



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la evolución (tendencias) del oleaje en la costa cantábrica. ¿Variabilidad o cambio climático?

Treball realitzat per:

Manuel Viñes Recasens

Dirigit per:

Cesar Mösso Aranda

Agustín Sánchez Arcilla

Grau en:

Ciències y Tecnologies del Mar

Barcelona, **miércoles, 28 de septiembre de 2022**

Departament d'enginyeria civil i ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a Raquel Somavilla por darnos acceso a la serie temporal de la boya AGL y a Maribel Ruiz Gil de la Serna y Marta Alfonso Alonso por ayudarnos en el proyecto. También me gustaría agradecer especialmente a Cesar Mössö y Agustín Sánchez Arcilla por creer en mí y darme la oportunidad de formar parte de este proyecto.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	5
RESUM	6
ABSTRACT	7
LISTADO DE ILUSTRACIONES	8
LISTADO DE TABLAS	11
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. MOTIVACIÓN	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. Generales	13
1.2.2. Específicos	13
1.3. ESTADO DEL ARTE	14
1.4. FORMACIÓN DEL OLEAJE E INFLUENCIA CON EL CAMBIO CLIMÁTICO	15
1.5. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DEL CLIMA MEDIO Y EXTREMAL	16
1.5.1. Clima medio	16
1.5.2. Clima extremal	17
1.5.2.1. Picos sobre un umbral	17
1.5.2.2. Generalizada de Valores Extremos	18
1.5.2.3. Probabilidad anual de excedencia	18
1.5.2.4. Períodos de retorno	18
1.6. TÉCNICAS PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS OCEANOGRÁFICOS	19
1.6.1. Instrumentos oceanográficos	19
1.6.2. Boyas	19
1.6.3. Satélites	20
1.7. ÍNDICES CLIMÁTICOS	21
1.7.1. Oscilación del Atlántico Norte (NAO)	21
1.7.2. Patrón del Atlántico Este (EAP)	22
1.7.3. El Niño Southern Oscillation (ENSO)	22
2. ZONA DE ESTUDIO Y RECOPIACIÓN DE DATOS	25
2.1. BOYA BILBAO – VIZCAYA (PE)	25
2.1.1. Altura de ola significativa (Hs)	26
2.1.2. Período de pico (Tp)	26
2.1.3. Peralte (H/L)	26
2.2. BOYA AUGUSTO GONZÁLEZ DE LINARES (IEO)	27
2.2.1.1. Altura de ola significativa (Hs)	27
2.2.1.2. Período de pico (Tp)	28
2.2.1.3. Peralte (H/L)	28
2.3. ÍNDICES CLIMÁTICOS	29
2.3.1. NAO	29
2.3.2. EAP	29
2.3.3. ENSO	30
3. MÉTODOS	31
3.1. PROCESADO DE DATOS	31
3.2. FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN (ACF)	32
3.3. ANÁLISIS ESPECTRAL	33
3.4. TÉCNICA DE DESCOMPOSICIÓN	33
3.5. PRUEBA DE MANN-KENDALL	34

3.6.	FUNCIÓN DE CORRELACIÓN CRUZADA	35
3.7.	ANÁLISIS DE TORMENTAS	35
3.7.1.	<i>Cálculo del número de tormentas y el flujo de energía</i>	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	37
4.1.	RESULTADOS ANÁLISIS DE EXTREMOS DATOS PE.....	37
4.2.	RESULTADOS ANÁLISIS DE EXTREMOS DATOS IEO	40
4.3.	RESULTADOS PROMEDIO SEMANAL	42
4.3.1.	<i>Resultados para la boya B-V</i>	42
4.3.1.1.	Función de Autocorrelación para la boya B-V usando promediado semanal	42
4.3.1.2.	Análisis espectral de la boya B-V usando promediado semanal	43
4.3.1.3.	Obtención de la componente de tendencia de la boya B-V usando promediado semanal ..	44
4.3.1.4.	Prueba de Mann-Kendall para la boya B-V usando promediado semanal	46
4.3.1.5.	Función de correlación cruzada para la boya B-V usando promediado semanal	47
4.3.2.	<i>Resultados para la boya AGL</i>	49
4.3.2.1.	Función de Autocorrelación para la boya AGL usando promediado semanal	49
4.3.2.2.	Análisis espectral de la boya AGL usando promediado semanal	50
4.3.2.3.	Obtención de la componente de tendencia de la boya AGL usando promediado semanal	52
4.3.2.4.	Prueba de Mann-Kendall para la boya AGL usando promediado semanal.....	54
4.3.2.5.	Función de correlación cruzada para la boya AGL usando promediado semanal	55
4.4.	RESULTADOS PROMEDIO MENSUAL	57
4.4.1.	<i>Resultados para la boya B-V</i>	57
4.4.1.1.	Función de Autocorrelación para la boya B-V usando promediado mensual	57
4.4.1.2.	Análisis espectral para la boya B-V usando promediado mensual	58
4.4.1.3.	Obtención de la componente de tendencia de la boya B-V usando promediado mensual ..	59
4.4.1.4.	Prueba de Mann-Kendall para la boya B-V usando promediado mensual	61
4.4.1.5.	Función de correlación cruzada para la boya B-V usando promediado mensual.....	62
4.4.2.	<i>Resultados para la boya AGL</i>	64
4.4.2.1.	Función de Autocorrelación para la boya AGL usando promediado mensual	64
4.4.2.2.	Análisis espectral para la boya AGL usando promediado mensual	65
4.4.2.3.	Obtención de la componente de tendencia de la boya AGL usando promediado mensual	67
4.4.2.4.	Prueba de Mann-Kendall para la boya AGL usando promediado mensual	68
4.4.2.5.	Función de correlación cruzada para la boya AGL usando promediado mensual	69
4.5.	RESULTADO PARA EL ANÁLISIS DE TORMENTAS B-V	71
4.6.	RESULTADO PARA EL ANÁLISIS DE TORMENTAS AGL.....	75
5.	CONCLUSIONES.....	79
5.1.	CONCLUSIONES	79
5.2.	TRABAJO FUTURO	80
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	81

RESUMEN

Los estudios del clima medio y extremal del oleaje, son hoy en día esenciales tanto para la planificación y gestión costera (por ejemplo, para el diseño de infraestructuras costeras) como en alta mar (por ejemplo, diseño de rutas de navegación). En lo que respecta a los registros de olas, a menudo existen limitaciones en la serie temporales, ya sea en longitud o continuidad. Por ello, este trabajo se centrará en la comparación de registros de oleaje de la zona cantábrica (Santander y Bilbao) de diferentes periodos temporales, con el fin de comparar los registros, analizar el clima medio y extremo de ambas muestras, realizando un análisis de tendencia y determinar si los registros presentan variaciones relacionadas con el cambio climático. Los datos para el estudio han sido proporcionados por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y en concreto, estos, han sido medidos por la boya Augusto González de Linares (AGL) cubriendo el periodo de 2007 a 2018 mientras que los datos de Bilbao (boya Bilbao-Vizcaya) fueron adquiridos a partir del historial de datos de Puertos del estado, que abarca el período de 1990 a 2022. El estudio se iniciará con una comparación entre las series temporales de ambos registros, realizando un análisis de extremos, centrándose en la altura significativa de ola (H_s), con el fin de cuantificar las posibles diferencias entre ambos registros. A priori, sí se esperan diferencias sustanciales entre los dos estudios, ya que el número de observaciones difieren mucho.

Finalmente, se ha realizado un análisis comparativo de los registros de olas con índices climáticos (por ejemplo, NAO, EAP, ENSO) proporcionados por NOAA para determinar posibles correlaciones estadísticas con el fin de explicar si el oleaje puede utilizarse como una “proxi” para estudiar el cambio climático.

Palabras clave: Clima extremo, Clima medio, Análisis de tendencias, Cambio climático, Incertidumbre.

RESUM

Els estudis del clima d'ones mitjà i extremal, són avui en dia essencials tant per a la planificació i gestió costanera (per exemple, per al disseny d'infraestructures costaneres) com a alta mar (per exemple, disseny de rutes de navegació). Pel que fa als registres d'onades, sovint hi ha limitacions a la sèrie temporal (ja sigui en longitud o continuïtat). Per això, aquest treball se centrarà en la comparació de registres d'onatge de la zona cantàbrica (Santander i Bilbao) de diferents períodes temporals per tal de comparar els registres, analitzar el clima mitjà i extrem de les dues mostres, fent una anàlisi de tendència i determinar si els registres presenten variacions relacionades amb el canvi climàtic. Les dades per a l'estudi han estat proporcionades per l'Institut Espanyol d'Oceanografia (IEO) i el Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) i en concret, aquestes dades han estat mesurades per la boia Augusto González de Linares (AGL) cobrint el període de 2007 a 2018 mentre que les dades de Bilbao (boia Bilbao-Biscaia) van ser adquirits a partir de l'historial de dades de Ports de l'estat, que abasta el període del 1990 al 2022. L'estudi s'iniciarà amb una comparació entre les sèries temporals d'ambdós registres realitzant una anàlisi d'extremes, centrant-se en l'alçada significativa d'onada (Hs), per tal de quantificar les possibles diferències entre ambdós registres. A priori, sí que s'esperen diferències substancials entre els dos estudis, ja que el nombre d'observacions difereixen molt.

Finalment, s'ha realitzat una anàlisi comparativa dels registres d'onades amb índexs climàtics (per exemple, NAO, EAP, ENSO) proporcionats per NOAA per determinar possibles correlacions estadístiques per explicar si l'onatge es pot utilitzar com una proxy per a estudiar el canvi climàtic.

Paraules clau: Clima extrem, Clima mitjà, Anàlisi de tendències, Canvi climàtic, Incertesa

ABSTRACT

Studies of mean and extreme wave climate are nowadays essential for both coastal (e.g. for coastal infrastructure design) and offshore (e.g. shipping route design) planning and management. As far as wave records are concerned, there are often limitations in the time series (either in length or continuity). For that reason, this work will focus on the comparison of wave records from the Cantabrian coast (Santander and Bilbao) from different time spans in order to compare the records, analyze the mean and extreme climate of both samples, make a trend analysis and determine if the records present variations related to climate change.

The data for the study were provided by the Spanish Institute of Oceanography (IEO) and the Centre of Scientific (CSIC) and were measured by the Augusto González de Linares (AGL) buoy covering the period from 2009 and 2015 while the data from Bilbao (Bilbao-Vizcaya Deep Water Buoy) were acquired from the data history of Puertos del Estado, covering the period from 1990 to 2022. The study will start with a direct comparison between the extreme analysis focusing on the significant wave height (H_s), in order to quantify possible differences between both records. A priori, substantial differences are expected between the records of both buoys, since there are different number of observations.

Finally, a comparative analysis of the wave records with climatic indices (for example, NAO, EAP, ENSO) provided by NOAA has been carried out to determine possible statistical correlations in order to explain if the waves can be used as a "proxy" for study climate change.

Key words: Extreme climate, Mean climate, Trend analysis, Climate change, Uncertainty

LISTADO DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: ESTADO DE MAR DONDE SE PUEDEN OBSERVAR LOS TRES INDICADORES, UMBRAL DE ALTURA DE OLA, DURACIÓN DEL TEMPORAL Y TIEMPO MÍNIMO ENTRE TEMPORALES (P. DEL ESTADO, 1990).....	17
ILUSTRACIÓN 2: FENÓMENO FÍSICO FASES POSITIVAS Y NEGATIVAS DE LA NAO (THOMSON HIGHER EDUCATION).....	22
ILUSTRACIÓN 3: MAPA ZONA DE ESTUDIO, POSICIÓN DE LAS BOYAS AGL Y PE (ELABORACIÓN PROPIA).....	25
ILUSTRACIÓN 4: BOYA BILBAO-VIZCAYA.....	25
ILUSTRACIÓN 5: ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE DE LA BOYA BILBAO- VIZCAYA (ELABORACIÓN PROPIA).	26
ILUSTRACIÓN 6: PERÍODO DE PICO DE LA BOYA BILBAO- VIZCAYA (ELABORACIÓN PROPIA).	26
ILUSTRACIÓN 7: VARIABLE PERALTE DE LA BOYA BILBAO- VIZCAYA (ELABORACIÓN PROPIA).	26
ILUSTRACIÓN 8: BOYA AUGUSTO GONZÁLEZ DE LINARES (IEO-SANTANDER, N.D.)	27
ILUSTRACIÓN 9: ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE DE LA BOYA AUGUSTO GONZÁLEZ DE LINARES (ELABORACIÓN PROPIA).	27
ILUSTRACIÓN 10: PERÍODO DE PICO DE LA BOYA AUGUSTO GONZÁLEZ DE LINARES (ELABORACIÓN PROPIA).	28
ILUSTRACIÓN 11: VARIABLE PERALTE DE LA BOYA AUGUSTO GONZÁLEZ DE LINARES (ELABORACIÓN PROPIA).....	28
ILUSTRACIÓN 12: OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE (ELABORACIÓN PROPIA).	29
ILUSTRACIÓN 13: PATRÓN DEL ATLÁNTICO ESTE (ELABORACIÓN PROPIA).	29
ILUSTRACIÓN 14: EL NIÑO/LA NIÑA OSCILACIÓN DEL SUR (ELABORACIÓN PROPIA).	30
ILUSTRACIÓN 15: SERIES TEMPORAL DE PE INICIAL Y CON SUS PROMEDIADOS SEMANALES Y MENSUALES (ELABORACIÓN PROPIA).	32
ILUSTRACIÓN 16: EJEMPLO DE ANÁLISIS ESPECTRAL DEL PARÁMETRO HS UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	33
ILUSTRACIÓN 17: SERIE TEMPORAL DE PE CON UMBRAL DE ALTURA DE OLA EN 4.5 METROS (ELABORACIÓN PROPIA).	37
ILUSTRACIÓN 18: RESULTADOS ANÁLISIS DE EXTREMOS ESCALARES DE LA BOYA B-V CON PERÍODO COMPRENDIDO DES DE 1990 HASTA 2022 (ELABORACIÓN PROPIA).	38
ILUSTRACIÓN 19: SERIE TEMPORAL DE IEO CON UMBRAL DE ALTURA DE OLA EN 4.5 METROS (ELABORACIÓN PROPIA).....	40
ILUSTRACIÓN 20: RESULTADOS ANÁLISIS DE EXTREMOS ESCALARES DE LA BOYA AGL CON PERÍODO COMPRENDIDO DES DE 2007 HASTA 2018 (ELABORACIÓN PROPIA).	40
ILUSTRACIÓN 21: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO HS, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	42
ILUSTRACIÓN 22: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO Tp, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	43
ILUSTRACIÓN 23: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO PERALTE, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	43
ILUSTRACIÓN 24: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO HS SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	43
ILUSTRACIÓN 26: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO PERALTE SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	44
ILUSTRACIÓN 25: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO Tp SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).	44
ILUSTRACIÓN 27: COMPONENTE TENDENCIAL DE HS UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	44
ILUSTRACIÓN 28: COMPONENTE TENDENCIAL DEL Tp SUTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	45
ILUSTRACIÓN 29: COMPONENTE TENDENCIAL DEL PERALTE UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	45
ILUSTRACIÓN 30: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO NAO Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	47
ILUSTRACIÓN 31: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE LA VARIABLE TEMP Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	48
ILUSTRACIÓN 32: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO ENSO Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	48

ILUSTRACIÓN 33: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO HS, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
ILUSTRACIÓN 34: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO Tp, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
ILUSTRACIÓN 35: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO PERALTE, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	50
ILUSTRACIÓN 36: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO HS SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	50
ILUSTRACIÓN 37: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO Tp SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	51
ILUSTRACIÓN 38: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO PERALTE SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	51
ILUSTRACIÓN 39: COMPONENTE TENDENCIAL DE HS UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).....	52
ILUSTRACIÓN 40: COMPONENTE TENDENCIAL DE Tp UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).....	52
ILUSTRACIÓN 41: EJEMPLO DONDE SE PUEDE OBSERVAR QUE LAS COMPONENTES TENDENCIALES DEPENDEN DEL PERÍODO DE TIEMPO ESTUDIADO (ELABORACIÓN PROPIA).....	53
ILUSTRACIÓN 42: COMPONENTE TENDENCIAL DE PERALTE UTILIZANDO EL PROMEDIADO SEMANAL PARA LA BOYA AGL (ILUSTRACIÓN PROPIA).....	53
ILUSTRACIÓN 43: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO NAO Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).....	55
ILUSTRACIÓN 44: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO TEMPERATURA Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).....	55
ILUSTRACIÓN 45: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO ENSO Y LOS PARÁMETROS HS, Tp Y H/L SEMANALES DE LA BOYA AGL ((ELABORACIÓN PROPIA).....	56
ILUSTRACIÓN 46: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO HS, UTILIZANDO EL PROMEDIO MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	57
ILUSTRACIÓN 47: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO Tp, UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	57
ILUSTRACIÓN 48: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA EL PARÁMETRO PERALTE, UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL ((ELABORACIÓN PROPIA).....	58
ILUSTRACIÓN 49: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO HS MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	58
ILUSTRACIÓN 50: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO Tp MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	59
ILUSTRACIÓN 51: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA B-V, PARA EL PARÁMETRO PERALTE MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	59
ILUSTRACIÓN 52: COMPONENTE TENDENCIAL DE HS UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	59
ILUSTRACIÓN 53: COMPONENTE TENDENCIAL DE Tp UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	60
ILUSTRACIÓN 54: COMPONENTE TENDENCIAL DE PERALTE UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	60
ILUSTRACIÓN 55: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO NAO Y LOS PARÁMETROS MENSUALES HS, Tp Y H/L DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	62
ILUSTRACIÓN 56: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO EAP Y LOS PARÁMETROS MENSUALES HS, Tp Y H/L DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	62
ILUSTRACIÓN 57: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO ENSO Y LOS PARÁMETROS MENSUALES HS, Tp Y H/L DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).....	63
ILUSTRACIÓN 58: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO HS, UTILIZANDO EL PROMEDIO SEMANAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	64

ILUSTRACIÓN 59: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO Tp, UTILIZANDO EL PROMEDIO MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).	64
ILUSTRACIÓN 60: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA EL PARÁMETRO PERALTE, UTILIZANDO EL PROMEDIO MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).	65
ILUSTRACIÓN 61: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO Hs MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).	65
ILUSTRACIÓN 63: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO Tp MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).	66
ILUSTRACIÓN 62: PERIODOGRAMA Y DENSIDAD ESPECTRAL DE LA BOYA AGL, PARA EL PARÁMETRO PERALTE MENSUAL (ELABORACIÓN PROPIA).	66
ILUSTRACIÓN 64: COMPONENTE TENDENCIAL DE Hs UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	67
ILUSTRACIÓN 65: COMPONENTE TENDENCIAL DE Tp, UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	67
ILUSTRACIÓN 66: COMPONENTE TENDENCIAL DE PERALTE, UTILIZANDO EL PROMEDIADO MENSUAL PARA LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	67
ILUSTRACIÓN 67: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO NAO Y LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y H/L (ELABORACIÓN PROPIA).	69
ILUSTRACIÓN 68: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO EAP Y LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y H/L (ELABORACIÓN PROPIA).	69
ILUSTRACIÓN 69: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE EL ÍNDICE CLIMÁTICO ENSO Y LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y H/L (ELABORACIÓN PROPIA).	70
ILUSTRACIÓN 70: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA B-V PARA LOS PARÁMETROS N.º DE TORMENTAS Y FLUJO DE ENERGÍA (ELABORACIÓN PROPIA).	71
ILUSTRACIÓN 71: ANÁLISIS ESPECTRAL DEL N.º DE TORMENTAS Y FLUJO DE ENERGÍA, UTILIZANDO LOS DATOS DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	71
ILUSTRACIÓN 72: SERIES TEMPORALES Y COMPONENTES TENDENCIALES DE LOS PARÁMETROS DE TORMENTAS DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	72
ILUSTRACIÓN 73: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE ÍNDICES CLIMÁTICOS Y PARÁMETROS DE TORMENTAS DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	74
ILUSTRACIÓN 74: AUTOCORRELOGRAMA DE LA BOYA AGL PARA LOS PARÁMETROS N.º DE TORMENTAS Y FLUJO DE ENERGÍA (ELABORACIÓN PROPIA).	75
ILUSTRACIÓN 75: ANÁLISIS ESPECTRAL DEL N.º DE TORMENTAS, UTILIZANDO LOS DATOS DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	75
ILUSTRACIÓN 76: ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FLUJO DE ENERGÍA, UTILIZANDO LOS DATOS DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	76
ILUSTRACIÓN 77: SERIES TEMPORALES Y COMPONENTES TENDENCIALES DE LOS PARÁMETROS DE TORMENTAS DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	76
ILUSTRACIÓN 78: CORRELACIONES CRUZADAS ENTRE ÍNDICES CLIMÁTICOS Y PARÁMETROS DE TORMENTAS DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	78

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1: EJEMPLOS DE TIPOS DE INSTRUMENTOS EMPLEADOS PARA OBSERVACIONES OCEANOGRÁFICAS (TABLA INSPIRADA EN (BECHINI & VETRANO, 2013)).	19
TABLA 2: PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS QUE SE OBTIENE A RAÍZ DE OBSERVACIONES VÍA SATÉLITE (DEVI ET AL., 2015).	20
TABLA 3: EJEMPLO DONDE SE IGUALA CON VALORES NULOS AMBOS VECTORES (ELABORACIÓN PROPIA).	31
TABLA 4: CALCULO DE LOS PARÁMETROS DE OLEAJE SEGÚN SI SE TRATA DE AGUAS PROFUNDAS, INTERMEDIAS O SOMERAS (PALOMINO MONZÓN & ALMAZÁN GÁRATE, 2000).	36
TABLA 5: TABLA VALORES DE HS ASOCIADOS A PERÍODOS DE RETORNO PARA LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	38
TABLA 6: TABLA VALORES DE HS ASOCIADOS A PERÍODOS DE RETORNO PARA LA BOYA IEO (ELABORACIÓN PROPIA).	41
TABLA 7: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL DE LA BOYA B-V UTILIZANDO LOS DATOS CON PROMEDIADO SEMANALES (ELABORACIÓN PROPIA).	46
TABLA 8: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL DE LA BOYA AGL UTILIZANDO LOS DATOS CON PROMEDIADO SEMANALES (ELABORACIÓN PROPIA).	54
TABLA 9: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL DE LA BOYA B-V UTILIZANDO LOS DATOS CON PROMEDIADO MENSUALES (ELABORACIÓN PROPIA).	61
TABLA 10: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL DE LA BOYA AGL UTILIZANDO LOS DATOS CON PROMEDIADO MENSUALES (ELABORACIÓN PROPIA).	68
TABLA 11: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL PARA EL N.º DE TORMENTA Y SU FLUJO DE ENERGÍA DE LA BOYA B-V (ELABORACIÓN PROPIA).	73
TABLA 12: RESUMEN DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE MANN-KENDALL PARA EL N.º DE TORMENTA Y SU FLUJO DE ENERGÍA DE LA BOYA AGL (ELABORACIÓN PROPIA).	77

PARA UNA MEJOR VISUALIZACIÓN...

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Antes de empezar a estudiar y realizar el análisis de tendencia tanto para un clima medio como para un clima extremal, entendiendo extremal como aquellas situaciones donde la altura de ola supera un cierto umbral establecido, es importante entender las circunstancias que han llevado a realizar un estudio de estas características.

A nivel personal, ir al mar y poder disfrutar tanto dentro como fuera del agua, es, ha sido y será una de mis mayores aficiones. El buceo y la apnea me permiten observar y explorar los diferentes ecosistemas que se adentran en este gran, y en su mayoría, desconocido medio. Una experiencia muy enriquecedora, que invito a todo curioso a probarla. Complementariamente, el surf, me proporciona una sensación única e inexplicable a gente que no lo haya vivido, el deslizarse encima de una ola y formar parte de ella durante esos breves segundos genera una adrenalina que he experimentado pocas veces, y que a su vez te hace querer más.

