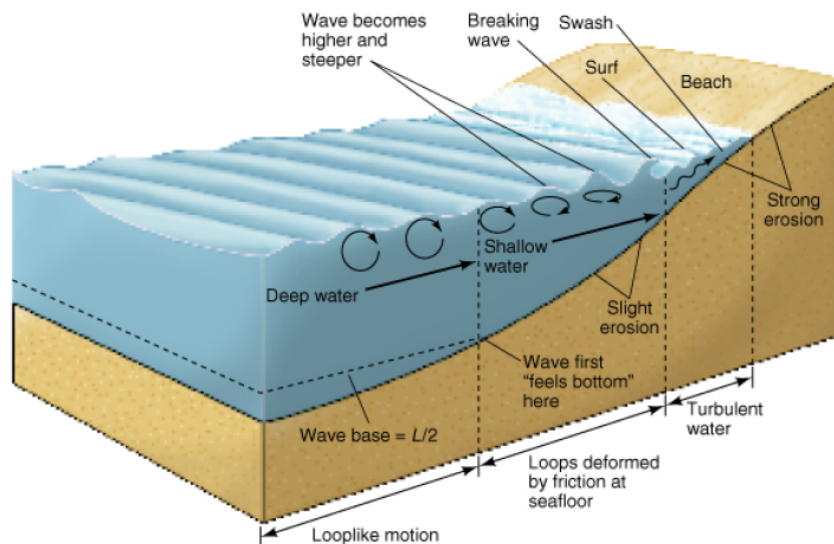


Figura 2.3. Dominios existentes en la propagación del oleaje

### 2.1.6. Parámetros utilizados en el estudio

Después de presentar la teoría lineal del oleaje, su deducción física y sus implicaciones matemáticas, a continuación se presentarán las variables deducidas de ésta que serán utilizadas en el presente estudio.

**Longitud de onda**

Definimos la longitud de las olas como la distancia entre dos crestas consecutivas suponiendo teoría lineal del oleaje.

Este parámetro viene definido por la formulación

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(k \cdot h) \quad [m]$$

En dicha formulación puede aplicarse una simplificación en función de si la ola se halla propagándose en aguas someras, intermedias o profundas (Tabla 2.1).

DOMINIO	$h/L$	$\tanh(k \cdot h)$	$L$
Aguas profundas	$>1/2$	$\approx 1$	$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$
Aguas intermedias	$1/25-1/2$	$\approx \tanh(k \cdot h)$	$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(k \cdot h)$
Aguas someras	$<1/25$	$\approx k \cdot h$	$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot (k \cdot h)$

Tabla 2.1. Dominios de propagación

Dado que en el presente trabajo los puntos de análisis se encuentran en profundidades en las que claramente la ola se está propagando en aguas profundas, utilizaremos la formulación

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \quad [m]$$

**Número de onda**

En teoría lineal del oleaje el número de onda, representado con la letra  $k$ , es una magnitud derivada del número de onda utilizada por razones de simplicidad en la ecuación que describe como vibra una onda

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - \omega t)$$

Esta ecuación indica cómo la intensidad de la oscilación  $\eta(x, t)$ , a un tiempo  $t$  determinado y partiendo de una posición inicial  $x$  determinada, es función de la amplitud de la vibración  $\frac{H}{2}$ , de la frecuencia angular  $\omega$  y del número de onda angular  $k$ .

Debido a su forma sinusoidal, es más cómodo expresar el número de onda en radianes por metro en lugar de ciclos por metro. Sabiendo que un ciclo comprende  $2\pi$  radianes, a partir de la definición de número de onda se obtiene el número de onda circular

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L} \quad \left[ \frac{\text{rad}}{m} \right]$$

**Celeridad de grupo**

La celeridad de grupo es definida como aquella variable que describe la velocidad a la que viaja la energía en el espacio y en el tiempo.

Aunque pudiera llevar a confusión, su concepto es diferente al de la celeridad (velocidad) de fase.

El concepto de celeridad de grupo se deriva considerando al interacción de dos trenes de ondas sinusoidales propagándose en la misma dirección y con la misma altura, pero con longitudes y períodos ligeramente distintos.

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{L_1} - \frac{2\pi t}{T_1}\right) + \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{L_2} - \frac{2\pi t}{T_2}\right)$$

Dado que L1 y L2 son ligeramente distintos, para ciertos valores de x, η1 y η2 estarán en fase y por lo tanto la altura de ola observada será 2H, mientras que para otros valores de x, la altura de ola observada será 0. En el perfil resultante las ondas parecen moverse en grupos, descrito por la ecuación de la curva envolvente

$$\eta_{envelope} = \pm H \cdot \cos\left[\pi \left(\frac{L_2 - L_1}{L_1 \cdot L_2}\right)x - \pi \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2}\right)t\right]$$

Esta ecuación representa la velocidad de grupo (la velocidad de propagación de las curvas envolventes), Figura 2.4.

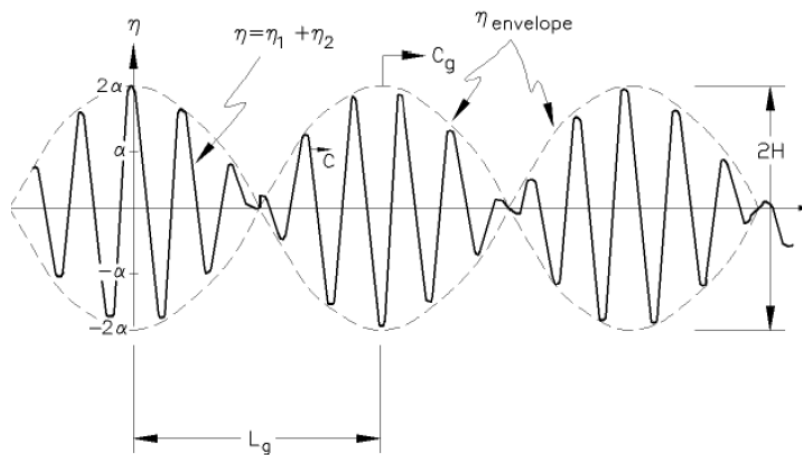


Figura 2.4. Velocidad de propagación de las curvas envolventes

La velocidad límite del grupo de ondas cuando L1 se aproxima a L2 y T1 a T2 viene dado por

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2 \cdot k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)} \right]$$

La formulación como antes, es dependiente del dominio en el que se propague la ola (Tabla 2.2).

DOMINIO	h/L	c <sub>g</sub>
Aguas profundas	>1/2	$c_g = \frac{c}{2} = \frac{g \cdot T}{4 \cdot \pi}$
Aguas intermedias	1/25-1/2	$c_g = nc = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L})} \right]$
Aguas someras	<1/25	$c_g = c = \sqrt{gh}$

Tabla 2.2. Formulaciones según el dominio de propagación

Dado que nosotros trabajamos con olas que se propagan en el dominio de aguas profundas utilizaremos la formulación

$$c_g = \frac{c_f}{2} = \frac{g \cdot T}{4 \cdot \pi} \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### **Energía del oleaje**

Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc.

Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética. Por ello, se suele decir que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes.

En este sentido, se podría concluir que la energía de las olas oceánicas constituye una forma de almacenar en la superficie de los océanos, con una densidad relativamente alta, la energía solar.

La energía total del oleaje es la suma de:

- Energía cinética

Es la energía asociada a las velocidades de las partículas de fluido (flujo oscilatorio).

La energía cinética por unidad de longitud de cresta de ola viene dada por

$$E_k = \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \cdot \frac{u^2 + w^2}{2} \cdot dz dx = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L$$

- Energía mecánica

Es la energía asociada al desplazamiento vertical de la superficie libre  $\eta$

La energía potencial por unidad de longitud de cresta de ola viene dada por

$$E_p = \int_x^{x+L} \rho \cdot g \cdot \left[ \frac{(\eta + h)^2}{2} - \frac{h^2}{2} \right] dx = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L$$

Por lo tanto la energía total (en una longitud de onda por unidad longitudinal de cresta de ola) será

$$E = \text{Energía cinética} + \text{Energía Potencial} (E_k + E_p)$$

$$E = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L + \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L$$

Por lo tanto la energía total del oleaje por unidad superficial de área, denominada Densidad de Energía esta dada por

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad \left[ \frac{J}{m} \right]$$

Dado que como se ha citado anteriormente, trabajaremos en aguas profundas utilizaremos la simbología (Ec 2.1)

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad \left[ \frac{J}{m} \right] \quad (Ec 2.1)$$

### Flujo de energía

Definimos el flujo de energía como la tasa de transmisión de energía en la dirección de propagación del oleaje a través de un plano perpendicular al avance del oleaje y en toda la columna de agua.

De acuerdo con la teoría lineal, el flujo medio de energía por unidad de anchura de cresta del oleaje a través de un plano perpendicular al avance del oleaje viene dado por

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+r} \int_{-h}^n \rho \cdot u \, dz \, dt$$

$$\bar{P} = \bar{E} \cdot c_g$$

La formulación como antes, es dependiente del dominio en el que se propague la ola (Tabla 2.3).

DOMINIO	$h/L$	$c_g$
Aguas profundas	$>1/2$	$c_g = \frac{c}{2} = \frac{g \cdot T}{4 \cdot \pi}$
Aguas intermedias	$1/25-1/2$	$c_g = nc = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d/L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L})} \right]$
Aguas someras	$<1/25$	$c_g = c = \sqrt{gh}$

Tabla 2.3. Formulaciones según dominio de propagación

Por lo tanto, como venimos diciendo, al trabajar con datos en aguas profundas

$$\bar{P} = \frac{\bar{E} \cdot c_g}{1000} = \frac{\rho \cdot T \cdot g^2 \cdot H^2}{32 \cdot \pi} \quad \left[ \frac{kW}{m} \right] \quad (Ec 2.2)$$

## 2.2. Teoría eólica

A diferencia del oleaje, el estudio del viento no supone admitir ninguna simplificación, ya que su formulación es universal. A continuación se presentan los aspectos claves para el análisis del viento.

### Dirección

El estudio de las direcciones del viento se realiza mediante las rosas de viento. Para realizar la rosa de los vientos es necesario un estudio estadístico de la frecuencia de cada dirección del viento. La rosa de los vientos es un gráfico radial que permite obtener información sobre la velocidad y dirección del viento. Muestra las diversas orientaciones y velocidades medias del viento dividiendo la circunferencia en varios sectores. El caso más general es dividirla en dieciséis sectores, ya que es un modelo más preciso. Entonces, las zonas se subdividen de la siguiente manera (Tabla 2.4).

Norte (N)	Este (E)	Sur (S)	Oeste (W)
Norte Noreste (NNE)	Este SurEste (ESE)	Sur Suroeste (SSW)	Oeste Noroeste (WNW)
Noreste (NE)	Sureste (SE)	Suroeste (SW)	Noroeste (NW)
Este Noreste (ENE)	Sur Sureste (SSE)	Oeste Suroeste (WSW)	Norte Noroeste (NNW)

Tabla 2.4. Direcciones del viento

**Variación de la velocidad del viento con la altura**

La variación del viento con la altura es importante para diferenciar entre terreno marino y terrestre. La velocidad del viento aumenta con la altura según la expresión.

$$V_h = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

V: Velocidad del viento a la altura elegida

V<sub>0</sub>: Velocidad del viento al "altura de referencia (10m)

h: Altura

h<sub>0</sub>: Altura de referencia (10m)

El parámetro  $\alpha$  varía con la hora del día, la estación, el tipo de terreno, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.

Valores del coeficiente se pueden observar en la Figura 2.5.

TIPO DE TERRENO	PARÁMETRO $\alpha$	TIPO DE TERRENO	PARÁMETRO $\alpha$
Hielo	0,070-0,076	Pastos	0,199-0,255
Agua	0,084-0,092	Suburbios	0,293-0,367
Hierba	0,104-0,136	Bosques	0,199-0,367
Terreno rocoso	0,136-0,175	Ciudades	0,367-0,897

Tabla 2.5. Valores del coeficiente  $\alpha$ **Potencia eólica**

Por otro lado también se analizará la potencia eólica. Para ello se utilizará la formulación

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad (Ec. 2.3)$$

Donde

$\rho$  es la densidad del aire,  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$

A es el área por la que circula el viento. Analizaremos  $A=1 \text{ m}^2$

v es la velocidad del viento, en m/s

Es decir, la formulación final será

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (Ec 2.3)$$

Si lo que queremos es la potencia eólica de un aerogenerador, deberemos tener en cuenta de que ésta no es la misma que la potencia total teórica. La masa de aire, al atravesar la turbina, desacelera perdiendo energía cinética, de manera que sale del generador a una velocidad inferior a la inicial.

Debido ello toda la potencia teórica contenida en el viento no es aprovechable para la generación de energía eléctrica. La potencia máxima que se podría extraer del viento a su paso por un aerogenerador ideal viene determinada por el límite de Betz.

El límite de Betz establece que la potencia máxima que se puede extraer del viento es un 59,26% (16/27) de la potencia teórica que contenía.

### **2.3. Fuentes de información del oleaje y el viento**

El estudio del oleaje (tanto a corto término como a largo plazo) requiere de una información detallada del fenómeno. Existen distintas fuentes de datos sobre las que poder realizar el análisis y que pueden agruparse en 3 categorías:

- 1) Datos instrumentales
- 2) Datos visuales
- 3) Datos procedentes de simulaciones numéricas.

En los puntos siguientes se describirán detalladamente cada una de estas fuentes así como la presencia de cada una de ellas en los datos disponibles facilitados por Puertos del Estado.

#### **2.3.1. Datos instrumentales**

Los datos instrumentales son adquiridos por sensores, principalmente boyas de oleaje, pudiendo ser de 2 tipos:

- 1) Direccionales: Se obtiene información sobre la altura, el período y la dirección del oleaje.
- 2) Escalares: Sólo se obtiene información sobre la altura y periodo del oleaje.

La ventaja de estos sensores reside en la calidad de los datos que proporciona aunque desgraciadamente su instalación (fondeo) en nuestras costas es relativamente reciente.

En España los datos instrumentales proceden, de diferentes redes de sensores que miden de un modo directo variables oceanográficas y atmosféricas como el oleaje, el viento, el nivel del mar... La información generada por estos equipos de medida llega en tiempo real al Banco de Datos de Puertos del Estado. Las principales redes de medida de las que se nutre el Banco de Datos son:

- Red de Boyas Exteriores (REDEXT)
- Red de Boyas Costeras (REDCOS)

##### **2.3.1.1. Red de Boyas Exteriores (REDEXT)**

El conjunto de datos REDEXT esta formado por las medidas procedentes de la Red de Boyas de Aguas Profundas (Red Exterior). Esta red unifica, amplía y actualiza las antiguas redes RAYO y EMOD.

Las boyas de esta red se caracterizan por estar fondeadas lejos de la línea de costa a gran profundidad (mas de 200 metros de profundidad). Por tanto, las medidas de oleaje de estos sensores no están

perturbadas por efectos locales. Por ello, cada boya proporciona observaciones representativas de grandes zonas litorales.

La Red Exterior esta compuesta por boyas de tipo Wavescan y SeaWatch. Las boyas de tipo SeaWatch miden tanto Oleaje como parámetros Atmosféricos y Oceanográficos. Las boyas de tipo Wavescan solo miden Oleaje y variables Atmosféricas.

#### *Tiempo de muestreo*

En la actualidad la cadencia de medida de estas boyas es de un dato por hora. Sin embargo, aunque la cadencia de generación de observaciones sea horaria, los parámetros que se proporcionan no se miden a lo largo de una hora. Así, por ejemplo, el viento se mide durante 10 minutos una vez cada hora. Por este motivo, aunque cada hora se genera un dato de velocidad media, dicho valor de velocidad media esta calculado sobre un periodo de 10 minutos.

La siguiente tabla detalla la duración de la medida para cada uno de los agentes observados.

Agente observado	Duración de la medida
Oleaje	30 Min. (Aprox)
Velocidad del Viento	10 Min.
Velocidad de Corriente	10 Min.
Temperatura del Aire	Instantánea
Presión del Aire	Instantánea
Salinidad de Agua	Instantánea
Temperatura del Agua	Instantánea

Tabla 2.6. Duración de la medida

#### *Puntos de Medida disponibles*

La Figura 2.7 muestra las posiciones de las boyas de la Red Exterior disponibles en el Banco de Datos Oceanográficos. La Tabla 2.7 inferior indica los nombres de dichas boyas y los códigos de identificación en la base de datos.

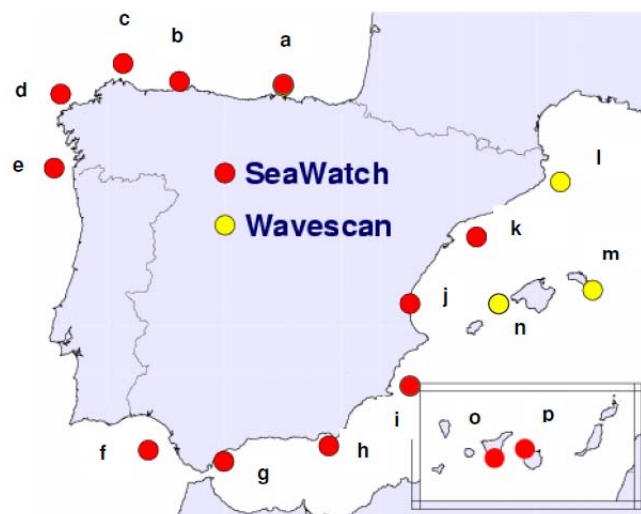


Figura 2.7. Posiciones de Medida de la Red Exterior de Boyas

### **2.3.1.2. Red de Boyas Costeras (REDCOS)**

El conjunto de datos REDCOS está formado por las medidas procedentes de la Red de Boyas Costeras de Puertos del Estado. Esta red amplía y actualiza la antigua red de boyas escalares REMRO.

Las boyas de esta red se caracterizan por estar ubicadas en las proximidades de instalaciones portuarias, estando fondeadas a menos de 100 m. de profundidad. En la mayoría de los casos, las medidas están perturbadas tanto por el perfil de la costa, como por los efectos del fondo sobre el oleaje.

Dado que están fondeadas a escasa distancia de la costa, las boyas de la Red Costera son representativas, sólo, de condiciones locales. Por este motivo es necesario utilizar con prudencia dichos datos a la hora de extraer conclusiones sobre el oleaje en zonas alejadas del área de medida.

Esta red está compuesta por boyas escalares de tipo Waverider (Datawell) y boyas direccionales de tipo Triaxys (Axis). En algunos puntos de medida las boyas direccionales han sustituido a las boyas escalares instaladas anteriormente, como es el caso de Gijón, Bilbao y Valencia, que cuentan con boyas direccionales desde el año 2004, o Cádiz donde en 2001 se instaló la primera boya direccional de tipo Triaxys.

#### *Parámetros disponibles*

De manera general el conjunto REDCOS dispone de los parámetros indicados a continuación dependiendo del tipo de boya.

- Parámetros de Oleaje Escalar
  - Altura Significante Espectral y de Cruce por cero
  - Periodo Medio Espectral y de Cruce por cero
  - Altura Máxima y Periodo asociado
  - Periodo Significante
- Parámetros de Oleaje Direccional (Sólo boyas Triaxys)
  - Dirección Media
  - Dirección Media en el Pico de Energía
  - Dispersión de la Dirección en el Pico de Energía

#### *Puntos de medida disponibles*

La Figura 2.11 muestra un mapa de las posiciones de las boyas de la Red Costera disponibles en el Banco de Datos Oceanográficos en el año 2007.

Esta Red permanente de boyas es muy dependiente de las necesidades de las Autoridades Portuarias, por lo que la distribución de las boyas puede verse modificada a lo largo del tiempo con bastante frecuencia.



Figura 2.11. Posiciones de las boyas de la Red Costera en el año 2007

### 2.3.2. Datos visuales

Los datos visuales provienen de observaciones realizadas por barcos en ruta a lo largo de todas las costas del mundo (World Meteorological Office) y son obtenidos de forma sistemática desde los años 50 de forma que un observador recoge (entre otras) información sobre la altura de ola, periodo y dirección de dos estados de mar, el mar de viento (SEA) y el mar de fondo (SWELL).

### 2.3.3. Datos procedentes de simulaciones numéricas

El otro gran bloque de datos esta formado por datos modelados, es decir, datos que no proceden de medidas directas de la naturaleza, sino que han sido inferidos a través de modelos numéricos de oleaje, viento, y nivel del mar. Los datos modelados, a diferencia de los instrumentales, permiten caracterizar grandes áreas litorales.

Una buena parte de este tipo de datos han sido generados mediante la técnica conocida como Hindcast, la cual permite reconstruir datos de viento y oleaje de épocas pasadas. Dicho proceso tiene su punto de partida en series históricas de presión y temperatura (series que se remontan a 1958), las cuales son tratadas mediante modelos numéricos para estimar o predecir las condiciones de viento y oleaje que, probablemente, debieron existir. Esto permite construir series históricas muy representativas que contienen información de temporales que no pudieron ser medidos en su momento. Los principales conjuntos de datos modelados son:

- 1) Conjunto WASA
- 2) Conjunto SIMAR-44
- 3) Conjunto WANA

#### 2.3.3.1. Datos modelados WASA

Son datos de Hindcast realizados dentro del proyecto Waves and Storms in the North Atlantic. Este conjunto esta formado por series de oleaje direccional y viento, localizadas a lo largo de todo el entorno

litoral atlántico, que cubren el periodo 1970-1994. La comparación con datos de boyas arroja correlaciones de 0.85 para la región cantábrica y correlaciones de 0.7 para el Golfo de Cádiz y Canarias.

### **2.3.3.2. Datos modelados SIMAR-44**

El conjunto SIMAR-44 se constituye a partir de modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español, durante el periodo 1958–2001. Dicho conjunto de datos ha sido generado por Puerto del Estado en el marco del proyecto europeo HIPOCAS. Las series generadas son de gran calidad y reproducen temporales ocurridos en fechas pasadas que no se midieron pero de cuyo efecto existe constancia.

El conjunto de datos SIMAR-44 está formado por series temporales de parámetros atmosféricos y oceanográficos procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados por ordenador y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

El conjunto SIMAR44 se constituye a partir de modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación de atmósfera y nivel del mar en todo el dominio de trabajo, así como la simulación de oleaje en la cuenca mediterránea han sido realizadas por Puertos del Estado en el marco del Proyecto Europeo HIPOCAS. La simulación de oleaje en el dominio Atlántico ha sido realizada por Puertos del Estado de modo independiente.

#### *Viento*

Los datos de viento de este conjunto se han obtenido mediante el modelo atmosférico regional REMO, forzado por datos del reanálisis global NCEP. Dicho reanálisis asimila datos instrumentales y de satélite. El modelo REMO se ha integrado utilizando una malla de 30'Lon x 30' Lat (aprox 50Km x 50Km) con un paso de tiempo de 5 min. Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

La malla utilizada para integrar el modelo REMO no permite modelar el efecto de accidentes orográficos de extensión inferior a 50Km. Tampoco quedan modelados la influencia en el viento de procesos de convección de escala local. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral... De modo general es más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes de mar.

#### *Oleaje*

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado el modelo numérico WAM. Dicha aplicación es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Los datos se han generado con una cadencia horaria. Se ha realizado descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se ha considerado la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo.

Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciado variable con una resolución de 15'Lat x 15'Lon. para el borde Este de la malla y de 7.5'Lat.\*7.5'Lon. (apro. 12.5Km\*12.5Km ) para el resto del área modelada.

Por otro lado, para el área atlántica se ha utilizado una malla de espaciado variable que cubre todo el Atlántico Norte con una resolución de 30'Lat x 30'Lon. para las zonas mas alejadas de la Península Ibérica y de Canarias. Para el entorno del Golfo de Cádiz' y del Archipiélago Canario se han anidado a la malla principal mallas secundarias con una resolución de 5'Lon x 5'Lat. De modo análogo, para el Mar Cantábrico y Galicia se han utilizado mallas anidadas con una resolución de 2.5'Lon x 2.5'Lat.

De toda la información generada en el proceso de modelado, se ha seleccionado una fracción considerada como representativa del clima en el entorno litoral español. Las series temporales almacenadas en el Banco de Datos cubren el periodo 1958-2001 con un dato cada 3 horas.

La Figura se 2.14 muestra para el Atlántico las posiciones de los nodos de malla seleccionados para su almacenamiento en el Banco de Datos. En general para cada una de estas posiciones se disponen de series de oleaje, viento y residuo atmosférico de nivel del mar.

En el proceso de modelado se generaron campos con una cadencia horaria, pero con el fin de generar conjuntos de datos de un tamaño más manejable, las series almacenadas en el Banco de Datos tienen una cadencia de un dato cada 3 horas.

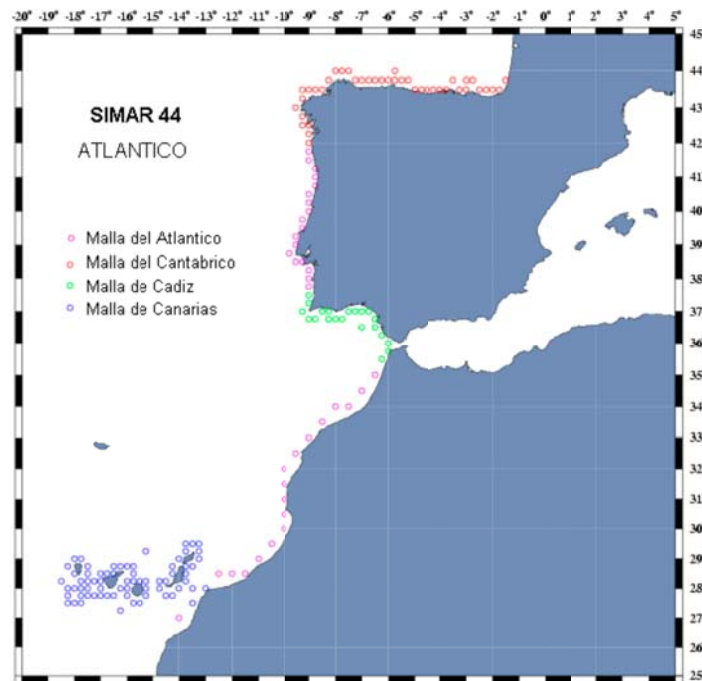


Figura 2.14. Nodos o puntos SIMAR-44 para el área atlántica

### 2.3.3.3. Datos modelado WANA

El conjunto de datos WANA está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Los series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con el INM. No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelado y consistente con las observaciones realizadas.

### 2.3.4. Fuentes utilizadas en el presente estudio

En la presente Tesina se van a utilizar tanto datos instrumentales como datos procedentes de simulaciones numéricas.

Primeramente se realizará un análisis con los datos procedentes de las simulaciones numéricas SIMAR-44, para posteriormente reforzarlos con los datos provenientes de boyas instrumentales.

#### 2.3.4.1. Puntos SIMAR-44 utilizados

Los puntos SIMAR-44 utilizados en la presente tesina están localizados en la cornisa Cantábrica. Pueden observarse a continuación y en color amarillo en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Localización genérica de los puntos SIMAR-44 utilizados

Las series de datos de dichos puntos han sido facilitados por el organismo Puertos del Estado.

Concretamente se han utilizado un total de 24 puntos. Su identificativo y coordenadas se expresan en la siguiente Tabla 2.8, respetando su orden desde oeste a este.

Nº	IDENTIFICADOR	TIPO DE DATOS	COORDENADAS
1	1048076	SIMAR-44 y WANA	I=44,00°N, L=008,00°W
2	1049076	SIMAR-44 y WANA	I=44,00°N, L=007,75°W
3	1050076	SIMAR-44 y WANA	I=44,00°N, L=007,50°W
4	1051075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=007,25°W
5	1052075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=007,00°W
6	1053075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=006,75°W
7	1054075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=006,50°W
8	1055075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=006,25°W
9	1056075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=006,00°W
10	1057075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=005,75°W
11	1058075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=005,50°W
12	1059075	SIMAR-44 y WANA	I=43,75°N, L=005,25°W
13	1060074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=005,00°W
14	1061074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=004,75°W
15	1062074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=004,50°W
16	1063074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=004,25°W

17	1064074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=004,00°W
18	1065074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=003,75°W
19	1067074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=003,25°W
20	1068074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=003,00°W
21	1070074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=002,50°W
22	1071074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=002,25°W
23	1072074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=002,00°W
24	1073074	SIMAR-44 y WANA	I=43,50°N, L=001,75°W

Tabla 2.8. Puntos SIMAR-44 utilizados

Para un mayor detalle en cuanto a la posición de dichos puntos consultar ANEJO I. Localización de los puntos SIMAR-44.

#### 2.3.4.2. Datos instrumentales utilizados

Asimismo se han utilizado una serie de datos instrumentales procedentes de las redes REDCOS y REDEXT del Ente Puertos del Estado.

La condición que se ha utilizado para la selección de dichas boyas ha sido triple:

- 1) Proximidad a los puntos SIMAR-44 utilizados
- 2) Registro de datos desde como mínimo 10 años
- 3) Boyas con registro direccional (Altura de ola, Período y Dirección)
- 4) Cadencia de toma de datos cada hora mínimo.

Si ya de por sí la red española de registro empírico oceanográfico no es de por sí demasiado extensa, el echo de limitar tanto las condiciones de selección ha hecho limitar aún más las boyas seleccionadas.

Obviamente éstas se hallan en el litoral Cantábrico. Su identificativo y coordenadas se expresan en la siguiente Tabla 2.9, respetando su orden desde oeste a este.

Nº	IDENTIFICADOR	NOMBRE	COORDENADAS	RED	DATOS DESDE
1	2244	Boya de Estaca de Bares	I=44,12°N, L=007,67°W	REDEXT	13/10/1996
2	2242	Boya de Cabo de Peñas	I=43,74°N, L=006,17°W	REDEXT	18/03/1998
3	2136	Boya de Bilbao Vizcaya	I=43,64°N, L=003,05°W	REDEXT	07/11/1990

Tabla 2.9. Boyas oceanográficas utilizadas

Como se puede observar las 3 boyas forman parte de la REDEXT.

Para un mayor detalle en cuanto a la posición de dichas boyas consultar el ANEJO II. Localización de las boyas oceanográficas.

#### 2.4. Metodología de análisis

Disponemos de datos de oleaje direccional (fecha, altura de ola significativa, período y dirección) así como de viento direccional (fecha, velocidad del viento a 10 metros de altura y dirección) a partir de los cuáles queremos determinar posibles tendencias temporales.

Cabe destacar que como se ha demostrado en diversos trabajos [5], [7], [11], los parámetros antes mencionados presentan normalidad.

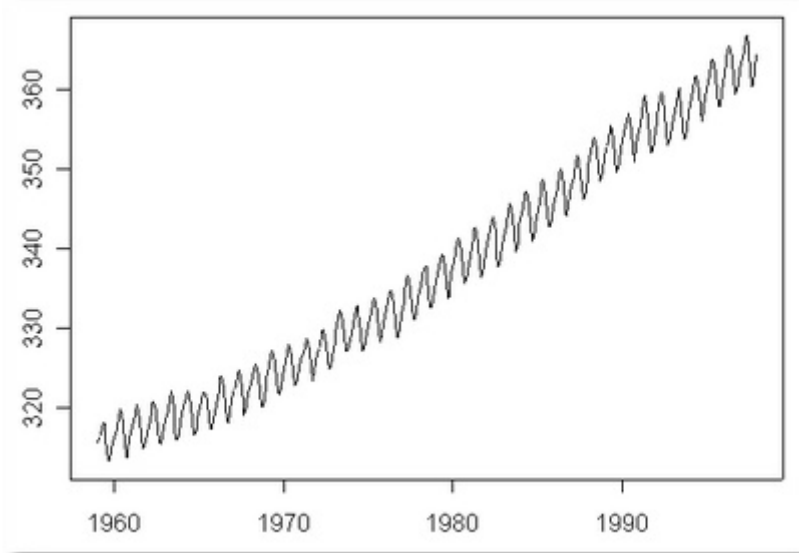
Dichos datos corresponden a fenómenos que cambian en el tiempo. Por lo tanto, podemos hallarnos ante datos determinísticos (existe una relación definida o causal por lo que la obtención de nuevos datos no agrega información sobre el mismo) o estocásticos (definidos por una distribución de probabilidades). Dado que conocidos los valores pasados de nuestra serie, no es posible predecir con total certeza el próximo valor de la variable, nos hallamos ante datos no deterministas o estocásticos.

Inicialmente evaluamos la calidad y consistencia de los datos. Dichos datos se someten a un diagrama de caja o box plot mediante el cual limpiamos los outliers.

Una vez realizado este proceso pasamos a aplicar lo que conocemos como un modelado clásico de series temporales.

La metodología tradicional para el estudio de series temporales es bastante sencilla de comprender, y fundamentalmente se basa en descomponer las series en varias partes: tendencia, variación estacional o periódica y otras fluctuaciones irregulares.

- Tendencia. Es la dirección general de la variable en el periodo de observación, es decir el cambio a largo plazo de la media de la serie (Figura 2.17)



*Figura 2.17. Tendencia presentada por una serie de datos*

- Estacionalidad. Corresponde a fluctuaciones periódicas de la variable, en periodos relativamente cortos de tiempo.
- Otras fluctuaciones irregulares. Después de extraer de la serie la tendencia y variaciones cíclicas, nos quedará una serie de valores residuales, que pueden ser o no totalmente aleatorios. Volvemos a estar como en el punto de partida, pues ahora también nos interesa determinar si esa secuencia temporal de valores residuales puede o no ser considerada como aleatoria pura.

En la presente tesina únicamente se estudiará la tendencia de los datos.

#### **2.4.1. Análisis de la tendencia**

Una primera idea sobre la presencia de tendencia en la serie la obtendremos en su representación gráfica.

Los medios más utilizados para detectar y eliminar la tendencia de una serie se basan en la aplicación de filtros a los datos. Un filtro no es más que una función matemática que aplicada a los valores de la serie

produce una nueva serie con unas características determinadas. Entre esos filtros encontramos las medias móviles, que son las que aplicaremos en el presente estudio. De esta forma asimilamos una variable continua a un punto discreto

La media móvil de pasa baja de 3 años viene dada por:

$$m(x_t) = \frac{x_t + x_{t+1} + x_{t+2}}{3}$$

Mientras que la media móvil de pasa baja de 5 años:

$$m(x_t) = \frac{x_t + x_{t+1} + x_{t+2} + x_{t+3} + x_{t+4}}{5} \quad (\text{Ec 2.4})$$

Como es lógico, una media móvil de pasa baja de 5 años aplica un filtro mayor a los datos que una media móvil de pasa baja de 3 años o simplemente los datos anuales.

Una vez realizado el filtrado de datos, evaluamos nuevamente la calidad de estos. Dichos datos se someten a un diagrama de caja o box plot mediante el cual limpiamos los outliers y posteriormente, una vez realizada la limpieza de los datos, procedemos a verificar que dichos datos siguen una distribución normal, es decir, presentan normalidad (ver *Anejo III. Análisis de normalidad de los datos*)

Los programas presentan varios métodos para contrastar normalidad:

Métodos gráficos (Scatter plot)

- Histogramas
- Gráfico PP
- Gráfico QQ Plot

Métodos de contraste de normalidad

- Prueba Chi cuadrado
- Prueba de Kolmogorov-Smirnov
- Prueba de Shapiro Wilks

Este análisis lo realizamos con el software específico MathWave Professional 5.3, Origin Pro 5.1 y XLSTAT.

Los resultados denotan la existencia de normalidad (*Anejo III. Análisis de normalidad de los datos*) en todos los casos, condición sine qua non para la realización del análisis exploratorio de los datos.

Dichos datos son sometidos a una regresión lineal, a la cuál aplicamos los test F de Fischer i t-student para contrastar la Hipótesis nula  $R^2=0$ . Si la probabilidad de descarte de dicha hipótesis, con una fiabilidad del 99% es superior al 95%, se tomará como buena la regresión. En caso contrario, dicha regresión deberá ser descartada y tomada como no válida.

#### **2.4.2. Análisis de la periodicidad**

Dado que la mayoría de las series que analizamos en ciencias atmosféricas son originadas en procesos que tienen incluidos ciclos u oscilaciones periódicas, tanto ciclos diarios, mensuales y anuales, es oportuno realizar también un análisis de posibles ciclos a largo plazo.

Por ello se someten los resultados a análisis de sus periodogramas. El periodograma mide aportaciones a la varianza total de la serie de componentes periódicos de una frecuencia determinada ( $w$ ). Si el

periodograma presenta un “pico” en una frecuencia, indica que dicha frecuencia tiene mayor “importancia” en la serie que el resto (Figura 2.18)

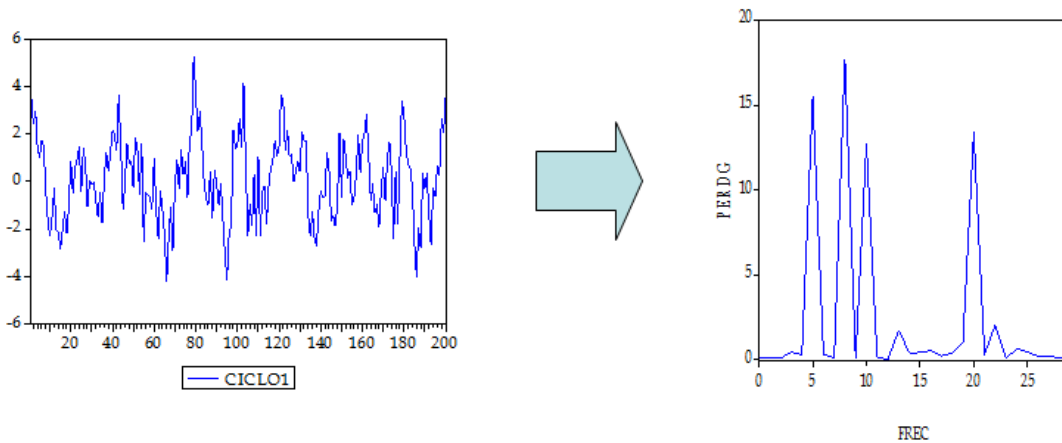


Figura 2.18. Periodogramas

De nuevo se realizará un contraste de hipótesis con el software específico MathWave Professional 5.3, Origin Pro 5.1 y XLSTAT.