Paralelamente, a nivel académico los estudios en Ciencias y Tecnologías de Mar han despertado en mí un gran interés, en los estudios en el ámbito costero y todo lo que conlleva, en concreto en la formación, propagación y rotura del oleaje, el impacto que esto comporta a nivel ambiental, económico y social y los agentes impulsores, tanto antropogénicos, como naturales, que tienen influencia en el oleaje.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

El objetivo principal de la tesina es analizar, mediante diferentes técnicas estadísticas para estudiar tendencias y caracterizar picos, la evolución del oleaje en dos ubicaciones distintas a escalas climáticas y las variaciones interanuales, además de profundizar en las variaciones estacionales y espaciales que pueden detectarse durante el dominio y tiempo estudiados y determinar la influencia del cambio climático en su evolución.

Antes de empezar con los objetivos específicos del proyecto es necesario remarcar que este se puede considerar como un cúmulo de relaciones causa-efecto en el que a priori hace pensar que debido a algunos hechos estos traerán como consecuencia la variación de otros.

1.2.2. Específicos

Con el fin de alcanzar exitosamente el objetivo general propuesto anteriormente, se han definido otros 7 más específicos:

- Obtención y preproceso de series temporales del oleaje proporcionadas por el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto Español de Oceanografía (IEO) y Puertos del Estado.
- Obtención de series de índices climáticos por parte de la NOAA
- Análisis de correlaciones seriales, aplicación de promediados
- Análisis espectral para caracterizar la evolución detallada de la serie

- Extracción de la componente tendencial de las series de manera aditiva
- Análisis de tendencia lineal de parámetros del oleaje y número de tormentas mediante el modelo no paramétrico de Mann-Kendall.
- Búsqueda de correlaciones entre los datos de oleaje y los índices climáticos

1.3. Estado del arte

Antes de empezar, para poder introducir la temática de este proyecto, se muestran diferentes estudios que se han realizado durante los años y tienen una cierta concordancia con lo que se va a mostrar en este trabajo. Algunos de estos estudios se encuentran en zonas del Mediterráneo, y algunos otros en la zona del Atlántico Norte.

En el puerto de Tarragona (en la costa sur de Catalunya), hicieron un análisis de tendencias con el fin de analizar las alteraciones a largo plazo en el patrón de tormentas, en términos de energía y direccionalidad de las olas (Casals-Prat & Sierra, 2010). Tras realizar el análisis, a nivel general, no se encontraron tendencias temporales significativas para la energía media y máxima anual.

Por otro lado, en el litoral Catalán, en 2012, se realizó un estudio parecido donde se analizaban los efectos del cambio climático sobre el clima del oleaje y en particular sobre la direccionalidad de las olas. Casas-Prat & Sierra, (2012), desarrolla una metodología para analizar las tendencias del clima medio.

Según Charles et al., (2012), los impactos del cambio climático en las condiciones de las olas, pueden aumentar el riesgo de peligros costeros. Este artículo investiga las tendencias multidecenales del clima de olas en el golfo de Vizcaya durante el período comprendido entre 1958 y 2001, donde se identifican varias tendencias, en particular un aumento de la altura significativa de las olas en verano, un cambio hacia el sur en la dirección extrema de las olas en otoño y un cambio hacia el norte en primavera.

En 2017, Ulazia & Penalba, (2017), realizaron un estudio para analizar las tendencias de la energía de las olas en el golfo de Vizcaya. En este estudio se presenta la validación de los datos de cuatro boyas que se encuentran el golfo y los resultados principales muestran variaciones importantes en la energía media anual del oleaje.

Por último, Rasilla et al., (2018), estudia el oleaje extremal y la variabilidad atmosférica en la zona del golfo de Vizcaya. En este estudio se destacan principalmente la diversidad de mecanismos atmosféricos que son responsables de las tormentas de olas a diferentes escalas espaciales y temporales. Este estudio utiliza en particular el índice Patrón del Atlántico Este (EAP), índice que se utilizará también en este.

1.4. Formación del oleaje e influencia con el cambio climático

En términos generales, el oleaje es generado por el viento, que a la vez depende de los patrones de distribución espacial y variaciones de los centros de altas y bajas presiones atmosféricas, que están altamente ligados a la variabilidad climática. La energía que produce el viento, tiene mucha relevancia cuando interacciona con el mar, puesto que perturba la superficie, produciendo la ondulación de la superficie del mar a distintas escalas espacio-tiempo (desde ondas capilares a oscilaciones de largo periodo).

Inicialmente, se forman las ondas capilares cuya fuerza restitutiva es la tensión superficial y dado que son ondas muy pequeñas y cuando más cortas son, más rápido viajan. Cuando se generan estas ondas, se produce un efecto de retroalimentación, puesto que la superficie del agua se vuelve más rugosa y, por tanto, cuando más rugosidad, más fricción y mayor es la eficacia de la transferencia de energía del viento al mar.

Cuando se llega a una situación de equilibrio entre la capacidad del oleaje de absorber energía y la que se disipa por la rotura de este, se produce un fenómeno conocido como transferencia no lineal de energía, en la que la energía de las olas con periodo bajo se transfieren a las de periodo alto. Finalmente, este oleaje más regular se va propagando hasta que llega a la costa donde se disipa la energía y se cierra el ciclo (Gómez Lahoz, 2014).

Por otra parte, la gran mayoría de modelos climáticos que existen hoy en día indican que las principales consecuencias del cambio climático son en general un aumento de las temperaturas, cambio en los patrones de precipitación y aumento del nivel del mar, entre otros (Koetse & Rietveld, 2009).

Sin embargo, de acuerdo a Reguero et al., (2019) los gradientes de temperatura de la superficie del mar (TSM) tienen una influencia directa en los patrones de circulación de los vientos y en la ciclogénesis de las tormentas a nivel mundial y estas a su vez tienen una relación directa en la formación y propagación del oleaje. Por lo tanto, este se puede considerar como una proxy para el estudio de la variabilidad climática.

Por último, es necesario remarcar que el estudio del clima de oleaje medio y extremal son esenciales hoy en día para la planificación y gestión tanto costera como en alta mar, como por ejemplo para la navegación costera y de alta mar, protección costera, diseño de parques eólicos y plataformas de petróleo y gas (Grabemann et al., 2015).

1.5. Importancia del estudio del clima medio y extremal

1.5.1. Clima medio

El conocimiento de la formación del oleaje, ayuda a entender el efecto de este sobre zonas costeras i/o zonas antropogénicas. Sin embargo, para terminar de entender a grandes rasgos el comportamiento del oleaje se precisa de lo que comúnmente se denomina estudio del clima de oleaje medio y extremal, ambos de vital importancia para la planificación y gestión costera.

Según el ente público Puertos del Estado (PE), el régimen medio del oleaje se puede definir como el conjunto de estados de mar que son físicamente más probables de obtener en una zona en concreto, en otras palabras, el porcentaje de tiempo en que durante un año, la altura de ola no excede de cada valor (Página web Puertos del Estado, 09/08/2022).

Para describir este régimen, habitualmente se pueden emplear diferentes distribuciones probabilísticas de tipo Normal, Log-Normal, Weibull de mínimos y Gumbel de máximos (Gómez, 2021).

Sin embargo, la distribución que se emplea habitualmente en este tipo de estudios es la de Weibull definida por la siguiente expresión.

$$F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^C\right)$$

Esta función continua es triparamétrica, es decir, viene definida por tres parámetros, el parámetro A (parámetro de escala) que tiene que ser mayor de 0, el parámetro B (parámetro centrado) ha de ser menor que el menor de los valores justados, y el parámetro C (parámetro de forma) que oscila entre 0.5 y 3.5 e indica el momento a partir del cual se define la distribución.

De cara a una óptima caracterización del oleaje, este estudio permite definir diferentes criterios de selección o agrupación de datos. En primer lugar, se puede representar el régimen medio estudiando todos los años registrados, en segundo lugar, se puede hacer el estudio agrupando los datos según las distintas estaciones del año, ambos criterios se realizan de manera escalar, es decir cogiendo todas las direcciones que ha tomado el oleaje. A raíz de eso se emplea el tercer criterio donde se agrupan los datos en función de las direcciones¹ (Página web de Puertos del Estado, 09/08/2022).

Una vez ajustada la distribución a la serie temporal, esta permite obtener diferentes resultados que se pueden representar de forma gráfica mediante lo que se conocen como histogramas acumulados y mediante tablas de contingencia donde permiten cruzar la información y ver de manera más clara la probabilidad de que un determinado tipo de oleaje exista con una determinada dirección.

¹ También puede recibir el nombre de “sectorial”

1.5.2. Clima extremal

Una vez entendido a grandes rasgos la importancia del análisis de clima medio, hace que resalte aún más la importancia de acotar el riesgo que puede tener cualquier instalación costera mediante el número de eventos extremos, la probabilidad anual de excedencia, los valores de Hs asociadas a períodos de retorno que se obtienen a partir de un análisis de extremos. Según la ROM 1.1-18² para realizar cualquier proceso de transformación de datos oceanográficos se precisa definir previamente los estudios estadísticos, ya bien sea utilizando el método picos sobre un umbral o bien mediante el método máximos anuales. (Losada, 2018).

1.5.2.1. Picos sobre un umbral

Generalmente existen dos maneras de seleccionar los temporales, uno conocido como “*block máxima* o máximos anuales” donde se basa principalmente en dividir la serie temporal en periodos iguales y definir el valor máximo observado en cada uno de esos períodos y el utilizado comúnmente en oceanografía denominado “POT” (Peak Over Threshold), donde se seleccionan aquellas observaciones que superen un cierto umbral (Ferreira & de Haan, 2015) y (Sánchez-Arcilla, 2005).

Para escoger de manera adecuada las observaciones que se utilizaran para ajustar la función de distribución, existen tres indicadores. En primer lugar, es importante escoger un umbral de altura de ola que mejor se ajuste al tipo de oleaje que existe en la zona, ya que por ejemplo por razones de *fetch*³ i/o condiciones meteorológicas el estado de mar en el Mediterráneo es mucho menor en cuanto a altura de ola se refiere que en el Atlántico, por ese motivo se escogería un valor de Hs menor para el mar Mediterráneo que para el Atlántico.

En segundo lugar, y dependiendo nuevamente de la zona, se escoge el tiempo mínimo que tiene que durar las observaciones para poder considerarlas temporales y finalmente el tiempo que tiene que pasar entre dos observaciones para considerarlas independientes (P. del Estado, 1990).

En la siguiente imagen extraída de (P. del Estado, 1990) se puede observar, para un estado de mar en concreto, las distintas indicaciones comentadas anteriormente para la elección de los temporales (Ilustración 1).

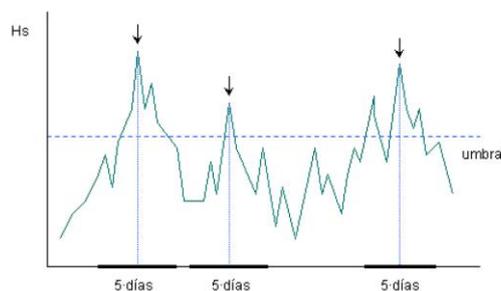


Ilustración 1: Estado de mar donde se pueden observar los tres indicadores, umbral de altura de ola, duración del temporal y tiempo mínimo entre temporales (P. del Estado, 1990).

² Recomendaciones en Obras Marítimas (ROM): Normativa española en proyectos portuarios.

³ Relación entre la velocidad del viento, su dirección constante y la distancia recorrida por el mismo viento en un tramo de agua sin obstáculos.

1.5.2.2. Generalizada de Valores Extremos

Para ajustar de manera adecuada los valores extremos seleccionados anteriormente se pueden estimar a partir de una función de distribución de frecuencias. Generalmente las funciones que se consideran para el análisis clásico son: a) la distribución General de Valores Extremos (GEV) que es la que se va a escoger para analizar los datos como primera opción; b) la distribución Logística generalizada (LOG); y c) la función de Pareto generalizada (Castillo, 1988).

La distribución GEV expresada a continuación, es una distribución que es muy flexible con un parámetro de forma (ξ), que le permite tener diferentes subclases de distribuciones.

$$G(x) = \exp(-(1 + \xi x)^{-1/\xi}) \quad \text{donde } 1 + \xi x > 0, \xi \neq 0$$

Por norma general, si $\xi > 0$, la distribución que se puede asociar es la de Fréchet, si $\xi = 0$ la distribución que se puede asociar es la de Gumbel, donde también se pueden incluir diferentes distribuciones tales como la normal, la exponencial etc. Por último, y la que se emplea por excelencia en oceanografía se conoce como distribución de Weibull (descrita anteriormente en el régimen medio) si $\xi < 0$ (Markose et al., 2005).

1.5.2.3. Probabilidad anual de excedencia

Una vez se tiene procesadas las observaciones y se realiza la función de distribución que ajusta de manera adecuada los datos, se puede obtener la gráfica de probabilidad anual de excedencia que indica la probabilidad de que una altura de ola en concreto supere un cierto valor establecido (H_a) dada por la expresión:

$$P_a(x) = 1 - e^{-\lambda(1-F_w(H_a))}$$

Donde λ es el número medio de temporales y F_w es la función triparamétrica de Weibull comentada anteriormente (P. del Estado, 1990).

1.5.2.4. Períodos de retorno

Un parámetro que es usual en análisis extremos y que es de vital importancia en cualquier proyecto portuario o costero es el período de retorno (Tr). Según la ROM 03-91 se define periodo de retorno de un valor determinado de altura de ola como el tiempo intermedio en el que dicho valor es superado una vez, en otras palabras, el número de años que en promedio tienen que pasar para que dos valores de H_s se repitan.

En ingeniería costera, este valor sirve para poder determinar el riesgo admisible durante la vida útil de cualquier infraestructura costera (ROM 0_3-91, 1991).

Este valor se obtiene fruto del cálculo de probabilidad anual de excedencia, ya que la relación entre un valor de H_s y su período de retorno viene definido por la siguiente expresión: (P. del Estado, 1990).

$$Tr = \frac{1}{\lambda \cdot P_a(H_s)}$$

1.6. Técnicas para la recopilación de datos oceanográficos

Hasta el momento se ha estudiado como se realizan los análisis para caracterizar de manera correcta el clima del oleaje. Sin embargo, es imprescindible ver las diferentes maneras que tradicionalmente existen para recopilar y estructurar los datos oceanográficos.

Existen muchos factores que contribuyen a que la gestión de los datos y su obtención sea particularmente difícil en este campo, produciendo así que existan muchas veces donde los sistemas de observación contengan regiones donde no haya información o bien esa información sea escasa o con errores sustanciales (Derber & Rosati, 1989).

1.6.1. Instrumentos oceanográficos

La primera manera que existe para recopilar información es de manera in situ mediante instrumentos oceanográficos. Con el fin de tener una visión a grandes rasgos, en la Tabla 1 se presentarán algunos de los instrumentos más utilizados por los investigadores para tener control de las variables más comunes en oceanografía.

Este tipo de datos, a diferencia de los satelitales, no pueden ser tratados de forma automática, sino que precisan de la interacción humana para tratarlos y que puedan ser interpretados de manera correcta (Bechini & Vetrano, 2013).

TIPO DE MEDIDA	ALCANCE ESPACIAL	VALOR SE ORIGINA A PARTIR DE UN PROMEDIADO DE VALORES
CTD	En un punto	Sí
ADCP	En un área o en un perfil	Sí
DRIFTERS	En una área	Sí
XBT	En un punto	Sí
AUV	En una área	Sí

Tabla 1: Ejemplos de tipos de instrumentos empleados para observaciones oceanográficas (Tabla inspirada en (Bechini & Vetrano, 2013)).

1.6.2. Boyas

Hoy en día la boya es una de las técnicas más empleadas a la hora de recopilar datos oceanográficos. Existen muchos tipos de boyas oceanográficas dependiendo del objetivo que se les da.

El principal tipo de boya que se utiliza en la comunidad científica son principalmente las boyas meteorológicas y oceanográficas, que incorporan instrumentos comentados anteriormente para poder obtener estos datos. Según Teng et al., (2005) la NOAA opera con unas 96 boyas fondeadas y con 57 estaciones fijas de la red automatizada *Coast-Marine*. Estos sistemas permiten agregar mediciones en tiempo real, estas incluyen fenómenos como las direccionales, corrientes superficiales y perfiladores de corrientes, conductividad, temperatura, etc.

El tamaño y forma que estas boyas generalmente adoptan para tanto aguas onshore como offshore, según Tomisa et al., (2008) son:

- Diámetro del cuerpo de 3 metros
- Altura del cuerpo 1 metro
- Calado de la boya 1.5 metros
- Altura de la boya total de 6 metros aproximadamente...

Aunque posteriormente se verán con más detenimiento las dos boyas que se han utilizado para el estudio, ambas son de tipo *Seawatch*, de tal modo que no solo miden parámetros del oleaje, sino que también miden parámetros atmosféricos y oceanográficos (Conjunto de Datos REDEXT, 2015).

Según la finalidad que se quiera tener existen diferentes tipos de boyas tipo *Seawatch* como pueden ser la *Seawatch Wind Lidar*, *Seawatch Wavescan*, *Seawatch midi 185* etc. Todas las boyas de este tipo funcionan con energía solar, cuentan con posicionamiento GPS y comunicaciones bidireccionales (Com, n.d.)

1.6.3. Satélites

Juegan un papel muy importante en la gestión y planificación tanto costera como de alta mar. La teledetección satelital y los sistemas de información geográfica (SIG) permite a la comunidad científica monitorizar muchos aspectos de la oceanografía moderna, tales como parámetros del oleaje batimetrías... Diferentes investigadores han realizado numerosos estudios con el fin de caracterizar y enumerar todas las variables que se pueden parametrizar del océano y la Tabla 2 muestra alguna de las variables que actualmente se pueden obtener (Devi et al., 2015).

PARÁMETROS	DATOS UTILIZADOS	IMPORTANCIA DE CADA PARÁMETRO
TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM)	MODIS, AMSRE, TMI, SENTINEL-3	Imprescindible para estudios de cambio climático y meteorología.
DATOS DE VIENTO	SENTINEL-1	Monitorea entre otras cosas intensidad de los vientos.
ALTURA DE OLA	GEOSAT.ASAR (ENVISAT), SENTINEL-1, SENTINEL-3	Imprescindible para aplicaciones costeras y de alta mar

Tabla 2: Parámetros oceanográficos que se obtiene a raíz de observaciones vía satélite (Devi et al., 2015).

1.7. Índices climáticos

Para entender de mejor manera el propósito de este estudio, es imprescindible terminar la introducción analizando los índices climáticos que se utilizarán y que información proporcionan.

Con el fin de calcular un valor que se pueda utilizar para describir los diferentes estados y cambios del sistema climático, se propusieron lo que ha día de hoy se conoce como índices climáticos. Estos índices permiten realizar diferentes estudios estadísticos para estudiar las variaciones sobre aspectos climatológicos y de este modo poder extraer comparaciones sobre diferentes series temporales.

En la actualidad estos índices permiten tener información sobre diferentes aspectos muy importantes sobre el clima, tales como:

- La temperatura del aire
- Precipitación
- Presión del aire
- Temperatura de la superficie del mar

Cada índice climático se basa en alguno de estos parámetros y describe solo ciertos aspectos del clima, por lo que hay una gran variedad de índices climáticos que se han ido definiendo y examinando en diferentes publicaciones (*Índices Climáticos, 2021*).

Para cada índice climático existe una expresión matemática que utiliza estos elementos descritos anteriormente. En este trabajo se estudiarán 3 índices principalmente:

- Oscilación del Atlántico Norte (NAO)
- Patrón del Atlántico Este (EAP)
- El niño/La niña Oscilación del Sur (ENSO)

1.7.1. Oscilación del Atlántico Norte (NAO)

El índice NAO, si no es el patrón de teleconexión más destacado en la comunidad científica, es uno de los más importantes. Según (NOAA Center for Weather and Climate Prediction, 2012a) teóricamente la NAO consiste en un dipolo norte-sur de anomalías, con un centro ubicado sobre Groenlandia y el otro centro de signo opuesto que abarca las latitudes centrales del Atlántico Norte entre 35 °N y 40 °N.

En otras palabras, se mide la diferencia de presión que existe entre centro de baja presión general que se encuentra cerca de Groenlandia e Islandia y el centro de altas presiones generales en las Azores.

Por norma general, como se puede observar en la Ilustración 2, un valor positivo de NAO, existe cuando hay un mayor gradiente de presiones entre los dos centros producido por una bajada de presión en Groenlandia y una subida de presión en las Azores. Este factor comporta por norma general un invierno dominado por fuertes vientos, y tormentas más salvajes en el Atlántico norte que tenderán a seguir más hacia el Norte, por otro lado, este factor comportará un clima menos tormentoso y húmedo en el sur de España y el Mediterráneo. Sin embargo, un valor negativo de la NAO, se produce cuando la diferencia del gradiente de presiones no es tan elevado y, por lo tanto, habrá un clima más inestable en el mediterráneo y un clima menos tormentoso, pero más seco y frío en el Norte (Jota, 2020).

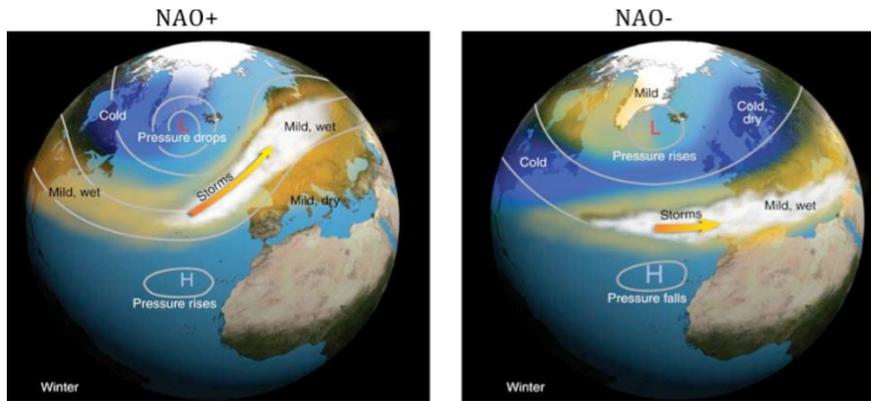


Ilustración 2: Fenómeno físico fases positivas y negativas de la NAO (Thomson Higher Education)

1.7.2. Patrón del Atlántico Este (EAP)

El patrón del Atlántico este (EAP) es el segundo índice más importante del atlántico, estructuralmente y teóricamente es un patrón muy similar al de la NAO, con la peculiaridad que en este caso se trata de un dipolo norte-sur de anomalías que se extienden de este a oeste. Los centros de anomalías están desplazados hacia el sureste, por esa razón muchos científicos interpretan el EAP como un patrón NAO desplazado hacia el sur. En lo que al centro de bajas presiones se refiere, es muy similar al patrón de la NAO, sin embargo, el centro de altas presiones, es decir, el centro que se encuentra en una latitud más baja está fuertemente asociada a la zona subtropical, es por ese motivo que el EAP da valores distintos que el de la NAO (NOAA Center for Weather and Climate Prediction, 2012b).

Las fases positivas de este patrón, se pueden asociar a un incremento de las temperaturas y las precipitaciones en el Norte de Europa, de tal forma que en el Mediterráneo predominaran inviernos más secos.

Por último, fases negativas del patrón del Atlántico este, se pueden asociar a una bajada tanto de las temperaturas como de las precipitaciones en el Norte de Europa, hecho que provocara que se produzcan más eventos de tormentas en la zona del Mediterráneo.

1.7.3. El Niño Southern Oscillation (ENSO)

Aunque este trabajo se centra principalmente en el Atlántico norte, es importante y luego se podrá corroborar, utilizar para el estudio otro índice climático que no esté estrictamente relacionado con el Atlántico. Es por ese motivo que el tercer y último patrón utilizado para el estudio es el que se conoce como El niño/La niña Oscilación del Sur (ENSO).

El nombre de “El niño” se atribuye a los pescadores peruanos que observan una inversión en las corrientes justo finalizadas las fiestas de navidad, se basa en la diferencia de presiones que existe entre el alta subtropical del Pacífico sur y el centro de bajas presiones situado en Indonesia (Periáñez, 2010).

Las fases negativas de la ENSO (fenómeno de El Niño), se produce cuando el gradiente de presiones es más bajo de lo normal, los vientos alisios disminuye, y, en consecuencia, una masa de agua cálida se desplaza hacia el este a lo largo del ecuador (Periáñez, 2010).

Sin embargo, cuando el gradiente de presiones es mayor a lo normal (fase positiva de patrón) se produce un aumento de la intensidad de los vientos alisios⁴. Este factor hace reducir aún más el espesor de la capa de mezcla de la costa este del Pacífico y, consecuentemente, se produce una bajada de la temperatura superficial del agua. A este fenómeno se conoce como La Niña (Periáñez, 2010).

⁴ Corrientes de viento constantes que soplan del Noreste al Suroeste en el hemisferio norte de la tierra y en dirección Sureste al Noroeste en el hemisferio sur.

PARA UNA MEJOR VISUALIZACIÓN...

2. ZONA DE ESTUDIO Y RECOPIACIÓN DE DATOS

En este estudio, se han estudiado los registros de oleaje procedentes de dos boyas en el Cantábrico. El primer registro viene proporcionado por la estación océano-meteorológica Augusto González de Linares que fue fondeada el 27 de junio de 2007 a 22 millas náuticas del norte de Cabo Mayor (Santander), concretamente en la posición $43^{\circ} 50.67' N$ y $03^{\circ} 46.2' O$. Este proyecto ha sido financiado por el Instituto Español de Oceanografía (IEO), el gobierno de Cantabria y el Ministerio de ciencia e innovación con el objetivo de proporcionar datos en tiempo real de gran interés para la comunidad científica, meteorológica, medioambiental, pesquera, náutica y turística de Cantabria (Somavilla, 2021).

El segundo registro corresponde a una boya procedente del conjunto de boyas REDEXT (Red Exterior) que se caracterizan principalmente por estar fondeadas lejos de las costas, haciéndolas imperturbables a los efectos de la batimetría. En este caso en particular, se ha optado por estudiar la boya de aguas profundas Bilbao- Vizcaya (Ilustración 3). Esta se encuentra en la posición $43^{\circ} 38' 24'' N$ y $03^{\circ} 02' 24'' O$ y fondeada a una profundidad de 600 metros (Conjunto de Datos_REDEXT, 2015).

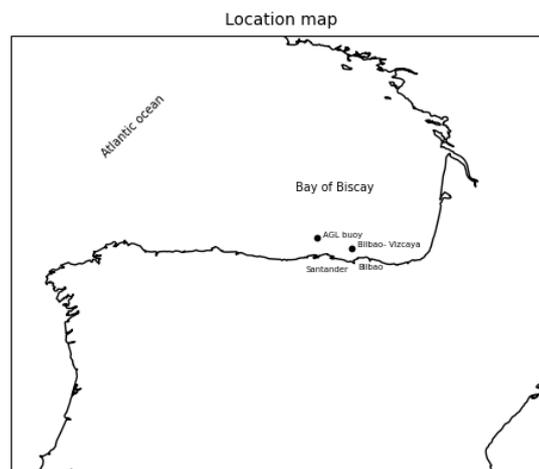


Ilustración 3: Mapa zona de estudio, posición de las boyas AGL y PE (Elaboración propia).

2.1. Boya Bilbao – Vizcaya (PE)

La boya Bilbao-Vizcaya inició sus medidas el 7/11/1990 hasta la actualidad, haciendo un total de 32 años de registro. Esta tiene un par de flotadores sumergidos que les permiten crear un falso fondo, evitando así que la línea de fondo se arrastre, la parte superior de esta línea está formada por material elástico. Esta boya (Ilustración 4) en sus inicios era de tipo *Wavescan* de tal modo que solo disponía de medidas de oleaje y atmósfera, sin embargo, a partir de diciembre de 2006 esta empezó a proporcionar datos de corrientes, temperatura y salinidad considerándose así como boya de tipo *Seawatch* ("Conjunto de Datos_REDEXT," 2015).



Ilustración 4: Boya Bilbao-Vizcaya

2.1.1. Altura de ola significativa (H_s)

Este registro de altura de ola significativa representado gráficamente en la Ilustración 5 abarca un período de 32 años.

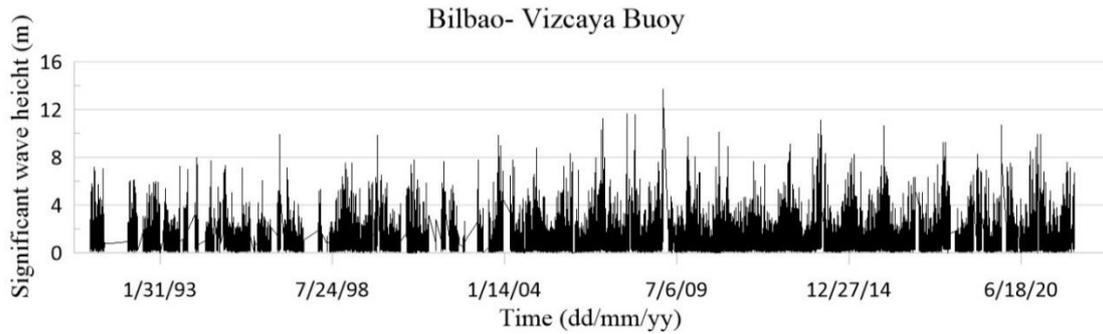


Ilustración 5: Altura de ola significativa de la boya Bilbao- Vizcaya (Elaboración propia).

2.1.2. Período de pico (T_p)

En lo que respecta al período de pico, en este caso, se obtiene para el estudio información del T_p los 32 años. En la Ilustración 6 se puede observar el estado de mar para esta variable.

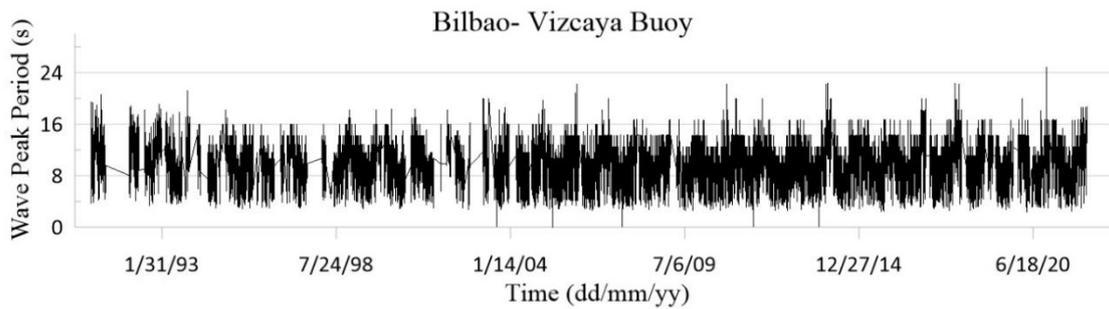


Ilustración 6: Período de pico de la boya Bilbao- Vizcaya (Elaboración propia).

2.1.3. Peralte (H/L)

Finalmente, se extrae para todo el registro el valor del peralte representado gráficamente en la Ilustración 7.

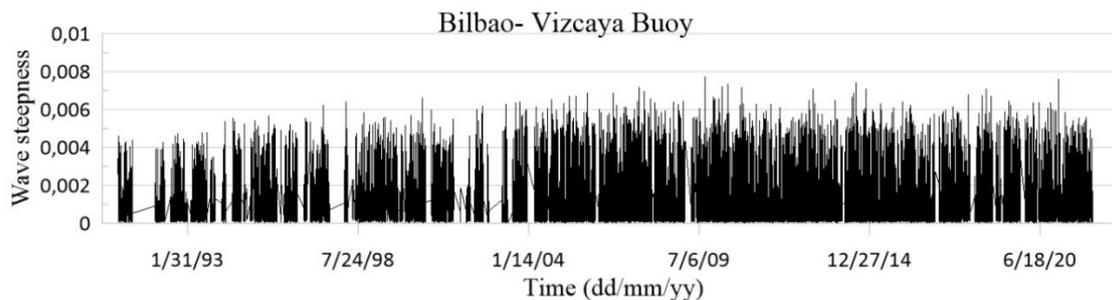


Ilustración 7: Variable peralte de la boya Bilbao- Vizcaya (Elaboración propia).

2.2. Boya Augusto González de Linares (IEO)

La boya August González de Linares, cuyo período de registro corresponde desde 2007 hasta 2018, tiene unas dimensiones y peso de 8.6 metros de alto y 710 Kg. Debido a que es de tipo *Seawatch* (Ilustración 8), está equipada con paneles solares de 60 W con baterías de Litio de 770Amph, luz de flash, luz de navegación y reflectores de radar y un sistema de fondeo formado por un lastre de dos ruedas de ferrocarril de unos 1250 Kg de peso. Aunque tiene diversos sensores como pueden ser fluorímetros, sensores de oxígeno disuelto, etc. Los sensores de oleaje que tiene son (IEO-Santander, n.d.):

- Sensor de altura de ola, cuyo rango es de ± 20 metros, resolución de 1 cm y período de muestreo de 1.6 – 30 segundos.
- Sensor de dirección, cuyo rango comprende desde 0 a 360 °, resolución de 1.5 ° y período de muestreo de 1.6 – 30 segundos
- GPS que proporciona la posición cada 30 minutos con una precisión de 10 metros, etc.



Ilustración 8: Boya Augusto González de Linares (IEO-Santander, n.d.)

2.2.1.1. Altura de ola significativa (Hs)

A raíz de este sensor se puede extraer el valor de altura de ola significativa que será imprescindible para poder realizar los objetivos principales del estudio.

En la Ilustración 9 se puede representar los valores de altura de ola significativa registrada por la boya Augusto González de Linares y para una mejor comparación, se muestra el mismo intervalo de tiempo que con la boya Bilbao-Vizcaya.

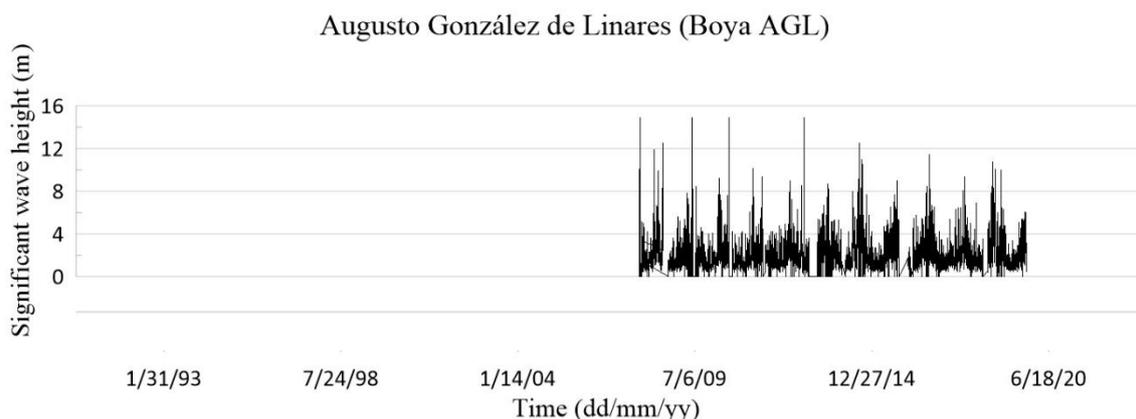


Ilustración 9: Altura de ola significativa de la boya Augusto González de Linares (Elaboración propia).

2.2.1.2. Período de pico (T_p)

El segundo parámetro que se utilizará para extraer las componentes tendenciales y realizar el trabajo será el período de pico. En la Ilustración 10 se puede ver de manera gráfica los valores de T_p durante los 11 años de registro.

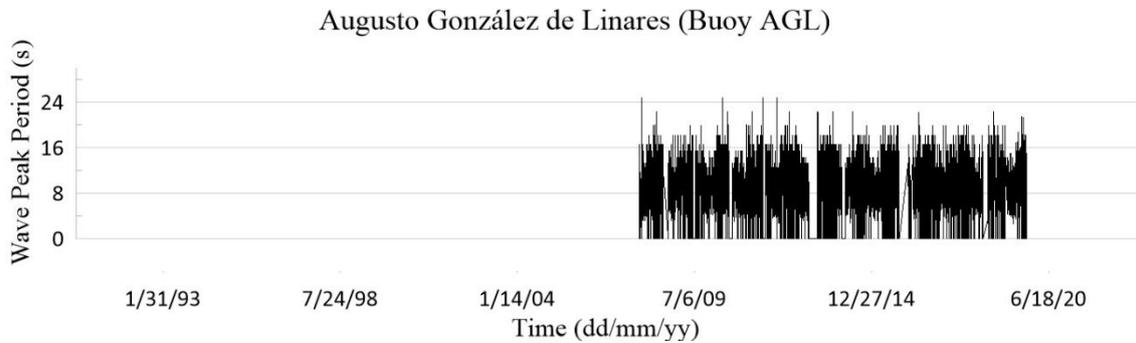


Ilustración 10: Período de pico de la boyeta Augusto González de Linares (Elaboración propia).

2.2.1.3. Peralte (H/L)

A raíz del valor de período de pico y longitud de onda que a su vez es función de la altura de ola, se puede extraer el valor del peralte⁵. A continuación, en la Ilustración 11 se representa esta variable durante los años 2007 a 2018.

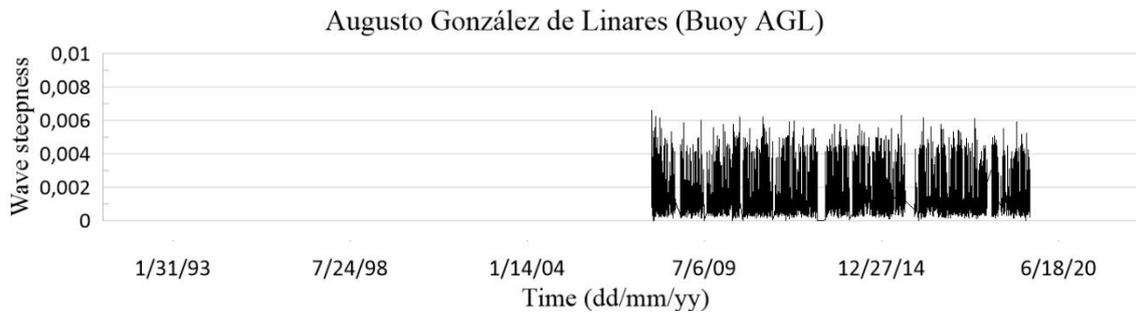


Ilustración 11: Variable peralte de la boyeta Augusto González de Linares (Elaboración propia).

⁵ Se define peralte, como la ratio que hay entre el valor de altura y la longitud de ola (H/L), si esta relación supera 1/7 la ola será demasiado empinada y romperá (Webb, n.d.).

2.3. Índices climáticos

De igual manera que se ha realizado con los datos del oleaje, se representa las series temporales de los diferentes patrones comentados anteriormente en el apartado 1.7 proporcionados por la NOAA.

2.3.1. NAO

A continuación, en la Ilustración 12 se representa la serie temporal del índice Oscilación del Atlántico Norte. Coloreado en rojo, se representan todas las fases positivas que se han obtenido en el período comprendido desde 1950 hasta la actualidad.

Por otra parte, en azul se representan todas las fases negativas y en discontinua se puede observar el período comprendido que se ha utilizado para el estudio. Por último, se marca en color azul claro la recta de regresión lineal de la serie.

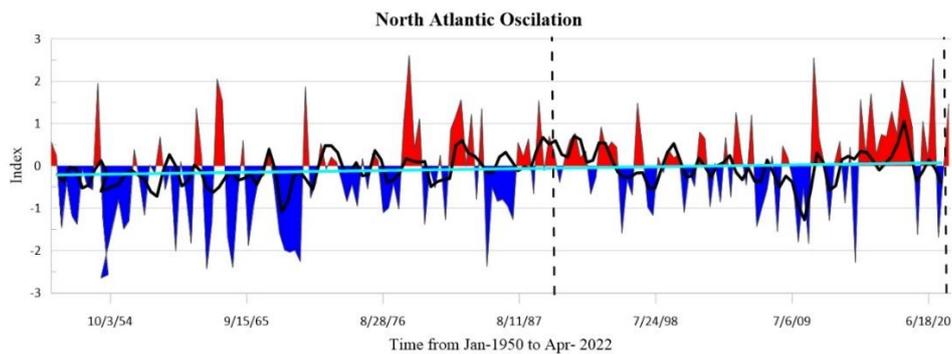


Ilustración 12: Oscilación del Atlántico Norte (Elaboración propia).

2.3.2. EAP

Lo mismo sucede para el patrón del Atlántico Este (EAP), donde en rojo se muestran las fases positivas del patrón y en azul marino las fases negativas (Ilustración 13).

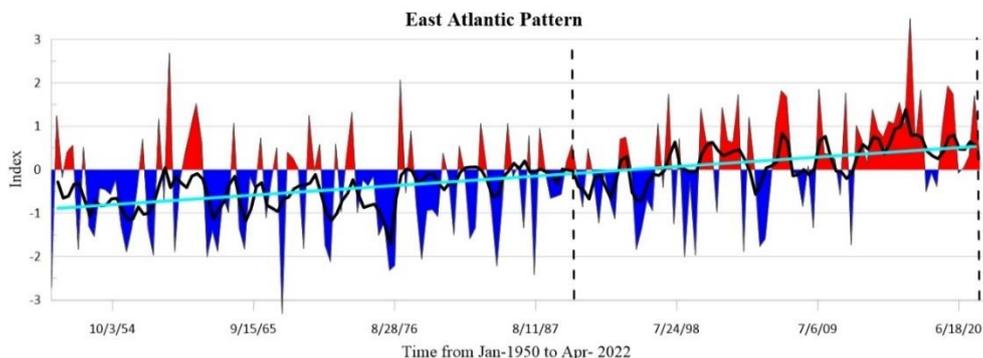


Ilustración 13: Patrón del Atlántico Este (Elaboración propia).

2.3.3. ENSO

Finalmente, se representa en la Ilustración 14 el último patrón que se ha utilizado para el estudio, el índice de el Niño/la Niña Oscilación del Sur.

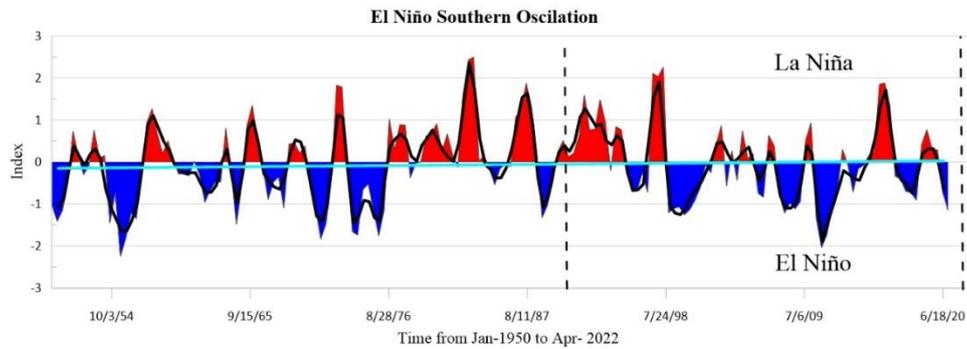


Ilustración 14: El niño/La niña Oscilación del Sur (Elaboración propia).

3. MÉTODOS

Hasta el momento se han comentado a grandes rasgos la importancia que tiene a nivel costero el conocimiento y estudio de los procesos tanto de formación del oleaje, de las diferentes técnicas que existen para obtener estos datos y la influencia de los índices climáticos. A continuación se comentará la metodología empleada para la realización del trabajo.

Hay que remarcar que esta metodología pretende ser una metodología general formada para poder obtener correlaciones entre diferentes series temporales. Por ese motivo, aunque en este apartado solo se explicara una vez, en los resultados se verán para distintos casos.

3.1. Procesado de datos

Si bien obtener datos de oleaje es particularmente difícil en este campo, también lo es la gestión de estos debido a diferentes factores como lo pueden ser (Bechini & Vetrano, 2013):

- En primer lugar, la heterogeneidad de los instrumentos oceanográficos produce que existan muchos formatos de lectura e interpretación de estos dificultando así su tratamiento.
- En segundo lugar, la responsabilidad que ciertos datos pueden tener sobre diferentes investigadores i/o técnicos.
- En tercer lugar, el almacenamiento por error de diferentes archivos recopilados en diferentes ubicaciones durante diferentes campañas, etc.

Debido a estos factores, se han realizado diferentes técnicas de preprocesado. Tanto para los datos de la boya de Puertos del Estado (PE) como los datos de la boya del Instituto Español de Oceanografía (IEO), se han ajustado y ordenado temporalmente.

Por otro lado, las series temporales procedentes de ambas boyas contienen saltos temporales, sin embargo, las series temporales procedentes de los 3 índices climáticos no tienen ningún salto temporal. Es por ese motivo que se ha de tener en cuenta en todo momento que todos los vectores tengan el mismo tamaño. De manera manual, se tienen que incorporar valores nulos "NULL" en los espacios donde existan saltos.

De este modo y como se puede ver en la Tabla 3, se consigue que ambos vectores tengan la misma longitud y se pueda proceder a empezar el estudio.

N.º semanas	Componente tendencial NAO	N.º semanas	Componente tendencial Hs
267	0.268067967	267	NULL
268	0.247396	268	NULL
269	0.240483322	269	NULL
270	0.235126641	270	1.723063444
271	0.233263498	271	1.661997548
272	0.230246887	272	1.613467731
273	0.230821473	273	1.602914555
274	0.219057885	274	1.613115664
275	0.182199418	275	1.629378211
276	0.16593389	276	NULL

Tabla 3: Ejemplo donde se iguala con valores nulos ambos vectores (Elaboración propia).

3.2. Función de Autocorrelación (ACF)

La serie proporcionada por el IEO da información sobre el estado de mar cada hora, mientras que el registro proporcionado por Puertos del Estado lo da cada 3. Ambas series temporales han sido sometidas a un análisis descriptivo para observar si hay una autocorrelación lo suficientemente fuerte como para poder realizar posteriormente el análisis y determinar así si existe una tendencia en las series. Esta cuestión se ha abordado utilizando la función de autocorrelación (ACF), ya que esta permite dar una idea sobre la dependencia que tienen los diferentes valores de la serie.

Este proceso es uno de los más importantes, porque se realiza al principio, por lo que si existe algún tipo de incertidumbre a la hora de realizar la función, esta se vería reflejada a lo largo del estudio.

Además, si la serie a analizar tiene una correlación serial, esta se tendría que eliminar. Existen principalmente dos maneras de eliminar esta correlación, o bien haciendo un remuestreo de los datos o bien realizando un promediado.

En este trabajo se ha optado por utilizar la segunda técnica, Por este motivo los resultados estarán divididos: 1) utilizando el promediado semanal, y 2) utilizando el promediado mensual.

La Ilustración 15 es un ejemplo de la serie AGL, donde se pretende mostrar si la serie tiene o no una correlación serial. Esta es un tanto subjetiva, ya que no existe ninguna regla que defina un umbral para considerar si existe o no una correlación, es por ese motivo que en este trabajo se hará el mismo estudio teniendo en cuenta los dos promediados.

Además, si se analiza con mayor detenimiento la ilustración, se puede observar que en el autocorrelograma semanal, entre la semana 8 y 12, la correlación serial se ha eliminado prácticamente por completo. Este mismo hecho se puede corroborar analizando el autocorrelograma mensual, donde entre los 2 y 4 meses se obtiene esta misma correlación.

Por último, es interesante también observar como en el autocorrelograma mensual, se puede ver mucho mejor como la serie tiene un factor de estacionalidad clara, ya que se observa una variación cíclica muy bien definida.