Hay 2 pruebas estadísticas para probar la periodicidad de la serie:

- Kappa de Fisher
- Kolmogorov-Smirnov de Bartlett

Kappa de Fisher pone a prueba la hipótesis nula de que la serie es ruido blanco Gaussiano en contra de la hipótesis alternativa de que la serie contiene una componente determinista periódica añadida en la frecuencia especificada. La prueba de BKS compara el periodograma acumulado normalizado con la función de distribución acumulada de la distribución uniforme (0,1) para probar la hipótesis nula de que la serie es ruido blanco.

### 3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Una vez procesados todos los datos y aplicadas las formulaciones descritas anteriormente, en el presente punto se analizarán los resultados obtenidos de forma numérica (*Anejo IV. Resultados puntos SIMAR 44*). Dichos resultados numéricos se reforzarán con representaciones gráficas de éstos, dado que su visualización ayuda a comprender de forma mucho más clara el resultado obtenido.

Los resultados se han obtenido punto a punto para cada uno de los 24 nodos SIMAR analizados. Si bien se comentarán los resultados obtenidos punto a punto, es mucho más interesante presentar una visión global de los resultados.

Es por ello, que también se analizarán los resultados de una forma global a lo largo de todo el litoral Cantábrico. Para ello, se han calculado las distancias entre los puntos SIMAR tomando como referencia y origen de coordenadas horizontales el punto SIMAR 1048076, situado frente a las costas de Galicia, aproximadamente 35 km al Norte de la playa de Teixido.

Para calcular dichas distancias únicamente se ha tenido en cuenta la diferencia de longitud entre coordenadas.

Dicha distancia es fácilmente calculable al conocer que un grado de longitud es equivalente a 60 millas náuticas, siendo la equivalencia de una milla náutica 1,852 kilómetros. Estas distancias están consideradas como loxodrómicas, no teniendo sentido hacer un cálculo ortodrómico considerando la curvatura terrestre dada la gran proximidad entre los puntos de análisis.

Es decir, calculamos la distancia horizontal entre dos puntos de la forma

$$Distancia(km) = \Delta L(^{\circ}) \cdot 60 \cdot 1,852$$

Las distancias obtenidas respecto al nodo de referencia SIMAR 1048076 son las presentadas a continuación (Tabla 3.1).

Nodo SIMAR	Distancia (km)	Nodo SIMAR	Distancia (km)
1048076	0	1060074	333
1049076	28	1061074	361
1050076	56	1062074	389
1051075	83	1063074	417
1052075	111	1064074	444
1053075	139	1065074	472
1054075	167	1067074	528
1055075	194	1068074	556
1056075	222	1070074	611
1057075	250	1071074	639
1058075	278	1072074	667
1059075	306	1073074	695

Tabla 3.1. Distancias relativas al origen de los diferentes nodos SIMAR

Para que el lector tenga claro definitivamente el sistema de referencia, se finaliza presentando una representación gráfica en la costa Cantábrica de dichas distancias (Figura 3.1)



Figura 3.1. Representación sobre el mapa de la escala de referencia

Que quedarán representadas en el eje de coordenadas de la forma siguiente (Figura 3.2).



Figura 3.2. Representación sobre el eje de coordenadas de la escala de referencia

Por último cabe destacar que todos los resultados obtenidos están referidos a la media móvil de 5 años, que es la que mejores ajustes ha presentado a lo largo de los análisis.

Pasamos pues a continuación a analizar los resultados.

### 3.1. Análisis del oleaje

En este apartado se comentarán los resultados obtenidos tras el análisis matemático y estadísticos de los datos de oleaje

Como era de esperar, las direcciones en las que la línea de costa se halla a escasos kilómetros han presentado una frecuencia absoluta de datos muy escasa, por lo tanto dichas direcciones serán descartadas de buen principio. Dichas direcciones corresponden a los sectores  $90^\circ$  ( $75^\circ$ - $105^\circ$ ),  $120^\circ$  ( $105^\circ$ - $135^\circ$ ),  $150^\circ$  ( $135^\circ$ - $165^\circ$ ),  $180^\circ$  ( $165^\circ$ - $195^\circ$ ),  $210^\circ$  ( $195^\circ$ - $225^\circ$ ) y  $240^\circ$  ( $225^\circ$ - $255^\circ$ ).

#### 3.1.1. Direcciones

En este punto analizaremos la evolución año a año del % de datos que recibimos en cada una de las 12 direcciones analizadas. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

El análisis de las direcciones del oleaje será muy importante también para el análisis de la evolución de la altura de ola significativa de ola, la potencia y la energía.

Su importancia radica en que el análisis de las direcciones del oleaje nos permitirá saber el número de datos para cada sector y por lo tanto descartar aquellos nodos en que no dispongamos suficientes datos sobre un sector como para que el análisis sea fiable.

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270º, 300º, 330º, 0º, 30º y 60º.

**Sector 270º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.3.

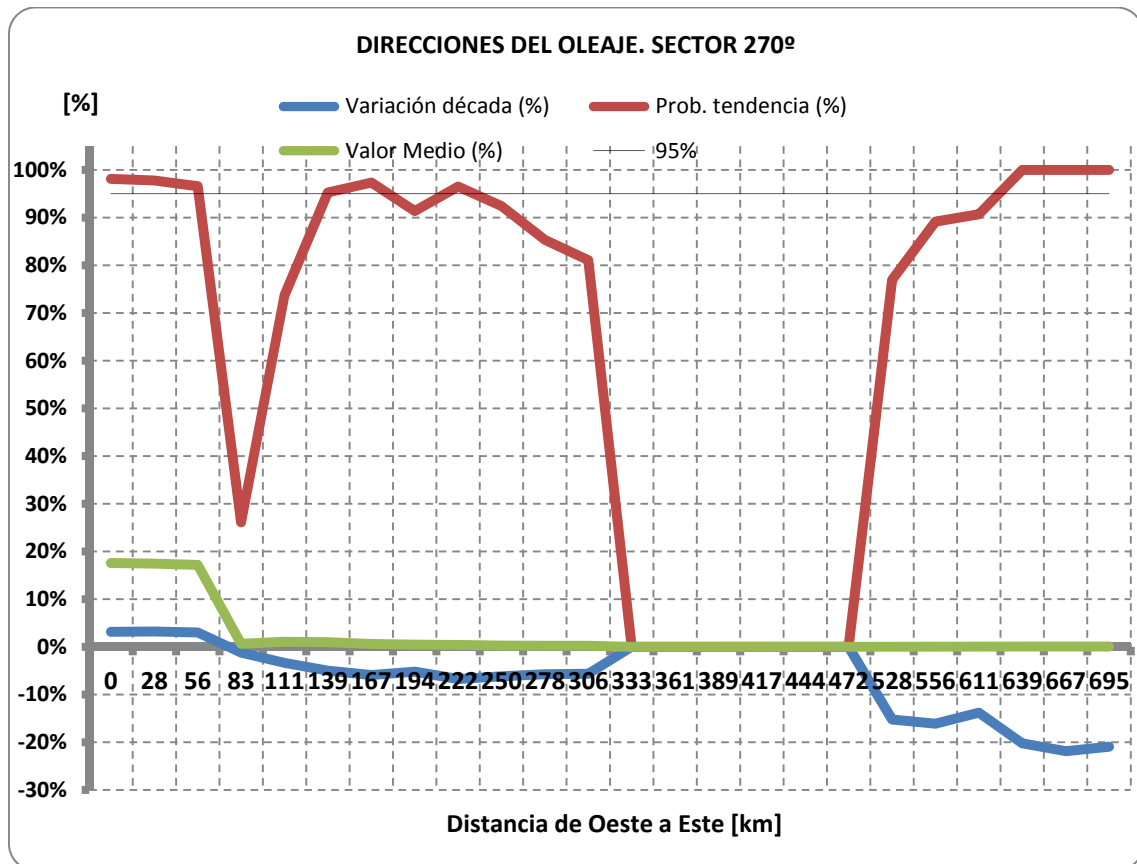


Figura 3.3. Sector 270º

Se observa que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega.

Éste resultado es obvio si tenemos en cuenta la disposición geográfica de dichos nodos. El saliente que supone la costa gallega impide que los nodos situados hacia el Este de ésta no tengan una zona de generación del oleaje (fetch) suficiente como para que el oleaje sea relevante desde dicha dirección, aunque como veremos es una de las direcciones en las cuáles la potencia del viento es destacable.

Por lo tanto, si nos fijamos únicamente en los tres primeros nodos SIMAR, es decir, los situados frente a las costas gallegas y que abarcan hasta una distancia de aproximadamente 56 kilómetros desde el origen, podemos apreciar los siguientes resultados (Tabla 3.1)

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	3,15%	3,21%	3,02%
probabilidad exista relación	98,13%	97,77%	96,57%
Media (%)	17,60%	17,44%	17,18%

Tabla 3.1. Resultados sector 270º para los tres primeros nodos

Se aprecia que en este tramo del litoral gallego, el oleaje procedente del sector 270º representa aproximadamente un 17% del oleaje que cruza la zona, siendo por lo tanto una cantidad para nada despreciable. El porcentaje de representatividad del sector disminuye conforme nos situamos más al Este, dado que la influencia de la costa afecta a los resultados. La tendencia es a recibir aproximadamente un aumento del 3% por década en cuánto al oleaje incidente desde este sector y por lo tanto estamos hablando de una tendencia en aumento muy considerable. Por su parte, el test F-Fisher nos muestra que las tendencias son muy fiables, pues estamos siempre situados por encima del 95% de probabilidad.

### Sector 300º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.4.

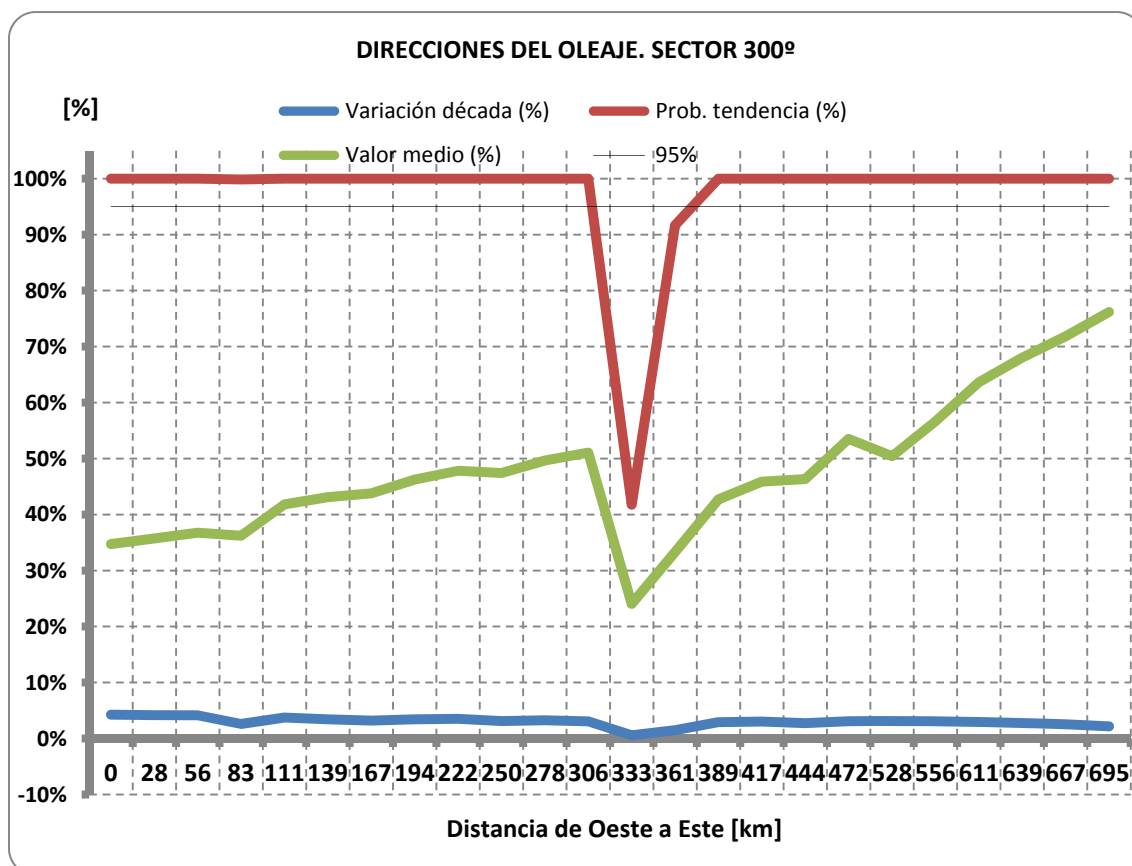
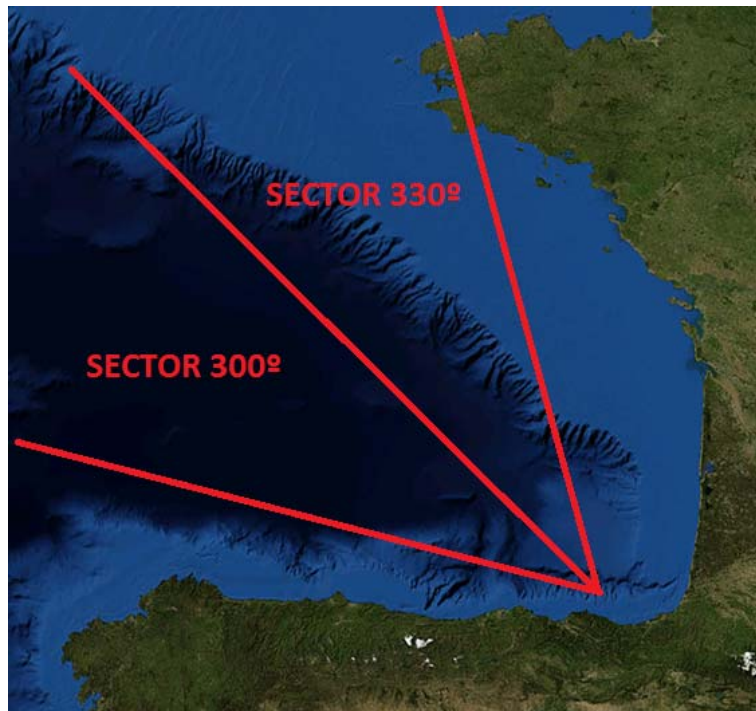


Figura 3.4 Sector 300º

Todos los puntos a excepción del situado aproximadamente a 350 kilómetros del origen tienen un porcentaje muy elevado en cuánto a oleaje procedente de este sector.

El valor medio del oleaje procedente desde dicho sector va en aumento conforme nos acercamos a Pasajes. Estos resultados tienen una explicación en la forma geológica del Golfo de Vizcaya (Figura 3.5).



*Figura 3.5. Morfología del Golfo de Vizcaya*

Se puede apreciar que al acercarnos hacia Pasajes, es decir hacia el litoral francés, los puntos del litoral van ganando protección frente a todos los sectores menos el de 300º i 330º. Por lo tanto es lógico que estos sectores representen un mayor porcentaje que los demás, ya que las zonas de generación son muchísimo más extensas y por lo tanto la posibilidad de que la ola generada llegue hasta el punto es mucho mayor.

Por lo tanto no es de extrañar que éste sector represente alrededor de un 75% del oleaje que llega a los nodos situados frente a Pasajes, mientras su importancia sea importante pero mucho menor, alrededor de un 35%, en los puntos situados en el litoral gallego.

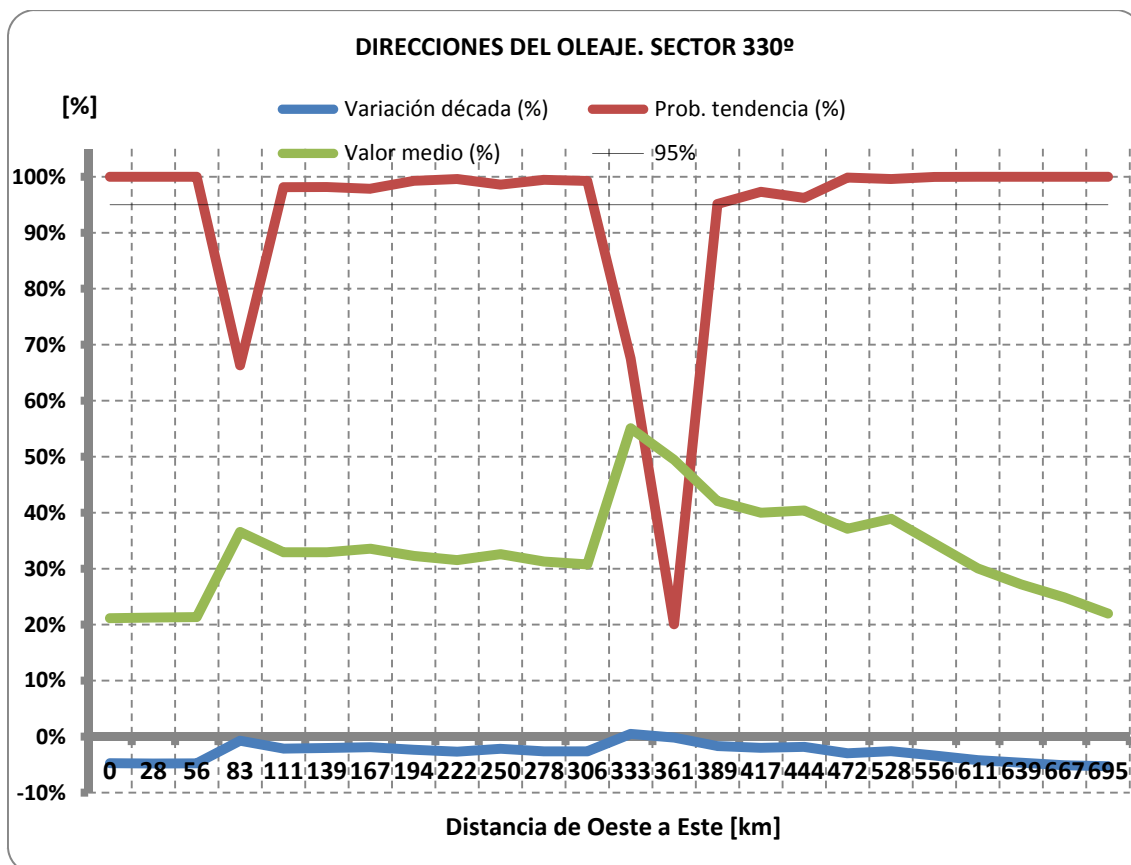
En la tendencia destaca una gran caída de la variación por década y de la fiabilidad alrededor de los 350 kilómetros. Si analizamos con detalle los motivos de este descenso, observamos que el nodo en cuestión es el 1060074.

Dicho nodo, queda situado aproximadamente 4 km al Norte de la playa de Ribadesella. Su peculiaridad es la de tener la costa muy cercana debido a un saliente por su lado oeste y por lo tanto el oleaje incidente desde el sector 300º puede sufrir refracción o efectos de contorno no deseados, que se traducen en unos resultados tan dispares respecto a los demás nodos. Es por lo tanto un valor atípico que en un análisis global no debería ser considerado.

Así pues, globalmente observamos que el sector 300º es uno de los sectores predominantes en el litoral Cantábrico y que con una gran fiabilidad del test F-Fisher está sufriendo un incremento muy considerable, de alrededor de un 3-4% por década.

#### **Sector 330º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.6



*Figura 3.6. Sector 330º*

Igual que en el sector de 330º, se aprecian discontinuidades en la tendencia general en dos zonas concretas, alrededor de los 83 kilómetros y los 350 kilómetros. Dichos nodos, que de nuevo son los 1054075, 1063074 y 1064074 vuelven a ser nodos con peculiaridades debido a la proximidad de la costa por su banda oeste.

Por lo tanto no deben ser tenidos en cuenta a la hora de obtener una valoración global.

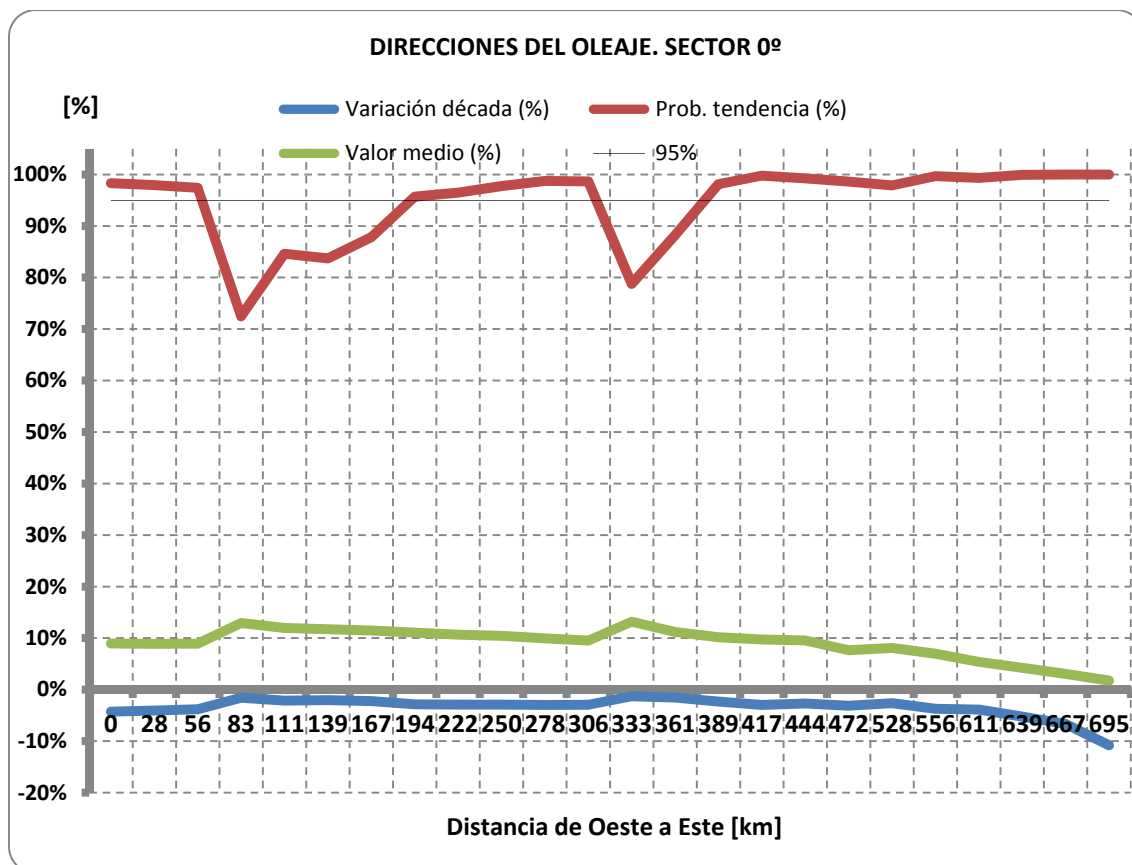
Globalmente se observa como anteriormente que el sector 330º es más importante o representa un mayor porcentaje de los puntos situados hacia la costa francesa, siendo inferior en el resto. No obstante, como se podía apreciar en la Figura 3.5 del Golfo de Vizcaya, el sector 330º es un sector del cual quedan más resguardados que el 330º y por ello va disminuyendo paulatinamente hacia Pasajes.

En general apreciamos que junto al sector 300º es uno de los sectores con mayor porcentaje de oleaje procedente del mismo, sin embargo la tendencia en vez de ser positiva es negativa, es decir, el oleaje procedente de dicho sector está disminuyendo a un ritmo aproximado del 3-4% por década, un valor muy semejante al del incremento del sector 300º.

Es por ello que se abre la puerta a pensar que la procedencia del oleaje está rolando en sentido contrario a las agujas del reloj, decreciendo en el sector 330º y aumentando en el de 300º.

### **Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.7.



*Figura 3.7. Sector 0º*

En el sector 0º de nuevo podemos observar las discontinuidades debidas a efectos de contorno situadas en los puntos 80 y 350 kilómetros.

Despreciando dichas discontinuidades, se aprecia que es un sector relevante en las zonas occidentales del litoral Cantábrico, siendo su promedio de alrededor de 0º.

Como era de esperar debido a la fisonomía del Golfo de Vizcaya, conforme nos desplazamos hacia oriente, hacia Pasajes, su representatividad es mucho menor, llegando prácticamente a ser nula.

En aquellas zonas en que su valor medio es superior al 5% y por lo tanto su tendencia fiable, observamos que el oleaje procedente de dicha dirección está disminuyendo alrededor de un 2-4% por década, una tendencia también importante.

### **Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.8.

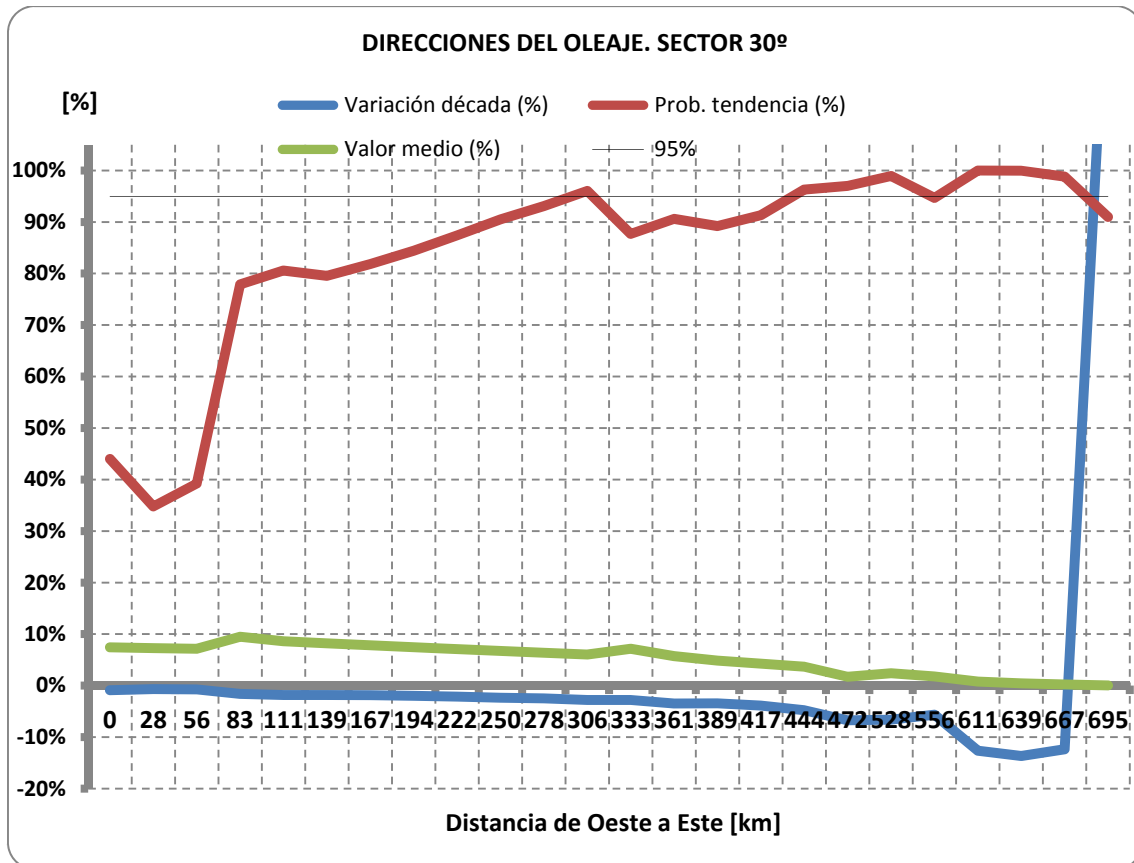


Figura 3.8. Sector 30°

El sector 30° comienza ya a ser uno de los sectores en que el oleaje que arriba a los nodos es escaso e irregular.

Su representatividad a partir de los 400 km es menor al 5% y por lo tanto no debería tenerse en cuenta.

Respecto a la zona occidental del Cantábrico en que este sector es más representativo, vemos que la fiabilidad de los test F-Fisher es escasa y por lo tanto la tendencia general no puede ser tomada por buena.

La explicación a este suceso la encontramos de nuevo en el Golfo de Vizcaya. Las olas procedentes del sector 30° tendrán una zona de generación pequeña, generadas en el interior del Golfo. Por ello su variabilidad es mucho mayor.

Aun no teniendo como válidos los resultados por la escasez de datos y fiabilidad del test F-Fisher, parece que a lo largo de los años el sector 30° está manteniendo constante su aportación anual, siendo ésta alrededor de un 7-8% para el sector occidental del litoral Cantábrico.

#### **Sector 60°**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.9.

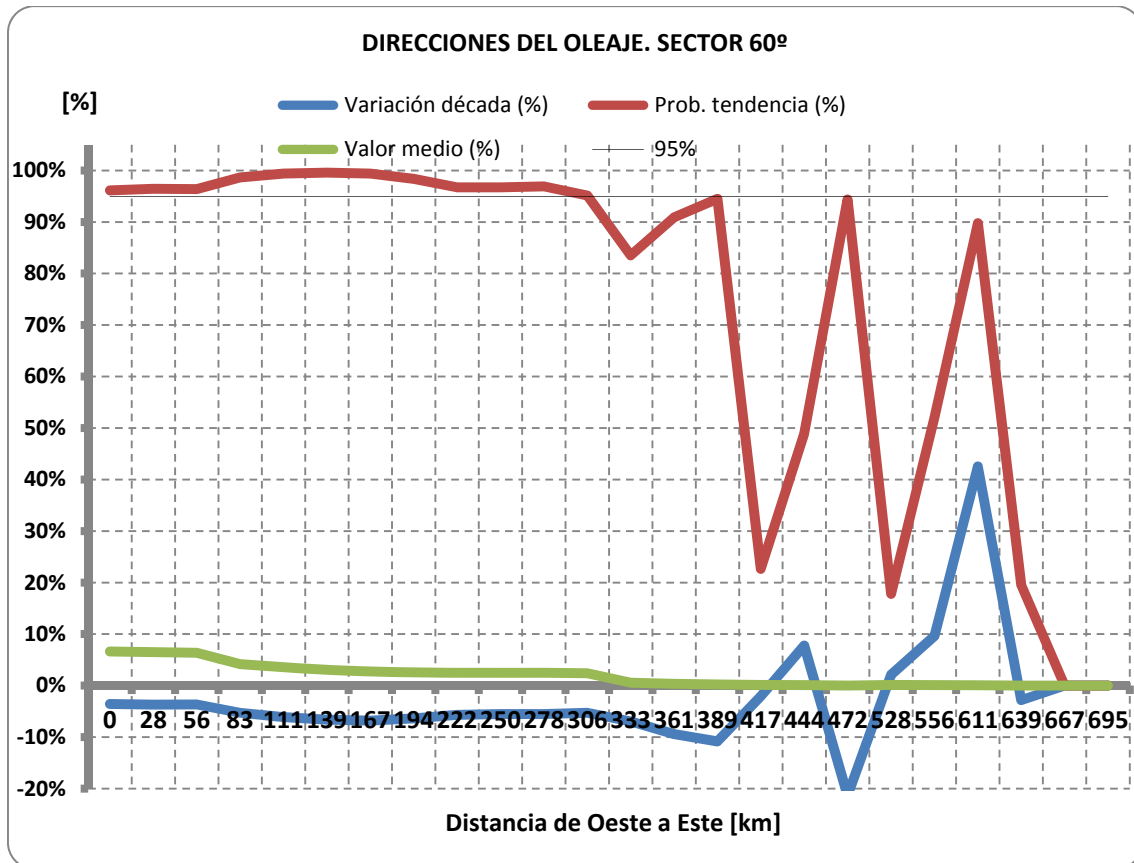


Figura 3.9. Sector 60°

De la misma forma que en el sector inicial de 270°, para el análisis de dicho sector deberemos despreciar los nodos situados más allá del litoral gallego, dado que el sector 60° no es representativo.

Para los tres nodos situados sobre el litoral gallego, presentamos los datos obtenidos en la Tabla 3.2.

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	-3,57%	-3,69%	-3,66%
probabilidad exista relación	96,14%	96,47%	96,39%
Media (%)	6,62%	6,51%	6,39%

Tabla 3.2. Resultados en el litoral gallego

Si bien de nuevo el sector 60° no es muy relevante (alrededor de un 6%), si que parece que con una fiabilidad alta la tendencia es a disminuir alrededor de un 3,5% por década el oleaje en dicha dirección.

### 3.1.2. Altura de ola significativa

En este punto analizaremos la evolución año a año del de la altura de ola significativa que recibimos en cada una de las 6 direcciones que tras haber realizado el análisis de las direcciones del oleaje, podemos concluir que disponen de suficientes datos. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270°, 300°, 330°, 0°, 30° y 60°.

**Sector 270º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.10.

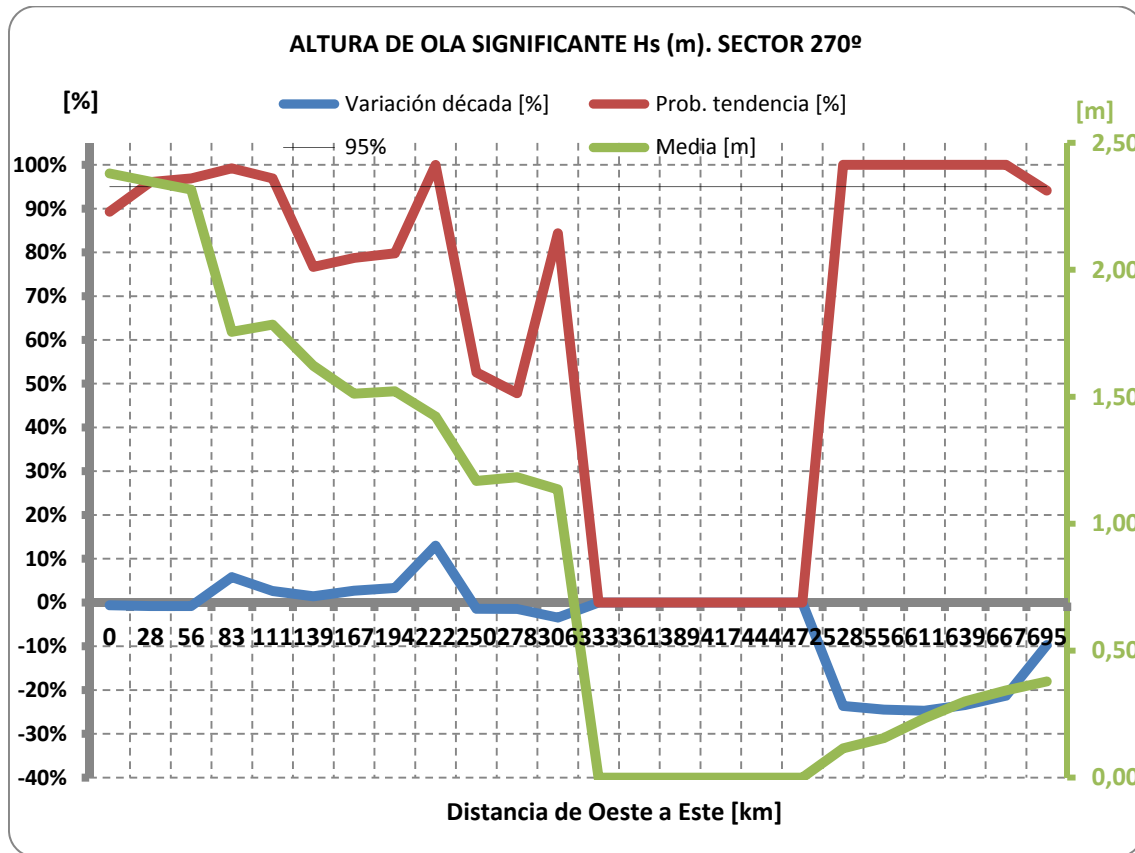


Figura 3.10. Sector 270º

Anteriormente en el análisis de las direcciones del oleaje habíamos observado que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega.

Por lo tanto, si nos fijamos únicamente en los tres primeros nodos SIMAR, es decir, los situados frente a las costas gallegas y que abarcan hasta una distancia de aproximadamente 56 kilómetros desde el origen, podemos apreciar los siguientes resultados (Tabla 3.3).

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	-0,64%	-0,80%	-0,82%
probabilidad exista relación	89,29%	96,06%	96,91%
Hs media (m)	2,38	2,35	2,32

Tabla 3.3. Resultados sector 270º para los tres primeros nodos

Se aprecia que en este tramo del litoral gallego, el oleaje procedente del sector 270º posee una altura de ola significativa media muy elevada, de casi 2,5 metros, cerca del corte que fijamos en la cornisa cantábrica como temporal  $H_s > 3m$ , según la ROM. La altura de ola media disminuye conforme nos situamos más al Este, dado que la influencia de la costa afecta a los resultados. El valor tan elevado es debido a que dicho oleaje procede del mar Atlántico y por lo tanto es un oleaje con un fetch muy grande.

La tendencia es que la altura media de dicho oleaje se mantenga aproximadamente constante década tras década (no llegando al 1%), siendo los resultados de los test F-Fisher poseedores de una gran correlación.