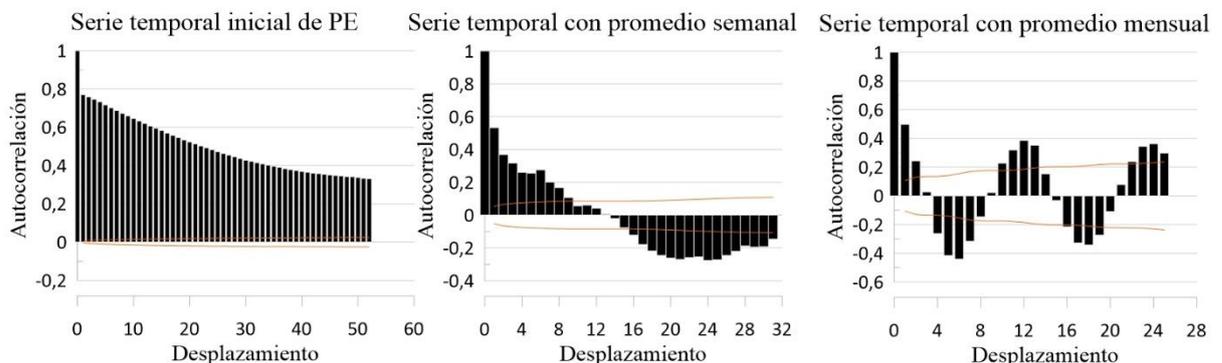


Ilustración 15: Series temporal de PE inicial y con sus promediados semanales y mensuales (Elaboración propia).

3.3. Análisis espectral

Una vez eliminada la correlación serial mediante el promediado de los datos, y antes de realizar la transformación de la serie para poder extraer su componente tendencial, se emplea el análisis espectral de la serie, pues este permite observar en un principio si la serie tiene o no tendencia.

Según Rodríguez Rodríguez, (2006) el análisis espectral, se podría definir, como la descomposición de una serie temporal de mayor o menor complejidad, en constituyentes elementales y observar cuál es la contribución de cada uno de ellos en el proceso. En otras palabras, descomponer la serie principal de tal modo que se puede obtener un mayor conocimiento de la serie a nivel Físico, Químico o Biológico.

En este trabajo las series analizadas son los parámetros de altura significativa del oleaje (Hs), período de pico (Tp) y peralte de ambas boyas utilizando los dos promediados, de este modo se pueden obtener representaciones gráficas tales como el periodograma y la densidad espectral y poder comprobar así, si la serie sigue o no una tendencia.

Para obtener estas representaciones, como normalmente solo se tiene acceso a un número limitado de datos que están espaciados igualmente en el tiempo, se precisa de la obtención de las coordenadas discretas de Fourier fruto de las transformadas de coseno y seno. A raíz de eso, se puede obtener el periodograma, que posteriormente utilizando una función de suavizado permite obtener finalmente la densidad espectral que es mejor estimador del espectro (Nussbaumer H.J., 1982).

Como se puede ver en la Ilustración 16, este es un ejemplo de la boya B-V donde la densidad espectral, indica como se distribuye la energía en función de las distintas frecuencias. En este caso, para periodos muy grandes, el espectro tiende a cero, sin embargo, a periodos muy pequeños (frecuencias muy altas), el espectro no tiende a cero, por lo que nos indica que la serie sí tiene una tendencia.

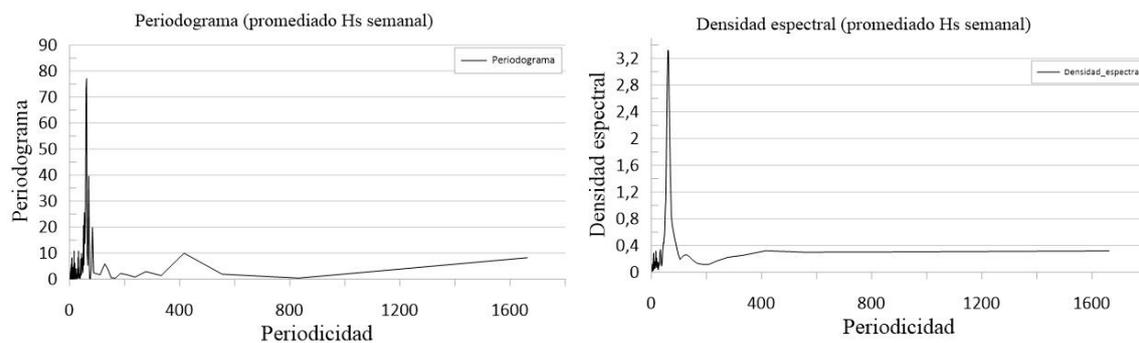


Ilustración 16: Ejemplo de análisis espectral del parámetro Hs utilizando el promediado semanal (Elaboración propia).

3.4. Técnica de descomposición

Es importante a la hora de estudiar series temporales realizar la transformación de estas, ya que de este modo se puede aislar el ruido blanco. Se separa la serie en tres componentes diferentes, la componente tendencial, estacional y aleatoria. Existen diversas formas para aislar el ruido blanco, sin embargo, en este trabajo se ha utilizado un modelo de desestacionalización clásico. En el presente trabajo se ha optado por descomponer la serie de manera aditiva de tal modo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$X_t = m_t + S_{t \bmod p} + \varepsilon_t$$

Siendo X_t la serie temporal ha analizar, m_t la componente tendencial de la serie, $S_{t \bmod p}$ la componente estacional y ε_t la componente aleatoria. La componente tendencial se ha estimado utilizando un filtro de media móvil centrado en X_t :

$$m_t = \sum_{i=-P/2}^{P/2} w_i X_{t+i}$$

Donde $P/2$ proviene de la división entera de P y el coeficiente w_i que este a su vez proviene de la expresión⁶:

$$w_i \begin{cases} \text{si } |i| = \frac{P}{2} \rightarrow \frac{1}{2P} \\ \text{de lo contrario} \rightarrow \frac{1}{P} \end{cases}$$

Una vez se tiene la componente tendencial, se obtiene cada valor de la componente estacional con la diferencia entre X_t y m_t para la media de los elementos de S_t donde $(t \bmod P = i)$ y se calcula la componente aleatoria aislando de la expresión inicial (Shumway & Stoffer, 2000).

$$\hat{\varepsilon}_t = X_t - \hat{m}_t - \hat{S}_{t \bmod p}$$

3.5. Prueba de Mann-Kendall

Para observar si esa componente tendencial obtenida es lo suficientemente significativa como para poder considerar que la serie sí sigue una tendencia, es necesario someter ambos registros a la prueba estadística de Mann- Kendall (S). Esta prueba propuesta por primera vez en 1945, se basa en el siguiente contraste de hipótesis (Mann H.B., 1945):

- H_0 : Donde la serie no sigue ninguna tendencia.
- H_a : Donde la serie sigue una tendencia y esta a su vez puede ser negativa, no nula o positiva.
-

El estadístico S viene dado por la siguiente expresión, donde la serie de tiempo x_i y x_j se ordenan y clasifican por $i = 1, 2, \dots, n-1$ y $j = i+1, 2, \dots, n-1$ consecutivamente (Sen, 1968).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

Sin embargo, Hirsch & Slack, (1984) mejoraron significativamente la prueba de Mann-Kendall (MK) implementando el factor de estacionalidad. Este permite no estudiar la serie de manera global sino que en función del periodo definido. En este caso, al tratarse de datos semanales y mensuales, el test observa si hay tendencia entre las mismas semanas y meses del registro. En otras palabras, agrupa los datos por períodos bien definidos en 1 año natural (semanas, meses estaciones...) y luego se procede a la realización de la prueba.

⁶ Período definido para la realización de la descomposición estacional en la transformación de series de tiempo, en este estudio cuando se trate de medias semanales $P = 53$ y cuando se trate de medidas mensuales $P=12$.

Este mismo estudio se ha realizado tanto para los registros de oleaje como para los índices climáticos.

3.6. Función de correlación cruzada

Una vez se sabe si la componente tendencial de la serie es significativa o no con un 95 % de significancia, se realiza finalmente la función de correlación cruzada para correlacionar las diferentes series determinando el desfase temporal entre ellas.

Así la correlación cruzada, permite comparar dos señales $m_t1(t)$ y $m_t2(t)$ y ver la similitud que tienen entre ellas en función del tiempo de retardo que tiene una de la otra. Matemáticamente, viene definida por la siguiente expresión:

$$(m_t1 * m_t2) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{m_t1}(t) m_t2(t + t_{corr}) dt$$

Dónde $\overline{m_t1}(t)$ es el complejo conjugado de $m_t1(t)$ y t_{corr} es el desplazamiento o retraso que hay entre ambas señales (Nauleau et al., 2018)

3.7. Análisis de tormentas

Paralelamente, se ha realizado para cada boya, utilizando los criterios descritos anteriormente en apartado (1.5.2.1), el análisis de tormentas, de tal modo que se obtiene para ambos registros parámetros como, el número de temporales, el momento en que se produjo, el valor de altura máximo del temporal, el valor de altura medio durante el temporal, el período de pico tanto máximo como medio, la dirección etc.

Para el estudio se ha considerado que eran especialmente interesantes estudiar tanto el número de tormentas, como el flujo de energía de estas. De este modo se tendría información sobre la frecuencia con la que vienen y la intensidad con la se producen. Para la obtención de ambos parámetros, se precisa de una pequeña transformación de los datos explicada a continuación.

3.7.1. Cálculo del número de tormentas y el flujo de energía

Esta parte del trabajo, se ha realizado utilizando un promediado anual y una vez se tienen los parámetros estadísticos de las tormentas, se procede a contabilizar el número de tormentas que ha habido por Una vez se tiene este valor se realiza el mismo procedimiento que se ha descrito anteriormente con el fin de ver si existe o no correlación con los índices climáticos.

Por otro lado, el valor de flujo de energía es un poco más complejo de obtener, pues este valor es función de la energía y de la celeridad de grupo que a su vez es función de la longitud de onda, ambos parámetros se tienen que calcular previamente una vez obtenido el análisis.

Como se puede observar en la Tabla 4, para el cálculo de la longitud de onda y la celeridad, hay que tener en cuenta que ambas boyas se encuentran en aguas profunda, ya que el cálculo de este parámetro depende directamente de este factor. En aguas profundas el valor de estos parámetros se puede considerar constante, sin embargo, en aguas intermedias o someras no, pues este valor decrece al hacerlo la profundidad (Flores, 2008).

	AGUAS SOMERAS* $d \leq L/20$	AGUAS INTERMEDIAS* $L/2 > d > L/20$	AGUAS PROFUNDAS* $d \geq L/2$
Ecuación de la superficie libre	$\eta = a \cdot \text{sen}(k \cdot x - \omega \cdot t)$		
Velocidad de fase (Celeridad) $C =$	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{g}{\omega} \cdot \text{tgh}(k \cdot d)$	$\frac{g}{\omega}$
Longitud de onda $L =$	$T \cdot \sqrt{g \cdot d}$	$\frac{g T^2}{2\pi} \cdot \text{tgh}\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right)$	$\frac{g T^2}{2\pi}$
Frecuencia angular $\omega^2 =$	$g \cdot k^2 \cdot d$	$g k \text{tgh}(k \cdot d)$	$g k$
Celeridad de grupo $Cg =$	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\text{senh}(2kd)} \right] \cdot C$	$\frac{g}{2\omega} = \frac{1}{2} \cdot C$
Comp. horizontal de velocidad $u =$	$a \sqrt{\frac{g}{d}} \text{sen}(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$a \cdot \omega \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$
Comp, vertical de velocidad $w =$	$a \omega \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$-a \cdot \omega \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp, horizontal de la partícula $\xi_\omega =$	$\frac{a}{\omega} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$a \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp. vertical de la partícula $\zeta =$	$a \left(1 + \frac{z}{d} \right) \text{sen}(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$-a \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$
Presión (sobre la atmosférica) $\frac{P}{\rho_w \cdot g} =$	$\eta = -z$	$\eta \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} - z$	$\eta \cdot e^{kz} - z$

Tabla 4: Cálculo de los parámetros de oleaje según si se trata de aguas profundas, intermedias o someras (Palomino Monzón & Almazán Gárate, 2000)

Una vez se tiene el valor de la longitud de onda y de la celeridad de grupo, se procede a encontrar el valor de la energía específica por unidad de área definida según Palomino Monzón & Almazán Gárate, (2000) como:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2$$

De tal modo que si se multiplica el valor de la energía específica por la celeridad de grupo se obtiene el valor de flujo de energía.

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los primeros resultados que se obtienen son los análisis de extremos de ambas boyas con el fin de observar la diferencia y ver que a menor número de datos (menor cobertura espacial) habrá un aumento de la incertidumbre.

4.1. Resultados análisis de extremos datos PE

En la Ilustración 17 se representa la serie temporal de PE, utilizando los requisitos descritos anteriormente y extraídos de P, del Estado, (1990) donde el umbral de altura de ola es de 4.5 metros.

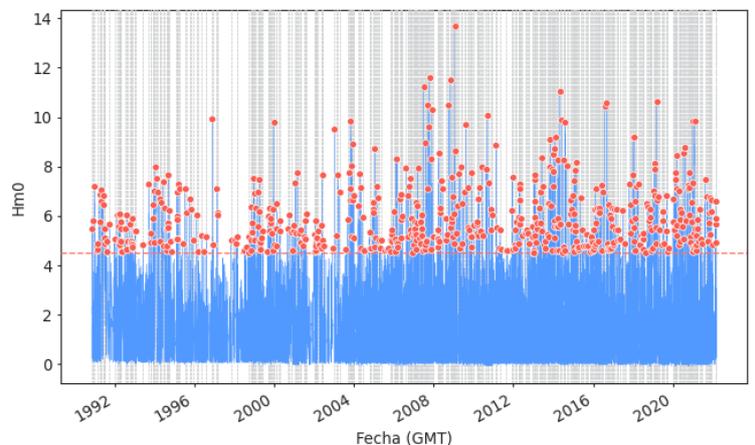


Ilustración 17: Serie temporal de PE con umbral de altura de ola en 4.5 metros (Elaboración propia).

Lo que más llama la atención al observar la Ilustración 17, es la gran cantidad de datos que hay para realizar el análisis. Este hecho conlleva a pensar que los resultados en la boya Bilbao Vizcaya pueden ser más fiables.

A continuación, en la Ilustración 20 se representa el diagnóstico del régimen extremal escalar del oleaje para la boya Bilbao-Vizcaya utilizando la función de Weibull.

Este diagnóstico esté formado por 4 gráficas principalmente:

- La primera corresponde a la gráfica de los valores de altura de ola asociada a un período de retorno. Aunque posteriormente se verá de manera más clara (Tabla 6), esta gráfica permite ver el valor teórico de H_s y los valores tanto de la banda de confianza alta como de la baja con un nivel de significancia del 95%.
- La segunda gráfica corresponde a la probabilidad de que se produzca un cierto valor de altura de ola.
- El tercer gráfico es el que se conoce como “gráfica QQ” en el que permite observar cuanto de cerca está la distribución obtenida a una distribución ideal (Kelmansky, 2008).
- Por último, el gráfico “PP” el cual permite saber en términos de probabilidad o porcentaje la banda del ajuste del modelo.

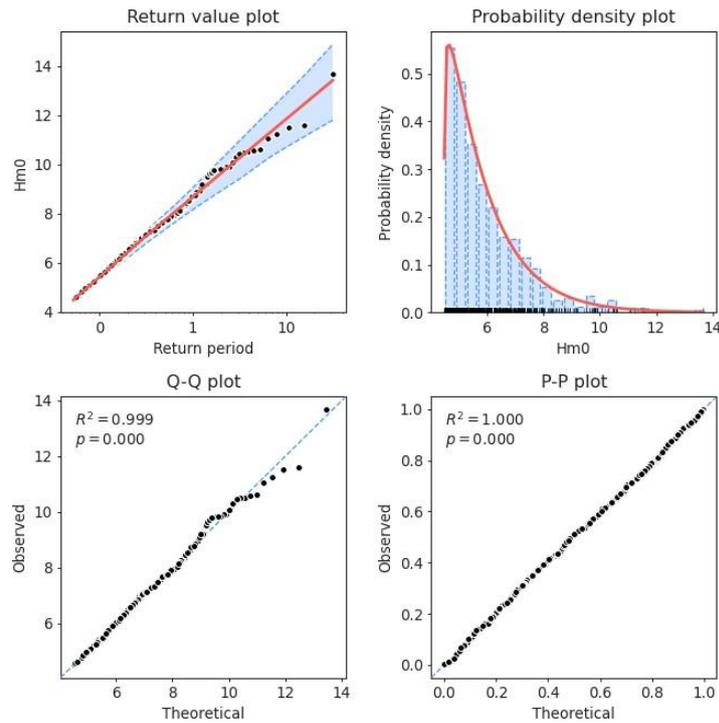


Ilustración 18: Resultados análisis de extremos escalares de la boyo B-V con período comprendido des de 1990 hasta 2022 (Elaboración propia).

En este caso, la gráfica del valores de altura de ola asociada a períodos de retorno, se aprecia con mayor fiabilidad, pues los límites tanto superiores como inferiores no distan tanto del valor central. Es decir, si se analiza los valores para un período de retorno (T_r) de 10 años, los valores de los límites superiores e inferiores son 13.3 y 10.1 metros respectivamente, por lo que existe un margen de error de 3.2 metros aproximadamente.

Por otro lado, en lo que respecta a el gráfico de densidad probabilística, este se observa muy bien ajustado a la función donde las máximas probabilidades, se tienen a valores de H_s pequeños.

En lo que a la gráfica QQ y PP respecta, el ajuste es casi perfecto, por no decir perfecto pues el valor de R^2 es del orden de 0.999 y 1.000 respectivamente.

Y nuevamente, se representa tal y como se ve en la Tabla 5 los valores de altura de ola asociados a su período de retorno, así como los valores de H_s con un intervalo de confianza del 95%.

PERÍODO DE RETORNO	VALOR DE HS	VALOR INFERIOR 95%	VALOR SUPERIOR 95%
1	8.690	8.317	9.188
2	9.644	9.125	10.376
5	10.902	10.127	12.076
10	11.854	10.823	13.432
50	14.063	12.362	16.709
100	15.014	12.997	18.169
150	15.571	13.362	19.036
200	15.966	13.610	19.656
300	16.522	13.946	20.537
400	16.917	14.179	21.168

Tabla 5: Tabla valores de H_s asociados a períodos de retorno para la boyo B-V (Elaboración propia).

En la Tabla 5, se puede corroborar el hecho de que los límites tanto superiores como inferiores, se asemejan más al valor central y por tanto existe un menor grado de incertidumbre.

Finalmente, se visualizan los valores de los parámetros de la función de Weibull.

$$F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - 1.373}{4.503}\right)^{1.000}\right)$$

4.2. Resultados análisis de extremos datos IEO

A continuación en la Ilustración 19, se representa la serie temporal del IEO, utilizando los requisitos descritos anteriormente y extraídos de Somavilla,(2021) donde nuevamente el umbral de altura de ola es de 4.5 metros.

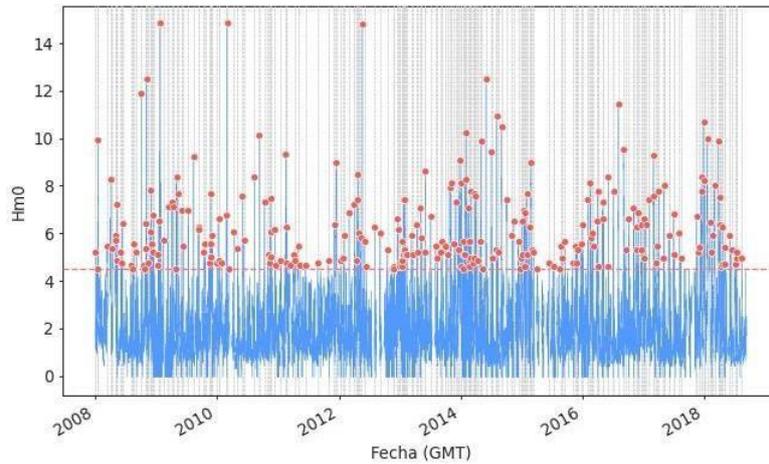


Ilustración 19: Serie temporal de IEO con umbral de altura de ola en 4.5 metros (Elaboración propia).

En la Ilustración 19, se observa en puntos rojos, los datos que se han escogido utilizando los requisitos descritos anterioremente en el apartado 1.5.2.1.

A continuación, en la Ilustración 20 se representa el diagnóstico del régimen extremal escalar del oleaje para la boya AGL utilizando la función de Weibull.

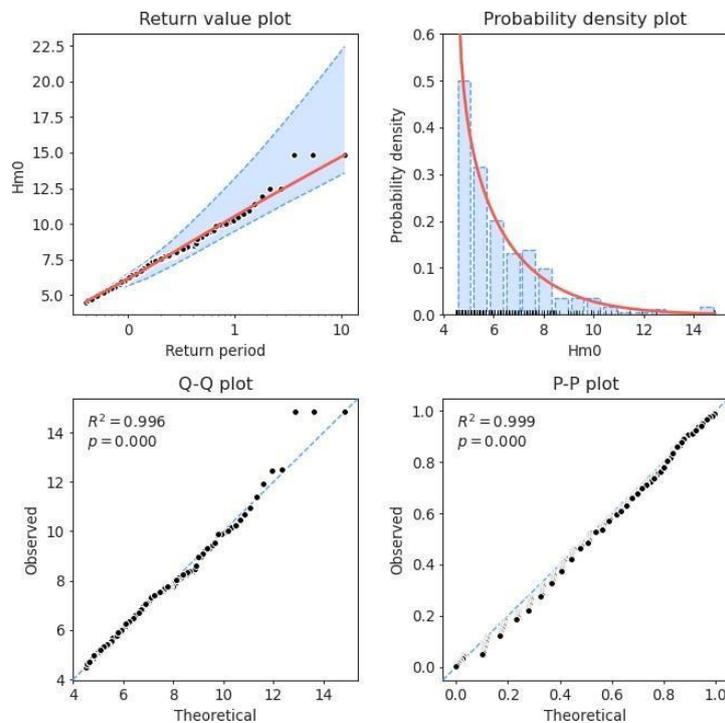


Ilustración 20: Resultados análisis de extremos escalares de la boya AGL con período comprendido des de 2007 hasta 2018 (Elaboración propia).

Analizando la banda de confianza en el gráfico del período de retorno, el límite superior y inferior conforme el Tr aumenta, divergen de manera sensible, lo que indica una gran incertidumbre. Analizando el mismo caso que anteriormente, existe un margen de error para un Tr de 10 años de aproximadamente 10 metros.

Sin embargo, aunque el gráfico de densidad probabilística, se ajusta de manera correcta, el ajuste utilizando la boya B-V es más preciso.

En lo que a la gráfica QQ y PP respecta, se puede observar como se ajusta de manera muy correcta pues, los resultados del coeficiente de determinación son 0.996 y 0.999 respectivamente.

Gracias a la función de distribución, se puede representar tal y como se ve en la Tabla 6 los valores de altura de ola asociados a su período de retorno, así como los valores de Hs con un intervalo de confianza del 95%.

PERÍODO DE RETORNO	VALOR DE HS	VALOR INFERIOR 95%	VALOR SUPERIOR 95%
1	10.526	9.374	12.837
2	11.812	10.664	15.216
5	13.477	12.330	18.365
10	14.713	13.555	20.887
50	16.319	15.003	24.801
100	17.516	16.058	27.605
150	18.699	17.113	31.092
200	20.245	18.449	35.230
300	21.401	19.503	38.549
400	22.547	20.428	41.845

Tabla 6: Tabla valores de Hs asociados a períodos de retorno para la boya IEO (Elaboración propia).

Observando la Tabla 6, se puede corroborar lo que analizando la gráfica del período de retorno se intuía, pues a periodos de retorno de 400 años aproximadamente, el valor de Hs del límite superior, es del doble aproximadamente que el valor de Hs normal.