### Sector 300º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.11

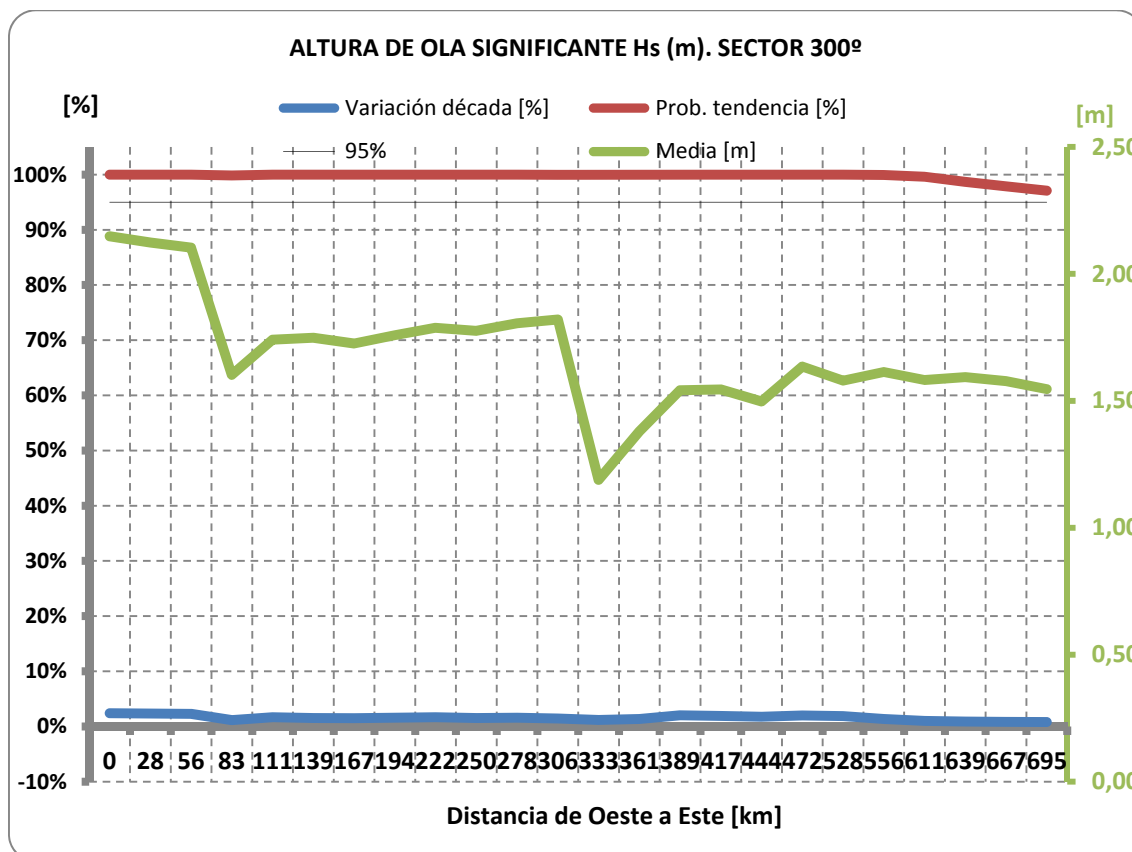


Figura 3.11. Sector 300º

De nuevo pueden observarse las discontinuidades producidas aproximadamente a los 85 y 350 kilómetros, que como ya se ha comentado, no dejan de ser irregularidades locales.

Salvo estos puntos, si que observamos tres zonas bien diferenciadas en cuanto a altura de ola media significativa se refiere. El litoral gallego, en que el valor medio ronda los 2,15 metros, el litoral asturiano donde la altura media ronda los 1,75 metros y el litoral de Cantabria y el País Vasco, donde dicho valor disminuye por debajo de los 1,6 metros.

En cuanto a la tendencia destaca un aumento general de la altura de ola en este sector de alrededor de un 2% por década, siendo este resultado contrastado ampliamente por los test F-Fisher.

### Sector 330º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.12

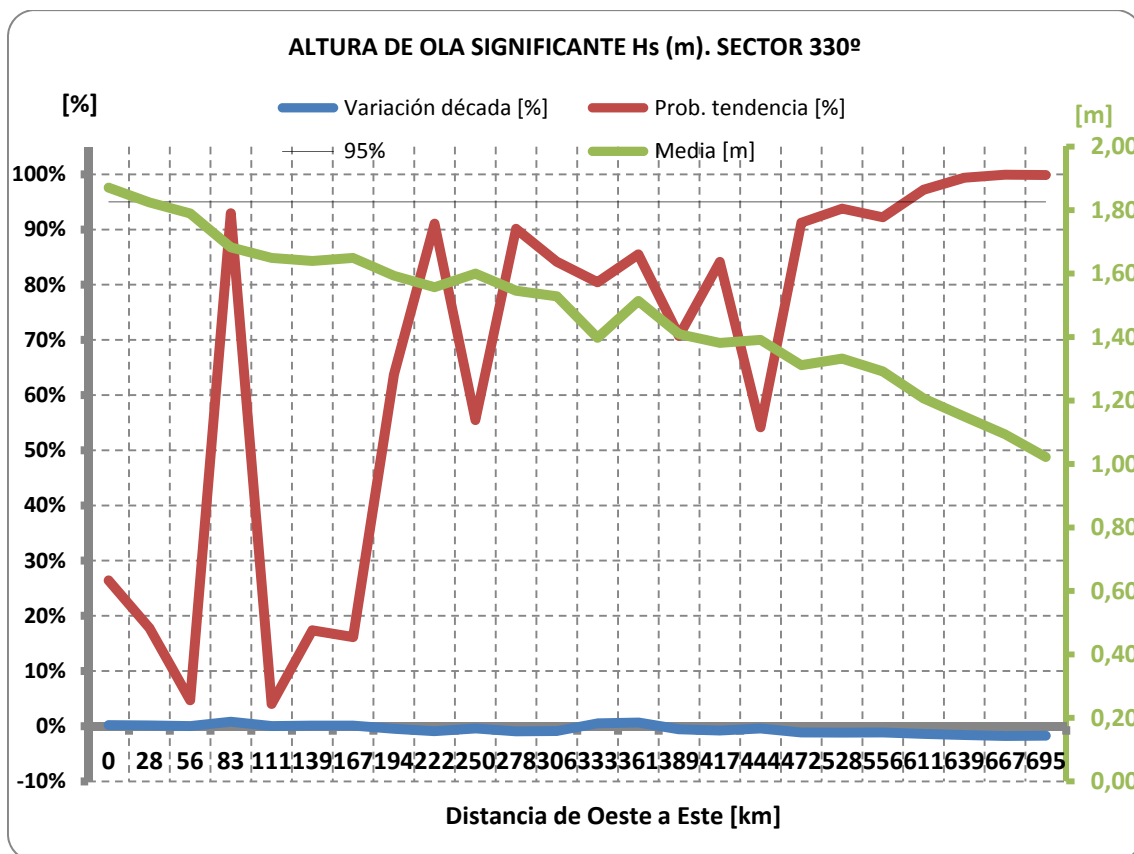


Figura 3.12. Sector 330º

En el actual sector, como ya se vio anteriormente, se disponen de datos suficientes como para poder estimar con claridad las tendencias.

Sin embargo, como se puede apreciar, dado que la variación por década es muy próxima a 0% la fiabilidad de las tendencias es muy baja y por lo tanto no debemos tenerlas en cuenta.

Es decir, cuando las variaciones son de un 3-4% o superior, la tendencia parece suficientemente clara y los test F-Fisher lo certifican. Mientras que cuando las tendencias son pequeñas, por ejemplo 0,1%, los test no tienen suficiente precisión como para asegurarlo, así pues nos salen fiabilidades muy bajas.

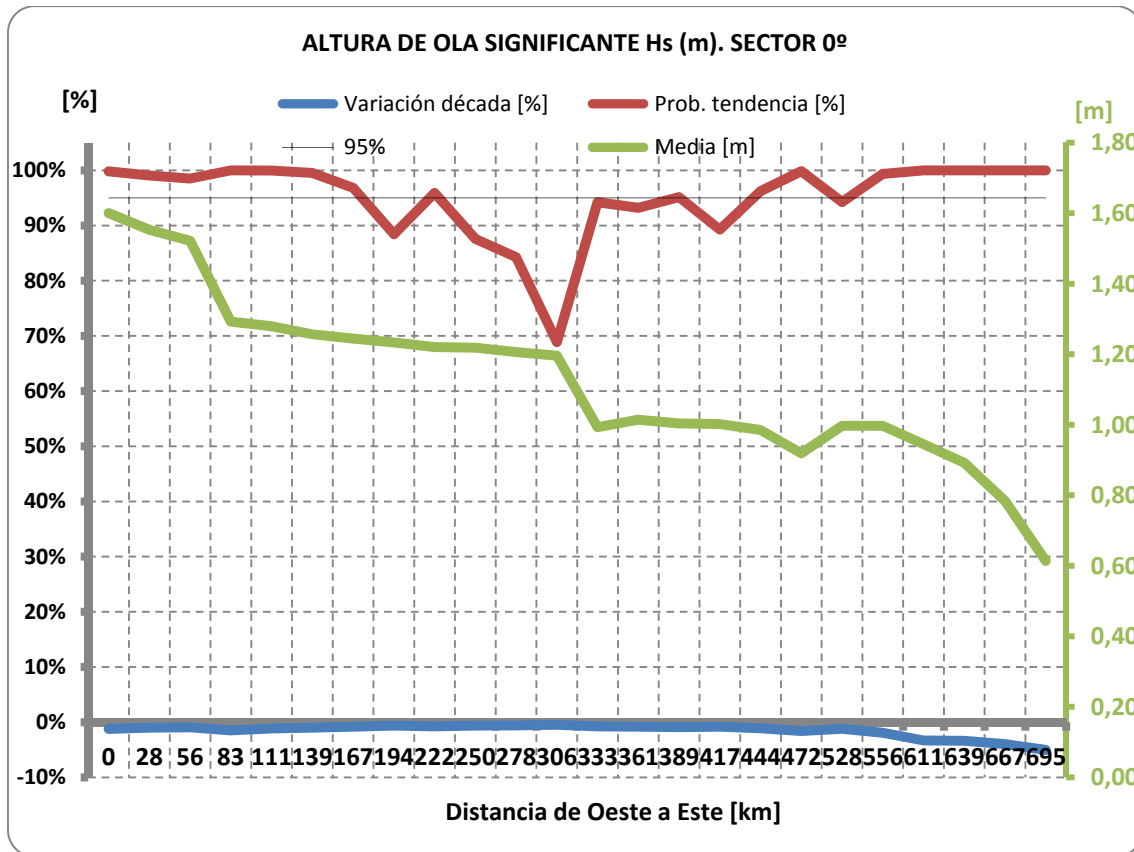
Por lo tanto, podemos suponer que en el sector 330º el oleaje no está variando su altura media significativa.

Por último, resaltar la clara disminución paulatina que sufre la altura media de la altura de ola cuando nos desplazamos desde el oeste hacia el este, pasamos desde una altura media de 1,9 metros aproximadamente hasta 1 metro. Es decir, una diferencia de aproximadamente 1 metros.

El motivo por el cuál, a diferencia del sector 300º, no se producen escalones tan evidentes sino que todo es más suave es debido a que cuanto más perpendicular es el oleaje respecto a la costa, es decir, más cercano a un ángulo de incidencia 0º, más igualdad habrá a lo largo del litoral, dado que el frente de onda avanzará aproximadamente igual para todo el litoral.

#### **Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.13



*Figura 3.13 Sector 0º*

Para este sector debemos recordar que a partir del kilómetro 600 aproximadamente ya no disponemos de suficientes datos como para asegurar que los datos obtenidos son fiables.

De nuevo en este sector denotamos discontinuidades evidentes en los puntos 80 y 350 kilómetros.

Existen 2 tipos de discontinuidad. La discontinuidad producida entre el litoral gallego y el litoral asturiano, debido a que en el sector 0º el litoral gallego sigue recibiendo oleaje con una zona de generación mucho mayor (no influenciada aún por el saliente geográfico de la Bretaña francesa) mientras que en el litoral cantábrico este tiene una zona de generación menor y por lo tanto menor altura. Además, su posición es mucho más avanzada respecto a esta dirección, impidiendo la pérdida de energía de dicho oleaje. Esta discontinuidad es acusada, de alrededor de 60 centímetros de altura media de ola.

Por otro lado existe la discontinuidad entre el litoral asturiano y el cantábrico-vasco, debido principalmente de nuevo al fetch, a la proximidad de la costa francesa y a la existencia de la plataforma continental de ésta. Sin embargo aquí la diferencia no es tan notoria, siendo de alrededor de 25 centímetros.

La tendencia, no muy fiable tal y como demuestran los test F-Fisher, denota una disminución débil, de alrededor de un 1% por década.

### **Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.14

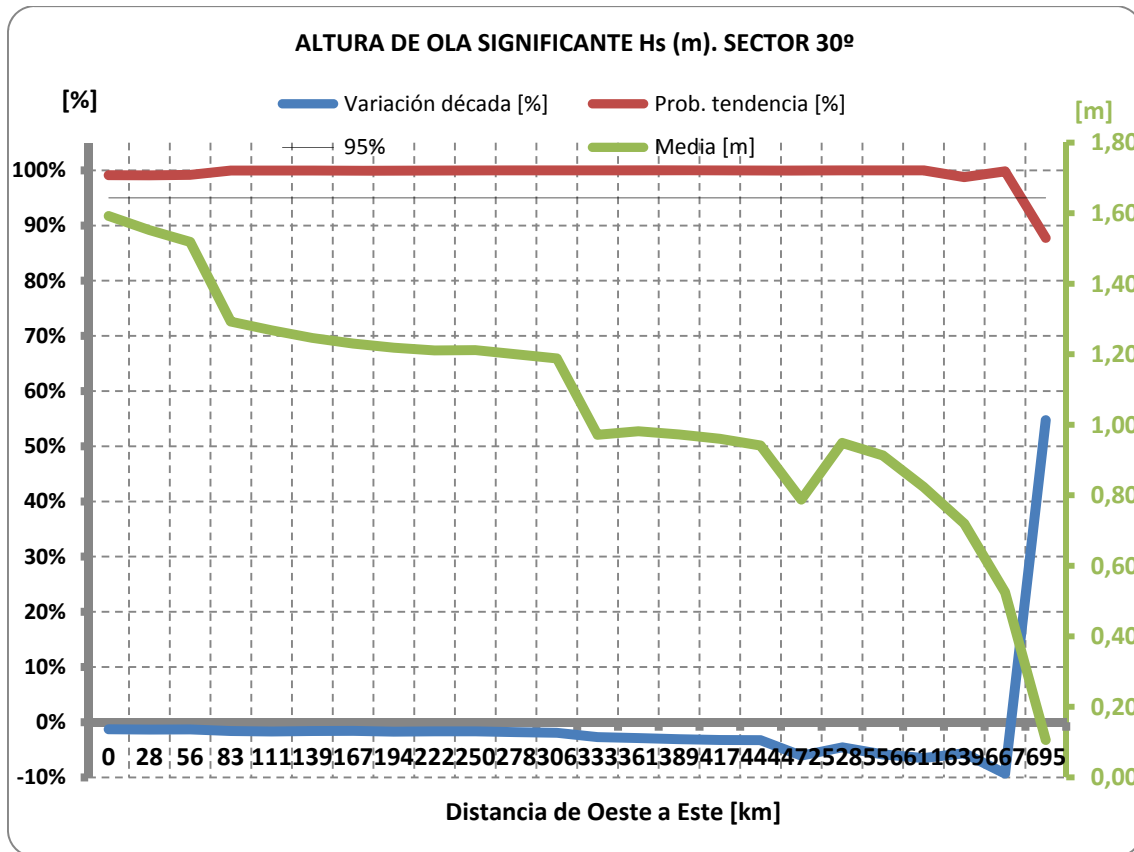


Figura 3.14. Sector 30º

El sector 30º comienza ya a ser uno de los sectores en que el oleaje que arriba a los nodos es escaso e irregular como hemos visto anteriormente. Su representatividad a partir de los 400 km es menor al 5% y por lo tanto no debería tenerse en cuenta.

Las diferencias en este sector no son tan acentuadas como en el anterior, principalmente como se ha denotado antes, porque las zonas de generación comienzan a asemejarse. Sin embargo dichas diferencias siguen siendo importantes, de alrededor de 40 cm en la primera transición y de unos 20 centímetros en la segunda.

Los valores medios descienden respecto al sector de 0º como era de esperar. Por último las tendencias, fiables según el test F-Fisher, denotan una disminución de alrededor de un 1,5% por década.

#### Sector 60º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.15

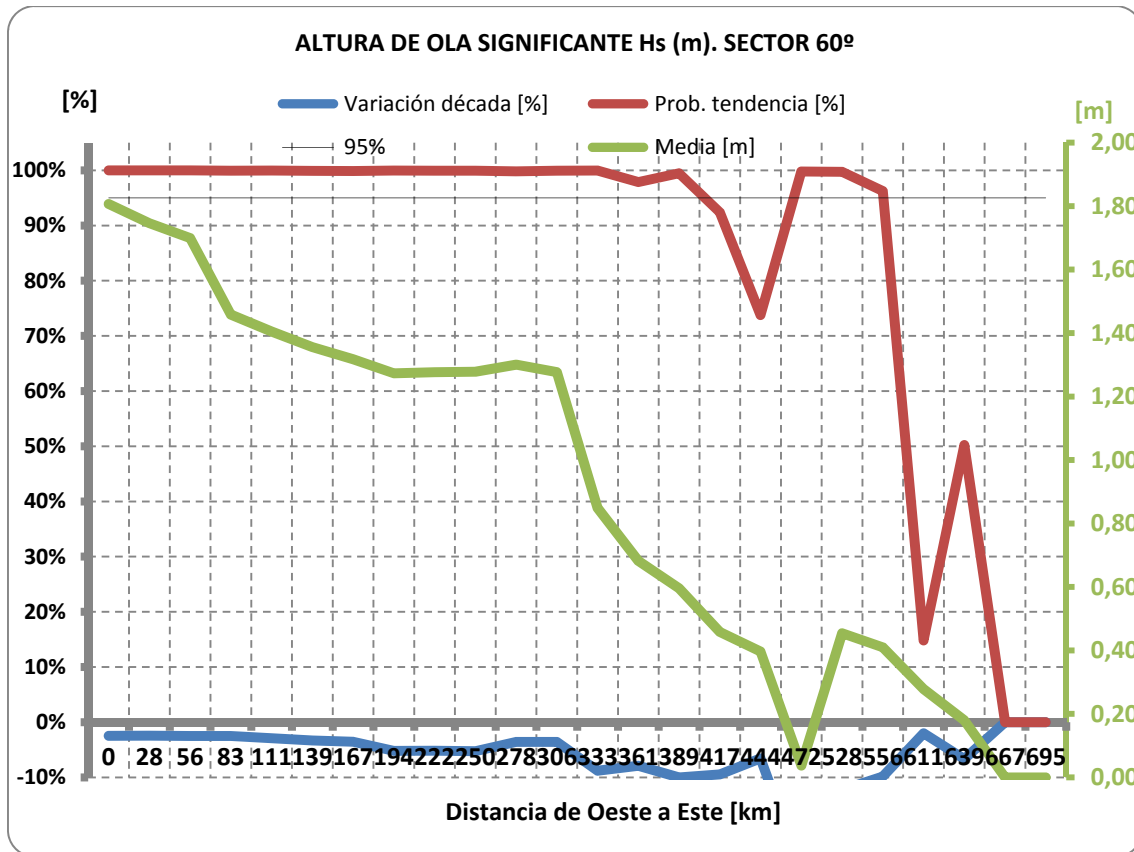


Figura 3.15. Sector 60º

De la misma forma que en el sector inicial de 270º, para el análisis de dicho sector deberemos despreciar los nodos situados más allá del litoral gallego, dado que el sector 60º no es representativo.

Para los tres nodos situados sobre el litoral gallego, presentamos los datos obtenidos en la Tabla 3.4

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	-2,48%	-2,44%	-2,50%
probabilidad exista relación	99,99%	99,99%	99,99%
Hs (m) medio	1,81	1,75	1,70

Tabla 3.4. Resultados obtenidos en el litoral gallego

Si bien del sector 60º no es muy relevante (alrededor de un 6%), si que parece que con una fiabilidad alta la tendencia es a disminuir alrededor de un 2,5% por década la altura media del oleaje proveniente de dicha dirección.

### 3.1.3. Energía del oleaje

En este punto analizaremos la evolución año a año del de la energía del oleaje que recibimos en cada una de las 6 direcciones que tras haber realizado el análisis de las direcciones del oleaje, podemos concluir que disponen de suficientes datos. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270º, 300º, 330º, 0º, 30º y 60º.

#### Sector 270º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.16

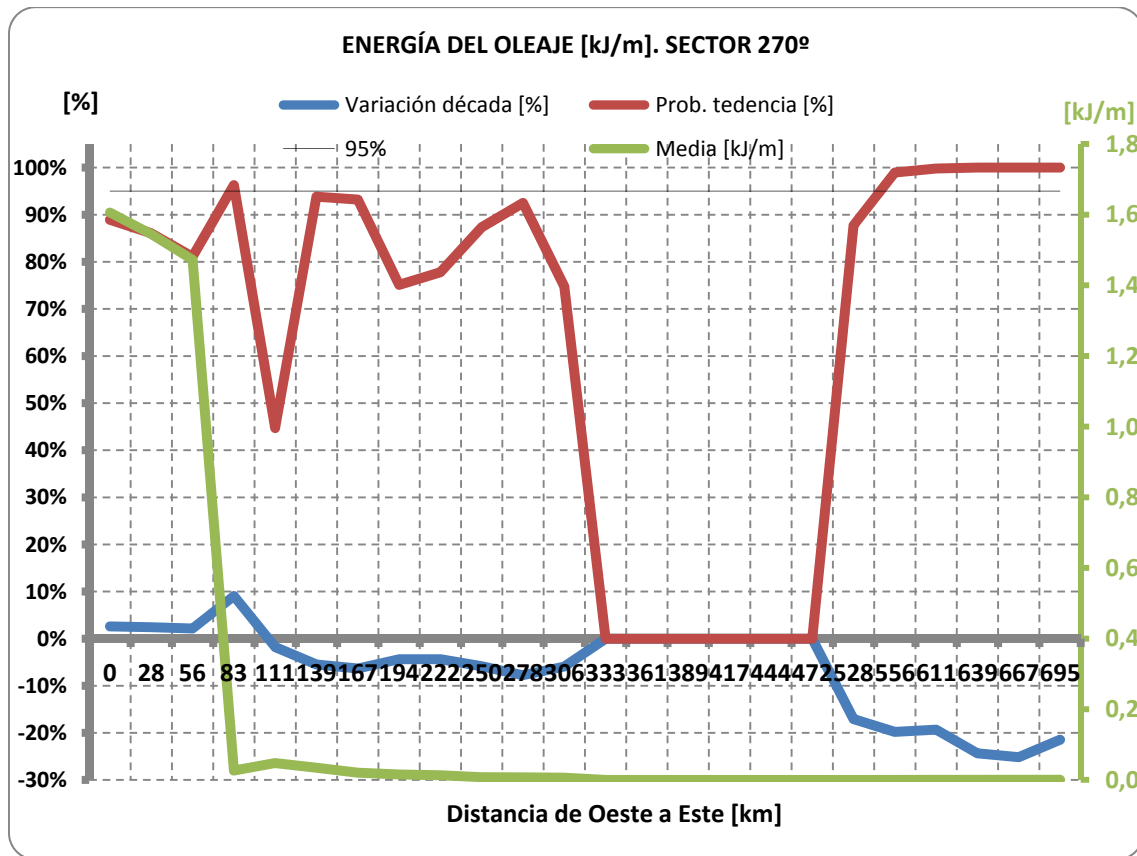


Figura 3.16. Sector 270º

Anteriormente en el análisis de las direcciones del oleaje habíamos observado que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega.

Dado que la energía ha sido calculada teniendo en cuenta también los momentos en que no nos llega energía, es decir, siendo esta el promedio anual y no el promedio de los momentos en que recibimos oleaje por este sector, en la gráfica queda reflejado el análisis hecho anteriormente, ya que menos en los puntos situados en el litoral gallego, la energía recibida por dicho sector es absolutamente despreciable.

Por lo tanto, si nos fijamos únicamente en los tres primeros nodos SIMAR, es decir, los situados frente a las costas gallegas y que abarcan hasta una distancia de aproximadamente 56 kilómetros desde el origen, podemos apreciar los siguientes resultados (Tabla 3.5).

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	2,60%	2,44%	2,16%
probabilidad exista relación	88,89%	86,06%	81,09%
Energía media (kJ/m)	1,6	1,5	1,5

Tabla 3.5. Resultados sector 270º para los tres primeros nodos

Se aprecia que en este tramo del litoral gallego, el oleaje procedente del sector 270º posee una energía media de alrededor de 1,5 kJ/m. Energía que como veremos es relevante, pues la energía total media ronda los 6,5 kJ/m.

La tendencia es que dicha energía del oleaje crezca aproximadamente un 2,5% por década. Sin embargo los test F-Fisher no muestran una gran fiabilidad, cosa que entra en concordancia con los resultados obtenidos en cuanto a altura media de ola se refiere, dado que allí las variaciones eran casi nulas. Es decir, no tendría sentido obtener unas fiabilidades muy altas en el aumento de la energía cuando anteriormente la tendencia del oleaje era a aumentar, pero de forma tan ligera que era casi despreciable.

### Sector 300º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.17

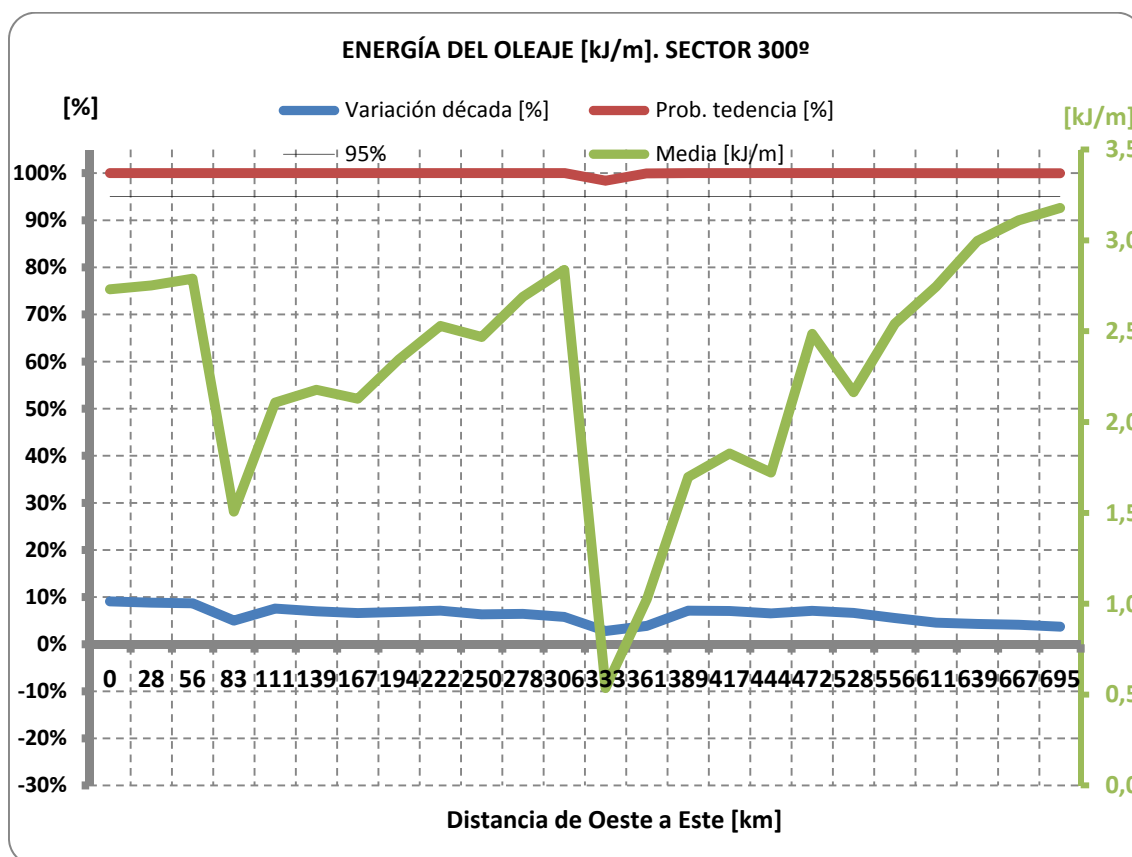


Figura 3.17. Sector 300º

De nuevo pueden observarse las discontinuidades producidas aproximadamente a los 85 y 350 kilómetros, que como ya se ha comentado, no dejan de ser irregularidades locales.

Esta vez si observamos como el sector 300º es determinante en la energía aportada en todo el litoral. Cabe destacar que ahora es en el extremo oriental donde dicho sector aporta más energía de oleaje. La energía del oleaje viene condicionada por dos factores: altura de ola y frecuencia. Cuanta mayor frecuencia y altura de ola, mayor energía. Si bien en la parte oriental hemos visto anteriormente que la altura de ola era menor que en la parte occidental, el hecho de que su frecuencia en este sector sea mayor nos acaba implicando una mayor energía promedio.

En cuanto a la tendencia, concuerda perfectamente con lo visto hasta ahora. Hemos visto que tanto la frecuencia como la altura de ola estaban aumentando entre un 3-4% i un 1-2% respectivamente en este sector con fiabilidades muy altas. Esto se ha traducido obviamente en un aumento muy considerable de la energía por década en este sector, de alrededor de un 6-10% dependiendo de la zona y con una fiabilidad según el test F-Fisher muy elevada.

### Sector 330º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.18.

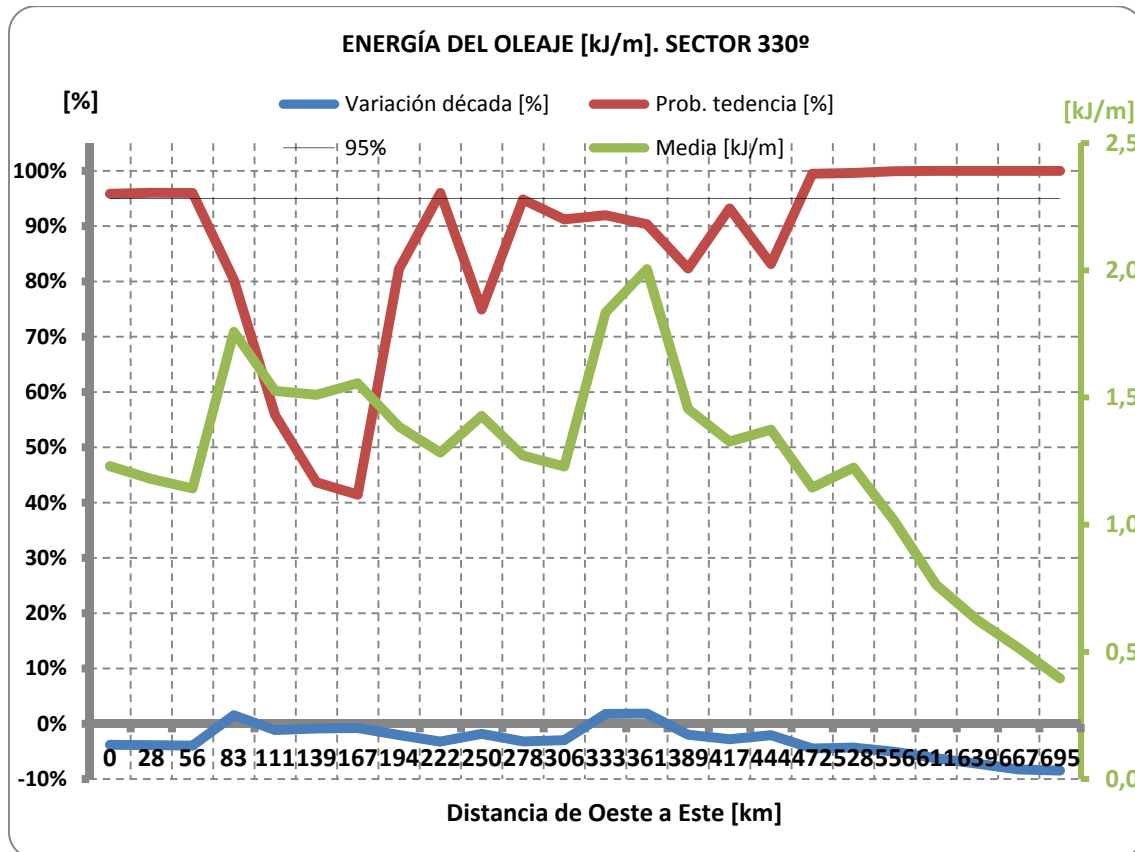


Figura 3.18. Sector 330º

El sector de 330º, si bien dispone de una gran cantidad de datos, dichos datos no muestran una correlación en tendencias fiable en cuanto a energía se refiere y que nos haga poder llegar a conclusiones según los test de fiabilidad.

Esto es consecuencia de los resultados obtenidos anteriormente en este sector para las frecuencias y las alturas medias de ola. Los resultados de frecuencias denotaban un descenso del 2-4% en general, mientras que las alturas significantes no acababan de desembocar en ninguna conclusión dada la poca fiabilidad.

Es por ello, que los resultados obtenidos en cuanto a la fiabilidad de la tendencia de la energía en el sector de 330º no son concluyentes y desembocan en una escasa fiabilidad de la cual no sería adecuado sacar conclusiones. Si que parece, sin embargo, que la energía en el sector está disminuyendo, aunque como ya se ha dicho, la fiabilidad no permite afirmarlo.

**Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.19.

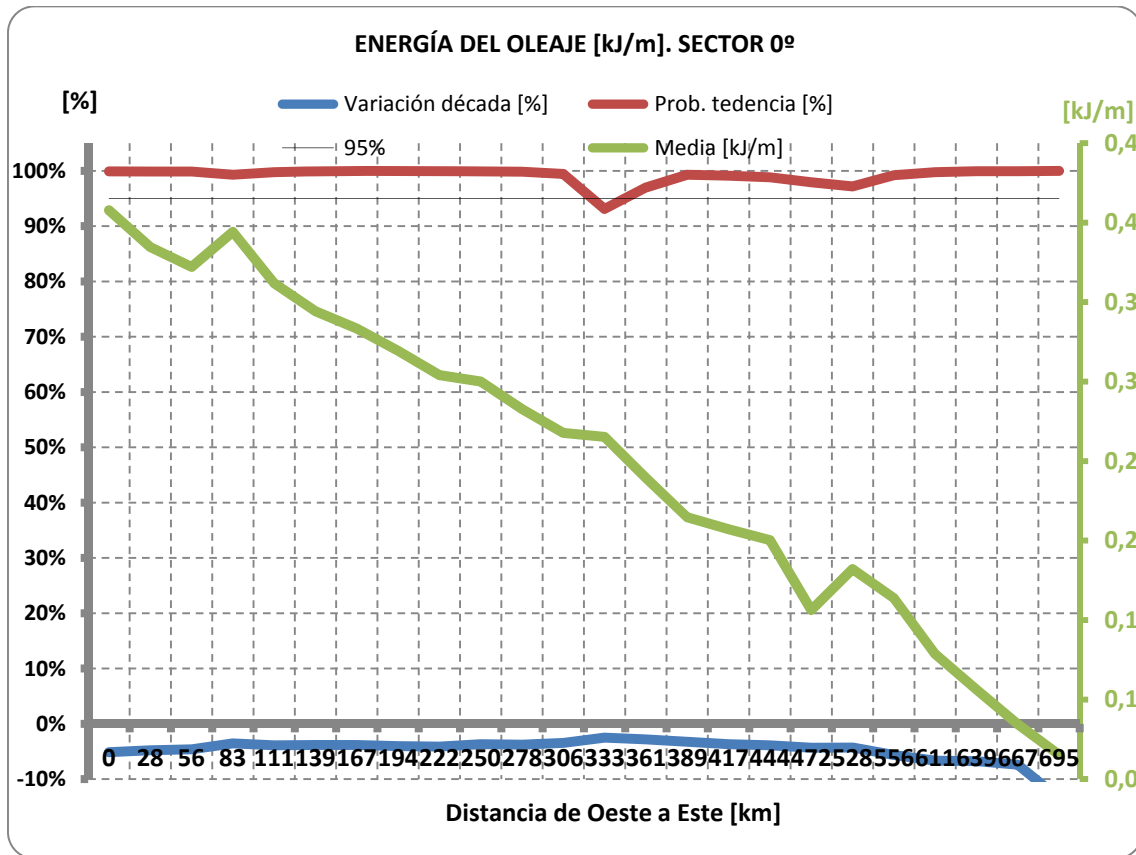


Figura 3.19. Sector 0º

Para este sector debemos recordar que a partir del kilómetro 600 aproximadamente ya no disponemos de suficientes datos como para asegurar que los datos obtenidos son fiables.

De nuevo en este sector denotamos discontinuidades evidentes en los puntos 80 y 350 kilómetros.

Si bien la energía del sector no es muy relevante en el cómputo global, si que es un sector en el cuál la tendencia es clara. Anteriormente habíamos observado como tanto la altura de ola como la frecuencia estaban disminuyendo con fiabilidades elevadas y esto se traduce en una disminución clara y fiable de la energía del sector.

**Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.20

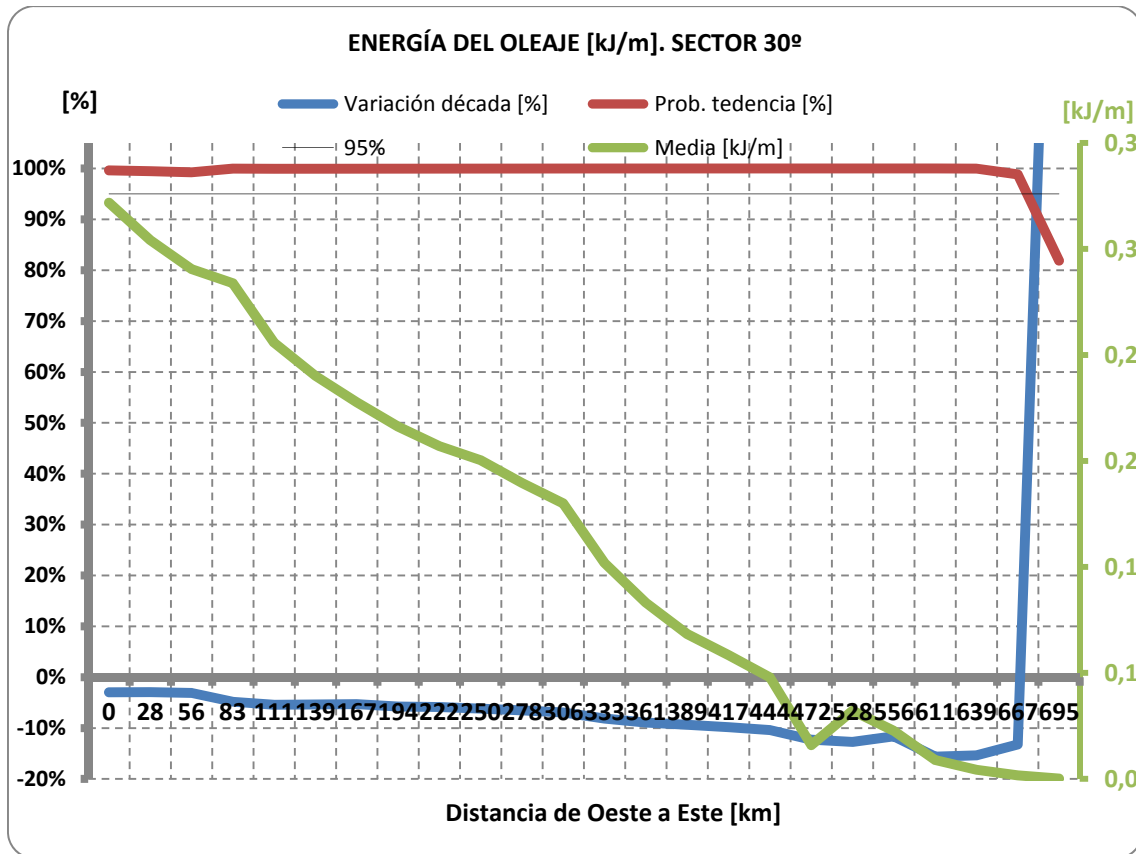


Figura 3.20. Sector 30º

El sector 30º comienza ya a ser uno de los sectores en que el oleaje que arriba a los nodos es escaso e irregular como hemos visto anteriormente. Su representatividad a partir de los 400 km es menor al 5% y por lo tanto no debería tenerse en cuenta.

Igual que en el sector 0º, este sector no es demasiado relevante en cuánto al cómputo global de energía, pero es cierto que como consecuencia de unas disminuciones tanto en altura de ola como en frecuencia en las que las fiabilidades eran elevadas, el resultado es un descenso notorio (de alrededor del 3-7%) por década en la energía procedente de dicho sector.

**Sector 60º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.21

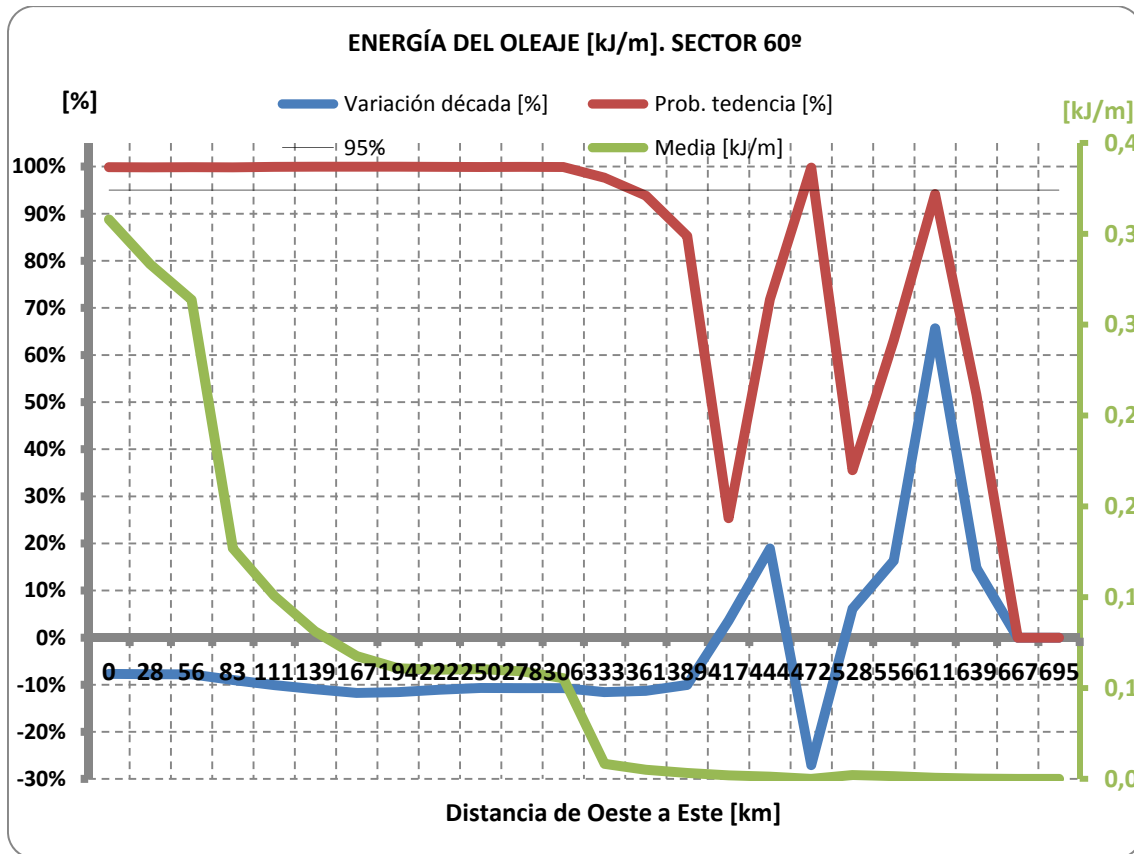


Figura 3.21. Sector 60°

De la misma forma que en el sector inicial de 270°, para el análisis de dicho sector deberemos despreciar los nodos situados más allá del litoral gallego, dado que el sector 60° no es representativo.

Para los tres nodos situados sobre el litoral gallego, presentamos los datos obtenidos en la Tabla 3.6.

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	-7,70%	-7,77%	-7,79%
probabilidad exista relación	99,86%	99,86%	99,88%
Energía media (kJ/m)	0,3	0,3	0,3

Tabla 3.6. Resultados obtenidos en el litoral gallego

Si bien el sector 60° no es muy relevante (alrededor de un 5% de la energía que reciben dichos nodos), si que parece que con una fiabilidad alta la tendencia es a disminuir alrededor de un 7,5% por década la energía procedente de dicho sector, por lo tanto nos hallamos ante una disminución muy abultada.

#### Variación total

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.22

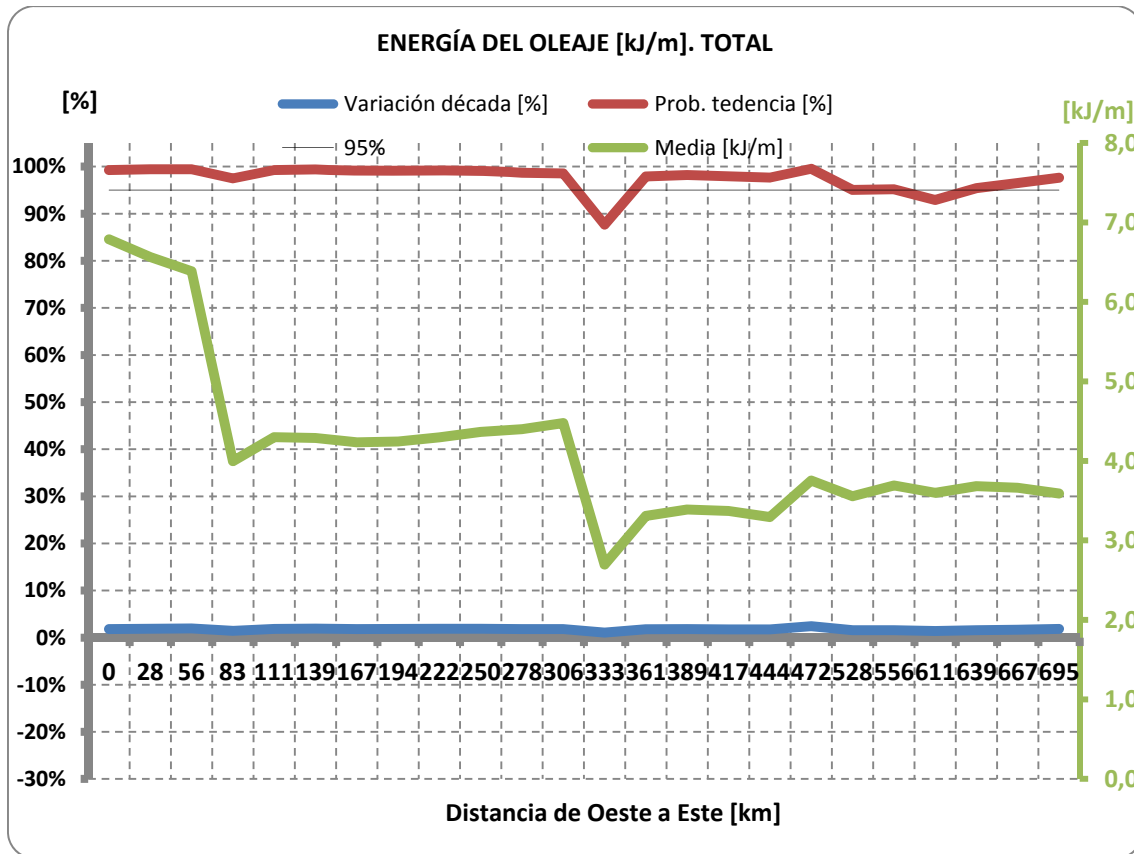


Figura 3.22. Energía total del oleaje

Por último procedemos a un análisis global del comportamiento de la energía media en el litoral cantábrico.

Se aprecia claramente como las diferencias entre zonas pueden llegar a ser casi del doble de energía, siguiendo la distribución esperable, pues en las zonas en que las olas son mayores se recibe mayor energía y en las más abrigadas por el golfo de Vizcaya menos.

En cuanto a la variación por décadas, ésta es positiva y de valor 2% aproximadamente en todo el litoral. Siendo las fiabilidades obtenidas mediante los test F-Fisher altas en general, menos en los nodos especiales que ya se han comentado anteriormente, donde sus singularidades bajan la fiabilidad.

Por lo tanto, en un análisis global observamos que la energía está aumentando ligeramente. Esto es concordante con los resultados obtenidos por sectores, en donde disminuía muy ligeramente en general menos en el sector de los 300º, en el cuál aumentaba considerablemente, desembocando en un aumento global.

#### 3.1.4. Potencia del oleaje

En este punto analizaremos la evolución año a año de la potencia del oleaje que recibimos en cada una de las 6 direcciones que tras haber realizado el análisis de las direcciones del oleaje, podemos concluir que disponen de suficientes datos. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270º, 300º, 330º, 0º, 30º y 60º.

**Sector 270º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.23

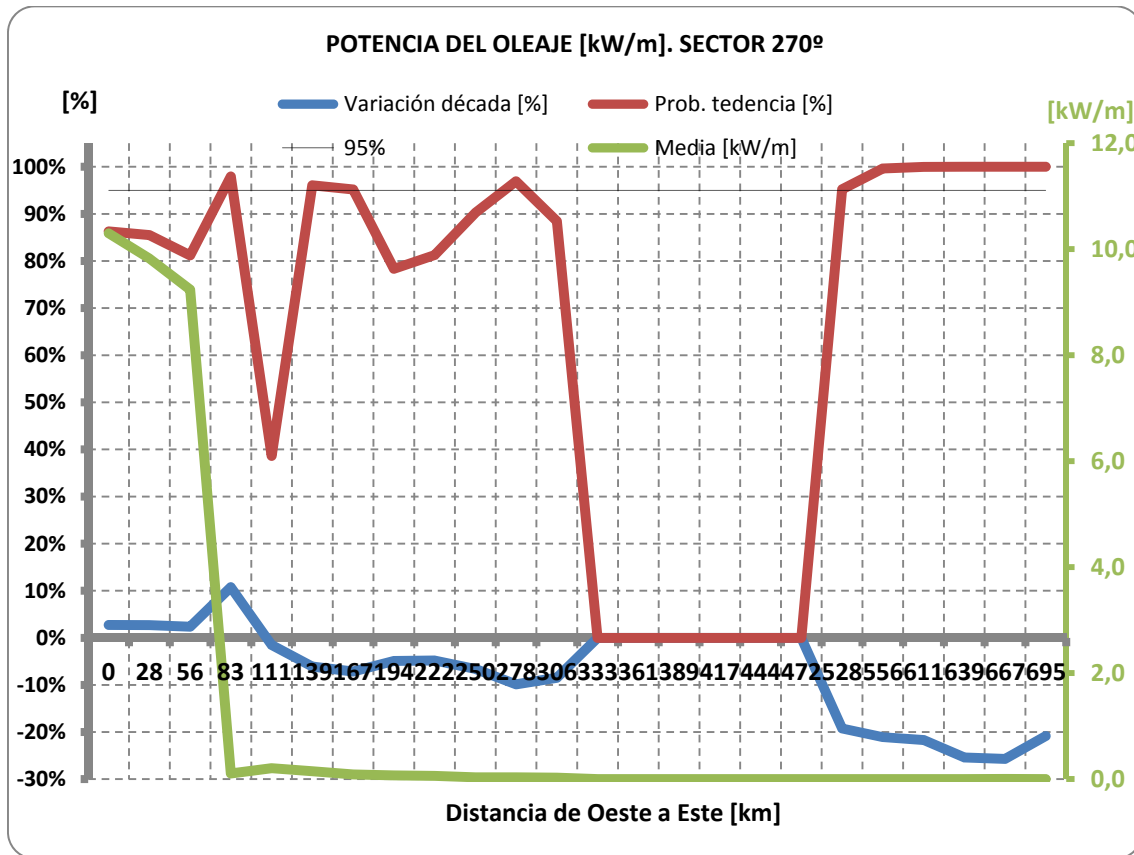


Figura 3.23. Sector 270º

Anteriormente en el análisis de las direcciones del oleaje habíamos observado que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega.

Al igual que anteriormente la energía, debido a la escasa frecuencia de oleaje en los puntos que no forman parte del litoral gallego, la potencia en estos es despreciable.

Por lo tanto, si nos fijamos únicamente en los tres primeros nodos SIMAR, es decir, los situados frente a las costas gallegas y que abarcan hasta una distancia de aproximadamente 56 kilómetros desde el origen, podemos apreciar los siguientes resultados (Tabla 3.7).

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	2,74%	2,69%	2,38%
probabilidad exista relación	86,29%	85,51%	81,19%
Potencia media (kW/m)	10,3	9,8	9,2

Tabla 3.7 Resultados sector 270º para los tres primeros nodos

Se aprecia que en este tramo del litoral gallego, el oleaje procedente del sector 270º posee una potencia media de alrededor de 10 kW/m. Potencia que como veremos es relevante, pues la potencia total media

ronda los 40 kW/m. Además, como comparación, en el Mediterráneo raramente se alcanza dicha potencia excepto en casos de temporal.

La tendencia es que dicha energía del oleaje crezca aproximadamente un 2,5% por década. Sin embargo los test no muestran una gran fiabilidad, cosa que entra en concordancia con los resultados obtenidos en cuanto a altura media de ola se refiere, dado que allí las variaciones eran casi nulas. Es decir, no tendría sentido obtener unas fiabilidades muy altas en el aumento de la energía cuando anteriormente la tendencia del oleaje era a aumentar, pero de forma tan ligera que era casi despreciable. Cabe resaltar, que no se ha realizado un estudio del período dado que este se considera constante [8].

### Sector 300º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.24

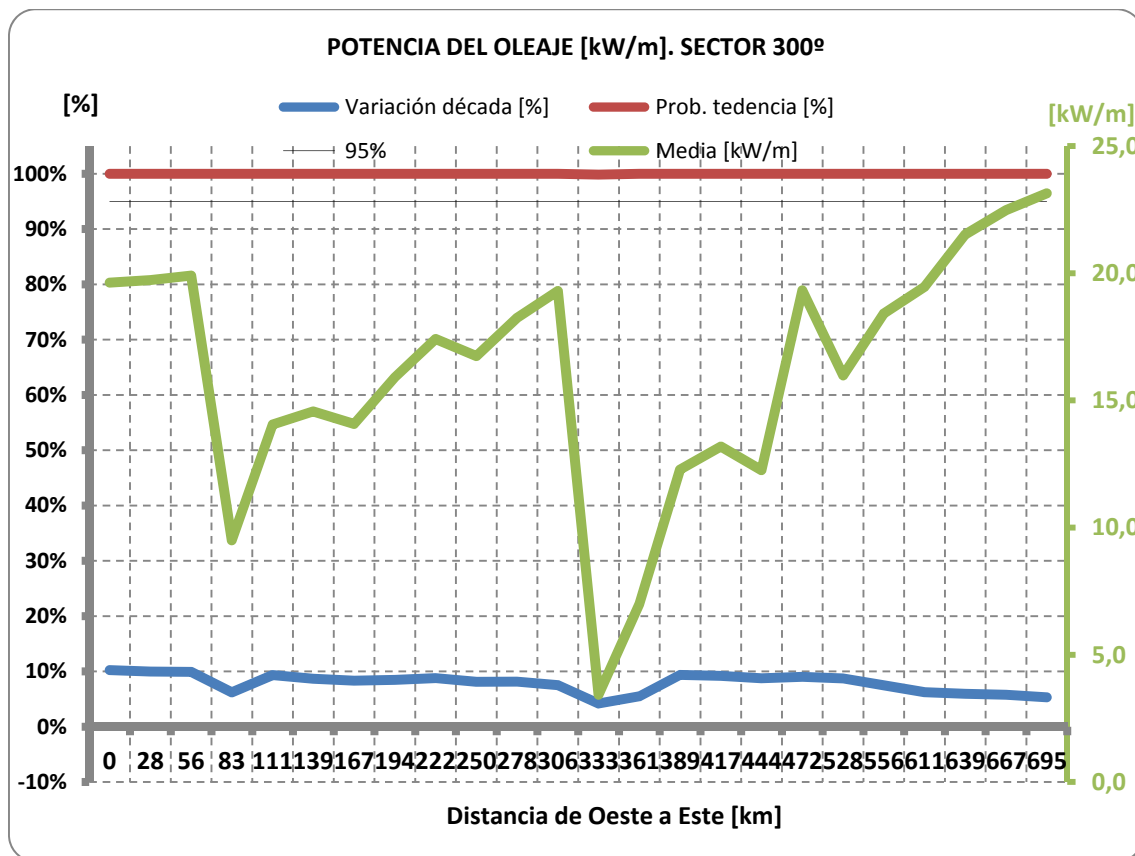


Figura 3.24. Sector 300º

De nuevo pueden observarse las discontinuidades producidas aproximadamente a los 85 y 350 kilómetros, que como ya se ha comentado, no dejan de ser irregularidades locales.

Como era de esperar, observamos como el sector 300º es determinante en la potencia del litoral cantábrico, suponiendo casi un 50% de la total. Nos hallamos ante una distribución muy parecida a la de la energía, dado que el período en esta dirección aumenta ligeramente y por lo tanto prácticamente estamos multiplicando por un coeficiente amplificador.

En cuanto a la tendencia, concuerda perfectamente con lo visto hasta ahora. Hemos visto que tanto la frecuencia como la altura de ola estaban aumentando entre un 3-4% i un 1-2% respectivamente en este sector con fiabilidades muy altas y además los estudios presentan un ligero aumento también del período. Esto se ha traducido obviamente en un aumento muy considerable de la energía por década en

este sector, de alrededor de un 8-10% dependiendo de la zona y con una fiabilidad según en los test estadísticos muy elevada.

**Sector 330º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.25

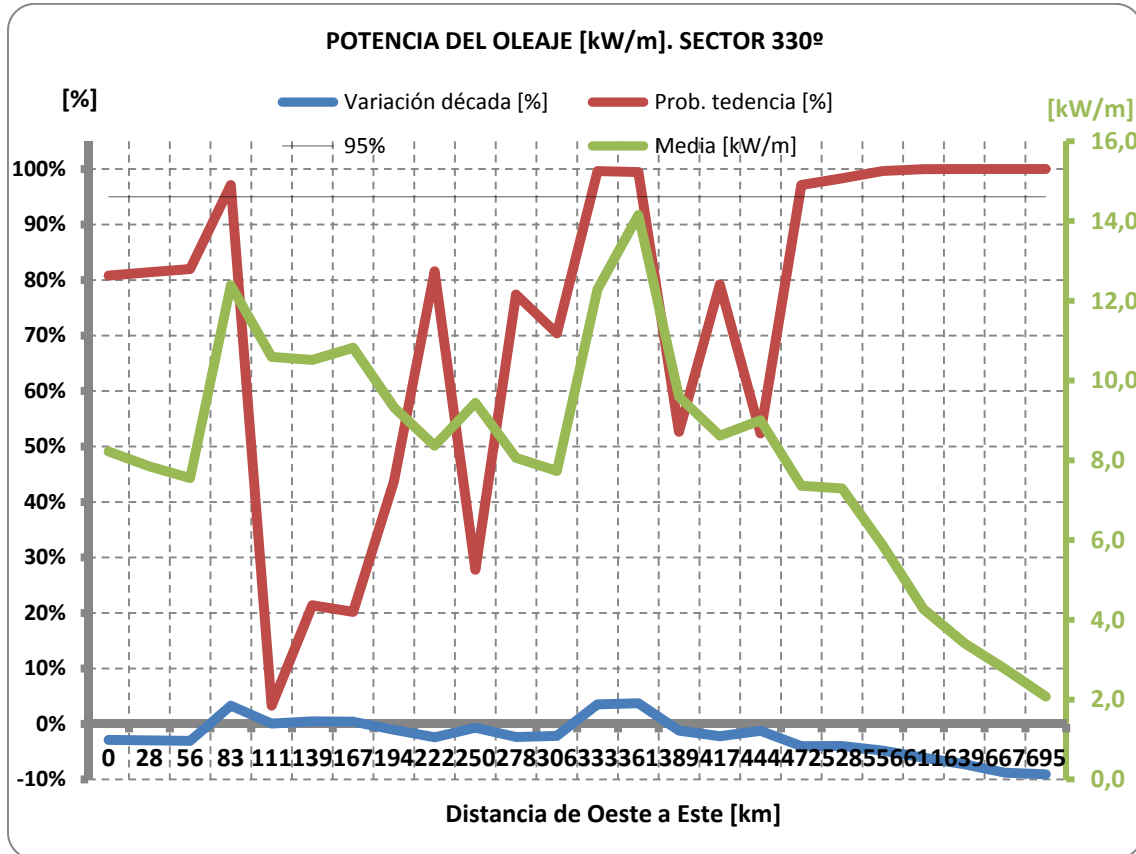


Figura 3.25. Sector 330º

El sector de 330º, si bien dispone de una gran cantidad de datos, dichos datos no muestran una correlación en tendencias fiable en cuanto a energía se refiere y que nos haga poder llegar a conclusiones según los test de fiabilidad.

Esto es consecuencia de los resultados obtenidos anteriormente en este sector para las frecuencias y las alturas medias de ola. Los resultados de frecuencias denotaban un descenso del 2-4% en general, mientras que las alturas significantes no acababan de desembocar en ninguna conclusión dada la poca fiabilidad. Y a esto le sumamos que la tendencia del período en este sector también sufre mucha incertidumbre, desembocamos en fiabilidades mucho inferiores a la de la energía.

Es por ello, que los resultados obtenidos en cuanto a la fiabilidad de la tendencia de la potencia en el sector de 330º no son concluyentes y desembocan en una escasa fiabilidad de la cual no sería adecuado sacar conclusiones. Si que parece, sin embargo, que la potencia en el sector está disminuyendo, aunque como ya se ha dicho, la fiabilidad no permite afirmarlo.

**Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.26

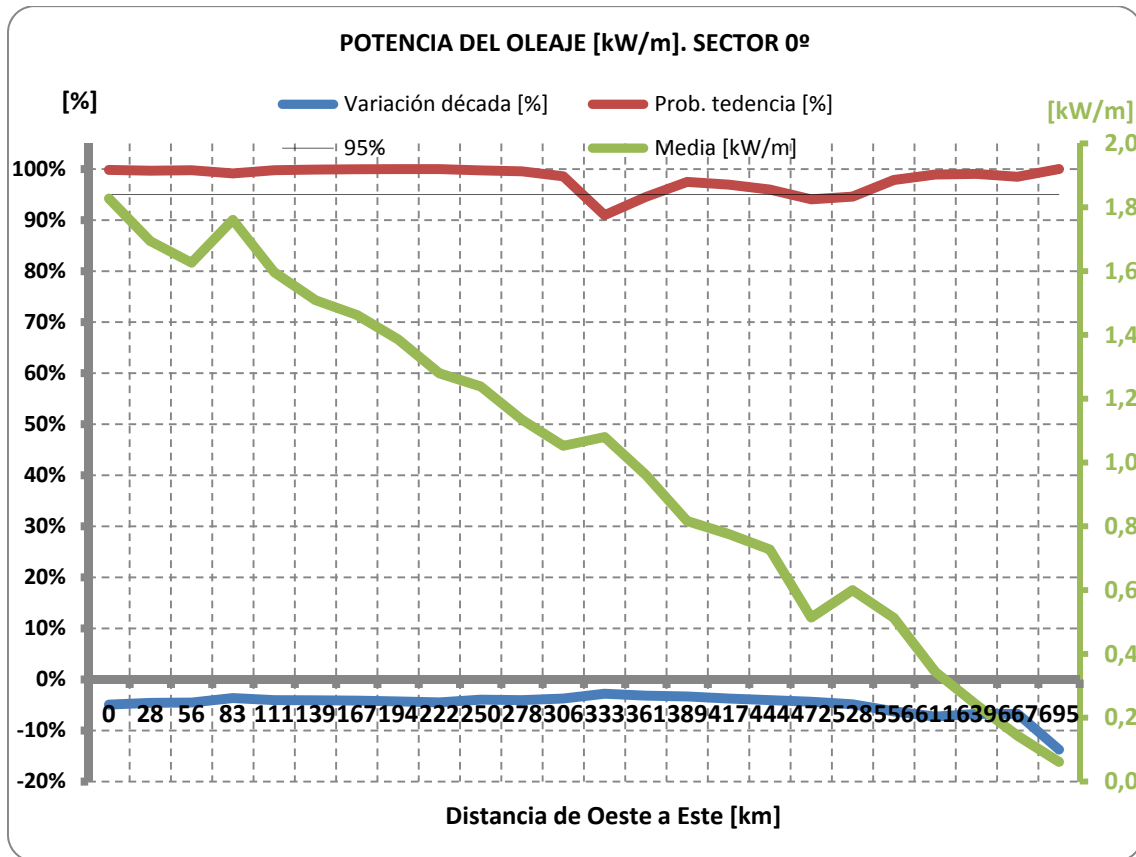


Figura 3.26. Sector 0º

Para este sector debemos recordar que a partir del kilómetro 600 aproximadamente ya no disponemos de suficientes datos como para asegurar que los datos obtenidos son fiables.

De nuevo en este sector denotamos discontinuidades evidentes en los puntos 80 y 350 kilómetros.

Si bien la potencia del sector no es muy relevante en el cómputo global, si que es un sector en el cuál la tendencia es clara. Anteriormente habíamos observado como tanto la altura de ola como la frecuencia estaban disminuyendo con fiabilidades elevadas. Si a esto le añadimos que el período también muestra un descenso claro, esto se traduce en una disminución clara y fiable de la potencia del sector.

**Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.27.

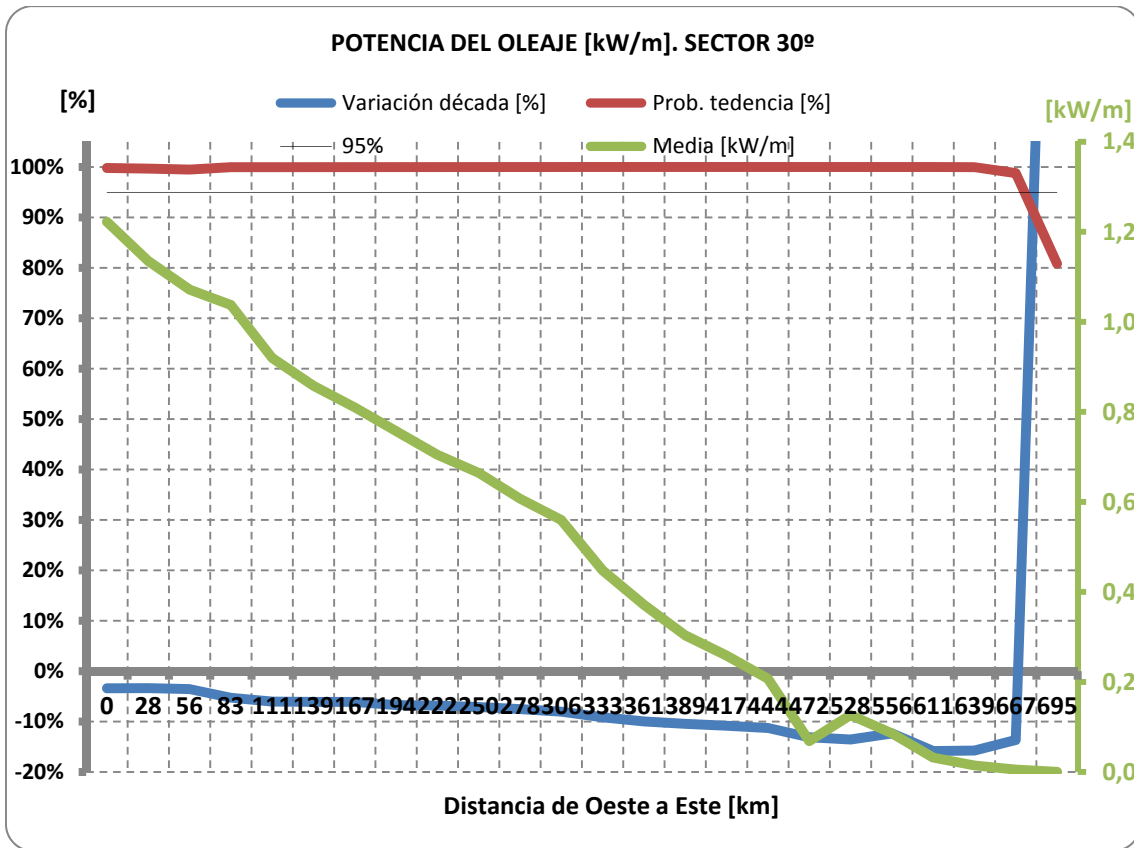


Figura 3.27. Sector 30º

El sector 30º comienza ya a ser uno de los sectores en que el oleaje que arriba a los nodos es escaso e irregular como hemos visto anteriormente. Su representatividad a partir de los 400 km es menor al 5% y por lo tanto no debería tenerse en cuenta.

Igual que en el sector 0º, este sector no es demasiado relevante en cuánto al cómputo global de potencia, pero es cierto que como consecuencia de unas disminuciones tanto en altura de ola como en frecuencia en las que las fiabilidades eran elevadas, el resultado es un descenso notorio (de alrededor del 3-7%) por década en la potencia procedente de dicho sector.

**Sector 60º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.28.

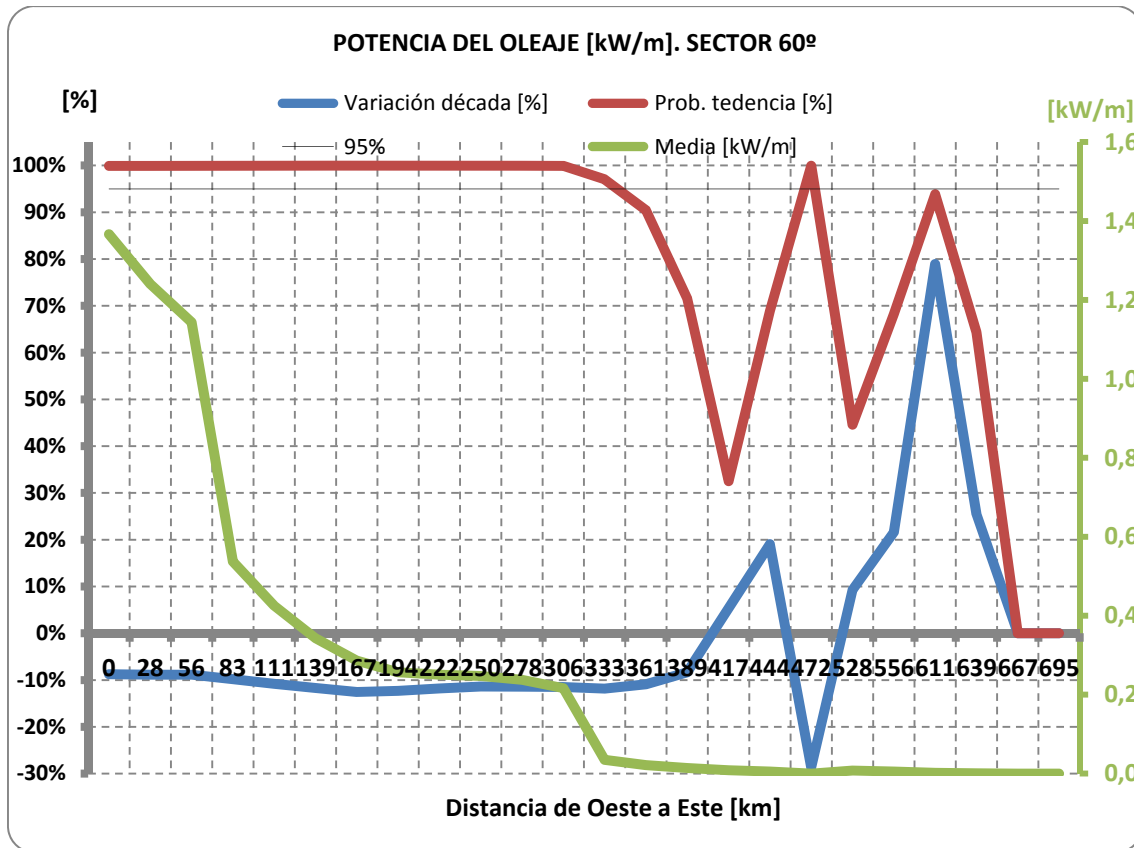


Figura 3.28. Sector 60°

De la misma forma que en el sector inicial de 270°, para el análisis de dicho sector deberemos despreciar los nodos situados más allá del litoral gallego, dado que el sector 60° no es representativo.

Para los tres nodos situados sobre el litoral gallego, presentamos los datos obtenidos en la Tabla 3.8

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	-8,75%	-8,84%	-8,85%
probabilidad exista relación	99,92%	99,92%	99,93%
Potencia (kW/m)	1,4	1,2	1,1

Tabla 3.8. Resultados en el litoral gallego

Si bien el sector 60° no es muy relevante (alrededor de un 5% de la potencia de dichos nodos), si que parece que con una fiabilidad alta la tendencia es a disminuir alrededor de un 8,5% por década la potencia de dicho sector, por lo tanto nos hallamos ante una disminución muy abultada.

#### Variación total

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.29

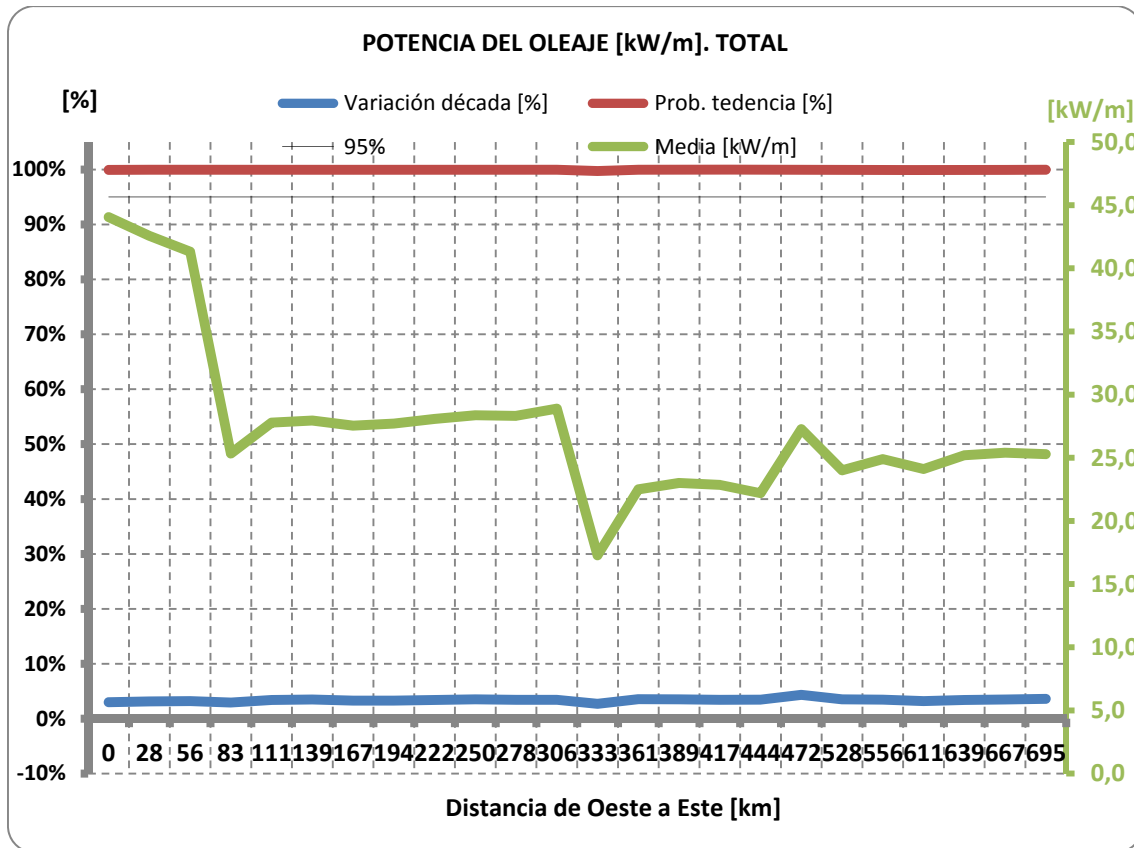


Figura 3.29. Potencia total del oleaje en el litoral cantábrico

Un análisis global de la potencia nos permite comprobar que igual que la energía, la estratificación en 3 niveles separados de potencia es evidente.

En el sector del litoral gallego es donde se dispone de una mayor potencia, de casi 45 kW/m, que como se verá posteriormente, es muy interesante para la instauración de energía renovable undimotriz.

Por otro lado, con una gran fiabilidad denotamos un aumento del 2-3% por década en la potencia total que nos llega al litoral cantábrico, cosa muy útil cuando posteriormente analicemos el potencial de la energía undimotriz.