Finalmente, se muestran a continuación los valores de los parámetros de la función de Weibull.

$$F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - 2.401}{4.503}\right)^{1.128}\right)$$

4.3. Resultados promedio semanal

Tras haber visto y analizado los análisis de extremos de ambas boyas y ver como varían los resultados en función del número de observaciones que se tienen, se dispone a presentar los resultados del análisis de correlación entre los índices climáticos y los parámetros del oleaje.

4.3.1. Resultados para la boya B-V

Hasta el momento, se han visto los resultados del análisis de extremos para ambas boyas con el fin de analizar las distintas incertidumbres que existen al realizar un mismo análisis con distintos números de observaciones. A continuación se muestran los resultados que dan nombre al título de este trabajo para la boya Bilbao-Vizcaya.

4.3.1.1. Función de Autocorrelación para la boya B-V usando promediado semanal

En primer lugar, siguiendo la metodología comentada anteriormente, se dispone a observar si los datos obtenidos tienen una correlación serial. De ser así se elimina esa correlación, realizando el promediado semanal.

En la Ilustración 21, se representa el autocorrelograma, para el parámetro Hs y poder observar de este modo si se ha eliminado la correlación serial.

Autocorrelograma de la boya B-V con Hs semanal

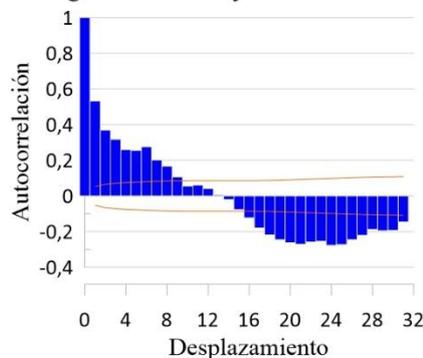


Ilustración 21: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro Hs, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

Como se puede observar en la gráfica, en el segundo “lag”, la correlación disminuye hasta un 0.5 aproximadamente, hecho que lleva a pensar que la correlación serial se ha eliminado en cierto modo y, por tanto, se puede proseguir con el estudio.

Es importante remarcar, que los límites superiores e inferiores en este caso son pequeños del orden de 0.1 aproximadamente.

En la Ilustración 22 y la Ilustración 23, se muestran los autocorrelogramas para los parámetros período de pico y peralte.

Autocorrelograma de la boya B-V con T_p semanal .

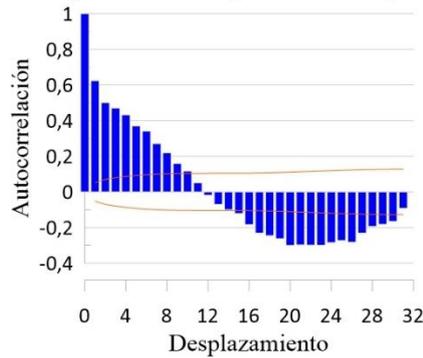


Ilustración 22: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro T_p , utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

Autocorrelograma de la boya B-V con Peralte semanal

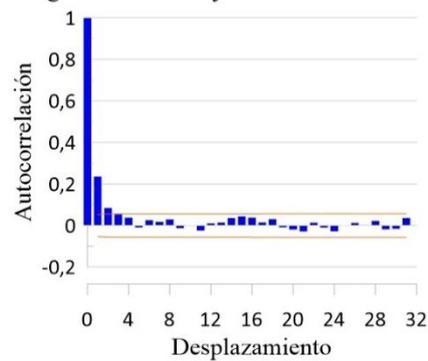


Ilustración 23: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro peralte, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

En este caso, se puede observar como la correlación serial de la Ilustración 23 es muchísimo menor que las correlaciones de las Ilustración 21 y Ilustración 22.

4.3.1.2. Análisis espectral de la boya B-V usando promediado semanal

Tras eliminar en buena parte la correlación serial, se representa en la Ilustración 24, tanto el periodograma como la densidad espectral del parámetro de altura de ola.

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro H_s

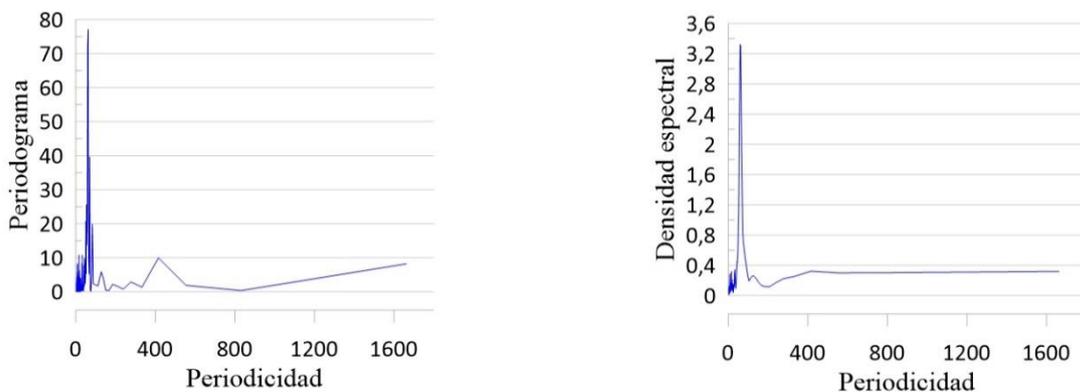


Ilustración 24: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro H_s semanal (Elaboración propia).

Analizando los resultados, se puede ver como, el parámetro tiene una componente tendencial que se tendrá que ver con mayor detenimiento posteriormente.

Lo mismo sucede para el peralte y T_p (Ilustración 25 y Ilustración 26), donde se puede ver como a periodos pequeños, el periodograma y la densidad espectral no tienden a cero.

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro T_p

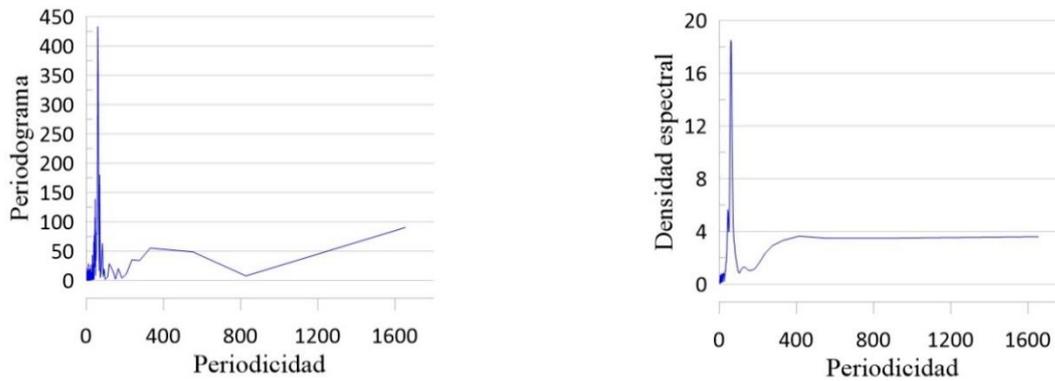


Ilustración 26: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro T_p semanal (Elaboración propia).

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro peralte

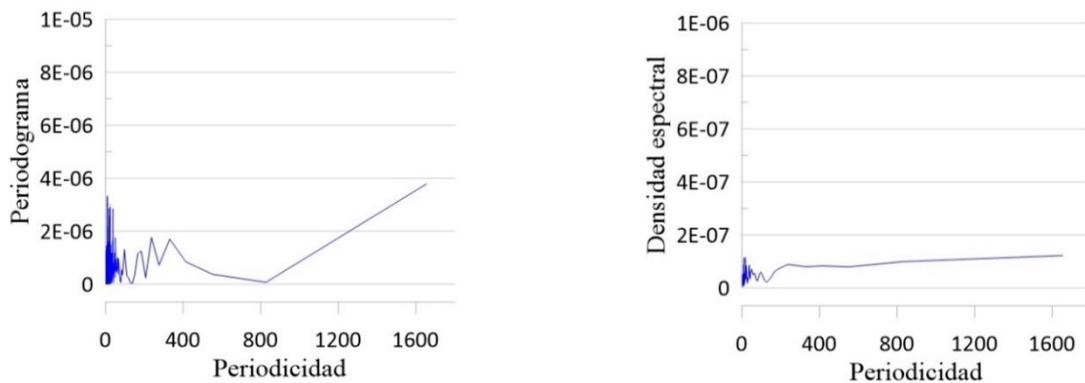


Ilustración 25: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro peralte semanal (Elaboración propia).

4.3.1.3. Obtención de la componente de tendencia de la boya B-V usando promediado semanal

Se descomponen las series temporales, para poder extraer la componente tendencial y posteriormente ver si esta es significativa o no. En la Ilustración 27, se muestra tanto la serie temporal como la componente tendencial de H_s .

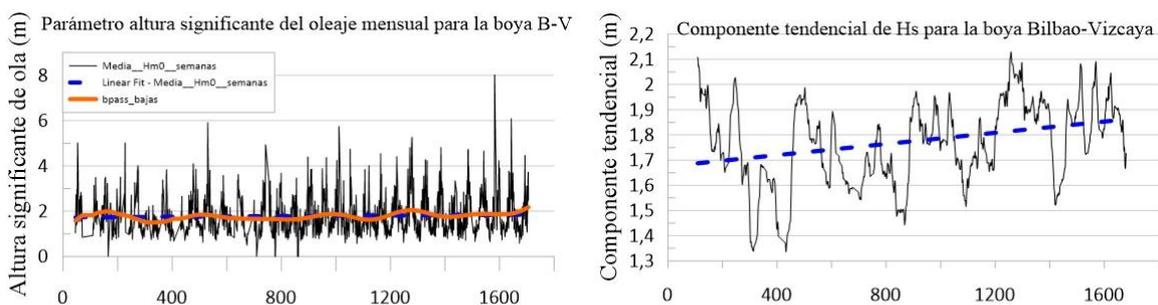


Ilustración 27: Componente tendencial de H_s utilizando el promediado semanal para la boya B-V (Elaboración propia).

En la Ilustración 27, además de representar tanto la serie temporal como su componente tendencial, se muestran en primer lugar, con una línea azul, una regresión lineal para mostrar de manera más directa la tendencia que pueda tener la serie. Y en segundo lugar, en línea naranja, se muestra el residuo fruto de la aplicación de un filtro pasa banda, de este modo, permite distinguir de manera más clara las frecuencias altas que anteriormente en el análisis espectral se observaban que tenían tendencia.

A continuación, se representa tanto la serie temporal como su componente tendencial para la variable período de pico (Ilustración 28).

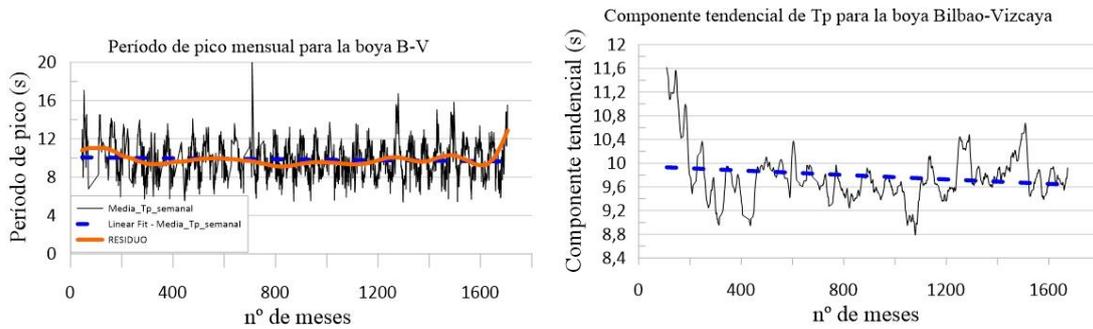


Ilustración 28: Componente tendencial del Tp utilizando el promediado semanal para la boy B-V (Elaboración propia).

En este caso, el pendiente de la componente tendencial del período de pico es negativo, es decir, el Tp tiende a disminuir durante el paso de los años.

Finalmente, se muestra tanto la serie temporal como su componente tendencial para el peralte, el cual, en la Ilustración 29, esta tiene una tendencia positiva.

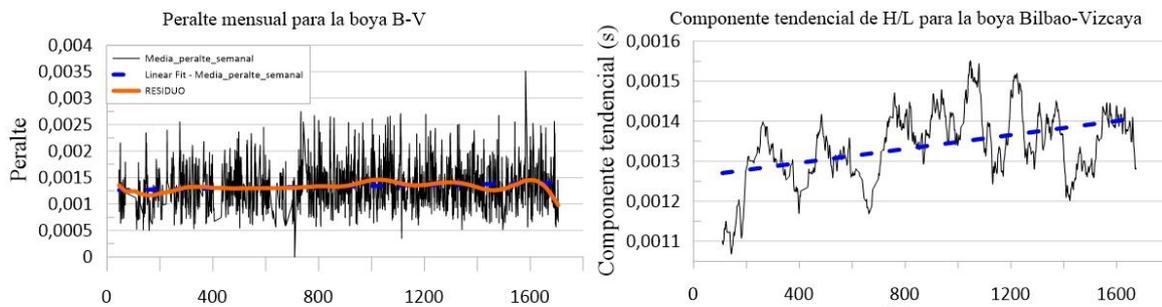


Ilustración 29: Componente tendencial del peralte utilizando el promediado semanal para la boy B-V (Elaboración propia).

4.3.1.4. Prueba de Mann-Kendall para la boya B-V usando promediado semanal

Tras analizar que, efectivamente, todos los parámetros tienen tendencia, hay que analizar si el pendiente a lo largo de los años es lo suficientemente grande como para poder considerar con un nivel de significancia del 95% que la tendencia es significativa o no.

En la Tabla 7, se muestra un resumen de los estadísticos de todos los parámetros y si finalmente se debe aceptar o rechazar la hipótesis alternativa.

	VALOR DE HS	TAU DE S KENDALL	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)	
ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA	Test de Mann-Kendall	0.204	182613	< 0.0001	0.05	0.00013	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	0.217	3450	0.006	0.05	0.008	Tendencia
PERÍODO DE PICO	Test de Mann-Kendall	-0.023	-20107	0.214	0.05	-0.00003	No tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	-0.023	-366	0.763	0.05	-0.002	No tendencia
PERALTE	Test de Mann-Kendall	0.251	222303	<0.0001	0.05	8.538E-8	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	0.266	4228	0.001	0.05	4.496E-6	No tendencia

Tabla 7: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall de la boya B-V utilizando los datos con promediado semanales (Elaboración propia).

En este caso, a lo que la altura de ola se refiere, esta tiene un p-valor más pequeño que el nivel de significación, de tal modo, que se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis de que la tendencia es significativa.

Sin embargo, con el parámetro de período de pico como el p-valor en ambas pruebas es mayor que 0.05, no se puede aceptar la hipótesis alternativa.

Por último, si se analiza el peralte, se puede observar como ocurre lo mismo que con la boya AGL, realizando el test sin tener en cuenta el factor de estacionalidad, los resultados, llevan a pensar que existe una tendencia significativa, sin embargo, si se realiza la prueba estacional, los resultados indican que se debe rechazar la hipótesis alternativa.

4.3.1.5. Función de correlación cruzada para la boya B-V usando promediado semanal

En la Ilustración 30, se muestran las correlaciones entre el índice NAO y los distintos parámetros del oleaje.

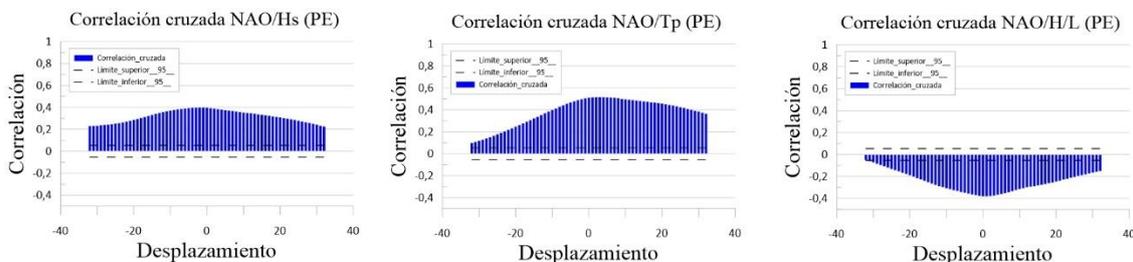


Ilustración 30: Correlaciones cruzadas entre el índice climático NAO y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boya B-V (Elaboración propia).

A grandes rasgos, se podría dividir el gráfico de correlaciones cruzadas de dos maneras distintas, para poder entenderlo de manera adecuada. En primer lugar, en el eje de las abscisas, se encuentra la variable desplazamiento⁷, esto comprende el rango de -30 hasta $+30$ y corresponde al lapso de tiempo que hay entre la variable altura de ola y la variable índice NAO.

En segundo lugar, en el eje de las ordenadas, se encuentra la correlación que existe entre ambas señales, esta va comprendido desde -1 hasta 1 coincidiendo así con las máximas correlaciones. Si las máximas correlaciones se encuentran en el $Lag=0$, indica que el efecto que ejerce la variable climática sobre la altura de ola es correlativa en el tiempo.

En tercer lugar, si las correlaciones son positivas y se producen en lapsos de tiempo positivos, indica que la variable climática lidera el proceso y, por lo tanto, un incremento en el índice climático, origina una variación del parámetro de oleaje.

De manera general, las correlaciones máximas entre los parámetros Hs y Tp son positivas y se producen en los primeros lags de tiempo, hecho que tiene sentido, pues como se ha visto en el apartado 1.4, el oleaje está muy influenciado por la intensidad y duración del viento.

Si se analiza la variable peralte, se observa que las correlaciones máximas son negativas. Como el peralte es función de la altura de ola y la longitud de esta y este hecho indica que el valor de longitud de onda es mayor que la altura, nos indica que el oleaje está dominado por oleajes de tipo *swell*.

En este caso, como el EAP no es tan conocido como los otros dos, no se han podido obtener datos promediados de manera semanal. Como entre otras cosas, el EAP proporciona información sobre la temperatura superficial del agua, con el fin de poder presentar datos parecidos, se ha procedido a utilizar los datos de temperatura superficial del agua de la boya Bilbao-Vizcaya, asumiendo que pueda haber un mayor grado de incertidumbre.

⁷ También se conoce como “Lag”

A continuación, en la Ilustración 31, se muestran las correlaciones entre los parámetros de altura y la componente tendencial de la variable temperatura.

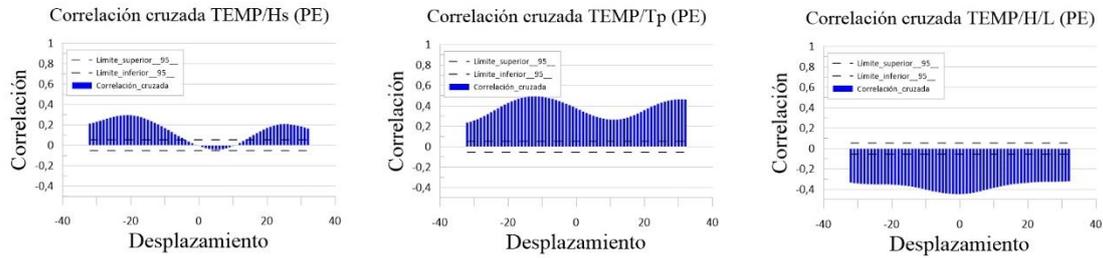


Ilustración 31: Correlaciones cruzadas entre la variable TEMP y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boya B-V (Elaboración propia).

En este caso, al tratarse de un valor que no corresponde exactamente con el índice climático EAP, los resultados no se pueden concluir de la misma manera. Sin embargo, las correlaciones máximas se producen con el período de pico, llegando a correlaciones de 0.55.

Finalmente, en la Ilustración 32, se muestran los resultados para el índice del Niño/la Niña Oscilación del Sur.

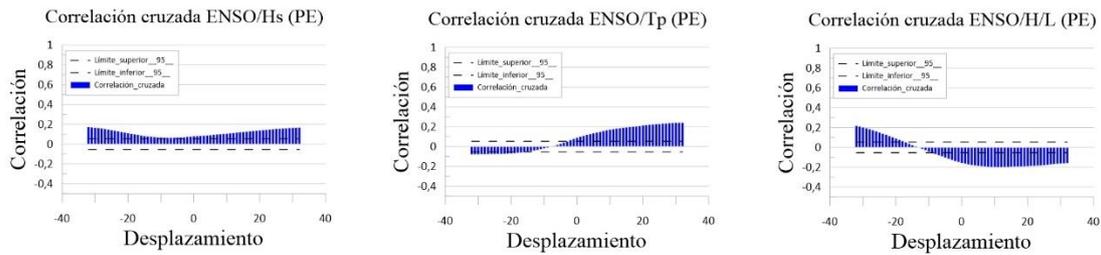


Ilustración 32: Correlaciones cruzadas entre el índice climático ENSO y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boya B-V (Elaboración propia).

En este caso, lo que más llama la atención, es la baja correlación que hay entre ambos parámetros, este hecho es debido a que el patrón ENSO es un patrón del pacífico y no del Atlántico.

Sin embargo, hay correlaciones que no se pueden pasar por alto en “lags” más atrasados, esto tiene sentido, ya que según He et al., (2020) se ha visto que existe un retardo de entre 4 a 6 meses entre un incremento del índice ENSO en el pacífico y el efecto de este incremento en la temperatura superficial del agua en el Atlántico.

4.3.2. Resultados para la boya AGL

4.3.2.1. Función de Autocorrelación para la boya AGL usando promediado semanal

En la Ilustración 33 se representa el autocorrelograma del parámetro Hs utilizando el promediado semanal.

Autocorrelograma de la boya AGL con Hs semanal

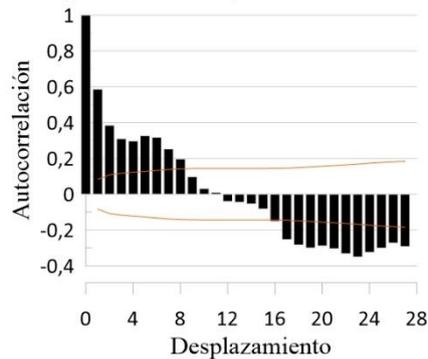


Ilustración 33: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro Hs, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

La Ilustración 33, muestra como la correlación serial decae durante el paso del tiempo. Al analizar la autocorrelación con el primer dato este siempre será 1, sin embargo, a partir del segundo dato, la correlación decae hasta el 0.6. En este caso, en primer lugar, se puede asumir que la correlación se ha eliminado en buena parte y en segundo lugar, los límites tanto superiores como inferiores son pequeños del orden de 0.2, lo que sugiere que este promediado ha conseguido disminuir la correlación serial y sin tener un aumento grande de la incertidumbre.

Una vez eliminada la correlación serial del primer parámetro del oleaje, se dispone a hacer lo mismo para el período de pico. En la Ilustración 34, se muestra el autocorrelograma del segundo parámetro analizado.

Autocorrelograma de la boya AGL con Tp semanal

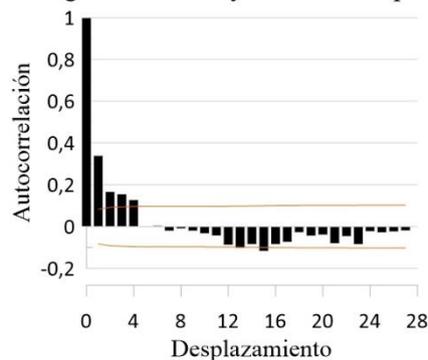


Ilustración 34: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro Tp, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

En este caso, la correlación serial se ha eliminado mucho mejor que con la altura de ola, ya que, la autocorrelación en el segundo desplazamiento decae hasta el 0.4 aproximadamente. Por otro lado, los márgenes superiores e inferiores se asemejan mucho al de la Hs (Ilustración 33).

Los resultados para el peralte del oleaje, se representan en la Ilustración 35, igual que con el período de pico, la correlación serial se ha eliminado mucho mejor que con la altura de ola significativa.

Autocorrelograma de la boya AGL con Peralte semanal

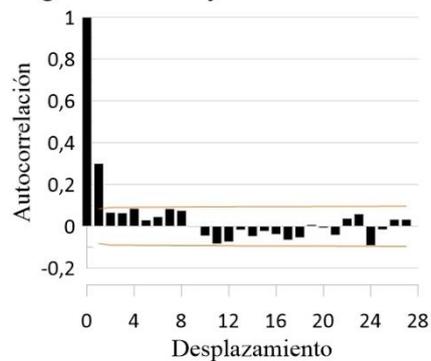


Ilustración 35: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro peralte, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

4.3.2.2. Análisis espectral de la boya AGL usando promediado semanal

Tras haber eliminado la correlación serial, se procede a observar si la serie temporal tiene o no una componente tendencial.

Una manera de observar de manera gráfica, si la serie tiene o no una componente tendencial, es analizando el periodograma o gráfico de densidad espectral. Como se ha comentado anteriormente, si el espectro no tiende a cero en frecuencias altas y bajas, significa que la serie temporal tiene una tendencia. En la Ilustración 36, se representan ambos gráficos para el parámetro de altura de ola significativa.

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro Hs semanal

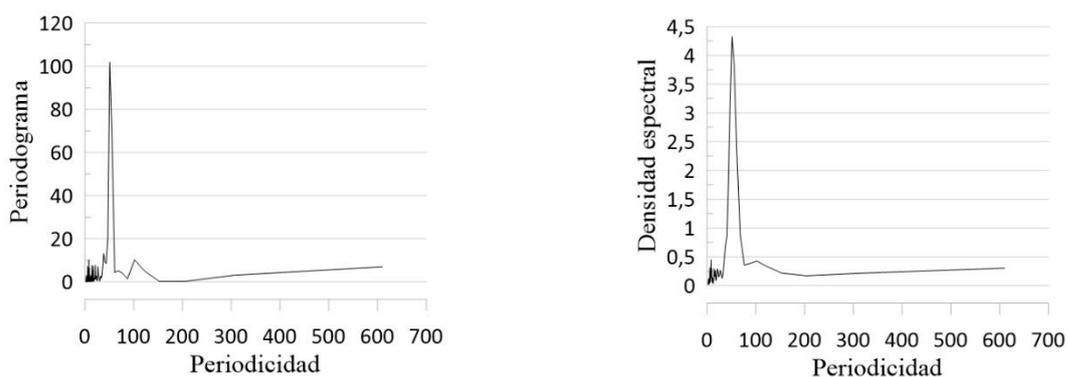


Ilustración 36: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro Hs semanal (Elaboración propia).

Analizando ambas gráficas, se puede observar como el espectro, en frecuencias altas, no tiende a cero, lo que sugiere, que serie tiene una componente tendencial.

De igual manera que se ha hecho con el parámetro altura de ola, se hace con el período de pico y el peralte. En la Ilustración 37 y la Ilustración 38, se representan los análisis espectrales para ambos parámetros.

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro T_p semanal

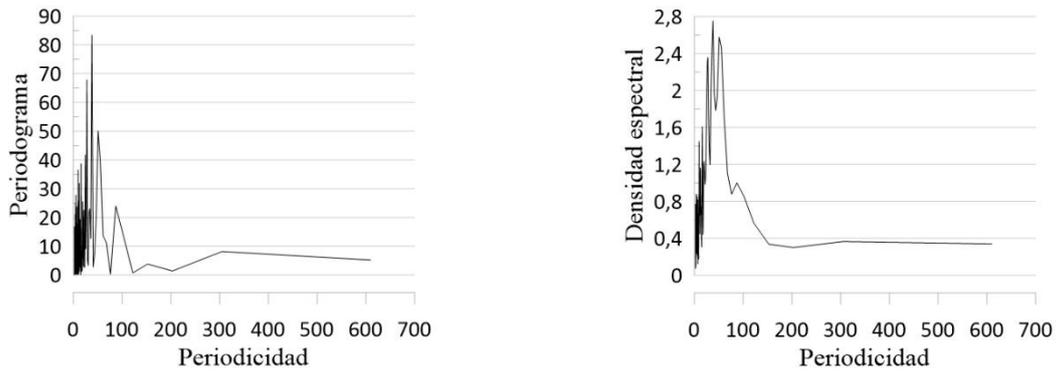


Ilustración 37: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro T_p semanal (Elaboración propia).

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro peralte semanal

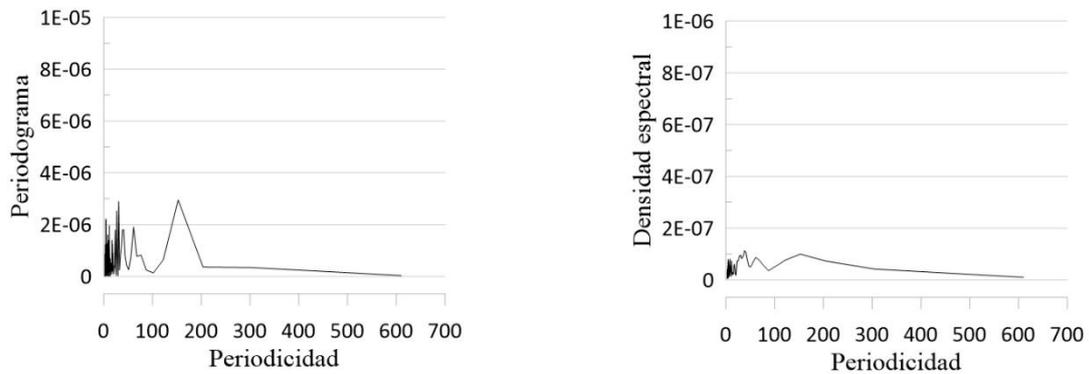


Ilustración 38: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro peralte semanal (Elaboración propia).

La Ilustración 37 y Ilustración 38, muestran que a frecuencias muy altas (períodos bajos), el espectro no tiende a cero, hecho que indica que la serie temporal tiene una componente tendencial.

4.3.2.3. Obtención de la componente de tendencia de la boya AGL usando promediado semanal

Una vez detectado que los parámetros tienen una componente tendencial, como se ha comentado anteriormente, el paso siguiente es extraer de manera aditiva esta componente para posteriormente observar estadísticamente si esta es significativa o no.

En la Ilustración 39, se representa la gráfica de la serie temporal de la altura de ola significativa y a la derecha, la gráfica de su componente tendencial.

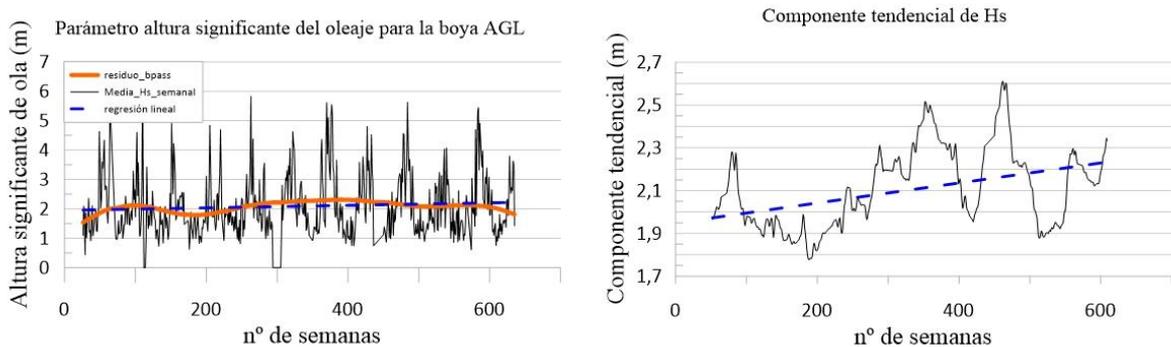


Ilustración 39: Componente tendencial de Hs utilizando el promediado semanal para la boya AGL (Elaboración propia).

Se observa de igual manera que con la boya Bilbao-Vizcaya, existe una componente tendencial positiva para este parámetro.

A continuación, en la Ilustración 40, se representa nuevamente la serie y su componente tendencial para el parámetro período de pico.

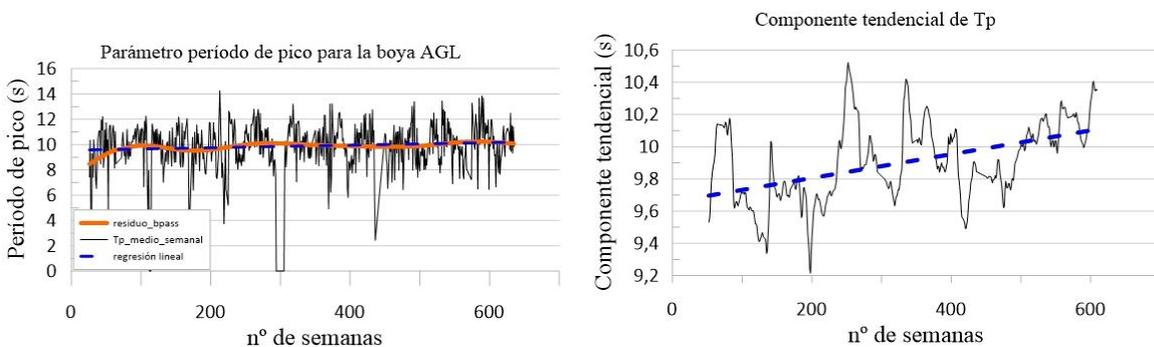


Ilustración 40: Componente tendencial de Tp utilizando el promediado semanal para la boya AGL (Elaboración propia).

En este caso, es muy interesante comparar la tendencia del Tp de ambas boyas (Ilustración 40) pues el pendiente de la componente tendencial del período de pico es positiva, es decir, el Tp tiende a aumentar durante el paso de los años.

Como se puede observar, la componente tendencial no es una regresión lineal, hay ciertos períodos de tiempo donde la tendencia es positiva y ciertos períodos de tiempo donde es negativa, sin embargo, al analizar toda la serie de manera general, esta es positiva.

Es por ese motivo, (como se puede ver en la Ilustración 41), que no se pueden comparar directamente los resultados obtenidos con la boya AGL, pues al tratarse de distintas coberturas temporales las tendencias pueden variar.

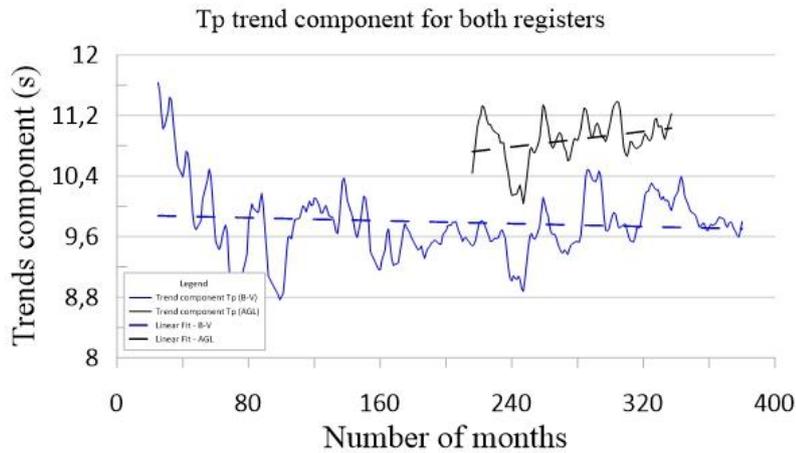


Ilustración 41: Ejemplo donde se puede observar que las componentes tendenciales dependen del período de tiempo estudiado (Elaboración propia).

En este caso, los resultados se asemejan mucho a los obtenidos con el parámetro altura de ola significativa, este hecho tiene sentido, pues sus análisis espectrales también en cierto modo se parecían. Ambos resultados tienen una componente tendencial que por lo general es positiva, aunque se tendrá que ver si esta es significativa o no. Finalmente, en la Ilustración 42, se muestra la descomposición de la serie para el parámetro, peralte.

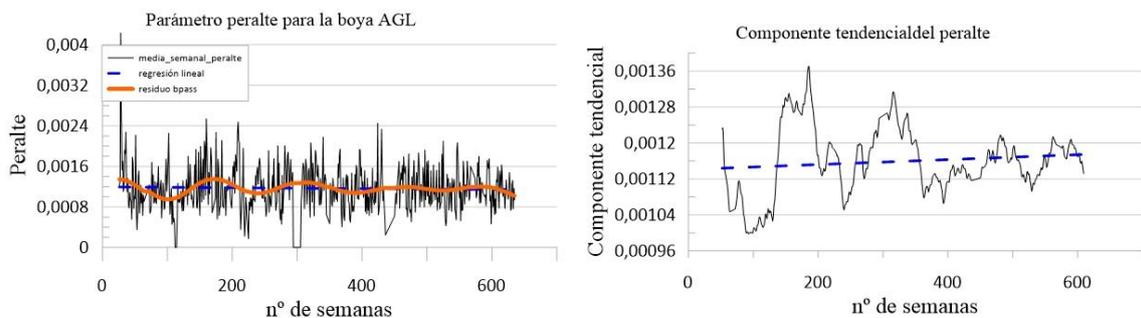


Ilustración 42: Componente tendencial de peralte utilizando el promediado semanal para la boya AGL (Ilustración propia)

En este caso, aunque existe una componente tendencial, no se aprecia a priori una pendiente lo suficientemente alta como para poder concretar si esta tendencia es significativa o no.

4.3.2.4. Prueba de Mann-Kendall para la boyo AGL usando promediado semanal

En la Tabla 8, se puede ver con un nivel de significancia, si los parámetros estudiados anteriormente tienen el pendiente de la componente tendencial lo suficientemente grande como para poder considerar si esta es significativa o no.

	VALOR DE HS	TAU DE KENDALL	S	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)
ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA	Test de Mann-Kendall	0.259	32948	< 0.0001	0.05	0.00052	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	0.261	498	0.092	0.05	0.026	Tendencia
PERÍODO DE PICO	Test de Mann-Kendall	0.356	45264	< 0.0001	0.05	0.00093	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	0.399	762	0.004	0.05	0.043	Tendencia
PERALTE	Test de Mann-Kendall	0.089	11284	0.003	0.05	8.395E-8	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=53)	0.060	114	0.627	0.05	3.884E-6	No tendencia

Tabla 8: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall de la boyo AGL utilizando los datos con promediado semanales (Elaboración propia).

Analizando la tabla parámetro por parámetro, a lo que la altura de ola se refiere, esta tiene un p-valor más pequeño que el nivel de significación de α , de tal modo, que se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis alternativa H_a .

Lo mismo sucede con el parámetro de período de pico, pues el p-valor en ambas pruebas es menor que 0.05 y, por tanto, se debe aceptar la hipótesis alternativa.

Por último, si se analiza el peralte, se puede observar como realizando el test, sin tener en cuenta el factor de estacionalidad, los resultados, indican a pensar que existe una tendencia significativa, sin embargo, si se realiza la prueba estacional, los resultados indican que se debe aceptar la hipótesis nula.

4.3.2.5. Función de correlación cruzada para la boyA AGL usando promediado semanal

Tras analizar, si los parámetros tienen o no una tendencia significativa, se representa en la Ilustración 43, las correlaciones entre la componente tendencial de la variable Hs y la componente tendencial del índice climático NAO.

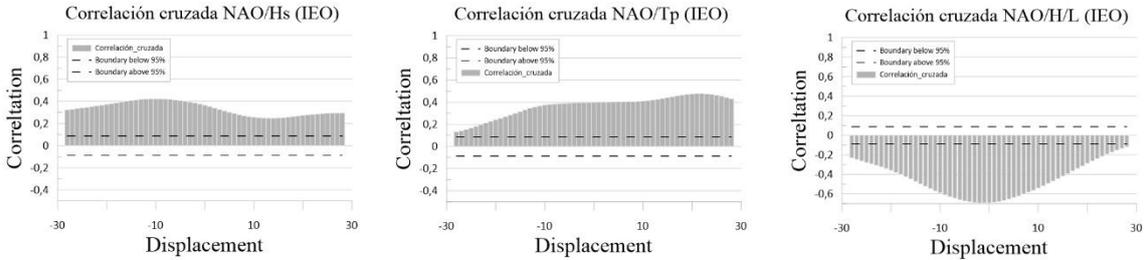


Ilustración 43: Correlaciones cruzadas entre el índice climático NAO y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boyA AGL (Elaboración propia).

Analizando la Ilustración 43, se puede ver como tanto para la altura de ola y para el período de pico, existen correlaciones muy elevadas del orden de 0.4 en los primeros lags de tiempo. Esto indica que el oleaje está influenciado por los eventos meteorológicos.

Además, para el peralte, las correlaciones máximas son negativas, por lo que nos indica que el oleaje en esa zona está dominado por oleaje de tipo swell.

A continuación en la Ilustración 44, muestra los resultados de la variable temperatura, ya que como se ha comentado anteriormente en el apartado 4.3.1.5 para el estudio utilizando el promediado semanal, no se han podido conseguir datos del patrón EAP.

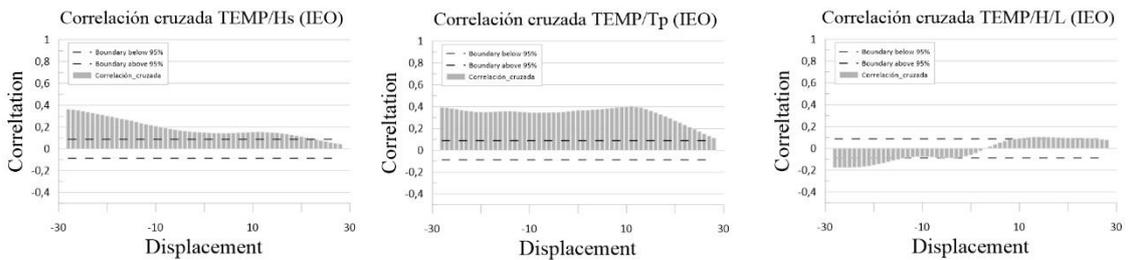


Ilustración 44: Correlaciones cruzadas entre el índice climático temperatura y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boyA AGL (Elaboración propia).

En este caso, al tratarse de un valor que no corresponde exactamente con el índice climático EAP, los resultados no se pueden concluir de la misma manera. Sin embargo, en este caso, se puede ver que el parámetro período de pico, es el parámetro que se ve más influenciado por la temperatura del agua.

Finalmente, en la Ilustración 45, se representan los resultados de las correlaciones cruzadas entre el índice del pacífico y los parámetros del oleaje, los cuales como se puede observar, indican, a grandes rasgos, que el índice climático del Pacífico, no está tan influenciado por los parámetros del oleaje en el Atlántico Norte.

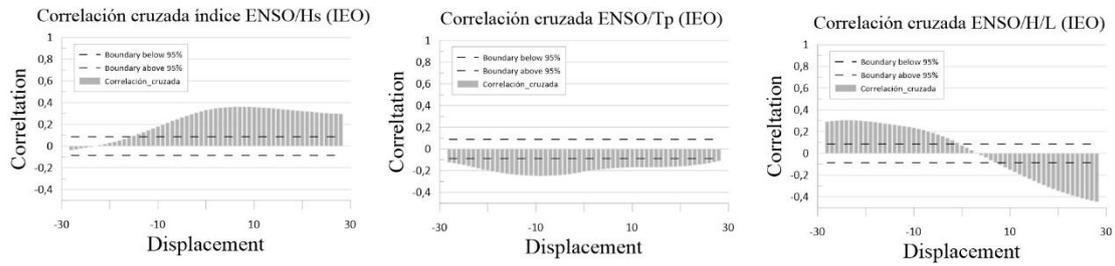


Ilustración 45: Correlaciones cruzadas entre el índice climático ENSO y los parámetros Hs, Tp y H/L semanales de la boya AGL ((Elaboración propia).

4.4. Resultados promedio mensual

4.4.1. Resultados para la boya B-V

En este caso, se representan los resultados de la boya de aguas profundas de Bilbao-Vizcaya utilizando el promediado mensual.

4.4.1.1. Función de Autocorrelación para la boya B-V usando promediado mensual

En la Ilustración 46, se puede observar la función de autocorrelación para la variable altura de ola significativa utilizando el promediado mensual para la boya de Bilbao-Vizcaya.

Autocorrelograma de la boya B-V con Hs mensual

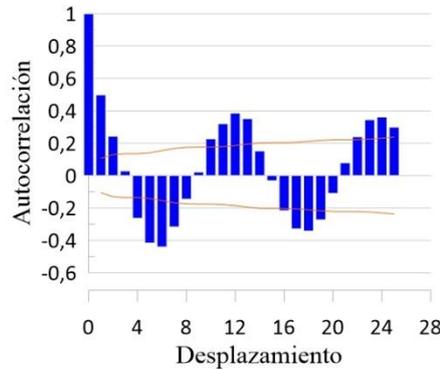


Ilustración 46: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro Hs, utilizando el promedio mensual (Elaboración propia).

Se observa como la correlación serial, decae mucho mejor que usando el promediado semanal (Ilustración 21).

A su vez, en la Ilustración 47 nuevamente, se representa el autocorrelograma para la variable período de pico, utilizando el promediado mensual para la boya de Puertos del Estado.

Autocorrelograma de la boya B-V con Tp mensual

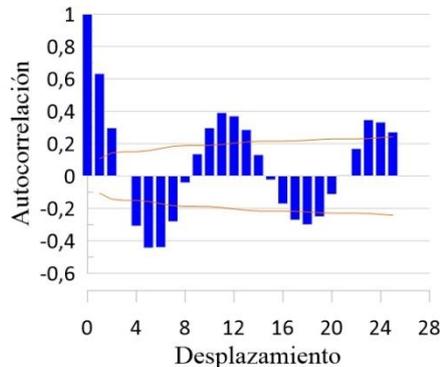


Ilustración 47: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro Tp, utilizando el promedio mensual (Elaboración propia).

Nuevamente la correlación serial se elimina casi por completo, ya que en el tercer mes la correlación es del orden de 0.2

Por último, y con el mismo resultado que las anteriores gráficas, se representa en la Ilustración 48, el autocorrelograma utilizando el parámetro del peralte.

Autocorrelograma de la boya B-V con Peralte mensual

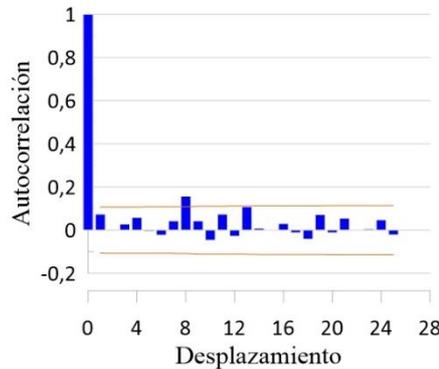


Ilustración 48: Autocorrelograma de la boya B-V para el parámetro peralte, utilizando el promediado mensual ((Elaboración propia).

4.4.1.2. Análisis espectral para la boya B-V usando promediado mensual

En la Ilustración 49, se muestran los resultados del análisis espectral del parámetro altura de ola significativa, utilizando el promediado mensual.

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro Hs

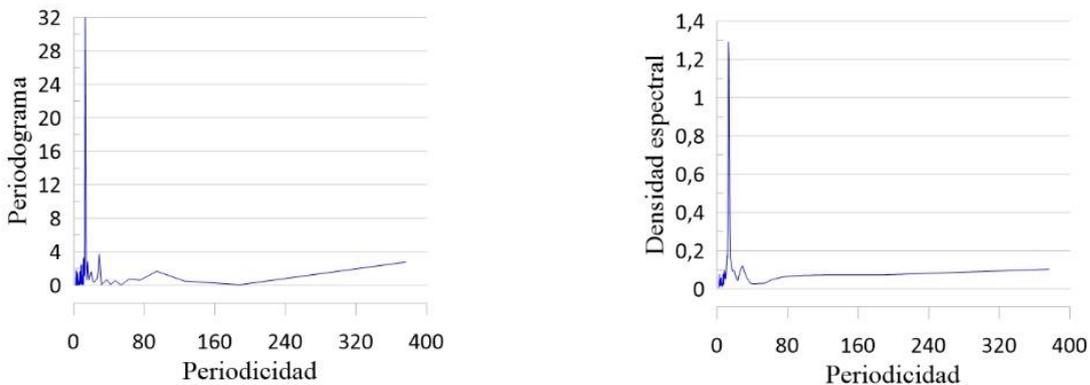


Ilustración 49: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro Hs mensual (Elaboración propia).