### 3.1.5. Direcciones en temporal

En este punto analizaremos la evolución año a año del % de datos que recibimos en cada una de las 12 direcciones analizadas correspondientes a temporal. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

La condición de temporal la hemos establecido mediante la definición de la ROM para el litoral Cantábrico, siendo ésta de  $H_s > 3m$ .

Su importancia también radica en que el análisis de las direcciones del oleaje nos permitirá saber el número de datos para cada sector y por lo tanto descartar aquellos nodos en que no dispongamos suficientes datos sobre un sector como para que el análisis sea fiable.

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270°, 300°, 330°, 0°, 30° y 60°.

**Sector 270º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.30

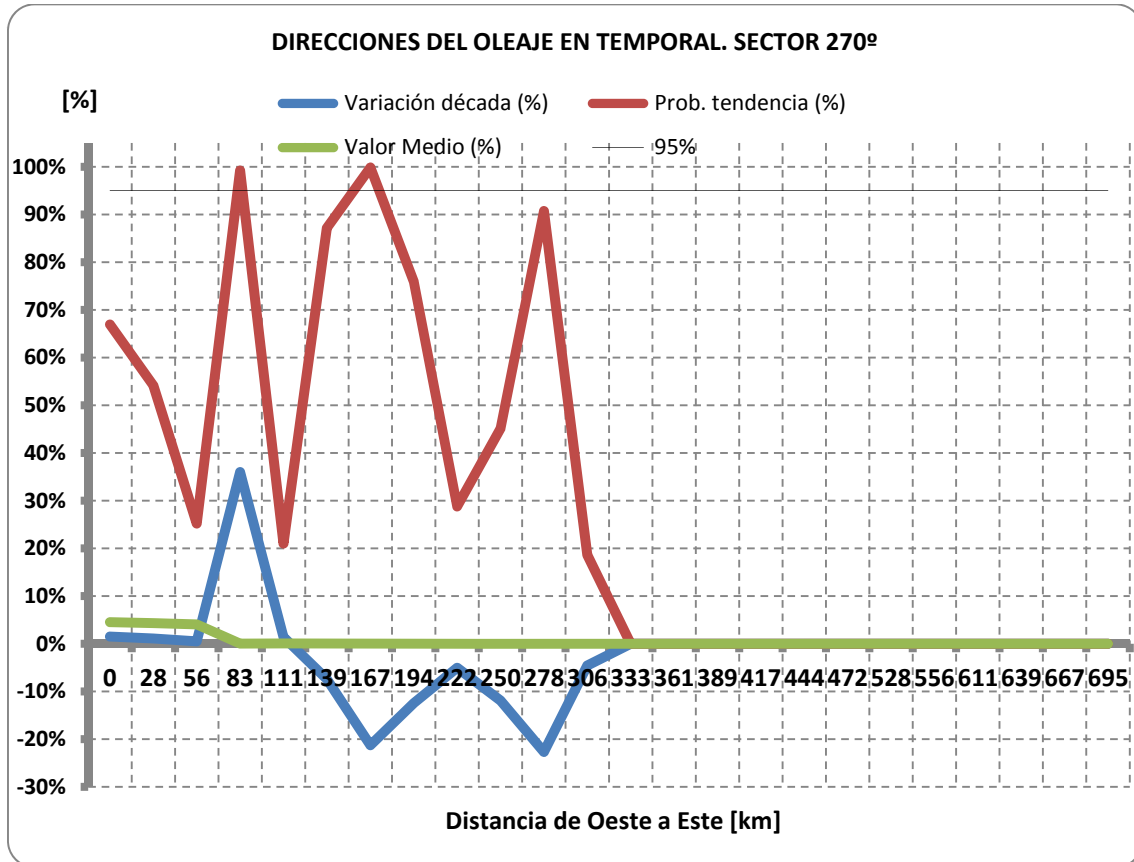


Figura 3.30. Sector 270º

Se observa que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega.

Sin embargo los test F-Fisher no demuestran que el % de temporales provenientes de dicha dirección mantenga una tendencia fiable, así pues, se descarta cualquier conclusión en ésta dirección.

**Sector 300º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.31

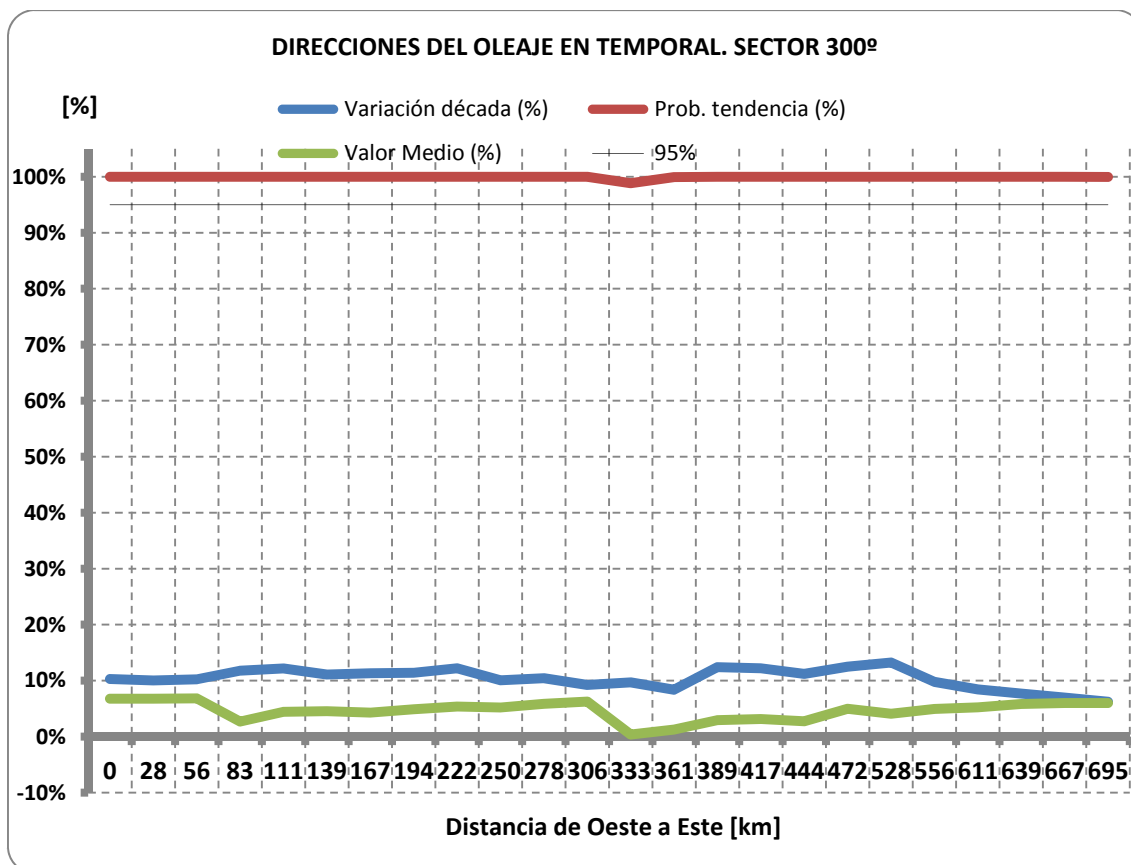


Figura 3.31. Sector 300º

Los resultados gráficos demuestran claramente que el sector de 300º representa el sector por el cual llegan casi la mitad de los temporales al litoral cantábrico. Obviamente, como se ha analizado anteriormente, los puntos más protegidos por los salientes del litoral sufren menos dichos temporales (aproximadamente en los puntos 80 y 350 km).

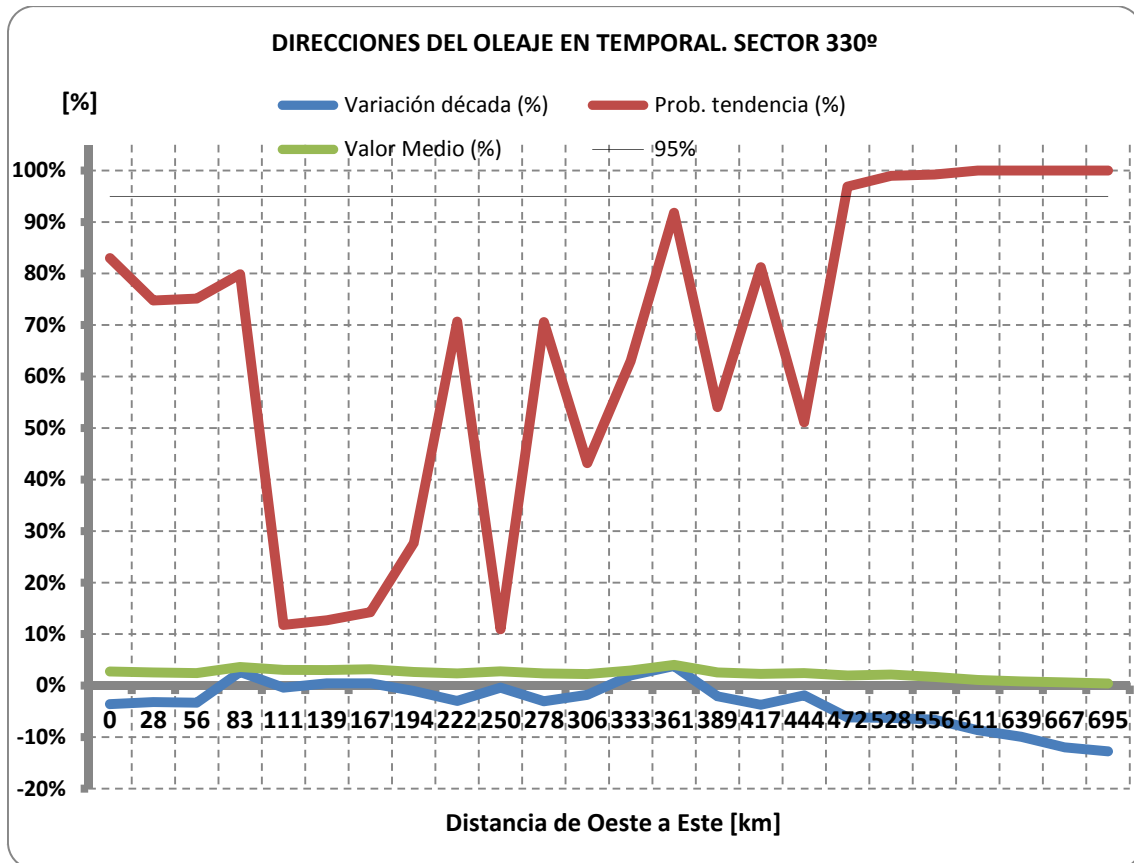
El valor medio de valores de temporal es del 5% aproximadamente. Teniendo en cuenta que el total de datos de temporal ronda el 5-10%, nos hallamos como ya se ha dicho, en el sector preponderante de temporales.

Por lo que respecta a las tendencias, son abrumadoramente altas. Nos hallamos ante incrementos de aproximadamente el 10% por década con fiabilidades muy elevadas, casi todas superiores al 99%.

La justificación de porqué son tan regulares las tormentas que llegan desde este sector al litoral cantábrico, existiendo tan pocas diferencias entre zonas (a no ser que estén protegidas) viene dado por el echo que los temporales, cuando provienen del sector 300º prácticamente siempre provendrán de mar abierto (mar Atlántico) y por lo tanto es difícil que se trate de un echo aislado y que únicamente afecte a una parte del litoral. Por eso, cuando afecta, afecta como norma general a toda la extensión del litoral cantábrico.

### Sector 330º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.32



*Figura 3.32. Sector 330º*

Los datos de los temporales provenientes de dicho sector denotan una fiabilidad muy variable a lo largo de la costa y por lo tanto no pueden ser considerados como válidos al no pasar los test F-Fisher de forma satisfactoria. Además dicho análisis empieza a reducir de forma considerable el número de puntos de estudio, restándole validez a las tendencias.

Por lo tanto, en el sector 330º, observamos que si bien de media un 5% aproximadamente de los datos corresponden a temporal, siendo junto con el sector de 300º el de mayores frecuencias de temporales, no podemos deducir ninguna tendencia fiable sobre estos.

#### **Sectores 0º, 30º y 60º**

En dichos sectores el número de datos de temporal no es suficiente como para establecer un análisis de tendencias y es por ello que se descarta su estudio.

#### **Variación total**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.33

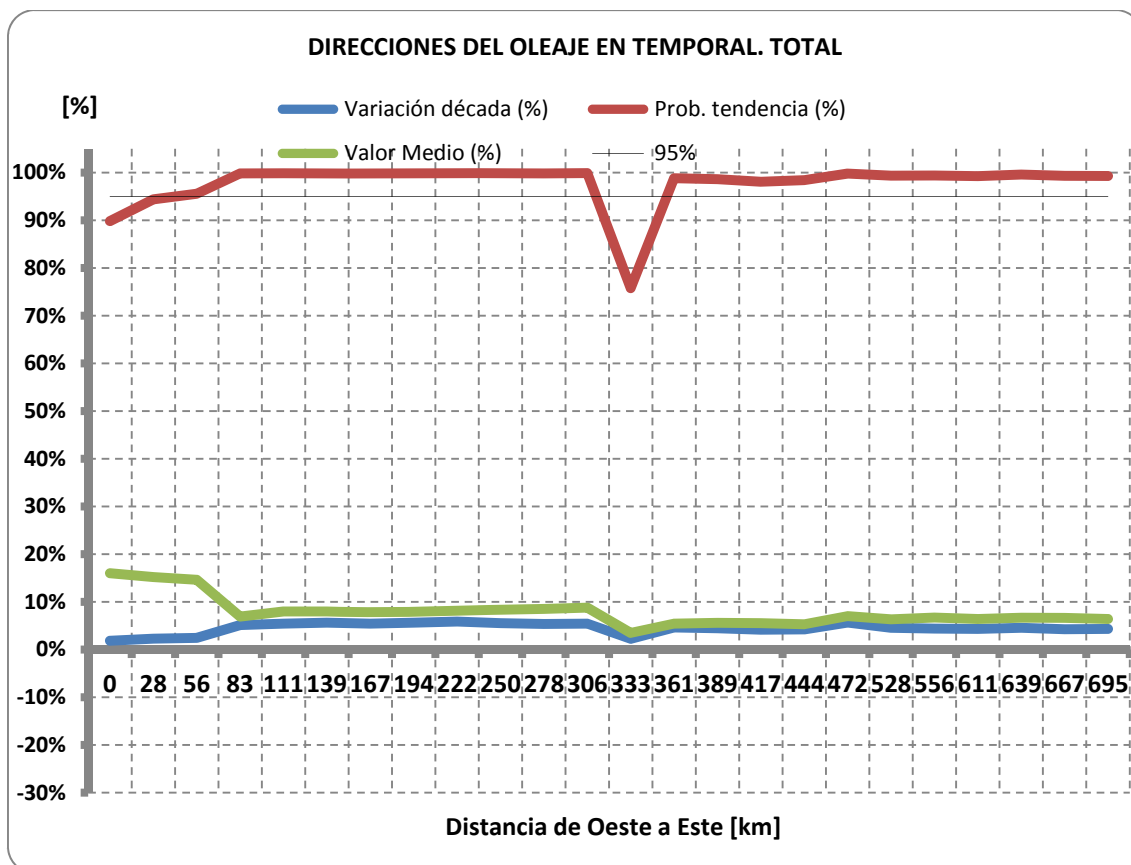


Figura 3.33. Direcciones del oleaje en temporal

Un análisis global del tanto por ciento de datos de temporal que tenemos al año nos permite observar que menos en el litoral gallego, en el que la fiabilidad es baja debido a que el número de temporales es prácticamente constante en el tiempo, el litoral cantábrico está sufriendo un aumento considerable, de alrededor del 5% por década, en el número de temporales registrados.

Aunque el número de datos por sector no nos ha permitido realizar un análisis detallado, si que hemos podido observar que en el sector de 300° el aumento era cercano al 10% y que por lo tanto muy posiblemente dicho incremento del 5% se deba al aumento registrado en dicho sector.

### 3.1.6. Altura de ola significativa en temporal

En este punto analizaremos la evolución año a año de la altura significativa media en temporal únicamente en los 3 sectores con suficientes datos. Recordamos que este valor de año a año corresponde a una media móvil de 5 años, como se ha especificado anteriormente.

La condición de temporal la hemos establecido mediante la definición de la ROM para el litoral Cantábrico, siendo ésta de  $H_s > 3m$ .

Pasamos pues directamente a analizar los sectores 270°, 300° y 330°.

#### Sector 270°

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.34

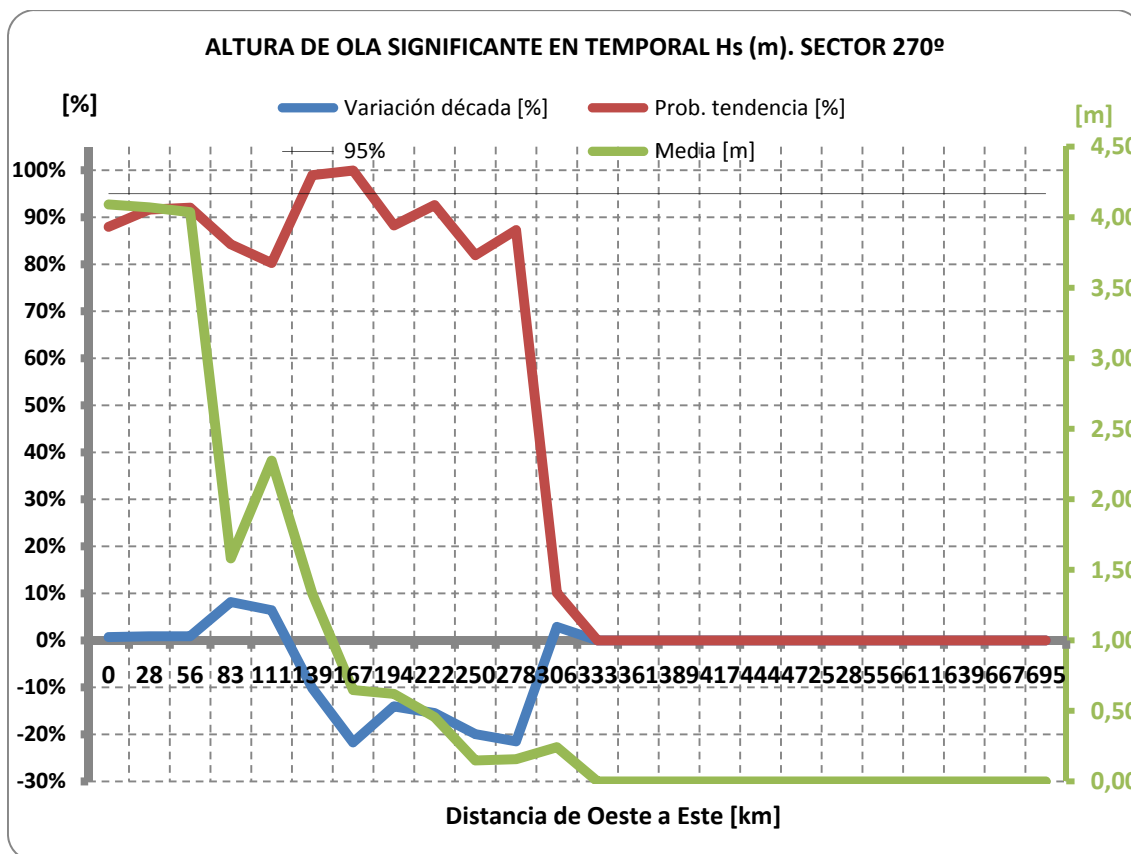


Figura 3.34. Sector 270º

Se observa que el oleaje recibido a través del sector de 270º solo es relevante (valor medio mayor al 5%) y por lo tanto con suficientes datos como para poder sacar conclusiones en los primeros nodos SIMAR, los situados en la costa gallega. Dichos resultados se muestran en la Tabla 3.9.

DISTANCIA (km)	0	28	56
% variación década	0,71%	0,86%	0,85%
probabilidad exista relación	87,96%	91,62%	92,04%
Hs (m) media en temporales	4,09	4,07	4,04

Tabla 3.9. Resultados en el litoral gallego

Los puntos de estudio denotan un ligero aumento que ronda el 0,7-0,8% por década en las alturas medias de ola en temporal, pero las fiabilidades no son demasiado altas, no llegando al 90% en general.

### Sector 300º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.35

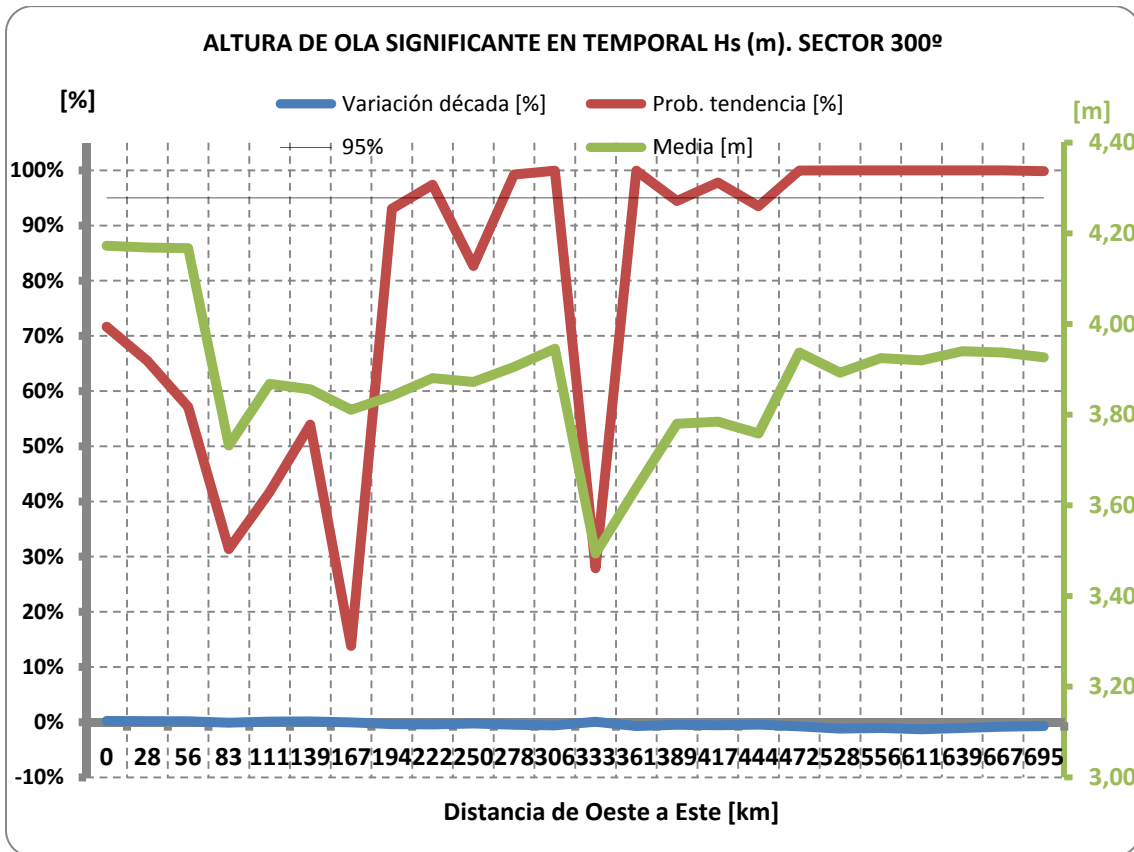
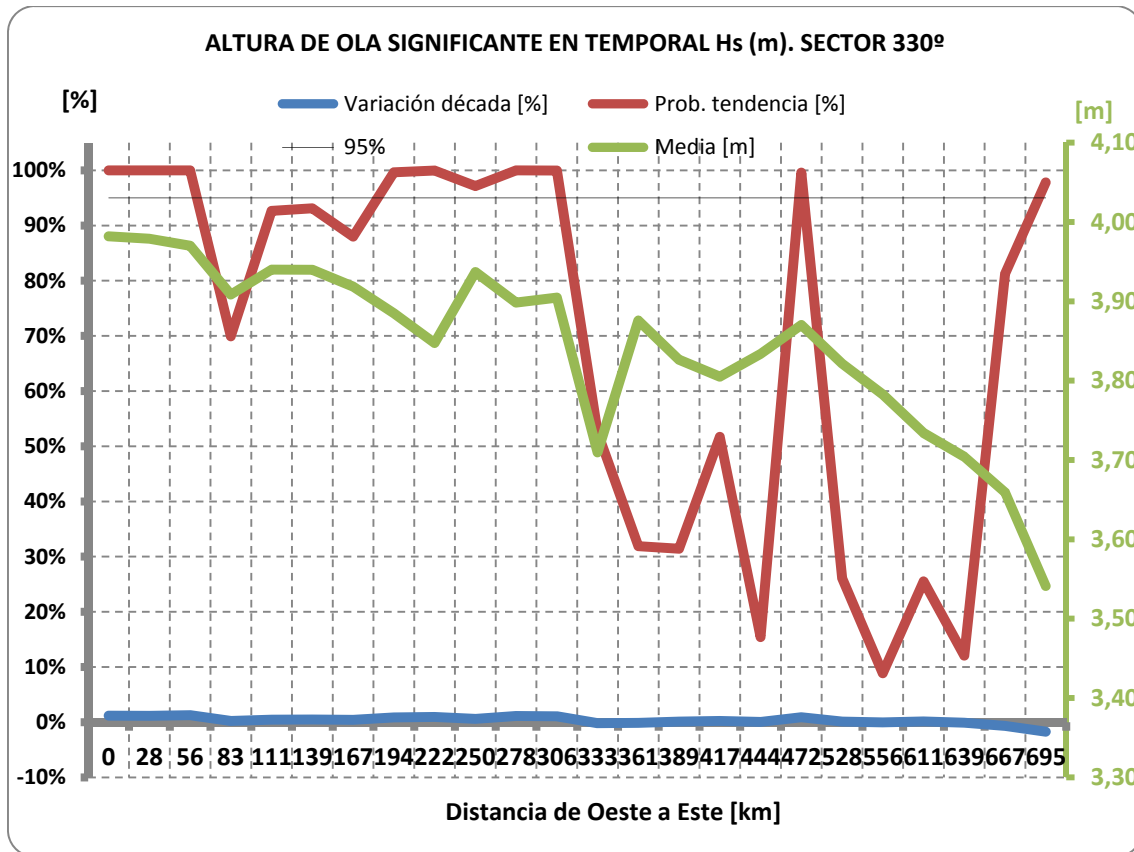


Figura 3.35. Sector 300º

Los resultados en cuanto a altura media del oleaje en temporal para este sector son cuanto menos curiosos. Si bien la frecuencia de temporales en el sector está aumentando muy considerablemente tal y como se ha visto anteriormente, la altura media de ola en temporal se mantiene muy constante, y es por ello que los test presentan tan poca fiabilidad frente a las pequeñas tendencias que podrían existir.

**Sector 330º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.36



*Figura 3.36. Sector 330º*

De nuevo los resultados en cuanto a altura media del oleaje en temporal para este sector son cuanto menos curiosos. Al igual que la frecuencia de temporales en el sector no presentaba apenas variación como se ha visto anteriormente, la altura media de ola en temporal se mantiene muy constante, y es por ello que los test presentan tan poca fiabilidad frente a las pequeñas tendencias que podrían existir.

### **Sectores 0º, 30º y 60º**

En dichos sectores el número de datos de temporal no es suficiente como para establecer un análisis de tendencias y es por ello que se descarta su estudio.

### **3.2. Análisis del viento**

En este apartado se comentarán los resultados obtenidos tras el análisis matemático y estadísticos de los datos de viento.

En contraposición al oleaje, el viento no tiene sectores en los cuales su análisis sea descartable y por lo tanto se analizarán todas las direcciones. Si en alguna de ellas se apreciase que la frecuencia de tanteo es demasiado baja como para obtener conclusiones, se omitirá previa justificación

#### **3.2.1. Direcciones**

A continuación se analizan las frecuencias con las cuales se presenta el viento a lo largo de los diferentes nodos estudiados en el litoral cantábrico.

#### **Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.37

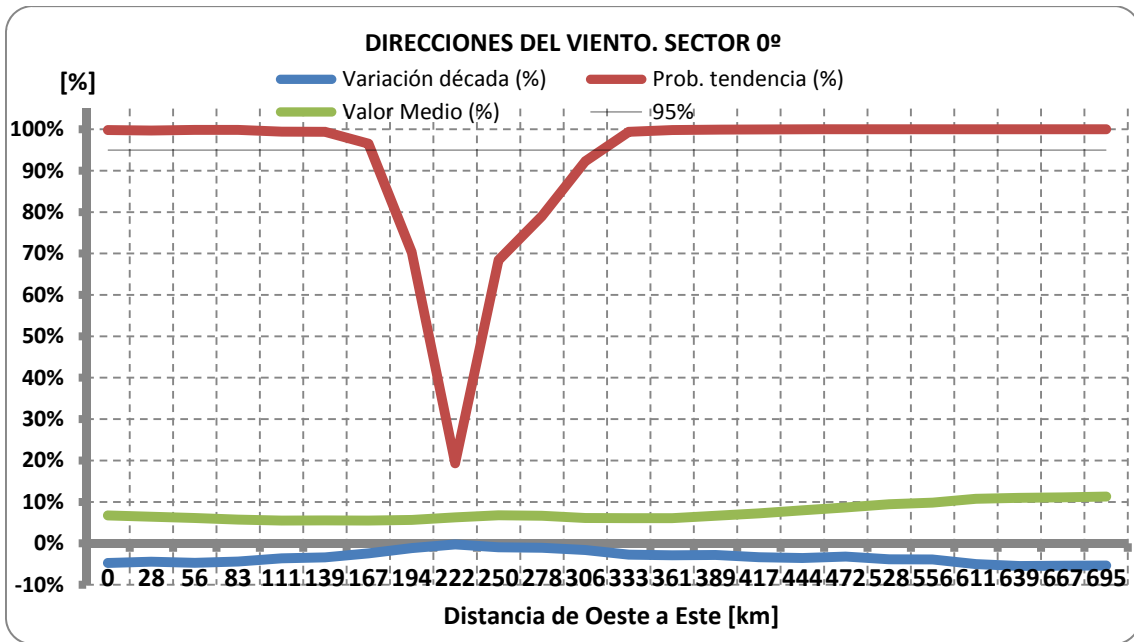


Figura 3.37. Sector 0º

Con el análisis observamos que el viento tiene una frecuencia media, puesto que aproximadamente entre un 8-10% del tiempo sopla desde dicho sector. Sin embargo, la tendencia predominante es la reducción de alrededor de un 4% por década, con una alta fiabilidad.

Cabe destacar que frente al litoral asturiano dicha reducción es mucho menor, tendiendo a mantenerse igual. Dado que la variación tiende a ser 0, la fiabilidad de la tendencia decrece notablemente, tal y como se ha explicado anteriormente.

**Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.38

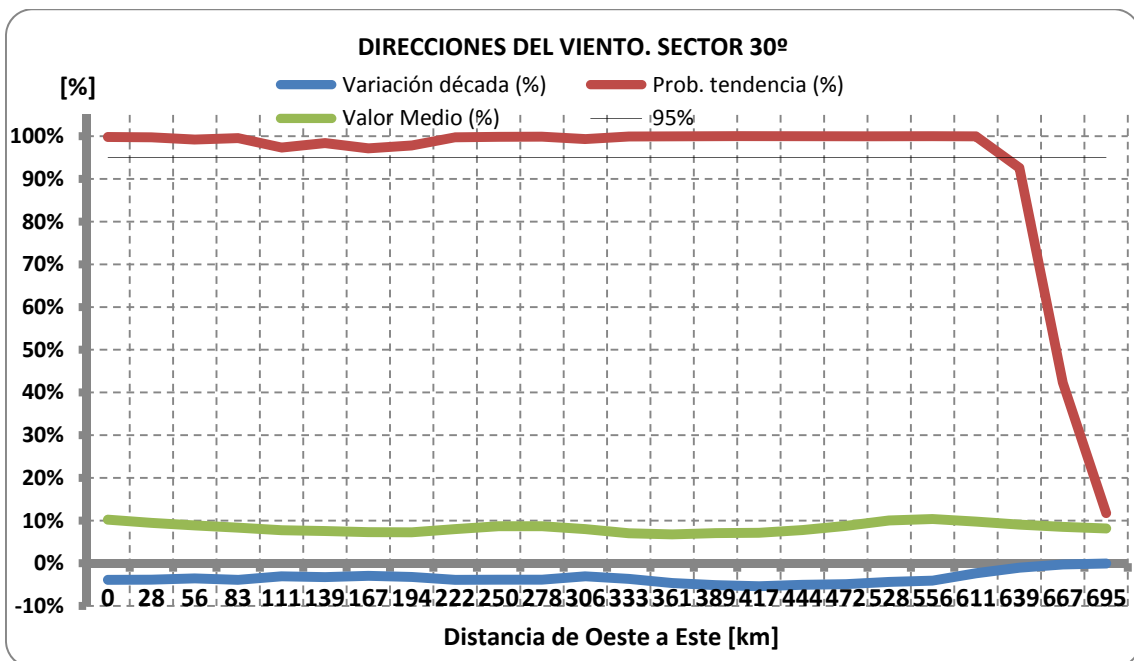


Figura 3.38. Sector 30º

Con el análisis observamos que el viento tiene también una frecuencia media en dicho sector, puesto que aproximadamente entre un 8-10% del tiempo sopla desde éste. Sin embargo, la tendencia predominante es la reducción de alrededor de un 4% por década, con una alta fiabilidad.

Destaca el hecho que cerca de Pasajes dicha reducción es mucho menor, tendiendo a mantenerse constante. Dado que la variación tiende a ser 0, la fiabilidad de la tendencia decrece notablemente, tal y como se ha explicado anteriormente.

### Sector 60º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.39

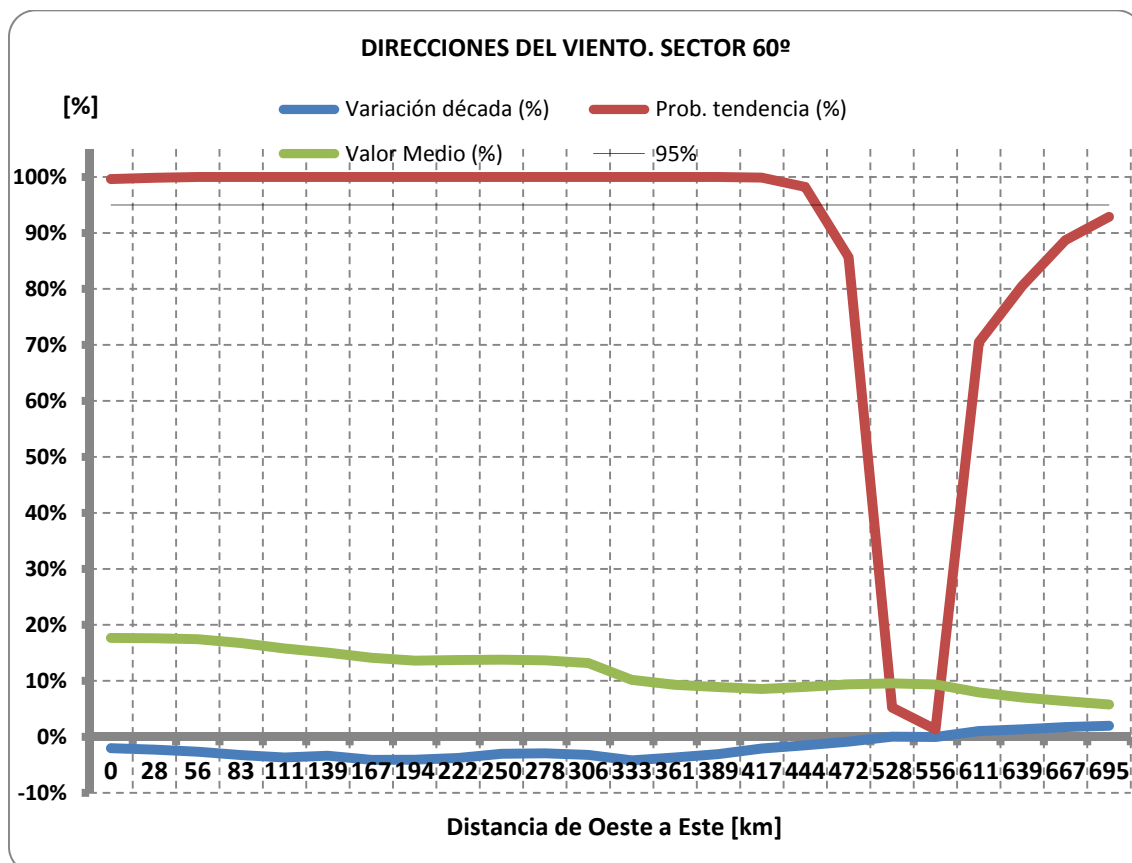


Figura 3.39. Sector 60º

Con el análisis observamos que el viento tiene una frecuencia elevada en dicho sector, especialmente en la mitad occidental del litoral cantábrico, donde ronda valores del 18% frente a las costas gallegas. Sin embargo dicho sector va perdiendo importancia conforme nos acercamos a Pasajes. Dicha reducción posiblemente venga condicionada por la presencia del litoral francés.

La variación por década oscila el 1-3% negativo en la mitad occidental, pasando a mantenerse y aumentar ligeramente frente a las costas vascas. La fiabilidad de nuevo es muy alta, reduciéndose en las zonas en que la variación tiende a 0% por el mero hecho explicado anteriormente.