Como ya se ha visto anteriormente, a frecuencias altas, el espectro no tiende a cero de tal modo, que indica que la serie tiene una componente tendencial que se debe analizar.

Seguidamente, en la Ilustración 50 y en la Ilustración 51, se muestran los resultados utilizando los parámetros período de pico y peralte.

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro T_p

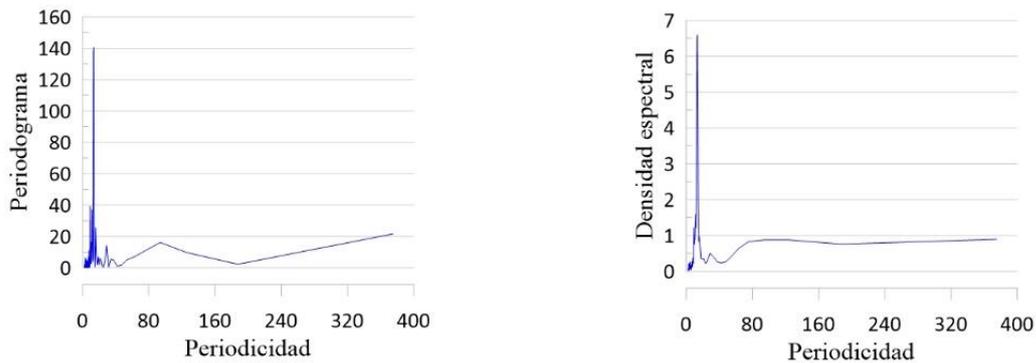


Ilustración 50: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro T_p mensual (Elaboración propia).

Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro peralte

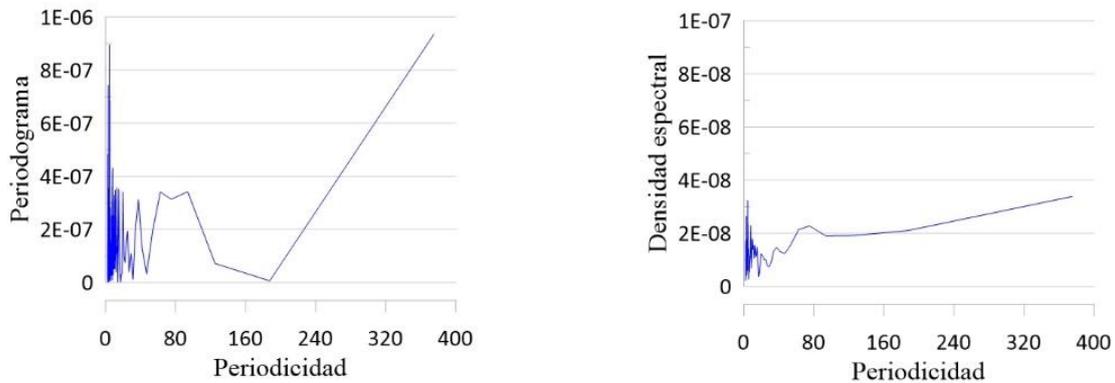


Ilustración 51: Periodograma y densidad espectral de la boya B-V, para el parámetro peralte mensual (Elaboración propia).

De nuevo, ambos análisis no tienden a cero en frecuencias altas, indicando así que ambas series tienen una componente tendencial.

4.4.1.3. Obtención de la componente de tendencia de la boya B-V usando promediado mensual

A continuación, se representan los resultados utilizando el promediado mensual de la componente tendencial y la serie temporal de cada parámetro. En la Ilustración 52, se muestran los resultados con el parámetro H_s .

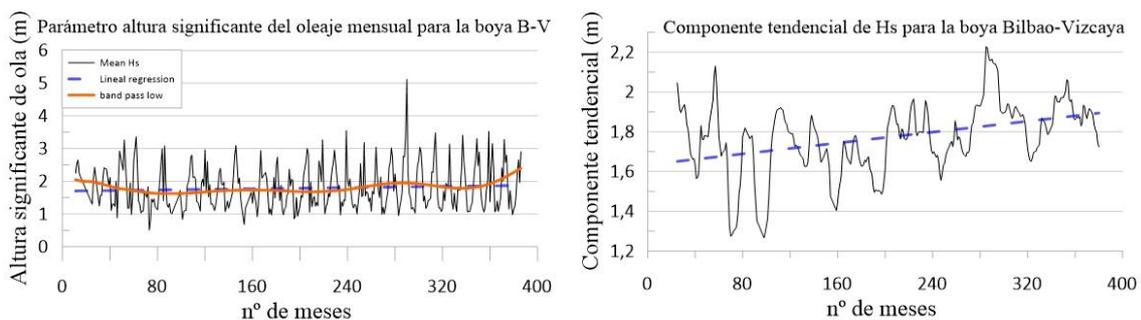


Ilustración 52: Componente tendencial de H_s utilizando el promediado mensual para la boya B-V (Elaboración propia).

Por un lado, y a diferencia del estudio utilizando el promediado semanal, se puede ver como la serie temporal se observa de manera más clara, eso es debido a la menor cantidad de observaciones.

Por otro lado, aunque posteriormente se verá si la tendencia es realmente significativa o no, a priori se puede observar como efectivamente existe una componente tendencial.

Y en la Ilustración 53 y la Ilustración 54, se representan los resultados de período de pico y peralte consecutivamente.

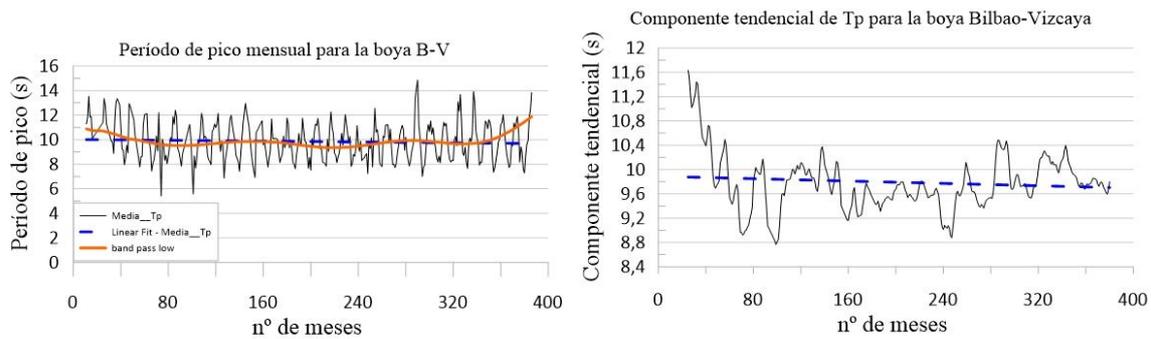


Ilustración 53: Componente tendencial de T_p utilizando el promediado mensual para la boya B-V (Elaboración propia).

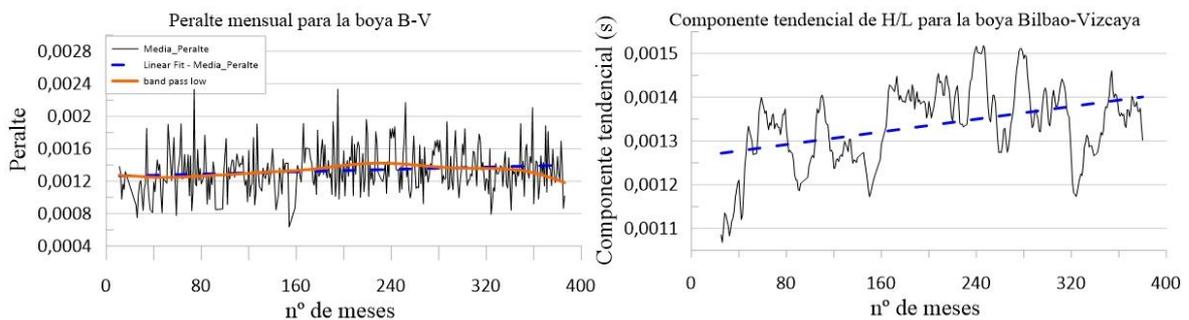


Ilustración 54: Componente tendencial de peralte utilizando el promediado mensual para la boya B-V (Elaboración propia).

En este caso, se observa que en general la tendencia del período de pico a lo largo de los años, tiende a ir disminuyendo.

Sin embargo, esto no sucede con el peralte, ya que se observa una clara tendencia creciente a lo largo de todo el período de registro.

4.4.1.4. Prueba de Mann-Kendall para la boyo B-V usando promediado mensual

En la tabla Tabla 9, se representan de manera resumida los resultados de ambas pruebas estadísticas hechas para cada parámetro.

	VALOR DE HS	TAU DE KENDALL	S	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)
ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA	Test de Mann-Kendall	0.068	310	0.085	0.05	3.282E-4	No tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	0.034	1951	0.35	0.05	0.007	No tendencia
PERÍODO DE PICO	Test de Mann-Kendall	-0.231	-13235	< 0.0001	0.05	-0.004	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	-0.26	-1180	< 0.0001	0.05	-0.055	Tendencia
PERALTE	Test de Mann-Kendall	0.305	17479	< 0.0001	0.05	4.452E-5	Tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	0.366	1658	< 0.0001	0.05	5.830E-4	Tendencia

Tabla 9: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall de la boyo B-V utilizando los datos con promediado mensuales (Elaboración propia).

Por norma general, al analizar mensualmente los datos, se puede ver que el pendiente de la altura de ola no es lo suficientemente grande como para poder considerar con un nivel de significancia del 95% que la tendencia es significativa. En este caso, el período de pico, sí se puede afirmar que la tendencia es significativa. Como la correlación serial en este caso se a eliminado de mejor manera que utilizando el promediado semanal, se pueden tomar estos resultados como unos resultados con mayor fiabilidad.

En lo que al peralte respecta, ambos test tienen un p-valor más pequeño que 0.05, de tal modo, que se puede aceptar la hipótesis alternativa y decir que la tendencia en este período de tiempo es significativa.

4.4.1.5. Función de correlación cruzada para la boya B-V usando promediado mensual

En la ilustración Ilustración 55, se representa la correlación cruzada entre el índice NAO y los distintos parámetros.



Ilustración 55: Correlaciones cruzadas entre el índice climático NAO y los parámetros mensuales Hs, Tp y H/L de la boya B-V (Elaboración propia).

En este caso, se puede ver como para la variable Hs, existe una correlación positiva en los primeros lags de tiempo del orden de 0.4 entre el parámetro del oleaje y el índice de la NAO.

De tal modo que en primer lugar, indica que los eventos son prácticamente simultáneos, hecho que, como anteriormente se ha podido ver, tiene sentido.

En segundo lugar, las correlaciones son positivas, de tal modo que un incremento del índice NAO, supone un incremento en la altura de ola. Y en tercer, es importante comentar que en la naturaleza, encontrar correlaciones de más de 0.4 son correlaciones bastante importantes.

Lo mismo sucede con el período de pico, donde las correlaciones máximas llegan hasta el 0.6 aproximadamente.

Finalmente, y de igual modo que hasta el momento, las correlaciones con el peralte son negativas, de tal modo que hace reforzar el hecho de que el oleaje en esa zona esta dominado por oleaje de tipo *swell*.

En la Ilustración 56, se representa la correlación que existe entre el índice climático EAP y los parámetros de oleaje.

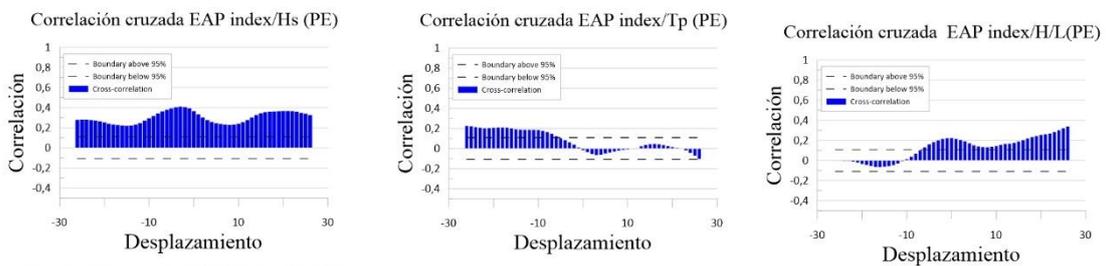


Ilustración 56: Correlaciones cruzadas entre el índice climático EAP y los parámetros mensuales Hs, Tp y H/L de la boya B-V (Elaboración propia).

En lo que al patrón del Atlántico Este se refiere, se observa como existen también correlaciones elevadas con el parámetro altura de ola, que puede llevar hasta correlaciones del 0.4 aproximadamente.

Por último, en la Ilustración 57, se representa el índice ENSO y los parámetros de la boya de aguas profundas Bilbao-Vizcaya.

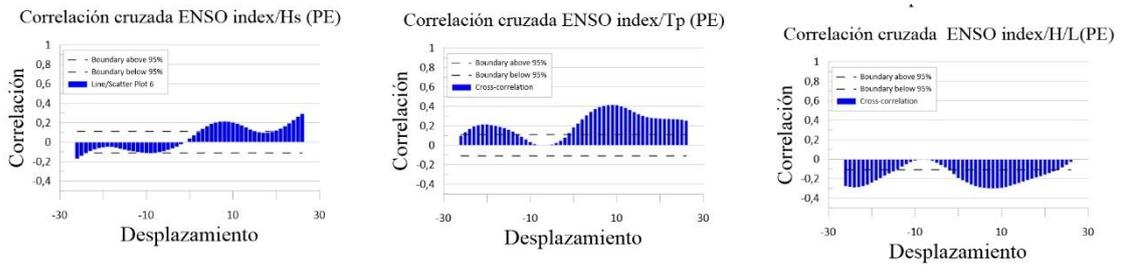


Ilustración 57: Correlaciones cruzadas entre el índice climático ENSO y los parámetros mensuales Hs, Tp y H/L de la boya B-V (Elaboración propia).

Por último, analizando el patrón por excelencia del pacífico, se puede corroborar, que existe un *delay* de aproximadamente 7-8 meses entre los eventos del patrón en el pacífico y los efectos de este sobre los parámetros del oleaje en el Atlántico.

4.4.2. Resultados para la boya AGL

4.4.2.1. Función de Autocorrelación para la boya AGL usando promediado mensual

Una vez realizada la función de autocorrelación, se representa de manera gráfica la eliminación de la correlación serial. En la Ilustración 58, se puede observar la función de autocorrelación para la variable altura de ola significativa.

Autocorrelograma de la boya AGL con Hs mensual

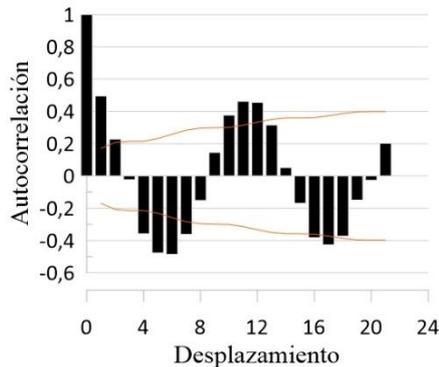


Ilustración 58: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro Hs, utilizando el promedio semanal (Elaboración propia).

A diferencia de los resultados obtenidos anteriormente utilizando los promediados semanales (apartado 4.3.2.1), se puede ver como la correlación serial ha disminuido mucho más.

El segundo parámetro que se representa en la Ilustración 59, es la gráfica de autocorrelaciones para la variable período de pico.

Autocorrelograma de la boya AGL con Tp mensual

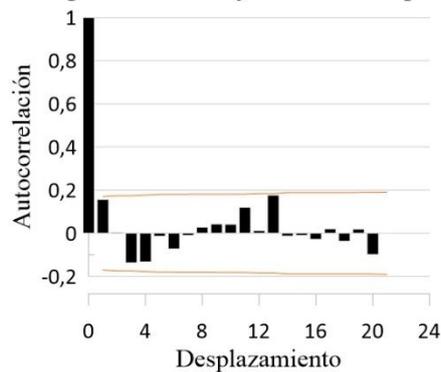


Ilustración 59: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro Tp, utilizando el promedio mensual (Elaboración propia).

Para el período de pico, también se ve como la correlación serial se ha eliminado mejor. Finalmente, en la Ilustración 60, se representa el peralte del oleaje, la última variable estudiada en el trabajo.

Autocorrelograma de la boya AGL con Peralte mensual

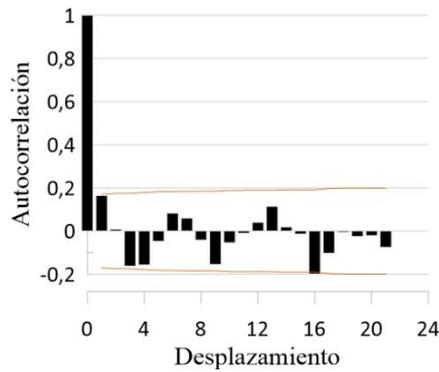


Ilustración 60: Autocorrelograma de la boya AGL para el parámetro peralte, utilizando el promedio mensual (Elaboración propia).

4.4.2.2. Análisis espectral para la boya AGL usando promediado mensual

A continuación se muestran los resultados gráficos tanto del periodograma como de la densidad espectral para cada parámetro de la boya Augusto González de Linares. En la Ilustración 61, se muestran los resultados para el parámetro altura de ola significativa.

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro Hs

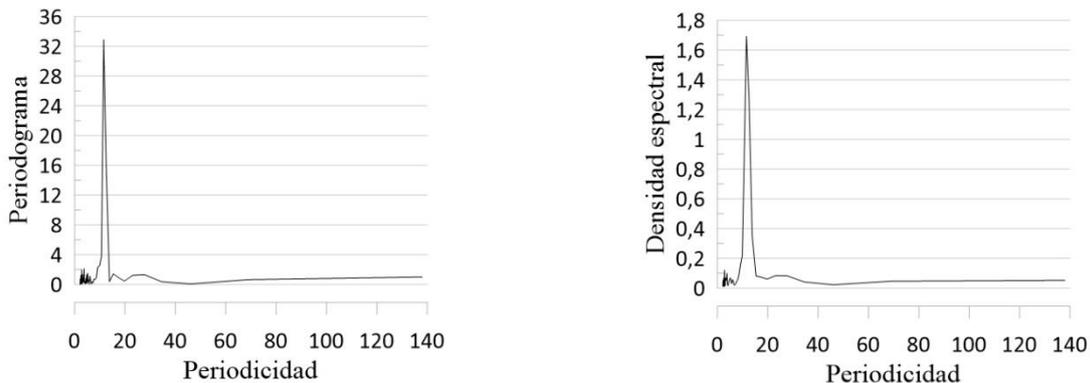


Ilustración 61: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro Hs mensual (Elaboración propia).

Lo primero que llama la atención al analizar el análisis espectral es que la periodicidad ha disminuido muchísimo con respecto a los resultados utilizando el promediado semanal. Esto es debido a la reducción del número de observaciones al realizar el promediado de los datos.

De todos modos, nuevamente se puede ver como para la Hs, a períodos bajos, el espectro no tiende a cero.

A continuación, en la Ilustración 62 y en la Ilustración 63, se representa el análisis espectral para el parámetro período de pico y peralte.

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro peralte

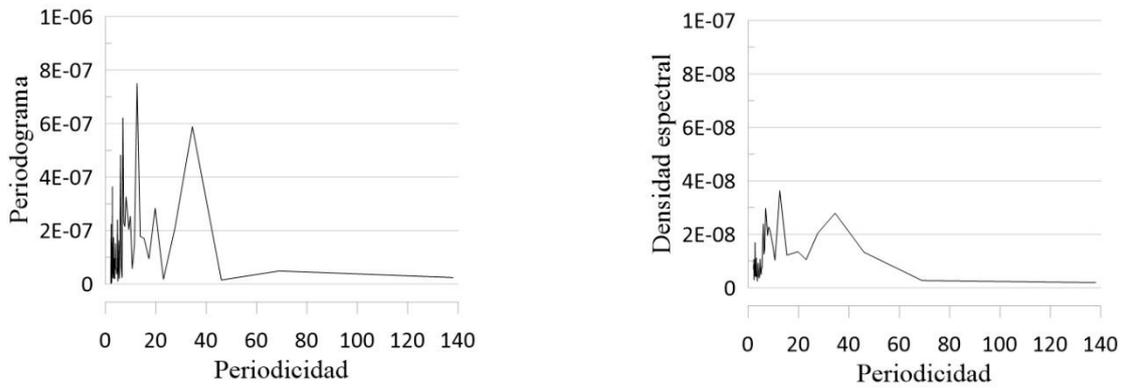


Ilustración 63: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro peralte mensual (Elaboración propia).

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro T_p

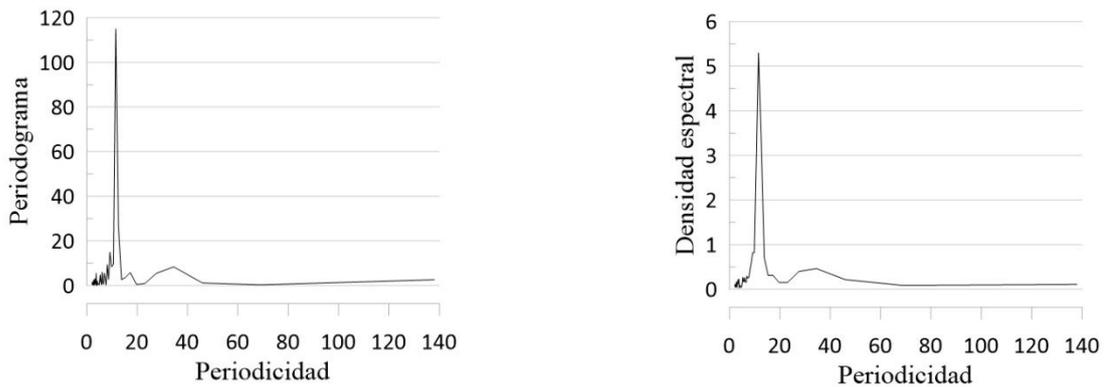


Ilustración 62: Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el parámetro T_p mensual (Elaboración propia).

Tras analizar ambos análisis, se puede ver como ambos parámetros efectivamente tienen una componente tendencial.

4.4.2.3. Obtención de la componente de tendencia de la boya AGL usando promediado mensual

A continuación, se representan los resultados utilizando el promediado mensual de la componente tendencial de cada parámetro. En primer lugar, en la Ilustración 64, se muestra la serie de altura significativa de ola y su componente tendencial.

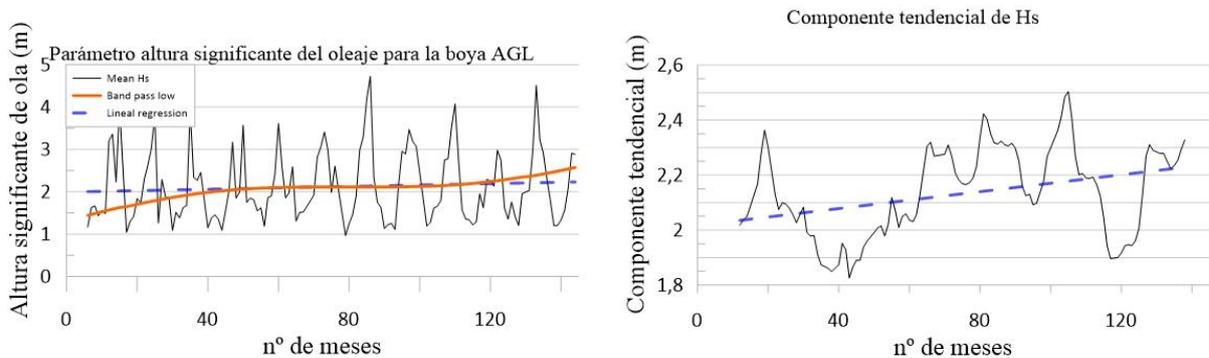


Ilustración 64: Componente tendencial de Hs utilizando el promediado mensual para la boya AGL (Elaboración propia.)