### Sector 90º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.40

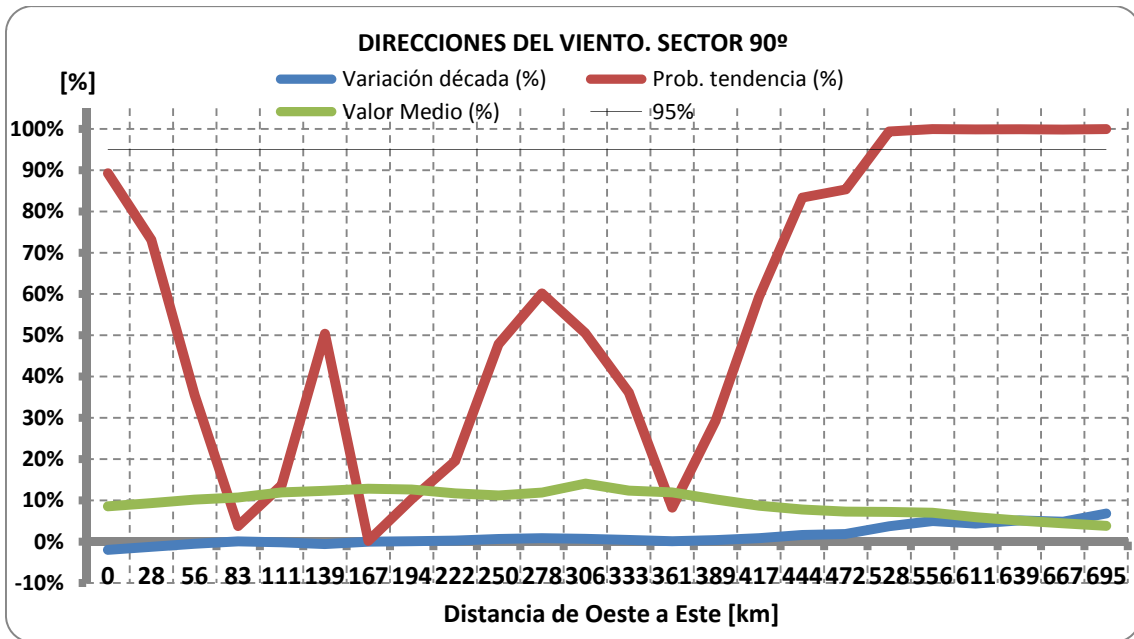


Figura 3.41. Sector 90º

El sector 90º vuelve a presentar valores medios de frecuencia. Dicho sector es predominante en la parte occidental central del litoral (frecuencias del 10%), sin embargo su importancia disminuye conforme nos acercamos al litoral francés (5%).

Las tendencias muestran que la frecuencia de dicho sector se mantiene en la parte occidental del litoral, mientras que aumentan muy considerablemente (5% por década) en las zonas próximas al litoral francés, haciéndolo con una gran fiabilidad.

**Sector 120º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.42

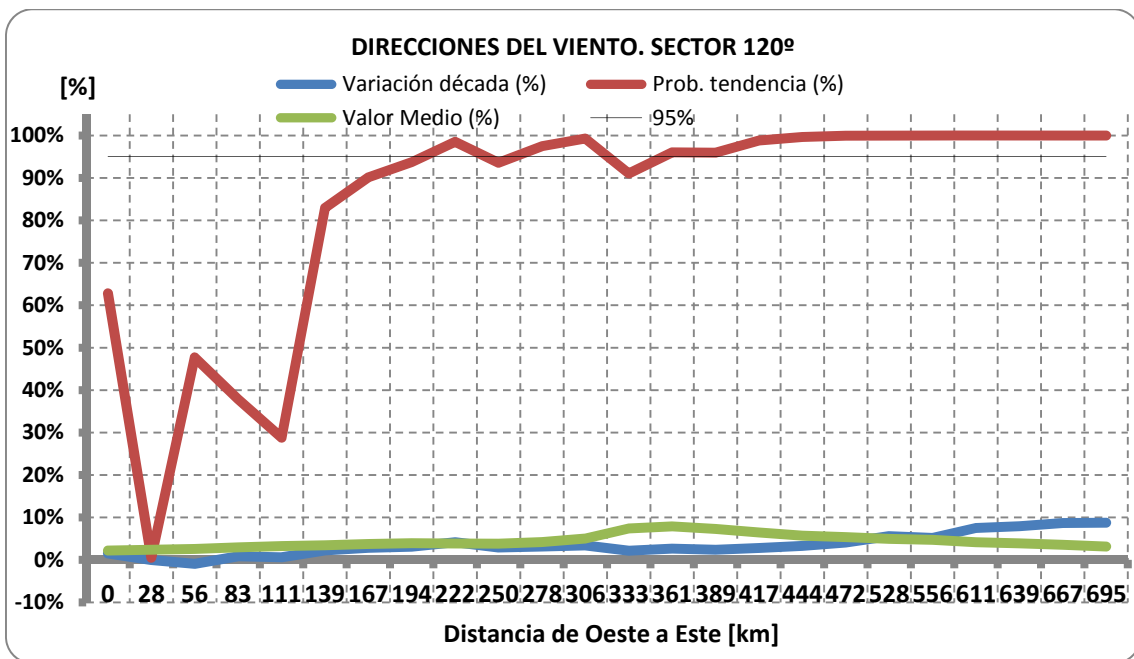


Figura 3.42. Sector 120º

Como apreciamos en la presentación gráfica de los resultados, el sector 120º no corresponde a una dirección predominante del viento, pues tan solo el 5% aproximadamente de éste proviene de él.

Sin embargo su tendencia es en aumento, especialmente en el litoral vasco, donde adquiere valores de variación por década de alrededor del 6-7% con una fiabilidad extremadamente elevada en los test F-Fisher.

### Sector 150º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.43

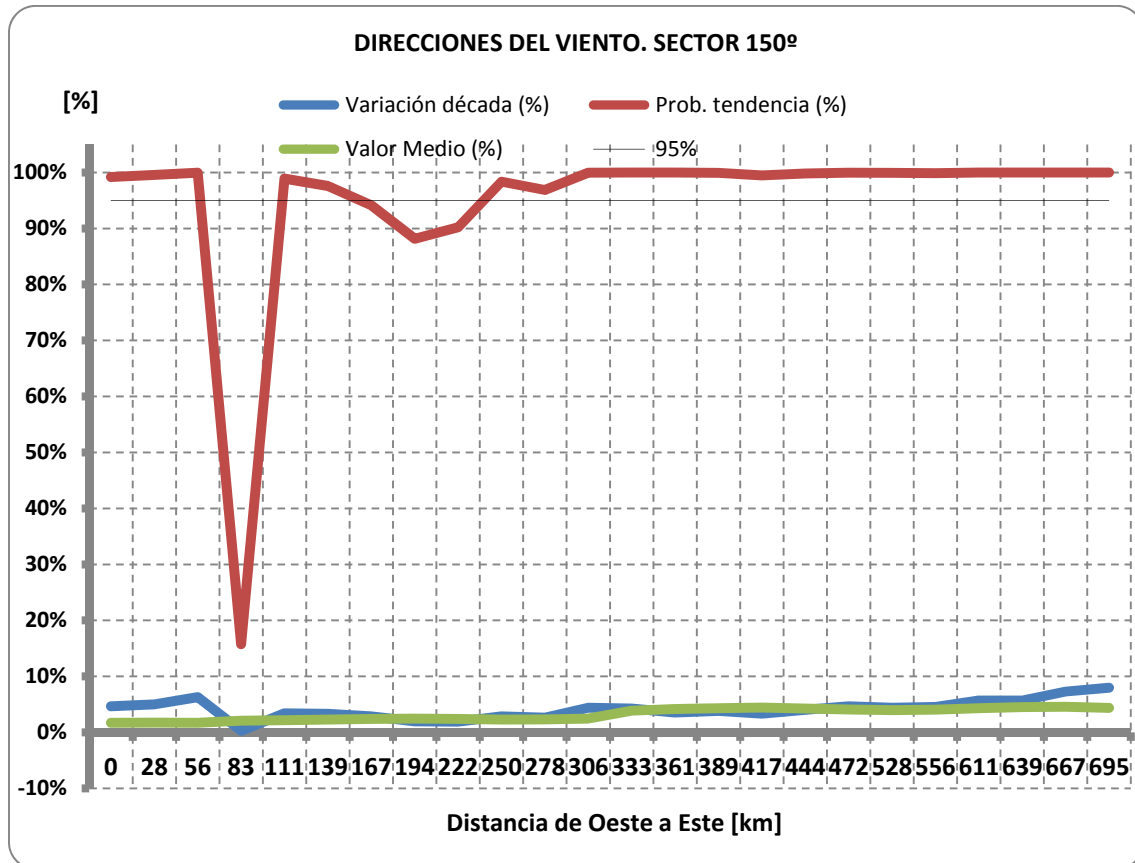


Figura 3.43. Sector 150º

El sector correspondiente a los 150º como puede apreciarse constituye una baja frecuencia respecto al total. Su valor medio oscila el 5% anual, con un crecimiento medio del 5% por década, destacando su alto crecimiento cerca del litoral francés y por lo tanto influenciado por los Pirineos. La fiabilidad de nuevo es muy elevada en los puntos en que la tendencia está lejana al 0%.

### Sector 180º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.44

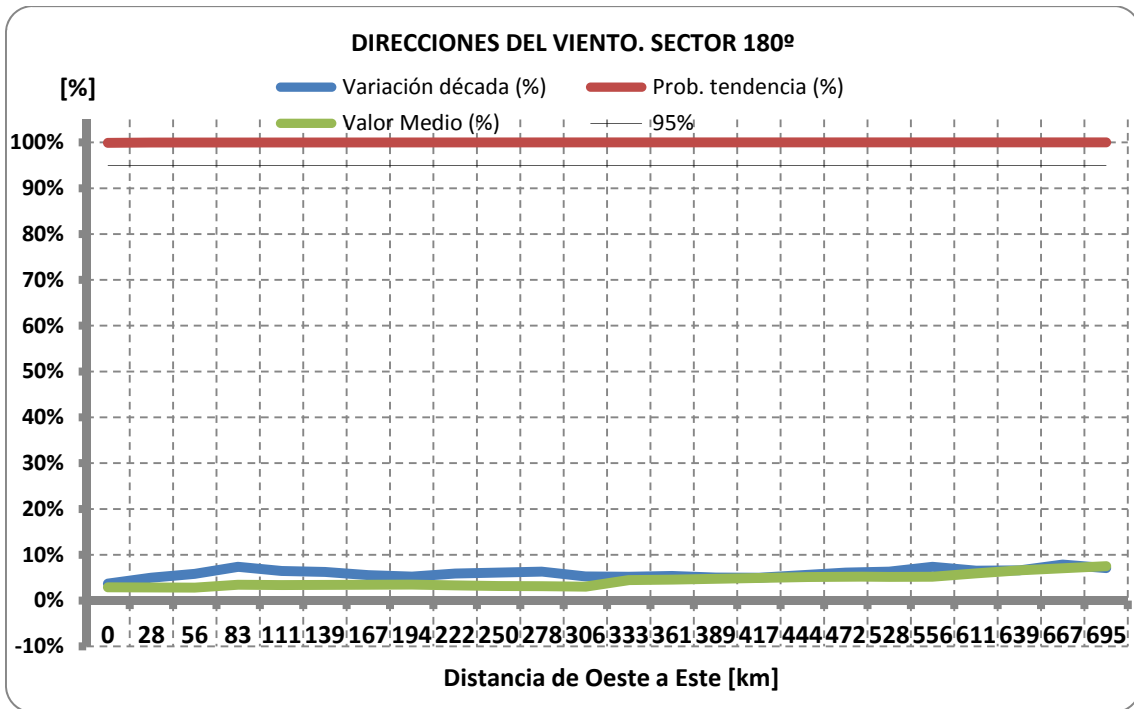


Figura 3.44. Sector 180º

El sector correspondiente a los 180º como puede apreciarse constituye una baja frecuencia respecto al total. Su valor medio oscila el 5% anual, con un crecimiento medio del 5% por década, destacando su alto crecimiento cerca del litoral francés y por lo tanto influenciado por los Pirineos. La fiabilidad de nuevo es muy elevada en todos los puntos.

**Sector 210º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.45

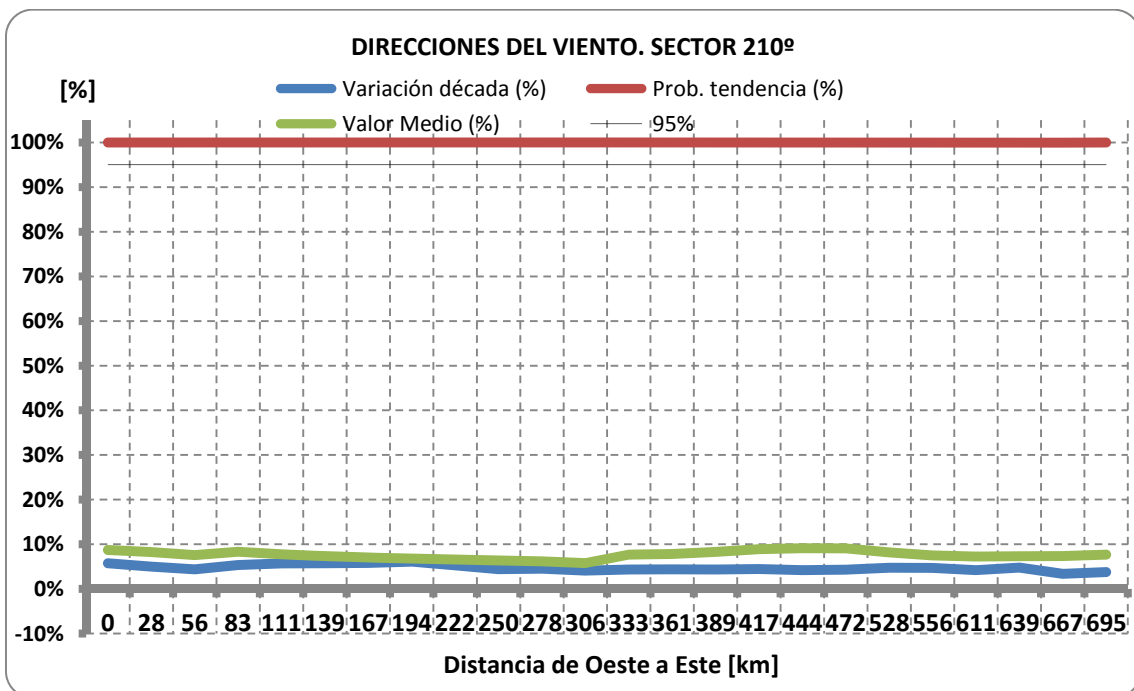


Figura 3.45. Sector 210º

El sector correspondiente a los 210º corresponde una frecuencia media respecto del total. Su valor medio oscila el 10% anual, con un crecimiento medio del 5% por década muy homogéneo a lo largo de todo el litoral. La fiabilidad de nuevo es muy elevada en todos los puntos.

#### Sector 240º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.46

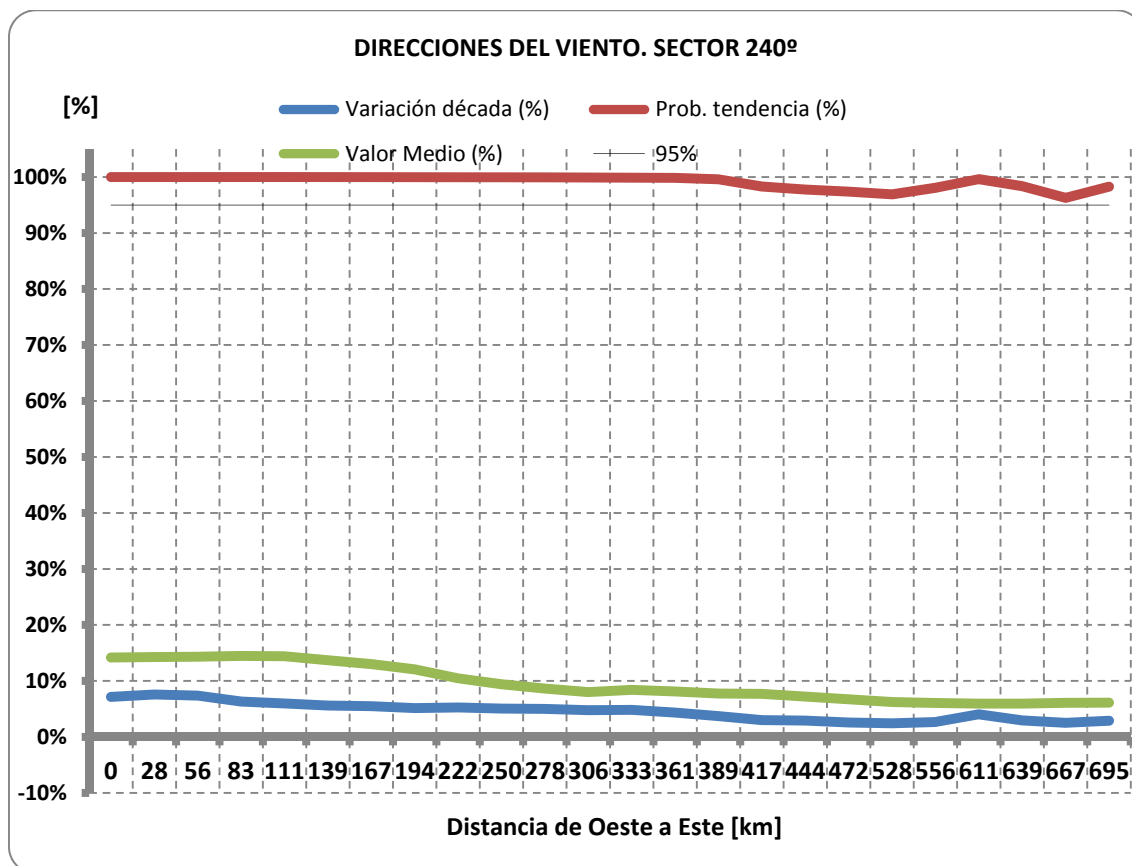


Figura 3.46. Sector 240º

Al sector correspondiente a los 240º le corresponde una frecuencia elevada en las zonas del litoral gallego y asturiano (valores del 10-15%), mientras que su relevancia es menor en las zonas del litoral vasco.

Su variación porcentual por década es muy considerable en las zonas donde goza de mayor frecuencia (llegando casi al incremento del 10% por década), mientras que en las zonas cercanas al litoral francés dicho aumento disminuye hasta el 3-5%.

Destaca de nuevo la alta fiabilidad de las tendencias según los test F-Fisher aplicados.

#### Sector 270º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.47

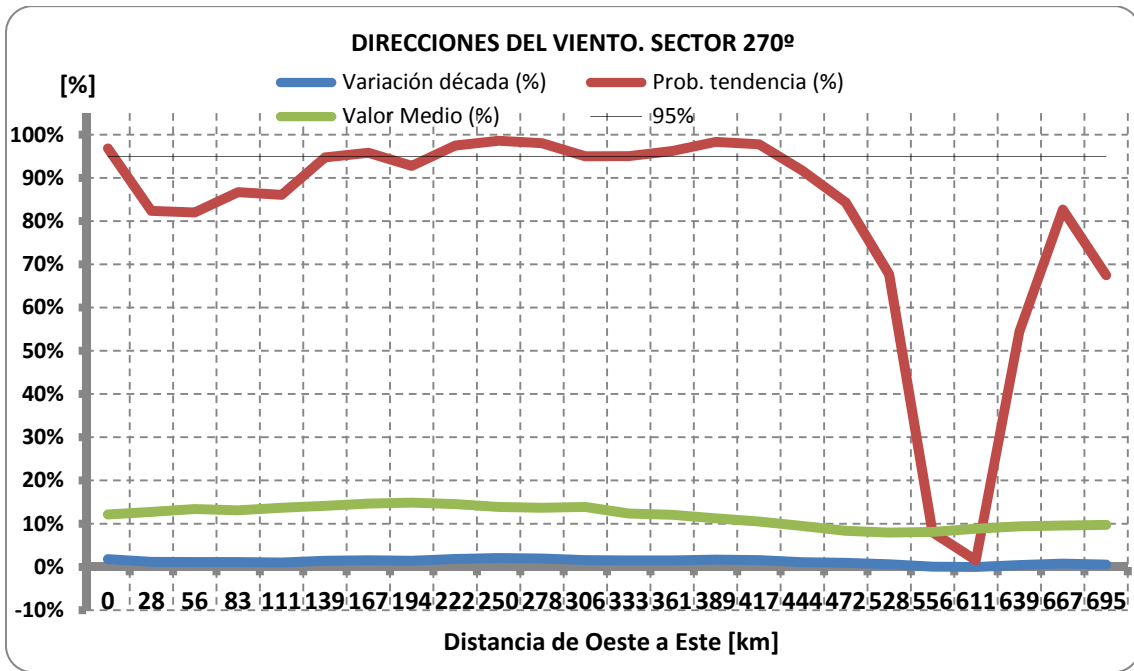


Figura 3.47. Sector 270º

En el sector de 270º, si bien su frecuencia es notable a lo largo de todo el litoral (alrededor de un 10% de media) su variación por década es prácticamente nula.

Su fiabilidad, entre tanto que su variación es próxima a cero, es muy variable y reducida, tal y como se ha ido explicando a lo largo del informe.

**Sector 300º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.48

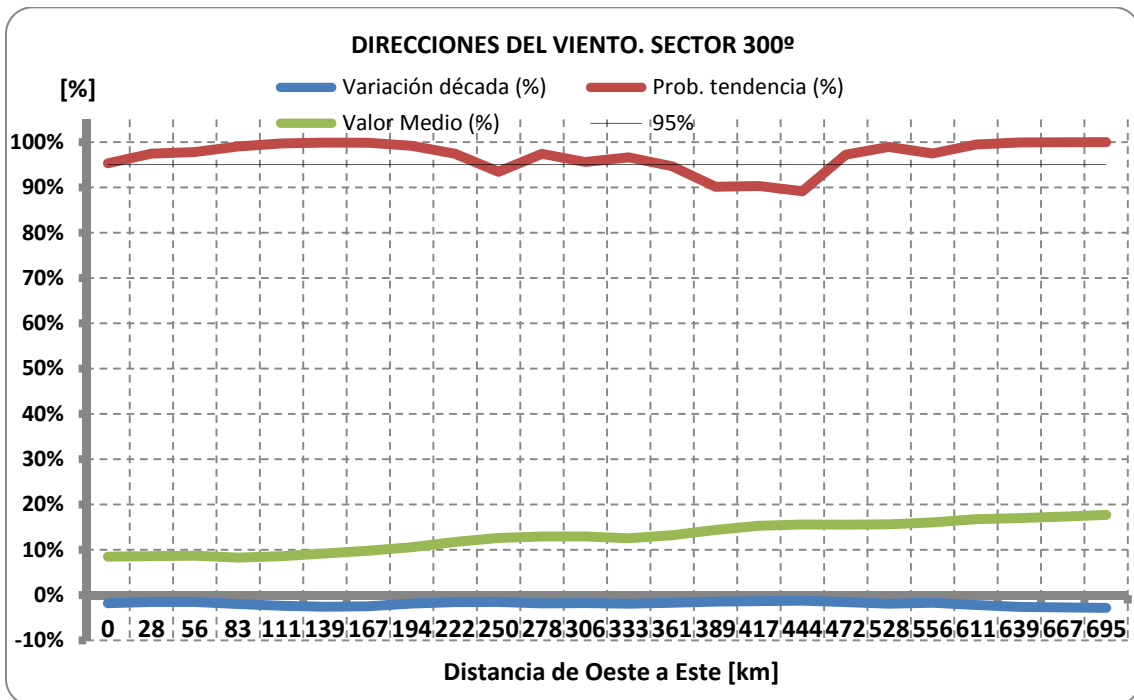


Figura 3.48. Sector 300º

En el sector de 300º, si bien su frecuencia es notable a lo largo de todo el litoral (alrededor de un 10% de media y llegando a valores muy elevados cerca del litoral francés, con casi un 20%) su variación por década es prácticamente nula o decreciente en un 1-2%.

Su fiabilidad, entre tanto que su variación es próxima a cero tiene picos de decrecimiento, pero en general de nuevo la fiabilidad es muy elevada.

### Sector 330º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.49

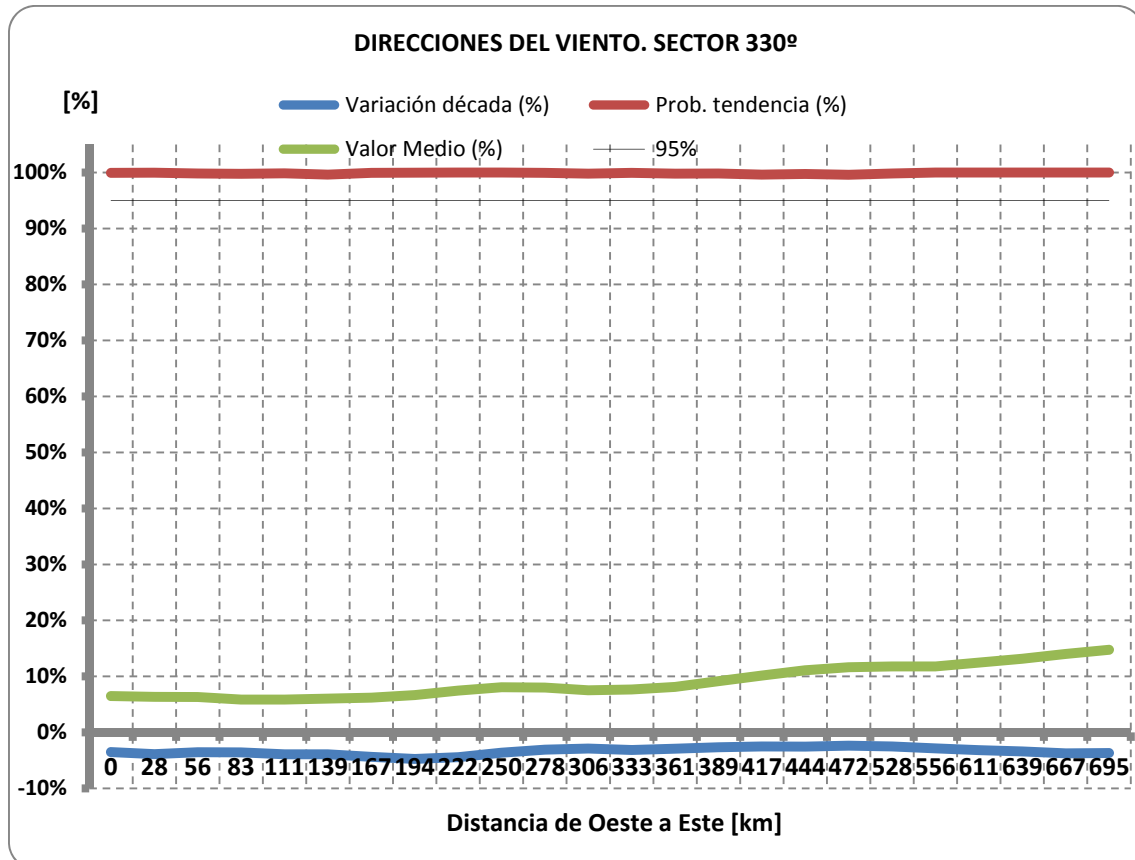


Figura 3.49. Sector 330º

En el sector de 330º, si bien su frecuencia es notable a lo largo de todo el litoral (alrededor de un 10% de media y llegando a valores muy elevados cerca del litoral francés, con casi un 15%) su variación por década es claramente decreciente y de alrededor de un 5%.

Su fiabilidad en los test F-Fisher a presentado valores muy elevados, con lo cual el decrecimiento aproximado del 5% presenta una gran fiabilidad.

### 3.2.2. Potencia del viento

A continuación se analizan la potencia del viento a lo largo de los diferentes nodos estudiados en el litoral cantábrico. Los sectores con mayor potencia eólica no son necesariamente aquellos en que el viento sopla con mayor frecuencia, dado que la potencia eólica depende de la velocidad del viento al cubo. Por lo tanto, será más dependiente de la velocidad del viento principalmente.

**Sector 0º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.50

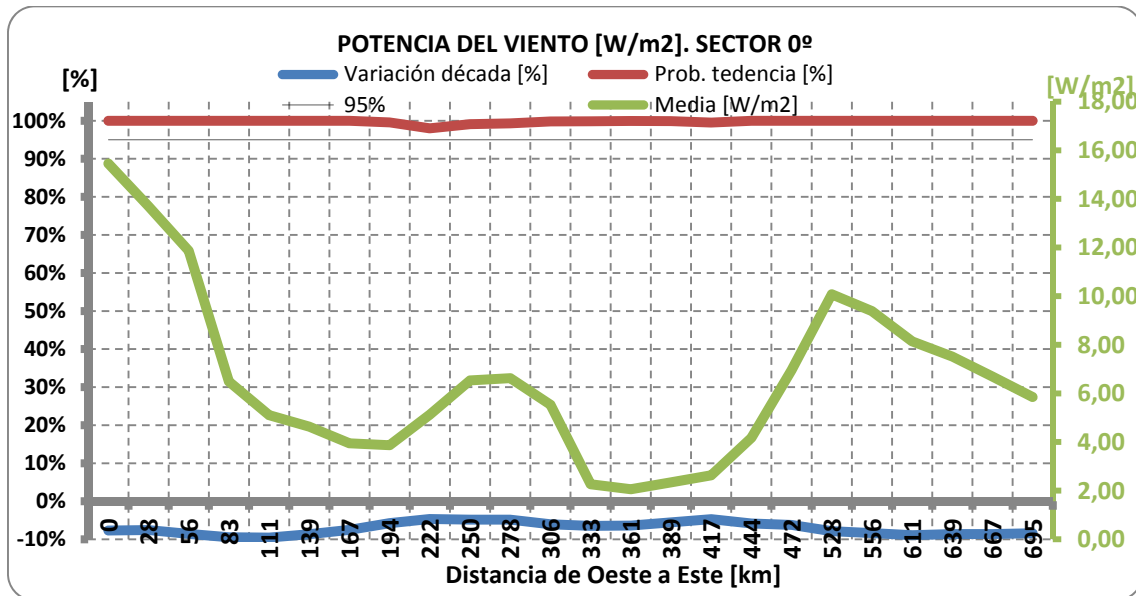


Figura 3.50. Sector 0º

Con el análisis habíamos observado que el viento tenía una frecuencia media en dicho sector, puesto que aproximadamente entre un 8-10% del tiempo sopla desde dicho sector. La tendencia predominante era la reducción de alrededor de un 4% por década, con una alta fiabilidad. En el caso de la potencia nos encontramos que ésta es muy reducida en dicho sector, pues menos en el litoral gallego escasamente llega a los 10 W/m<sup>2</sup>. Si a esto añadimos el hecho de que la potencia disminuye casi un 10% en algunas zonas, nos hallamos ante un sector poco interesante desde el punto de vista energético.

**Sector 30º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.51

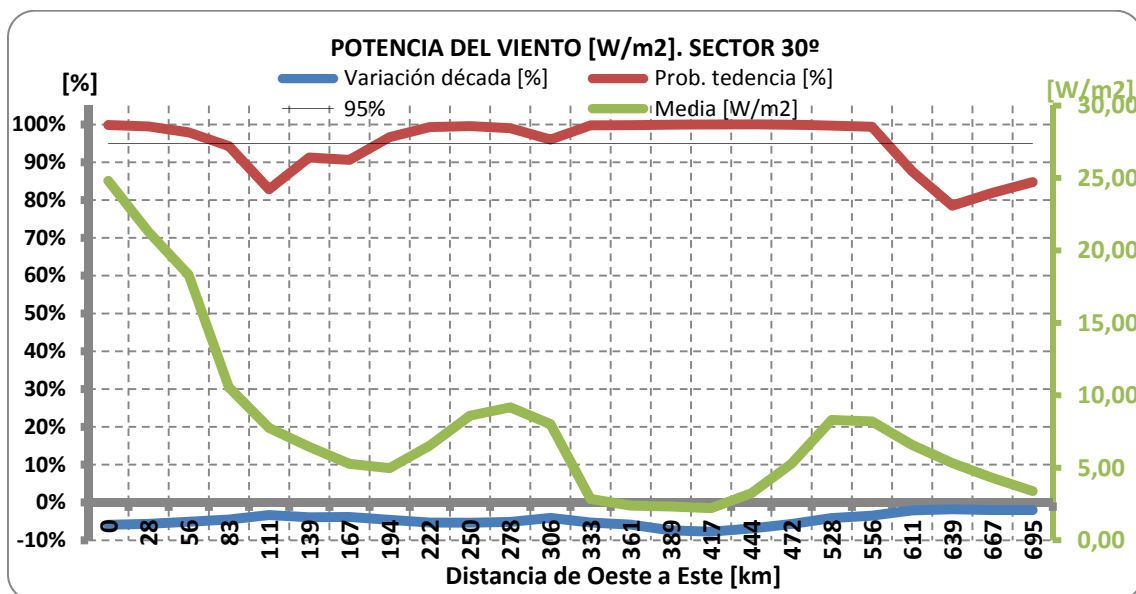


Figura 3.51. Sector 30º

Con el análisis habíamos observado que el viento tiene también una frecuencia media en dicho sector, puesto que aproximadamente entre un 8-10% del tiempo soplaba desde éste. Sin embargo, la tendencia predominante era la reducción de alrededor de un 4% por década, con una alta fiabilidad. De la misma forma esta tendencia se ve reproducida en al potencia del viento para dicho sector. Si bien de nuevo en el litoral gallego es superior, el hecho de ser un sector con poca potencia y con clara tendencia fiable al descenso de un 5% por década en la potencia nos hace descartarlo desde el punto de vista energético.

### Sector 60º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.52

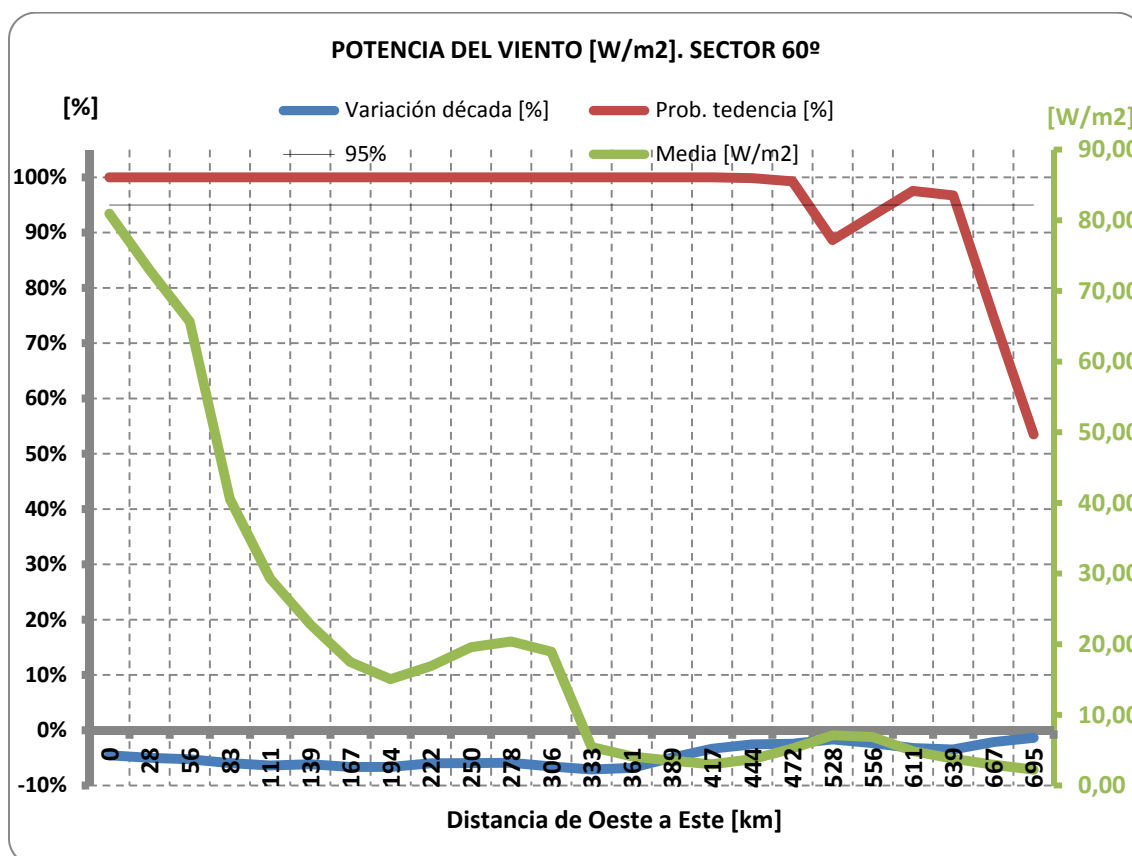


Figura 3.52. Sector 60º

Con el análisis frecuencias habíamos observado que el viento tenía una frecuencia elevada en dicho sector, especialmente en la mitad occidental del litoral cantábrico, donde ronda valores del 18% frente a las costas gallegas y perdía importancia hacia el litoral vasco. Estos datos se convierten en una potencia muy elevada en el litoral gallego y notable hasta mitades del litoral cantábrico. Sin embargo posee una tendencia a disminuir un 5% por década con una alta fiabilidad.

### Sector 90º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.53

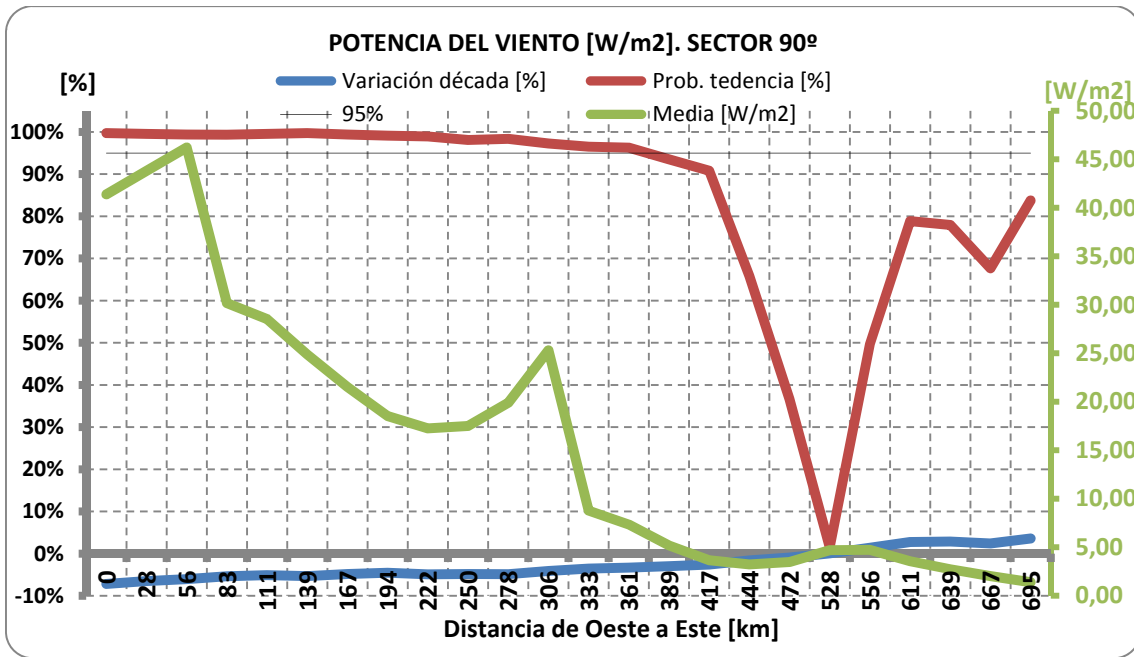


Figura 3.53. Sector 90º

El sector 90º vuelve a presentar valores medios de frecuencia. Dicho sector es predominante en la parte occidental central del litoral (frecuencias del 10%), sin embargo su importancia disminuye conforme nos acercamos al litoral francés (5%). La potencia, si bien es considerable en el litoral gallego, pasa a ser despreciable desde mitades del litoral cantábrico. En aquellas zonas donde es destacable presenta una tendencia clara a la disminución de alrededor de un 5% de media, mientras en el litoral vasco aumenta ligeramente, con fiabilidades no muy elevadas, pues tiende a mantenerse.

**Sector 120º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.54

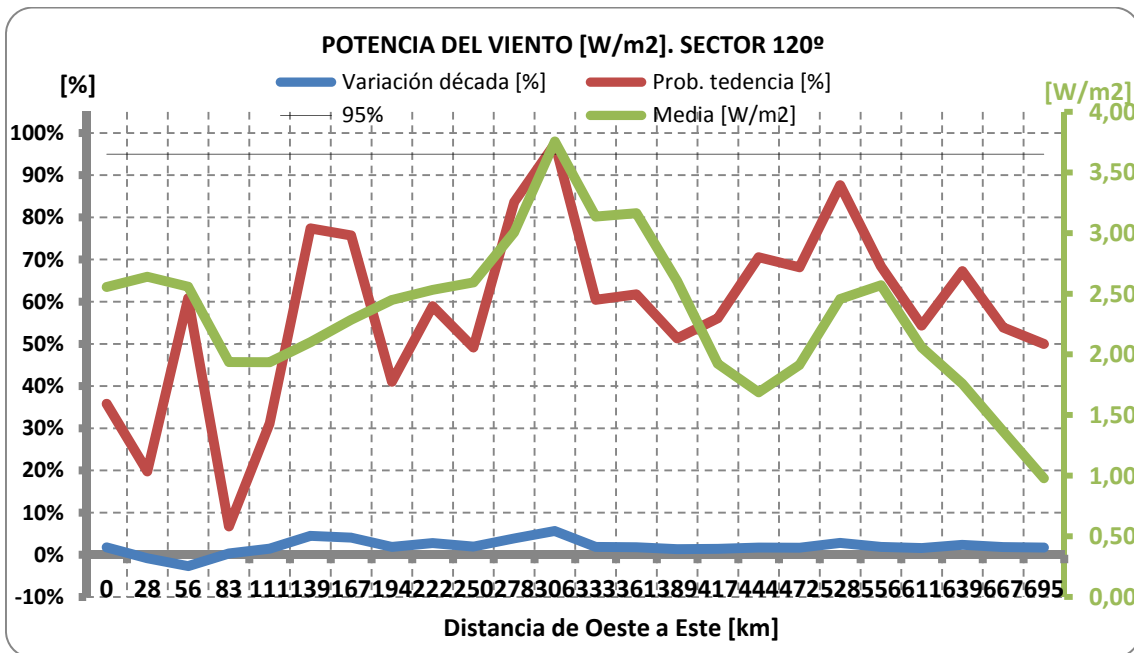


Figura 3.54. Sector 120º

Como se apreció en el análisis frecuencial, el sector 120° no constituía un sector destacado. Si a esto le sumamos que la velocidad media del viento no es excesivamente elevada, obtenemos los resultados graficados, en que la potencia eólica es prácticamente despreciable con una tendencia a mantenerse constante. Es por lo tanto un sector despreciable en cuanto a potencia eólica.

### Sector 150°

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.55

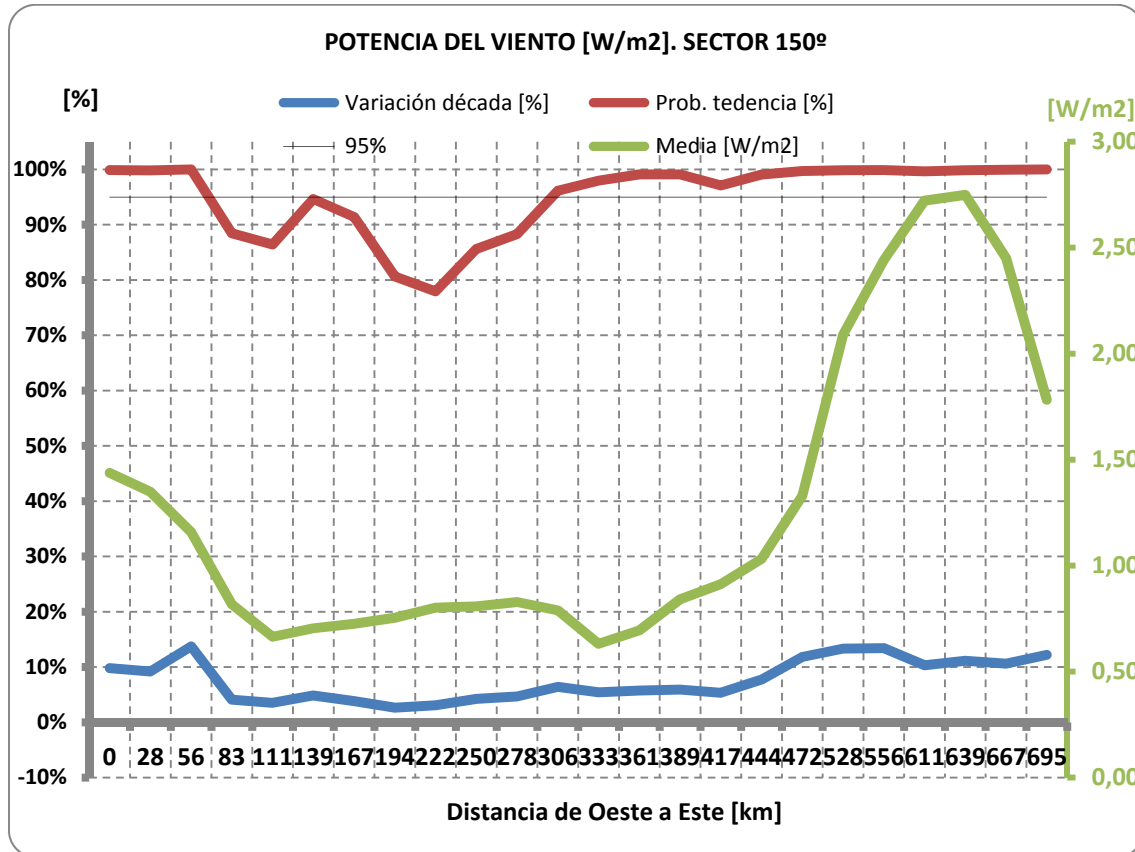


Figura 3.55. Sector 150°

De nuevo nos hallamos ante un sector aproximadamente ortogonal a los sector 60°-240° en los que la potencia del viento era máxima. Estos sectores como estamos viendo presentan una potencia eólica muy reducida, con lo cual son prácticamente despreciables desde el punto de vista energético. Aunque el aumento porcentual por década sea elevado (alrededor de un 6-8% anual con una alta fiabilidad, dicha potencia es tan pequeña que no supone un incremento considerable.

### Sector 180°

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.56

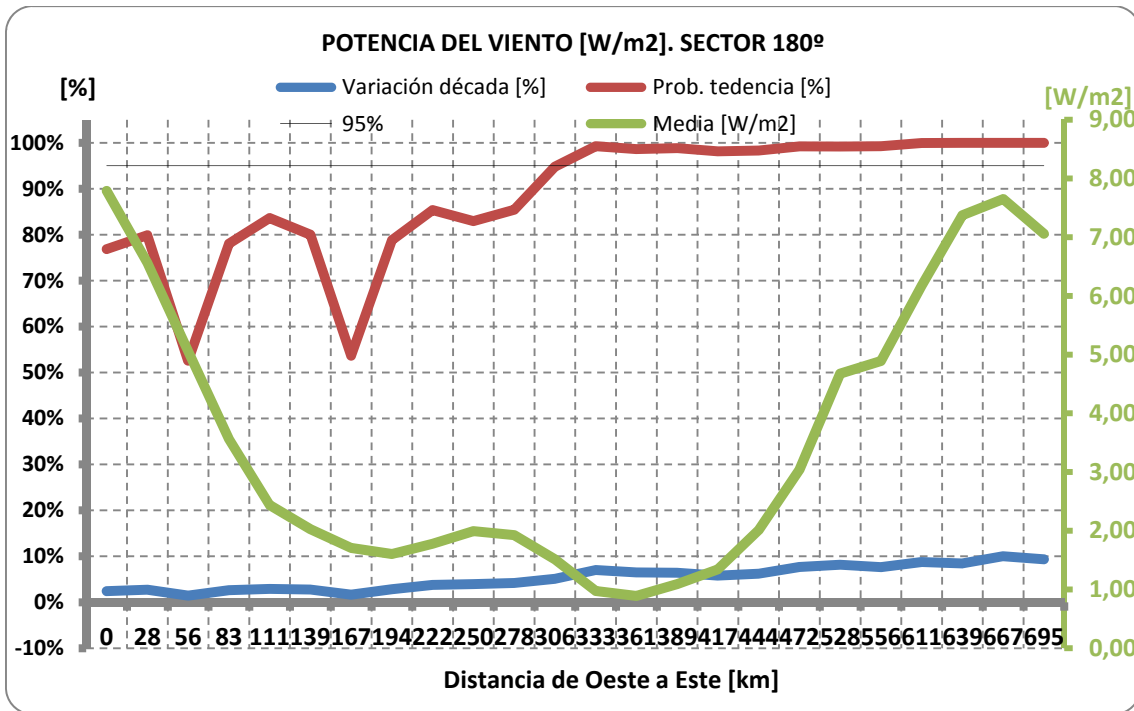


Figura 3.56. Sector 180º

Del mismo modo que los sectores anteriormente analizados 120º y 150º, dicho sector no representa demasiada potencia eólica asociada y si bien su variación porcentual por década es de nuevo elevada con una gran fiabilidad según los test F-Fisher, no nos hallamos ante una dirección que sea predominante en el litoral cantábrico en términos de potencia eólica.

**Sector 210º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.57

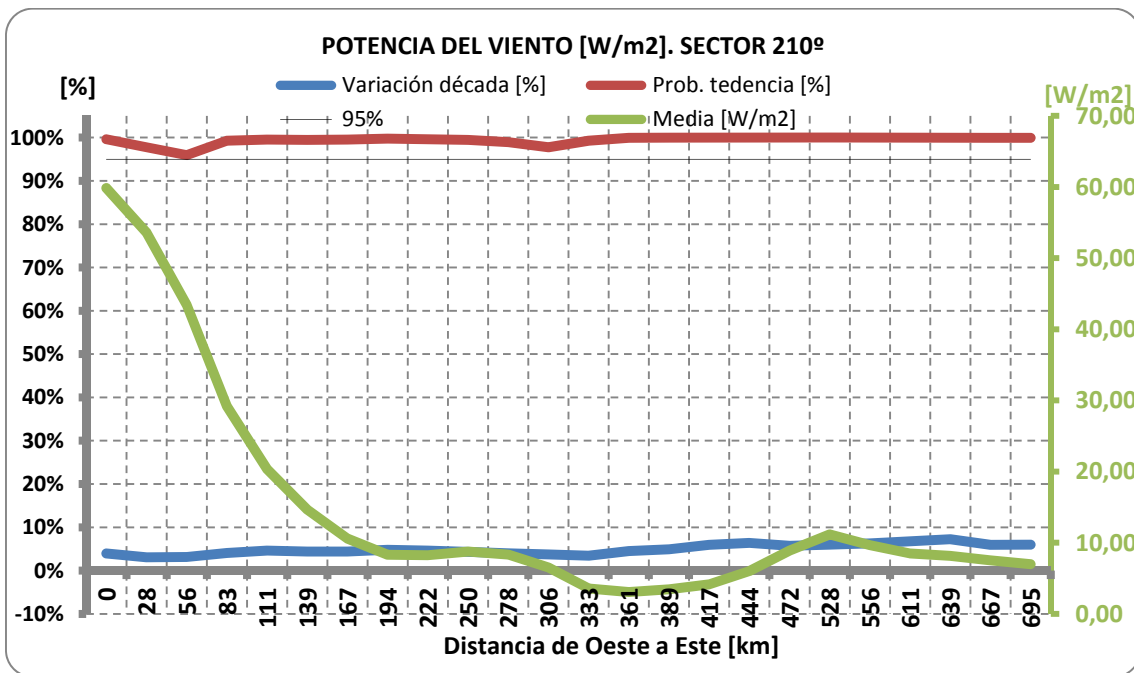


Figura 3.57. Sector 210º

Como se verá a continuación, el sector 210º, junto con los sectores 240º y 270º son los que disfrutan de una mayor potencia eólica, que conjugada con su clara tendencia al aumento de ésta alrededor de un 5% por década con una gran fiabilidad en los test F-Fisher, supone uno de los sectores más interesantes en cuanto a potencia eólica.

### Sector 240º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.58

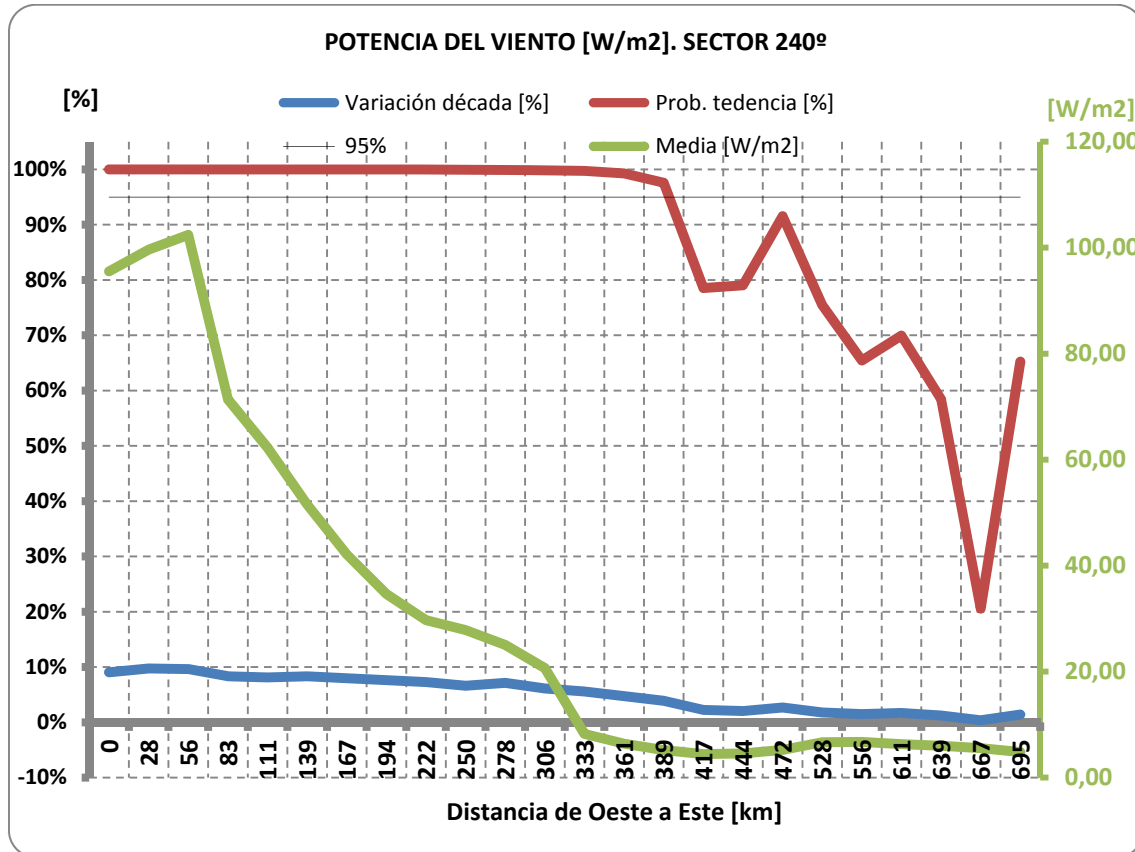


Figura 3.58. Sector 240º

De nuevo nos hallamos ante uno de los sectores que aporta una potencia mayor porcentualmente. Si bien sus valores son muy destacados en la mitad occidental, pierde importancia hacia el extremo oriental del litoral. Sin embargo, su aumento de casi un 10% por década en las zonas en que es más importante con una fiabilidad muy elevada, nos hace apreciar que será uno de los sectores más importantes en cuanto a potencia eólica.

### Sector 270º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.59

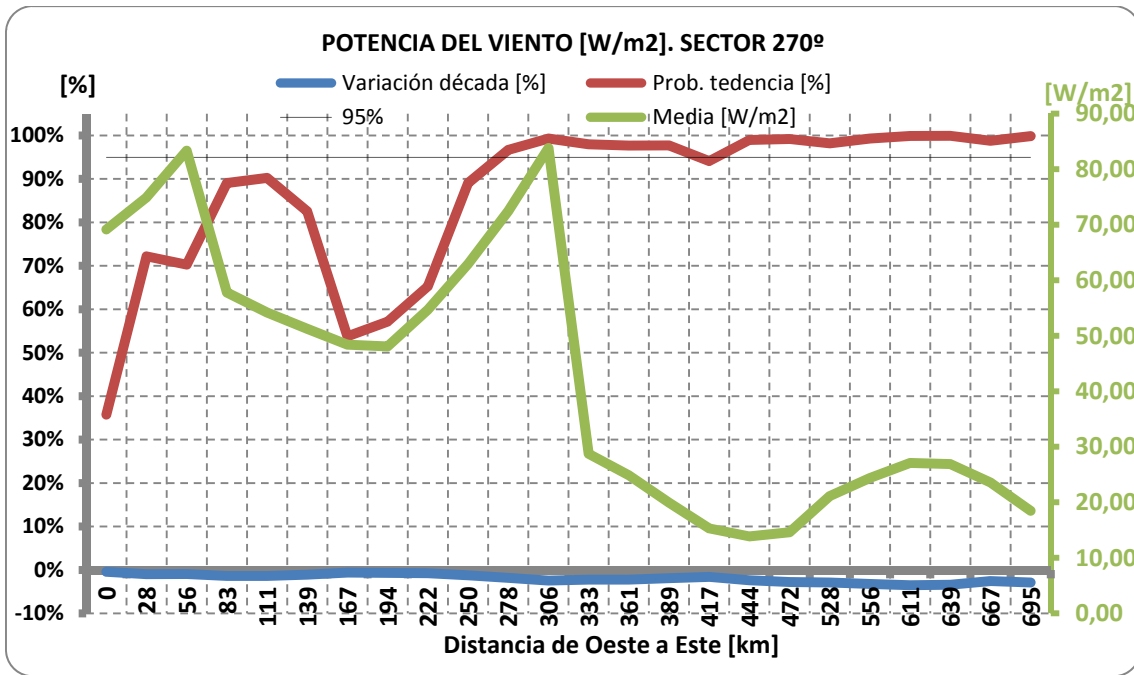


Figura 3.59. Sector 270º

En el sector de 270º empezamos a salir ya de la zona de máxima potencia eólica que constituían los sectores 210º y 240º. Si bien la potencia sigue siendo muy importante porcentualmente, las tendencias son a mantenerse o disminuir ligeramente, con la cual cosa, como ya se ha dicho, empieza a estar fuera de los sectores más relevantes en cuanto a potencia eólica.

**Sector 300º**

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.60.

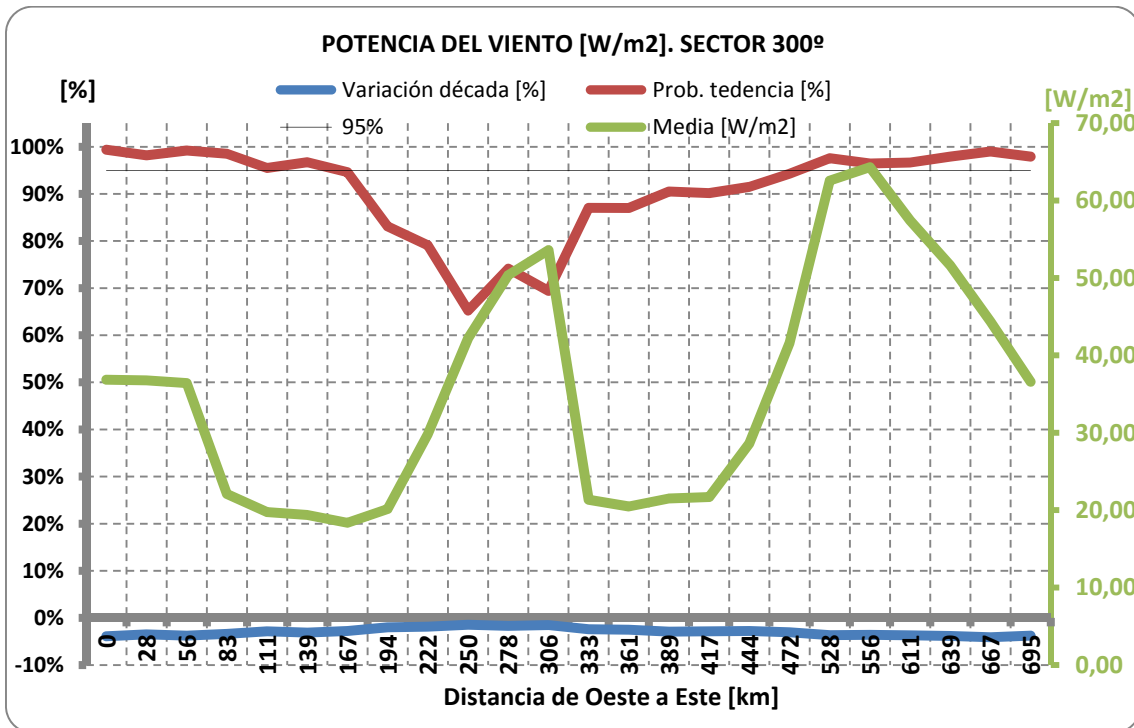


Figura 3.60. Sector 300º

Arribados al sector 300º, apreciamos como su importancia decrece muy sustancialmente en el tercio occidental, mientras que su importancia en el resto del litoral oriental es muy importante. Por lo tanto es una dirección en la que en las zonas con mayor potencial eólica deja de tener mucha relevancia, pero en el tercio oriental es de las que de mayor potencial eólico dispone. Sin embargo su tendencia es ligeramente descendente, alrededor de un 2-3% por década con una gran fiabilidad en las zonas donde dicho descenso es acusado.

### Sector 330º

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.61

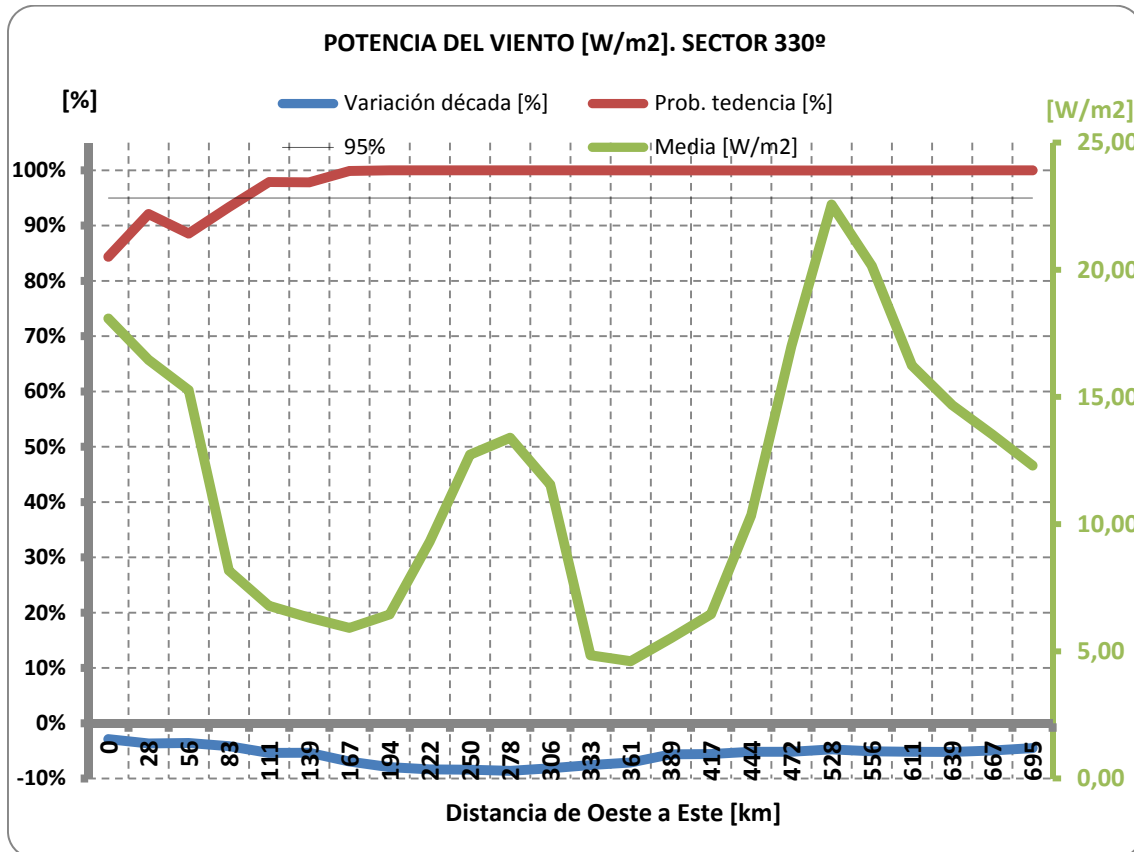


Figura 3.61. Sector 330º

Para finalizar con el último sector, vemos que la tendencia es muy similar al sector 300º. Su importancia en el tercio occidental de la península es muy baja, pero es relativamente alta en las costas vascas. Sin embargo su tendencia es claramente al descenso de potencia en un 5% por década y en consecuencia, al tratarse de un sector con una elevada aportación en el tercio oriental, su disminución es importante.

### Variación total

La representación gráfica de los resultados se muestra en la Figura 3.62.

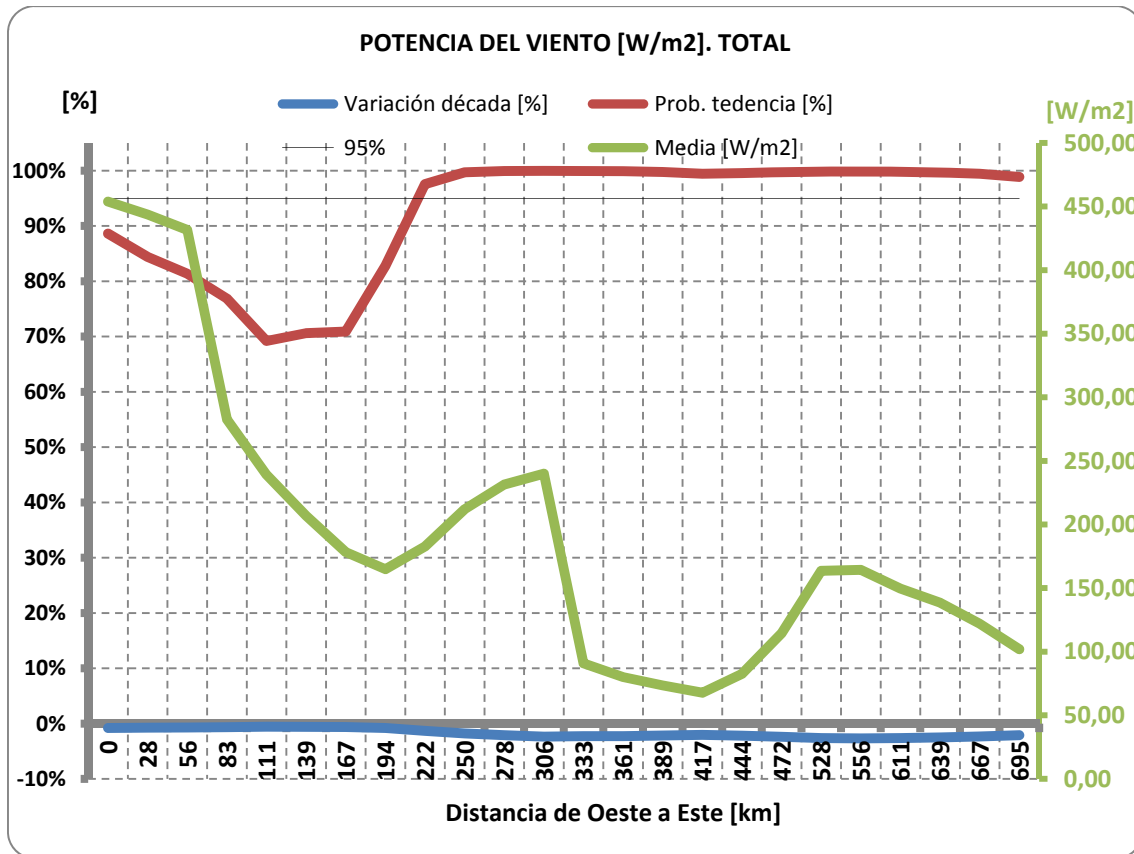


Figura 3.62. Potencia total del viento

Como puede observarse en la figura adjunta, aquellas zonas que gozan de mayor potencial eólico son las situadas frente a las costas gallegas, siendo su diferencia con el resto del litoral cantábrico muy abultada. Si a esto añadimos el hecho de que en dichas zonas la tendencia de la potencia es prácticamente a mantenerse mientras que en las zonas más orientales la tendencia es a disminuir ligeramente, encontramos que el litoral gallego es el que presenta más potencial para la instauración de energía eólica.

### 3.3. Contraste de tendencias

Las tendencias obtenidas en los análisis de los puntos SIMAR 44 se contrastan con los valores actuales de las boyas de Estaca de Bares, Cabo de Peñas y Bilbao Vizcaya mediante el estudio de sus rosas de oleaje y viento. Como puede observarse (*Anejo V. Contraste de tendencias*), dichas tendencias se cumplen y por lo tanto podemos darlas como buenas.

Asimismo se comparan los valores de potencia del oleaje y teórica con los valores estudiados en otros trabajos [8] y los valores del IDEA y el ENOLA. Como puede observarse en el *Anejo VI. Contraste de potencias*, dichos valores cuadran perfectamente con los obtenidos.

### 3.4. Análisis espectral

Una vez analizados los periodogramas, observamos que estos presentan posibles ciclos a 30-40 años. Dado que nuestra ristra cronológica de datos abarca únicamente 44 años, no es posible certificar los posibles períodos obtenidos, con lo cual se descarta su veracidad.

Los resultados obtenidos en los periodogramas pueden observarse en el *Anejo VII. Periodogramas*.



## 4. IMPLICACIONES EN LA EXPLOTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

### 4.1. Energía undimotriz

En el presente punto se ha calculado la potencia útil promedio extraída con un dispositivo WaveDragon 7M (ver especificaciones técnicas en el *Anejo VIII. Especificaciones técnicas WaveDragon 7M* y cálculos en el *Anejo IX. Cálculos potencia undimotriz*) durante los periodos 1958-1968, 1975-1985 y 2001-2011 en tres puntos del litoral cantábrico: Boya Estaca de Bares, Boya Cabo de Peñas y Boya Bilbao Vizcaya.

#### Boya Estaca de Bares

Los diagramas de energía extraída se muestran en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

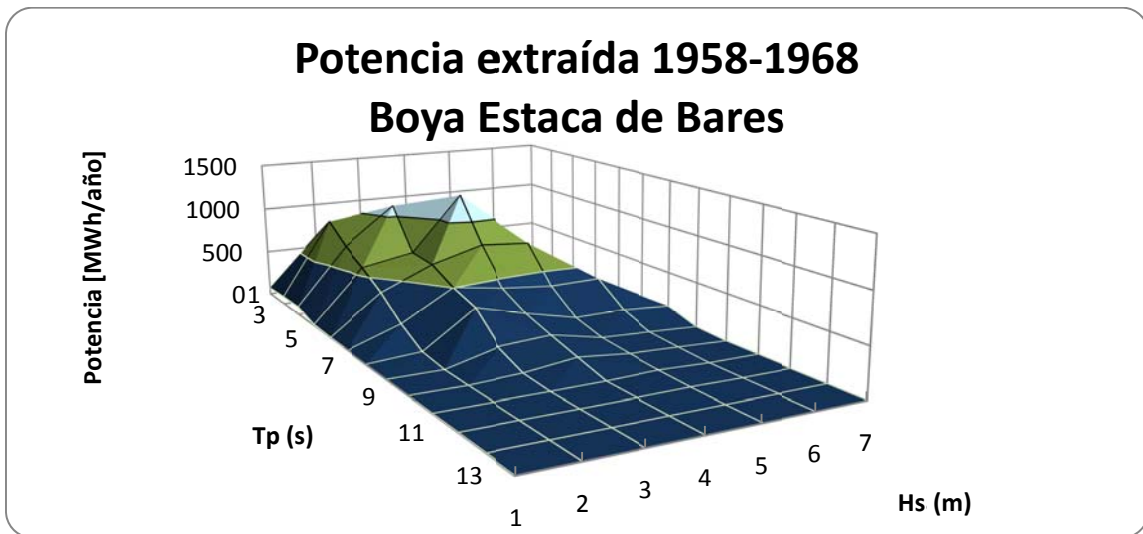


Figura 4.1 Potencia extraída periodo 1958-1968

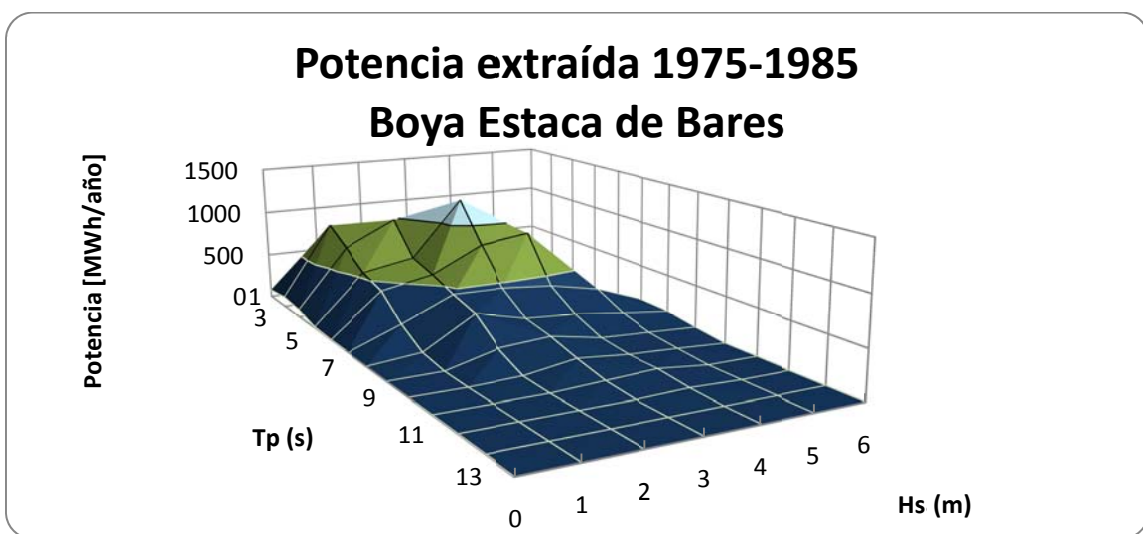


Figura 4.2 Potencia extraída periodo 1975-1985

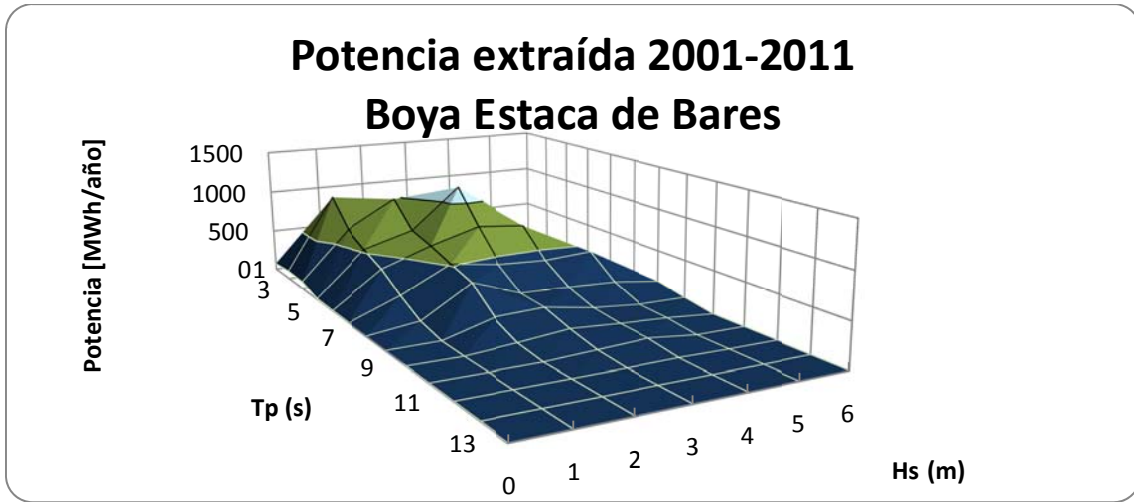


Figura 4.3 Potencia extraída periodo 2001-2011

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.1.

PERÍODO	POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]
1958-1968	14,45
1975-1985	14,41
2001-2011	14,44

Tabla 4.1. Potencia anual media extraída

En los análisis de tendencias habíamos calculado una tendencia al aumento del 3% por década en la potencia del oleaje en esta zona. Sin embargo, como se observa, la potencia extraída se mantiene prácticamente invariante. Esto es debido a que el mecanismo de extracción únicamente puede extraer en un rango específico, en el cual las variables se mantienen muy constantes en el tiempo.

La potencia extraída es un valor elevado, 14,4 kWh/año.

#### Boya Cabo de Peñas

Los diagramas de energía extraída se muestran en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

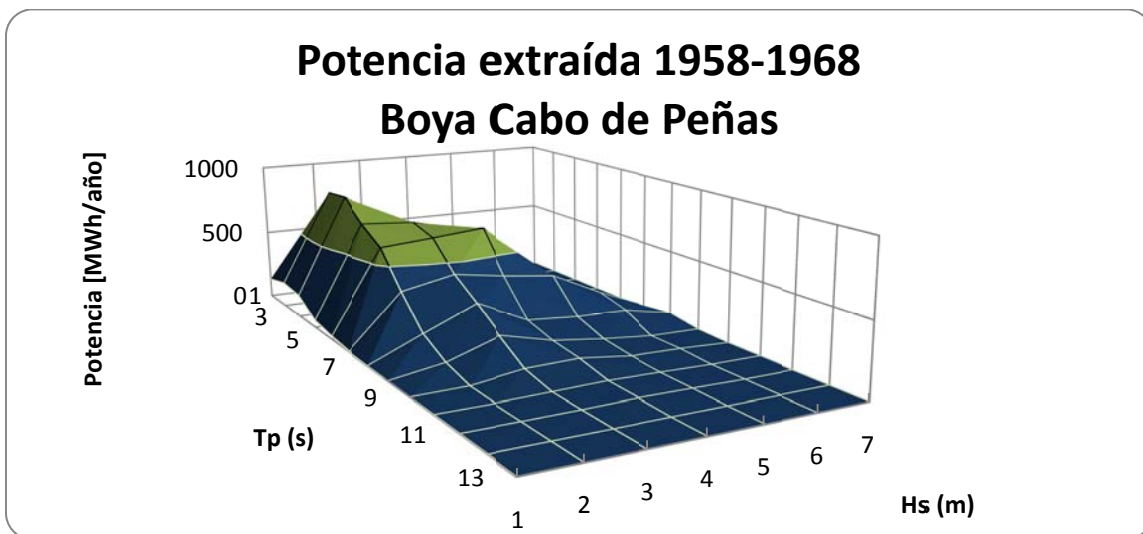


Figura 4.4 Potencia extraída periodo 1958-1968

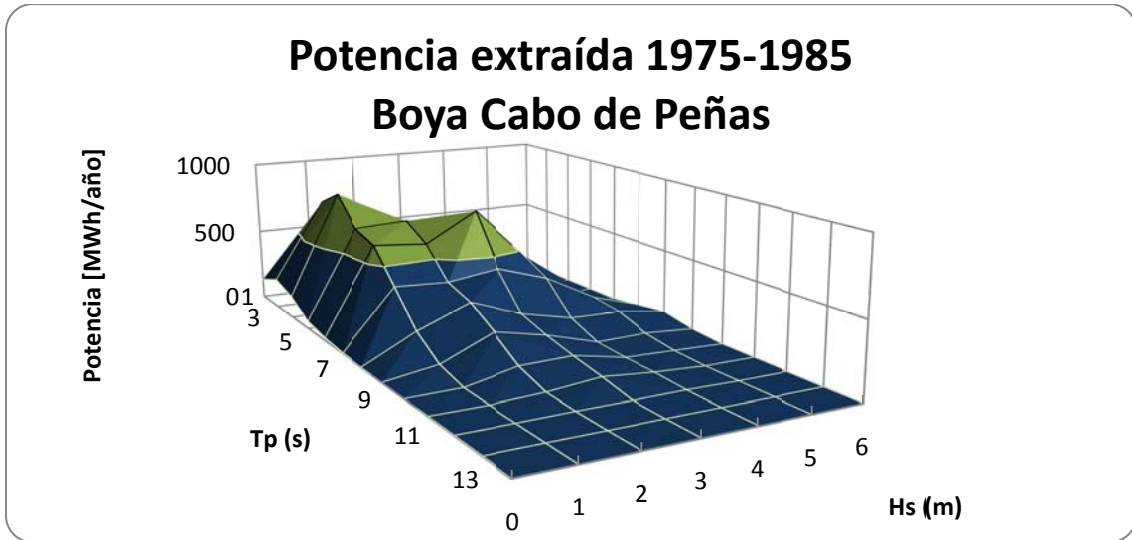


Figura 4.5 Potencia extraída período 1975-1985

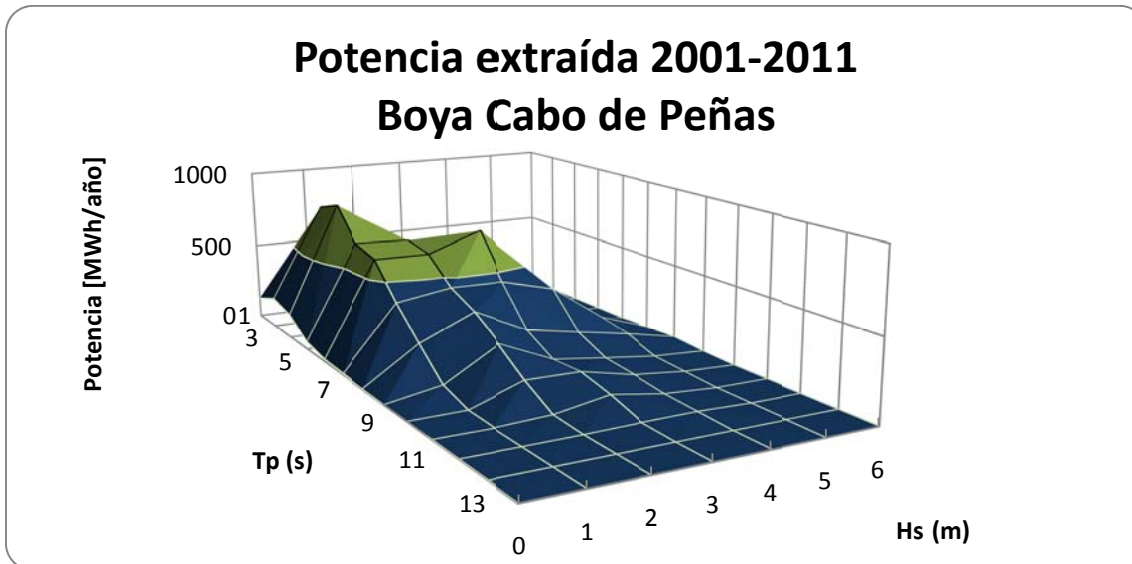


Figura 4.6 Potencia extraída período 2001-2011

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.2.

PERÍODO	POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]
1958-1968	10,74
1975-1985	11,01
2001-2011	11,01

Tabla 4.2. Potencia anual media extraída

En los análisis de tendencias habíamos calculado una tendencia al aumento del 3% por década en la potencia del oleaje en esta zona. En este caso si que aumentamos un 2% la potencia extraída desde el período 1958-1968 al 1975-1985, pero posteriormente dicha potencia se mantiene constante, debido a como se ha dicho anteriormente, que el mecanismo de extracción trabaja en unos rangos en que el oleaje se mantiene prácticamente constante en el tiempo.

**Boya Bilbao-Vizcaya**

Los diagramas de energía extraída se muestran en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

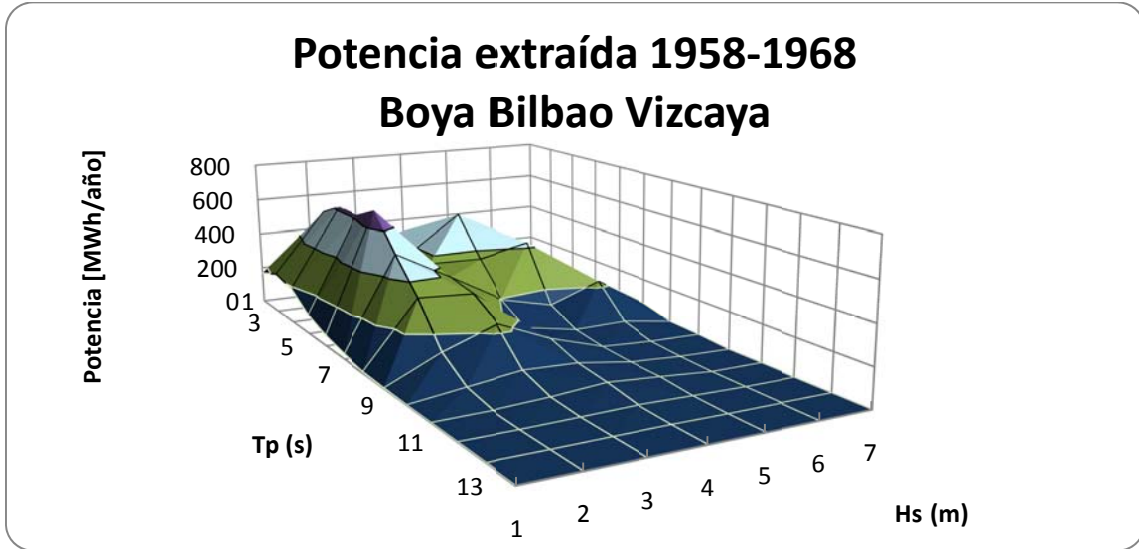


Figura 4.7 Potencia extraída período 1958-1968

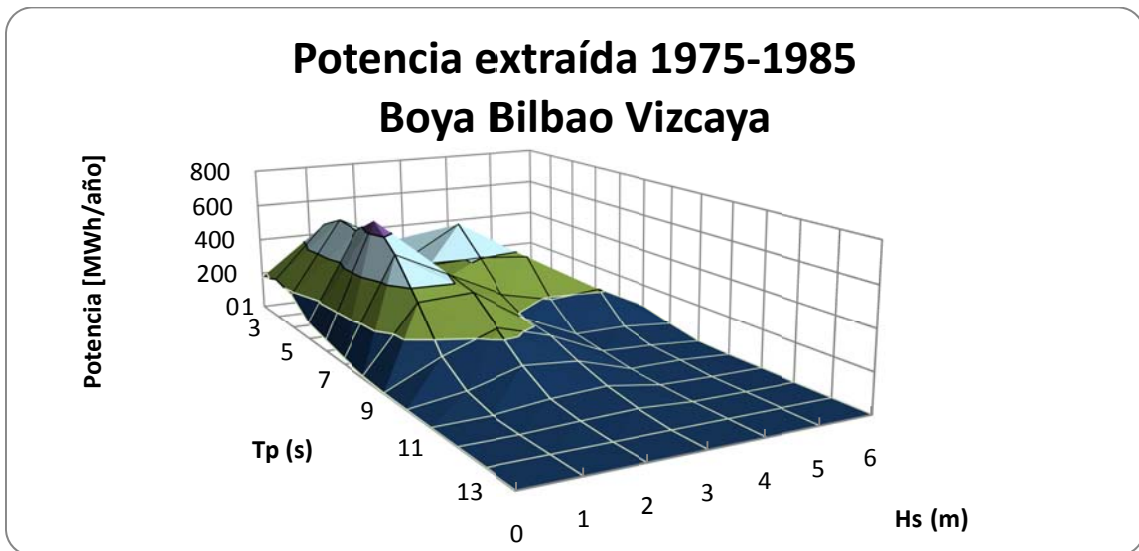


Figura 4.8 Potencia extraída período 1975-1985

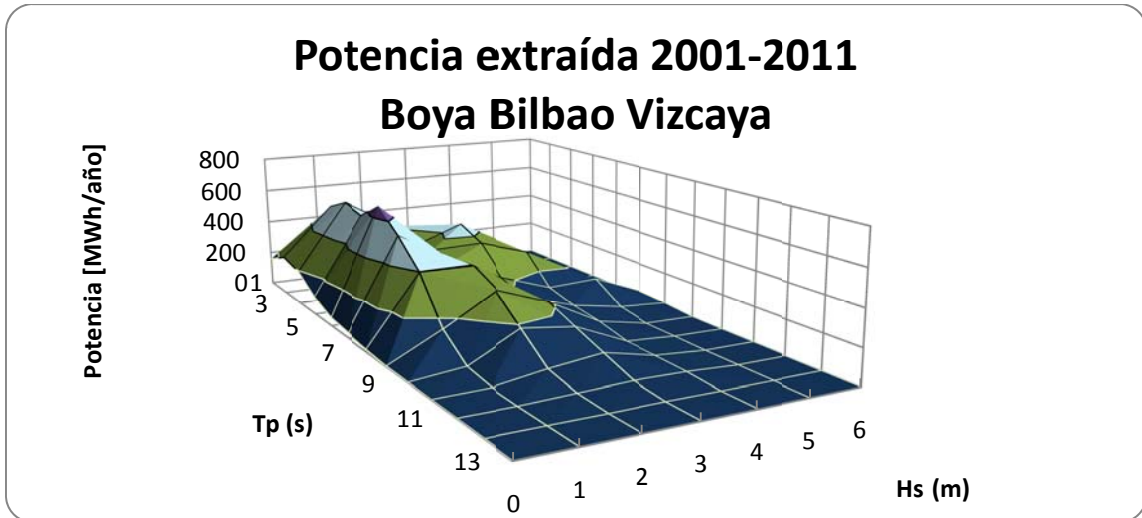


Figura 4.9 Potencia extraída período 2001-2011

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.3.

<b>PERÍODO</b>	<b>POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]</b>
1958-1968	9,54
1975-1985	9,84
2001-2011	9,71

Tabla 4.3. Potencia anual media extraída

En los análisis de tendencias habíamos calculado una tendencia al aumento del 3,5% por década en la potencia del oleaje en esta zona. En este caso si que aumentamos un 3% la potencia extraída desde el período 1958-1968 al 1975-1985, pero posteriormente dicha potencia disminuye ligeramente.

#### 4.2. Energía eólica

En el presente punto se ha calculado la potencia útil promedio extraída por un aerogenerador RePOWER 6M (ver especificaciones técnicas en el *Anejo X. Especificaciones técnicas RePOWER 6M* y cálculos en el *Anejo XI. Cálculos de potencia eólica*) durante los períodos 1958-1968, 1975-1985 y 2001-2011 en tres puntos del litoral cantábrico: Boya Estaca de Bares, Boya Cabo de Peñas y Boya Bilbao Vizcaya.

##### Boya Estaca de Bares

Los resultados de energía extraída por períodos se observan en la Figura 4.10.

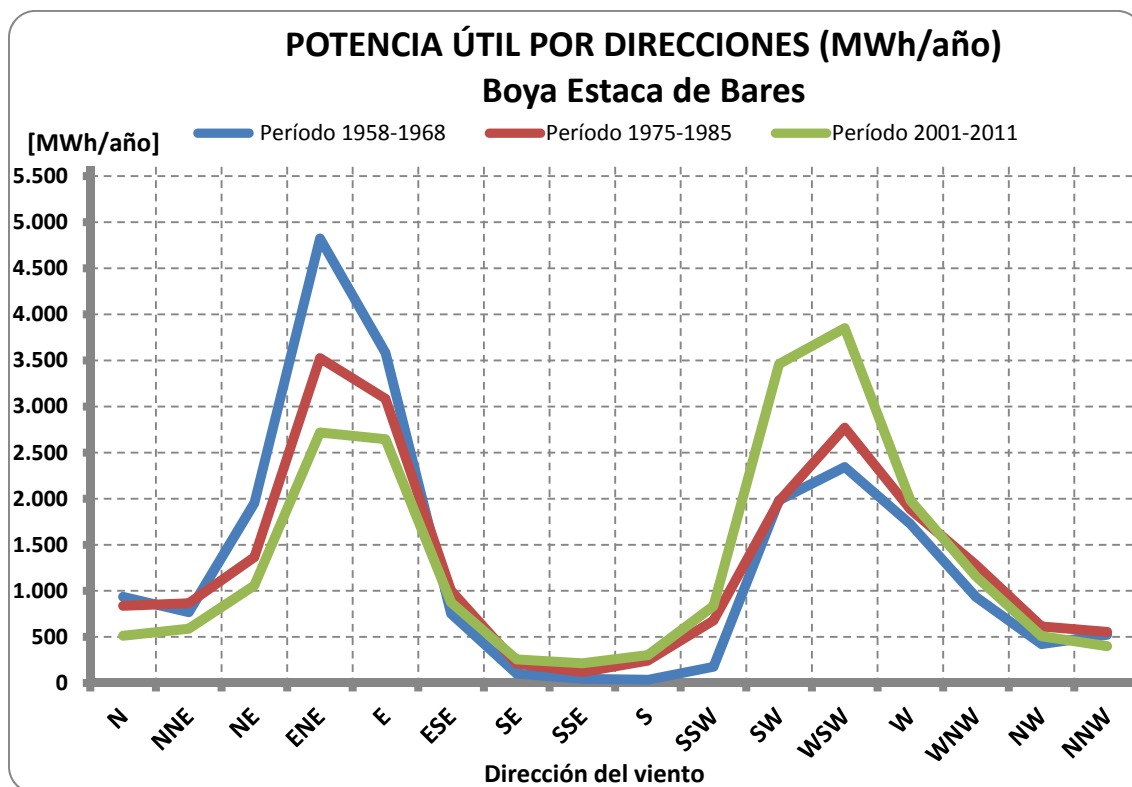


Figura 4.10 Potencia eólica extraída Estaca de Bares

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.4.

PERÍODO	POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]
1958-1968	21,20
1975-1985	21,04
2001-2011	21,64

Tabla 4.4. Potencia anual media extraída

Las tendencias observadas en los cálculos se cumplen perfectamente. Si bien la potencia se mantiene prácticamente constante tal y como se había previsto, la dirección de la cual obtenemos la energía varía muy considerablemente. Es por ello que si bien en el período 1958-1968 hubiésemos orientado las filas de aerogeneradores hacia el ENE, hoy en día los pasaríamos a orientar hacia el WSW.

##### Boya Estaca de Bares

Los resultados de energía extraída por períodos se observan en la Figura 4.10.

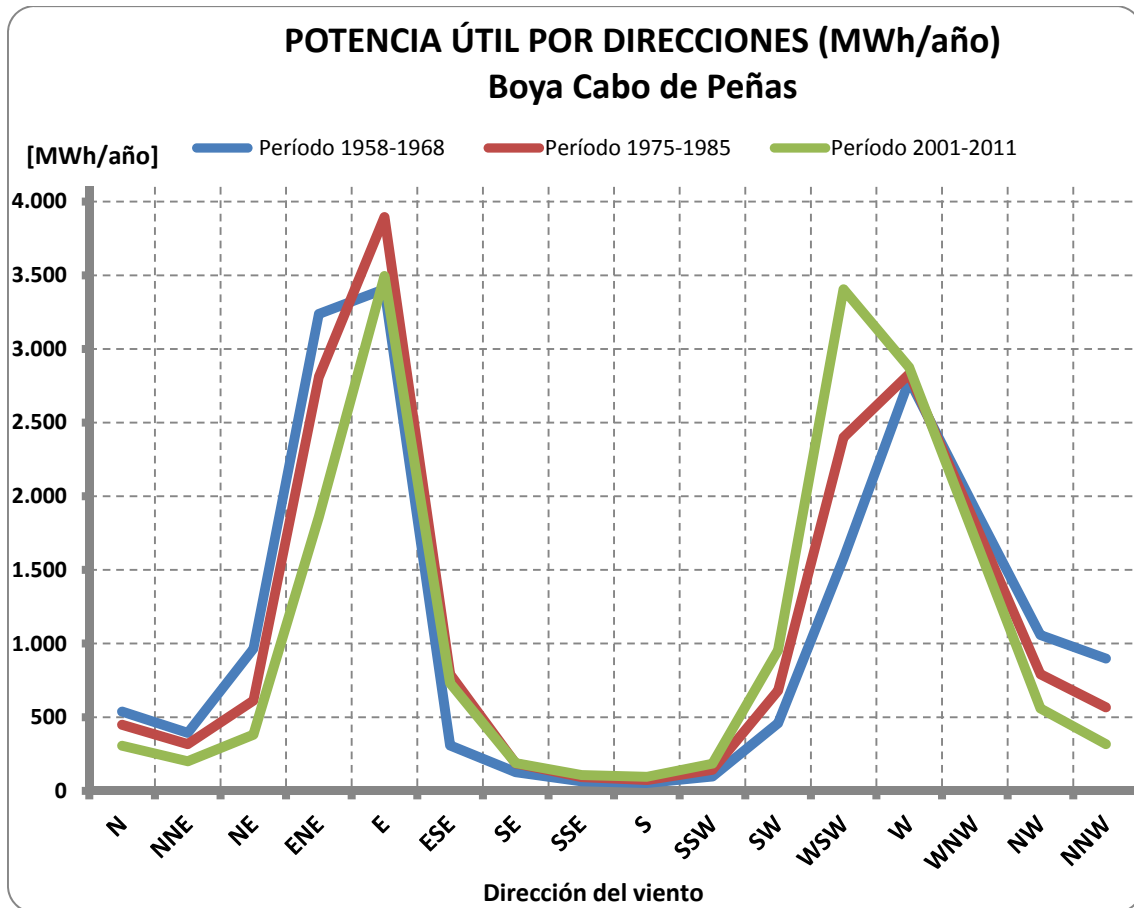


Figura 4.11 Potencia eólica extraída Cabo de Peñas

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.5.

PERÍODO	POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]
1958-1968	17,98
1975-1985	18,54
2001-2011	17,65

Tabla 4.5. Potencia anual media extraída

En este punto el análisis es complejo. Habíamos calculado una disminución del 0,7% por década, pero de nuevo este valor se cumple con matices. Los aerogeneradores no son capaces de transformar toda la energía, sino que su rendimiento varía según el rango de velocidades. Por lo tanto la variación de la potencia total no se transforma directamente en una variación de la potencia extraída. Para ello deberían realizarse estudios más pormenorizados.

En cuanto a la tendencia observada en la variación de las direcciones del viento, se cumple perfectamente. El viento rola pasando de predominar del E hacia el WSW. Actualmente dichas direcciones están muy igualadas en cuanto a potencia extraída, por lo tanto debería realizarse un estudio pormenorizado para la orientación final del campo de aerogeneradores, aunque se parte con la ventaja de que nos hallamos antes direcciones opuestas.

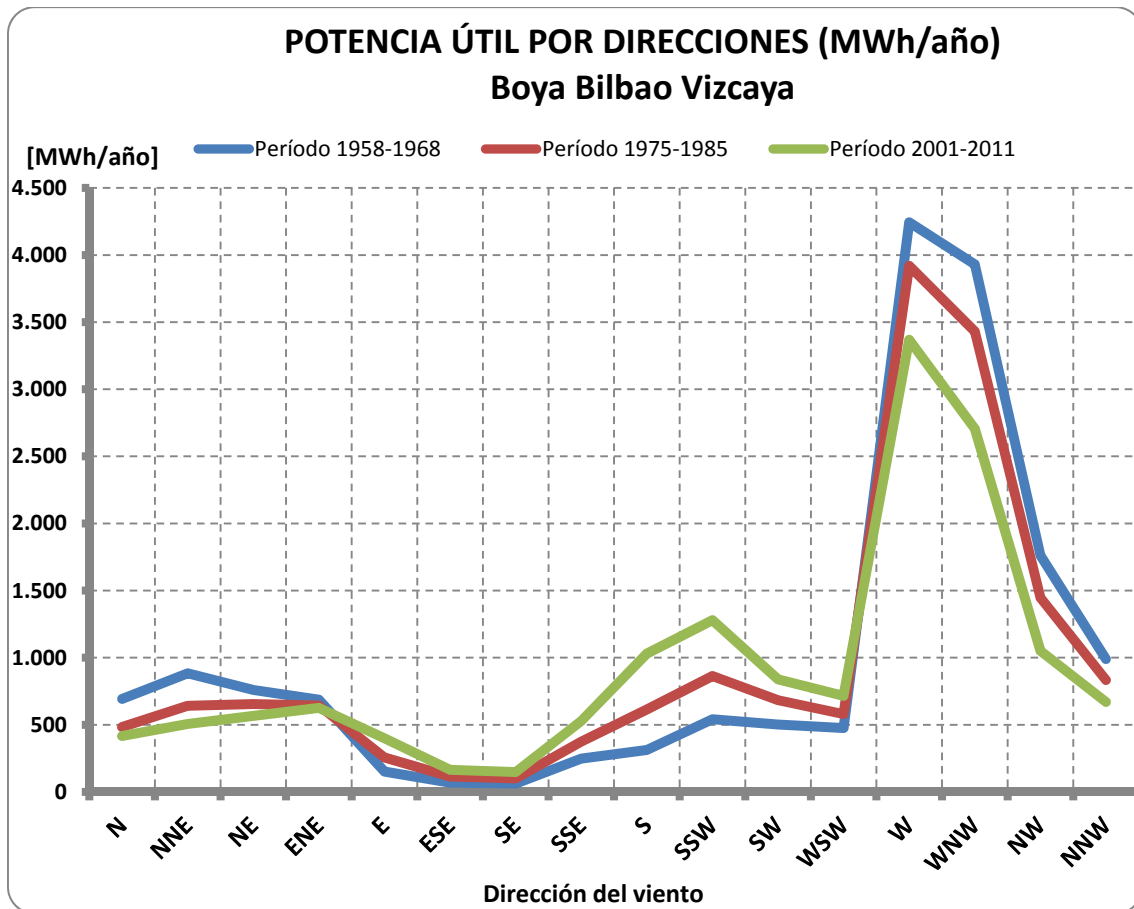
**Boya Bilbao Vizcaya**

Figura 4.12 Potencia eólica extraída Bilbao Vizcaya

Si integramos los resultados obtenidos, la potencia total extraída como media anualmente en cada período se muestra en la Tabla 4.6.

<b>PERÍODO</b>	<b>POTENCIA EXTRAÍDA [GWh/año]</b>
1958-1968	16,38
1975-1985	15,67
2001-2011	15,03

Tabla 4.6. Potencia anual media extraída

En el caso de la zona de Bilbao Vizcaya si que denotamos un cambio severo en la potencia extraída. Las previsiones eran de un 2,7% por década y si que en este caso se traduce en un 8% desde 1958-1968 hasta 2001-2011. Esto se debe a que el aerogenerador en este caso si que es capaz de captar los rangos en que se producen los cambios. Por lo tanto, si se quiere invertir en energía eólica en esta zona, se debe ser muy prudente.

Por lo que concierne a las direcciones se cumple la tendencia hallada de una disminución en el abanico W-NNW y un ligero aumento en las direcciones del SSW.

## 5. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

### 5.1. Conclusiones

Tras analizar los resultados obtenidos después del largo proceso de cálculo, se presentan a continuación las conclusiones obtenidas durante la realización del presente estudio. Como se observará dichas conclusiones tienen un carácter generalista, dado que si bien la tesina presentaría la posibilidad de aventurarse en conclusiones detallistas, no sería correcto desde el punto de vista de la veracidad científica, dejando dichas conclusiones para posibles estudios futuros de detalle centrados en zonas concretas del litoral cantábrico.

Así pues, se listan las conclusiones finales del presente estudio.

#### *Tendencias del oleaje*

- La dirección de procedencia del oleaje en el litoral cantábrico está variando significativamente en los últimos años. El porcentaje de olas procedentes desde las direcciones 270º y 300º (direcciones orientadas al océano Atlántico) está aumentando a la par que disminuye el porcentaje del oleaje procedente desde las direcciones 330º, 0º, 30º y 60º.
- Como consecuencia de este giro de la procedencia del oleaje, el sector 300º se convierte en el sector predominante en detrimento del sector 330º.
- La altura de ola significativa sufre una variación similar a las direcciones del oleaje. Se incrementa de forma notable en el sector 300º, se mantiene constante en el sector 270º y disminuye en los sectores 330º, 0º, 30º y 60º.
- Las tendencias de la energía y potencia del oleaje reflejan claramente las tendencias antes presentadas. Ambas aumentan de manera muy considerable en el sector 300º, se mantienen en el sector 270º y presentan tendencias fuertes de disminución en los sectores 0º, 30º y 60º.
- El balance total de energía y potencia en el litoral cantábrico presenta un aumento notable a lo largo del tiempo, siendo mayor el aumento registrado en los sectores 270º y 300º que el descenso acumulado en los sectores 330º, 0º, 30º y 60º.
- El número de datos de temporal ( $H_s > 3m$ ) presenta una tendencia muy marcada al aumento en el sector 300º, aumenta ligeramente en el sector 270º y en el resto de sectores no disponemos de suficientes datos como para extraer tendencias.
- La altura de ola significativa en temporal se mantiene constante a lo largo del tiempo en los sectores 300º y 270º, mientras que en el resto no se dispone de suficientes datos para establecer tendencias.
- El análisis espectral mediante periodogramas no permite establecer ciclos.

#### *Tendencias del viento*

- Las direcciones de procedencia predominante del viento a lo largo del litoral cantábrico varía según el tramo del litoral, en contraposición al oleaje, en el que todo el litoral se comportaba de forma muy similar. Podemos establecer de esta forma 2 zonas: mitad occidental y mitad oriental.
- Las direcciones del viento principales en la mitad occidental del litoral cantábrico son 30º, 60º, 210º, 240º y 270º. Si bien a mitades del siglo XIX las direcciones predominantes eran 30º y 60º, existen tendencias muy marcadas a la disminución del viento en dicha dirección a favor de sus direcciones opuestas 210º, 240º y 270º. En el resto de direcciones la tendencia es a mantenerse.

- Las direcciones del viento principales en la mitad oriental del litoral cantábrico son los sectores 270º, 300º y 330º, siendo la de 300º la dirección que acapara mayor frecuencia (alrededor del 15%). Desde los sectores orientados al litoral francés el viento posee frecuencias muy bajas.
- Las direcciones predominantes en la mitad oriental (270º, 300º y 330º) están manteniéndose, mientras que las próximas a los sectores 180º, 210º y 240º presentan tendencias fuertes al aumento, con lo cual la tendencia es a homogeneizarse la dirección de procedencia de los vientos.
- La potencia eólica en la mitad occidental del litoral cantábrico presenta la misma tendencia que las direcciones. La potencia en los sectores 210º, 240º y 270º aumenta de forma considerable mientras la potencia en las direcciones 30º y 60º disminuye, de forma que las direcciones 210º, 240º y 270º pasan a ser las direcciones con mayor potencial eólico desde aproximadamente 1975.
- En la mitad oriental la potencia eólica presenta ligeras tendencias a disminuir en los sectores predominantes 270º, 300º, 330º y al aumento en los sectores 180º, 210º, 240º. Sin embargo la potencia en los sectores dominantes es mucho mayor, con lo cual a corto plazo y con las tendencias estudiadas no se espera una equiparación entre las potencias de los sectores en que disminuye y los sectores en que aumenta.
- La potencia eólica total se mantiene en la mitad occidental, mientras que disminuye considerablemente en la mitad oriental.
- El análisis espectral mediante periodogramas no permite establecer ciclos.

#### ***Implicaciones en energías renovables marinas***

- La mayor potencia undimotriz se presenta en las costas gallegas, con alrededor de 40 kW/m, mientras que en el resto del litoral cantábrico oscila entre 25-30 kW/m.
- De esta potencia, con los dispositivos estudiados, podrían producirse rendimientos de alrededor de 14 GWh/año en el litoral gallego, 11 GWh/año en el litoral asturiano y 9 GWh/año en el litoral vasco.
- Dado que el incremento de potencia del oleaje que se está experimentando en todo el litoral cantábrico se debe principalmente a un incremento en el número de datos de temporal, este aumento sólo se traducirá en un aumento de la potencia extraída en aquellas zonas en que el oleaje aumente su potencia en un rango en el que los dispositivos sean capaces de trabajar.
- La implantación de estaciones de extracción de energía undimotriz en las aguas gallegas presenta mejores condiciones actuales que en la mitad oriental del litoral cantábrico. Sin embargo, la tendencia al aumento de la potencia debida a rangos no compatibles con los dispositivos podría hacer disminuir la potencia extraída. Por otro lado en la mitad oriental, si bien los potenciales son menores, las tendencias al aumento en rangos de trabajo presentan interesantes perspectivas.
- El aumento de la potencia del oleaje en el litoral gallego es más difícil que se traduzca en un aumento de la potencia extraída con los dispositivos actuales, mientras que la diferencia si puede ser notable en la parte oriental del litoral.
- La tendencia a la focalización de la dirección del oleaje en el sector de 300º favorece la operatividad de los dispositivos totalizadores o atenuadores.
- La mayor potencia eólica se presenta en las costas gallegas, con alrededor de 600 W/m<sup>2</sup>, mientras que en el resto del litoral cantábrico oscila entre 350-450 W/m<sup>2</sup>.
- De esta potencia, con los dispositivos estudiados, podrían producirse rendimientos de alrededor de 21 GWh/año en el litoral gallego, 17 GWh/año en el litoral asturiano y 15 GWh/año en el litoral vasco.
- En el litoral gallego la potencia eólica se mantiene traducándose únicamente en una variabilidad debida a las fluctuaciones del viento. Sin embargo en el litoral vasco la potencia

eólica presenta tendencias a la disminución en los rangos de velocidad de viento captables por los aerogeneradores actuales y por lo tanto su disminución repercute en la potencia extraída.

- La implantación de estaciones de extracción de energía eólica en las aguas gallegas se antoja mucho más productiva que su implantación en aguas vascas, dado su mayor potencia eólica teórica y su tendencia a mantenerse constante a lo largo del tiempo.
- Las tendencias en la variación de las direcciones predominantes del viento deben ser analizadas cuidadosamente en la mitad occidental del litoral cantábrico antes de disponer la orientación de los campos de aerogeneradores, dado que pueden repercutir severamente al rendimiento a largo plazo.

#### ***Implicaciones en ingeniería costera y portuaria***

- El giro de la dirección predominante del oleaje desde el sector 330º hacia 300º junto con un aumento de la altura de ola significativa implicará un mayor transporte longitudinal de sedimento, dado que nos acercamos más a un ángulo incidente del oleaje de 45º. Asimismo producirá basculaciones hasta los nuevos perfiles de equilibrio en planta.
- Con dicha tendencia las bocanas de los puertos pasarán a estar más protegidas frente al oleaje, pues están orientadas frente a temporales del Norte Noroeste. Sin embargo, el mayor transporte longitudinal puede desembocar en problemas de colmatación en bocanas.
- El aumento de la altura de ola significativa y la energía del oleaje puede implicar problemas de rebase en obras litorales, agitación interior en dársenas por efectos de difracción del oleaje y retroceso de playas.

#### ***5.2. Estudios futuros***

En base a los resultados obtenidos y a las limitaciones propias del presente estudio al querer abarcar una gran extensión costera, se presentan a continuación futuras líneas que tras la realización del trabajo se antojan como interesantes para futuras tesinas o tesis doctorales.

- Realización de análisis a pequeña escala en zonas concretas del litoral cantábrico con metodologías de estudio mucho más detalladas como los métodos del contraste de diferencias (test de Wald-Wolfowitz), regresiones logísticas o Test de Tendencia de Mann-Kendall, , que en dicha tesina no pueden abarcarse dado la intención de ofrecer una aproximación global a todo el litoral cantábrico.
- Estudio de la variabilidad anual y a corto plazo tanto del viento como del oleaje y comparación con sus tendencias a largo plazo.
- Aplicación de las variabilidades a corto y largo plazo del viento y el oleaje en los estudios económicos de explotación de energías renovables offshore.



---

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BACON, S., CARTER, D.J.T. (1991) Wave climate changes in the North Atlantic. *Int. J. Climatol.*
- [2] CAIRES, S., STERL, A. (2005) 100-year return value estimates for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data. *J. Climate*, 18, 1032-1048.
- [3] CASAS-PRAT, M., SIERRA, J.P., (2010) Trend analysis of the wave storminess: the wave direction.
- [4] CAVIA, B. (2009) Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores. UPC Minor Thesis
- [5] CHAPONNIERE. A., SMAKHTIN. A., (2006) Review of Climate Change Scenarios and Preliminary Rainfall Trend Analysis in the Oum Er Rbia Basin, Morocco
- [6] HEMER, M.A., MCLNNES, K., CHURCH, J.A., O'GRADY, J., HUNTER, J.R. (2008) Variability and trends in the Australian wave climate and consequent coastal vulnerability. Sidney College.
- [7] LEMM, A.J., HEGGE, B.J., MASSELINK, G., (1999) Offshore wave climate, Perth (Western Australia), 1994-96. *Mar. Freshwater Res.*, 50, 95-102.
- [8] MARÍA, F., MÉNDEZ, J., LOSADA, I., MEDINA, R., OLABARRIETA, M., (2004). Variaciones hiperanuales de parámetros medios de oleaje en el litoral mediterráneo español en los últimos cincuenta años: efectos sobre la costa.
- [9] MASTENBROEK, C., BURGERS, G., JANSSEN, P. A. E. M. (1993) The dynamic coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. *J. Phys. Ocean.* 23: 1856-1866.
- [10] MORA, A., SEBASTIÁN P. (2011), Aportación al diseño de sistemas eólicos. UPC Minor Thesis
- [11] POWER, S., CASEY. J.P., FOLLAND. C., COLMAN, A., MEHTA, V., (1999) Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamics*, 15, 319-324.
- [12] WANG, X.L., SWAIL. V.R., (2001) Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J. Climate*, 14, 2204-2221.
- [13] WOLF, J., WOOLF. D.K., (2006) Waves and climate change in the north-east Atlantic. *Geophysical Research*.
- [14] WOOD, J.D., TERRAY. E., STRONG. B., SINGH. B. (2005) Measurement of deepwater ocean waves from a subsurface mooring. In: *Proc. Oceans 2005 – Europe*
- [15] WOOLF, D.K. , CHALLENGOR, P.G., COTTON., P.D. (2002) Variability and Predictability of the North Atlantic wave climate. *J. Geophys. Res.*
- [16] YARNAL, B. (1993) *Synoptic climatology in environmental analysis: A primer*. Belhaven Press, London and Florida.
- [17] YOUNG, I.R. (1999) Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *Int. J. Climatology*, 19, 931-950.