En la Ilustración 65, se muestra para el parámetro período de pico, nuevamente su serie temporal y su componente tendencial.

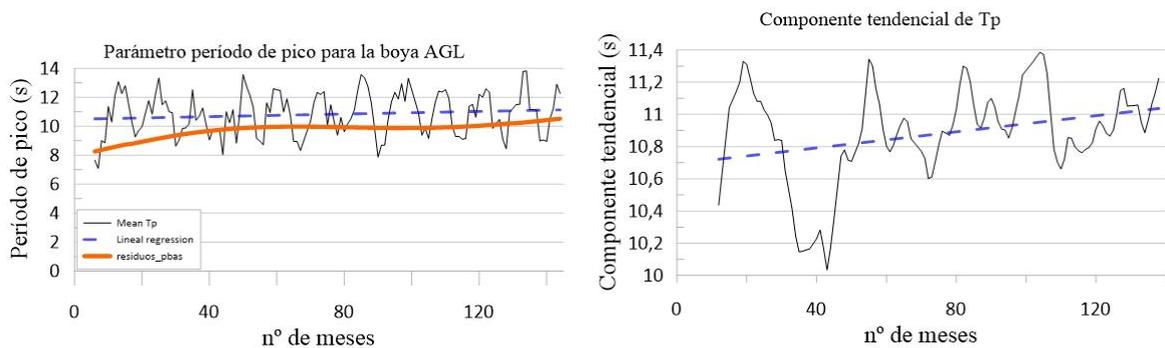


Ilustración 65: Componente tendencial de Tp, utilizando el promediado mensual para la boya AGL (Elaboración propia.)

Finalmente, en la Ilustración 66, se grafican los resultados para el peralte del oleaje.

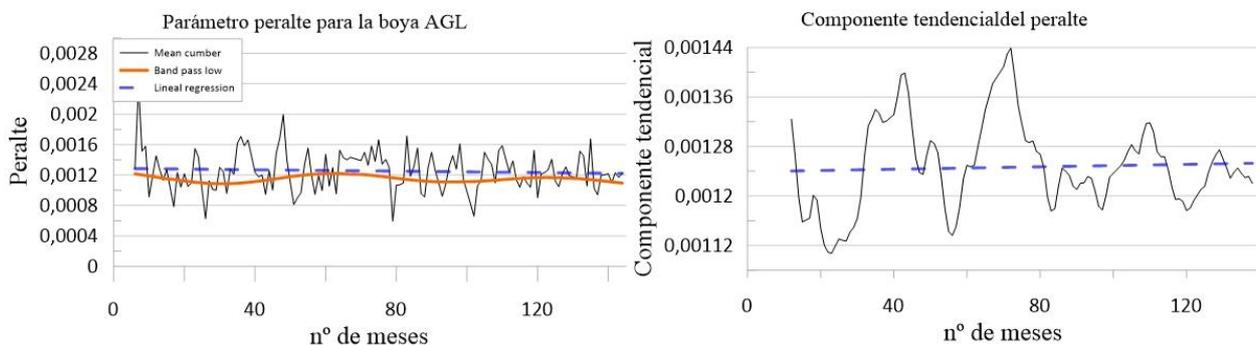


Ilustración 66: Componente tendencial de peralte, utilizando el promediado mensual para la boya AGL (Elaboración propia.)

En este caso, tanto en la Ilustración 64, como en las Ilustración 65 y 66, se pueden ver que al final, durante el período de registro de la boya AGL, todos los parámetros tienen tendencias positivas.

4.4.2.4. Prueba de Mann-Kendall para la boya AGL usando promediado mensual

A continuación, y de igual manera que anteriormente, se representa en la Tabla 10, un resumen de los estadísticos obtenidos más importantes utilizando la prueba estadística de Mann-Kendall normal y posteriormente teniendo en cuenta la estacionalidad.

Hay que remarcar que como en este caso estamos tratando de promediados mensuales, en la prueba estacional, el período de estacionalidad es de 12 meses.

	VALOR DE HS	TAU DE KENDALL	S	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)
ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA	Test de Mann-Kendall	0.058	498	0.328	0.05	0.002	No tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	0.133	88	0.026	0.05	0.046	Tendencia
PERÍODO DE PICO	Test de Mann-Kendall	0.072	624	0.220	0.05	0.004	No tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	-0.106	70	0.07	0.05	0.071	No tendencia
PERALTE	Test de Mann-Kendall	-0.029	-254	0.619	0.05	-3.176E-7	No tendencia
	Prueba estacional de Mann-Kendall (P=12)	-0.015	-10	0.836	0.05	-2.378E-6	No tendencia

Tabla 10: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall de la boya AGL utilizando los datos con promediado mensuales (Elaboración propia).

En este caso, en general menos en la prueba estacional del parámetro de altura de ola, todos los demás parámetros, tienen un p-valor más grande que la alpha, por lo que no se puede decir que con este nivel de significancia exista una tendencia significativa.

Es importante tener en cuenta que para este estudio los datos eran más independientes entre sí, es decir, la correlación serial se había eliminado de mejor manera, de tal modo que lleva a pensar que estos resultados son más significativos que los resultados de la boya AGL utilizando el promediado semanal (apartado 494.3.2.1). Este hecho tiene sentido, pues 11 años de registro son relativamente pocos como para poder extraer unas conclusiones al respecto.

4.4.2.5. Función de correlación cruzada para la boya AGL usando promediado mensual

En la Ilustración 67, se representan las correlaciones entre los distintos parámetros y el índice climático Oscilación del Atlántico Norte.

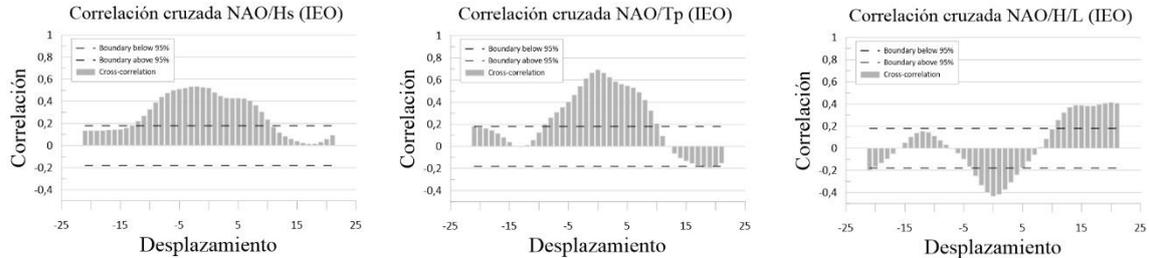


Ilustración 67: Correlaciones cruzadas entre el índice climático NAO y los parámetros Hs, Tp y H/L (Elaboración propia).

Existen correlaciones positivas muy grandes entre los parámetros de oleaje Hs y Tp y el índice climático de la NAO, de tal modo que lleva a pensar que a medida que el índice de la NAO tiende a aumentar, así lo hacen los parámetros de oleaje.

El segundo índice, y que anteriormente no se había podido representar exactamente, es el EAP y se puede observar en la Ilustración 68.

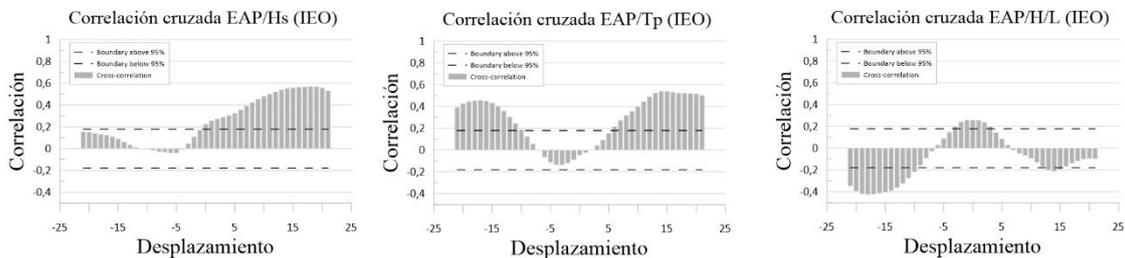


Ilustración 68: Correlaciones cruzadas entre el índice climático EAP y los parámetros Hs, Tp y H/L (Elaboración propia).

Aunque los resultados no son tan claros como lo pueden ser los de la Ilustración 67, en este caso, también existen correlaciones positivas entre el índice EAP y los parámetros Hs y Tp (Ilustración 68).

Nuevamente, las correlaciones máximas del parámetro peralte son negativas, por lo que utilizando el promediado mensual, también se puede corroborar que el oleaje en el Cantábrico viene definido por un oleaje de tipo *swell*.

Finalmente, en la Ilustración 69, se representa la correlación entre el índice del ENSO y los parámetros del oleaje.

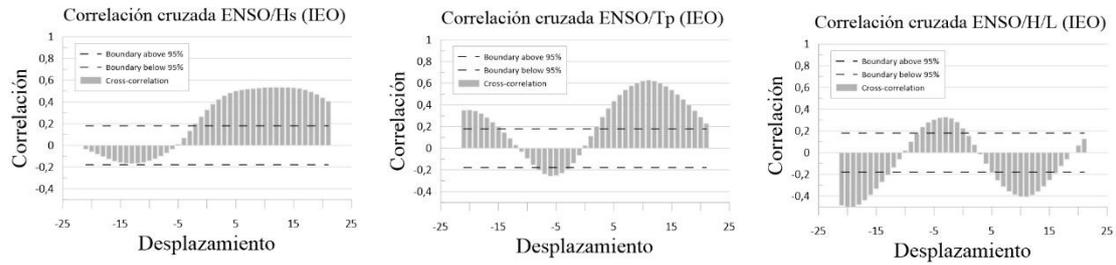


Ilustración 69: Correlaciones cruzadas entre el índice climático ENSO y los parámetros Hs, Tp y H/L (Elaboración propia).

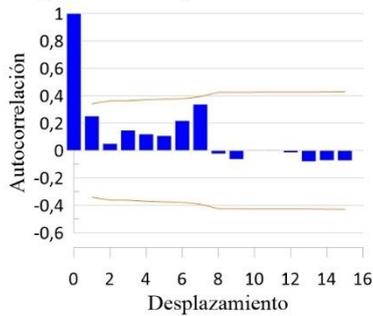
En este caso, se puede ver de manera más clara lo que se ha comentado anteriormente con los resultados utilizando el promediado semanal, donde las correlaciones máximas utilizando el patrón del pacífico se producen pasados los 7 y 8 meses desde la variación del índice.

Esta diferencia no es exactamente igual a la que He et al.,(2020) comentaba, pues como se puede ver en la Ilustración 69, existe un decalaje de dos meses aproximadamente.

4.5. Resultado para el análisis de tormentas B-V

El mismo procedimiento que hasta ahora se ha realizado, se hace finalmente para los parámetros de las tormentas. En la Ilustración 70, se muestra la gráfica de autocorrelación para comprobar que la serie no tiene correlación serial.

Autocorrelograma de la boyta B-V con nº de tormentas



Autocorrelograma de la boyta B-V con flujo de energia

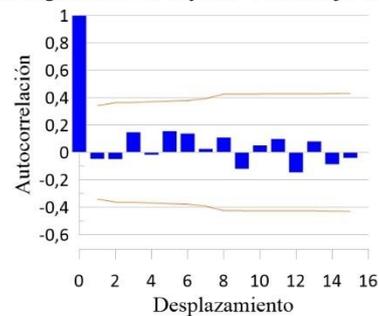
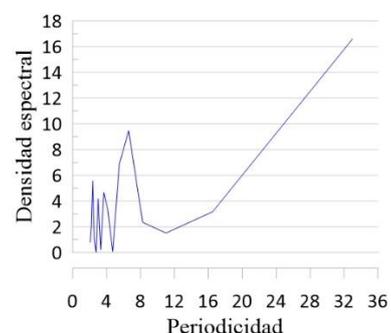
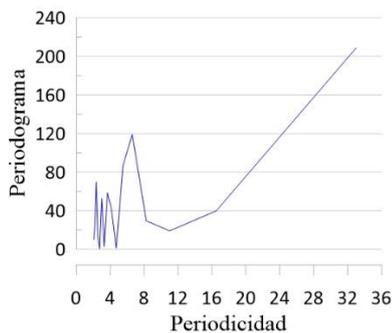


Ilustración 70: Autocorrelograma de la boyta B-V para los parámetros N.º de tormentas y flujo de energia (Elaboración propia).

En este caso, existe aún un cierto grado de incertidumbre mucho mayor que analizando los parámetros de oleaje utilizando los promediados semanales y mensuales.

Seguidamente, en la Ilustración 71, se representan los periodogramas y densidades espectrales de ambos parámetros, donde se puede observar que ambos parámetros tienen tendencia.

Periodograma y densidad espectral de la boyta B-V, para el nº de tormentas



Periodograma y densidad espectral de la boyta B-V, para el parámetro flujo de energia

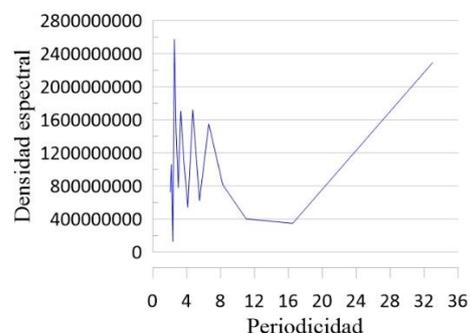
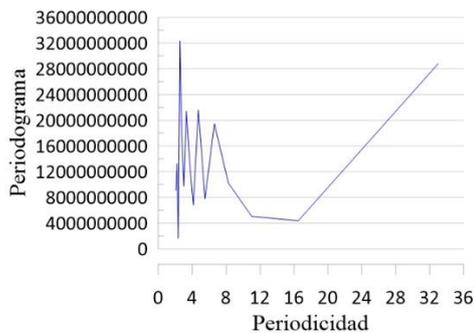
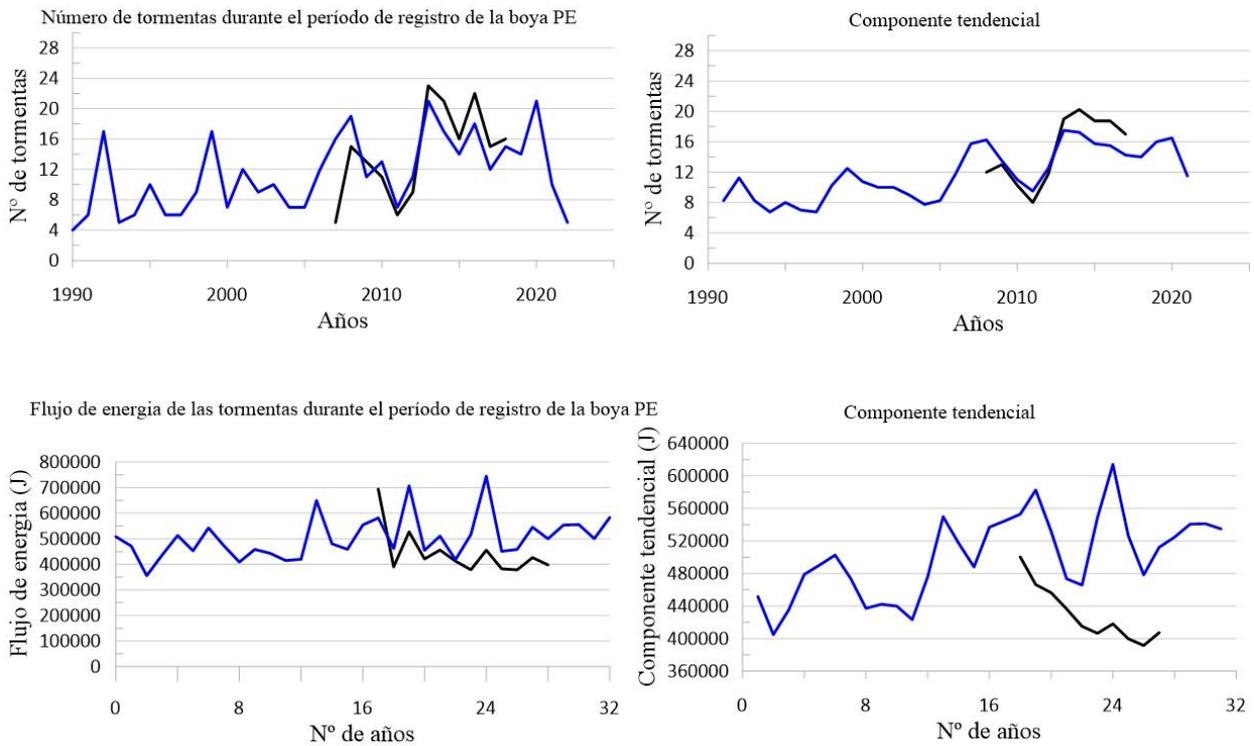


Ilustración 71: Análisis espectral del N.º de tormentas y flujo de energia, utilizando los datos de la boyta B-V (Elaboración propia).

Tras observar, que las series tienen tendencia, se procede a representar la componente tendencial de ambos parámetros (Ilustración 72).



En este caso, se han representado tanto los resultados de la boya AGL (función de color negro), como los resultados de la boya Bilbao-Vizcaya (función de color azul) con el fin de poder ver de manera más clara el factor que se ha comentado anteriormente con el período de pico (apartado 4.3.2.3).

También, analizando la boya que tiene el registro más largo, se puede ver como la tendencia de ambos parámetros tiende a aumentar con los años.

Analizando la Tabla 11, por lo que en general, se puede confirmar con una significancia del 95% que tanto el número de tormentas como la intensidad de estas tiende a aumentar con los años en la zona del Cantábrico. Además, en este caso ambas tendencias son positivas, pues así lo refleja la pendiente de Sen.

	VALOR DE HS	TAU DE KENDALL	S	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)
FLUJO DE ENERGIA	Test de Mann-Kendall	0,292	154	0.017	0.05	2920	Tendencia
NÚMERO DE TORMENTAS	Test de Mann-Kendall	0.498	230	<0.0001	0.05	0.277	Tendencia

Tabla 11: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall para el N.º de tormenta y su flujo de energía de la boya B-V (Elaboración propia).

Análisis de la evolución (tendencias) del oleaje en la costa cantábrica. ¿Variabilidad o cambio climático?

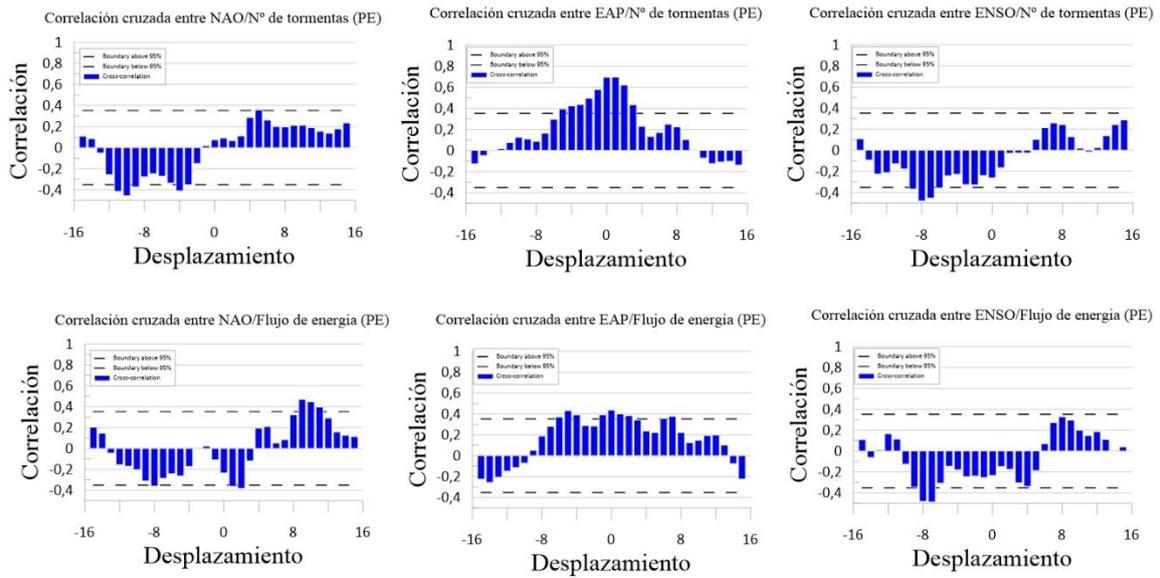


Ilustración 73: Correlaciones cruzadas entre índices climáticos y parámetros de tormentas de la boya B-V (Elaboración propia).

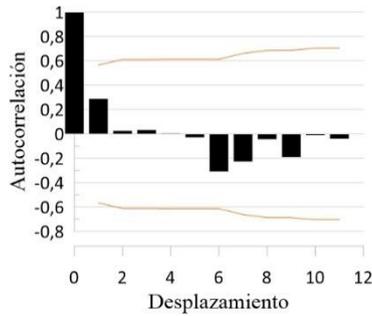
Para concluir los resultados, finalmente, se representan en la Ilustración 73, los resultados de las correlaciones cruzadas entre los parámetros de las tormentas para el registro de la boya Bilbao-Vizcaya y los índices climáticos NAO, EAP y ENSO.

En este caso, los límites superiores e inferiores son del orden de 0.4, por lo que indica que estos resultados obtenidos son más inciertos que los anteriores resultados.

4.6. Resultado para el análisis de tormentas AGL

En este caso, al estudiar el número de tormentas y su intensidad utilizando el promediado anual, la correlación serial se elimina por completo prácticamente, sin embargo, y como se puede ver en la Ilustración 74, existe una mayor incertidumbre que se irá arrastrando a lo largo del análisis.

Autocorrelograma de la boya AGL con nº de tormentas



Autocorrelograma de la boya AGL con flujo de energía

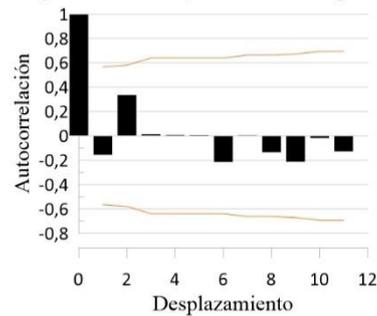


Ilustración 74: Autocorrelograma de la boya AGL para los parámetros nº de tormentas y flujo de energía (Elaboración propia).

Analizando, la gráfica, se puede observar que la correlación serial se ha eliminado por completo, sin embargo, aparece un factor que anteriormente no destacaba tanto y que se tiene que tomar en cuenta. Al realizar el promediado anual, se disminuye el número de observaciones de tal modo que incrementa la incertidumbre en los resultados. En el caso de la boya del Instituto Español de Oceanografía, este margen de error oscila en ± 0.6 .

Una vez analizado y visto que ambas series temporales no tienen una correlación serial, se realiza el análisis espectral del número de tormentas para ver si existe o no una tendencia en la serie (Ilustración 75).

Periodograma y densidad espectral de la boya AGL, para el nº de tormentas

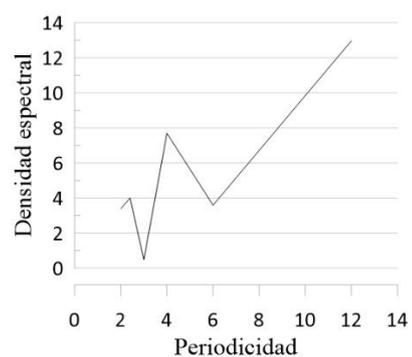
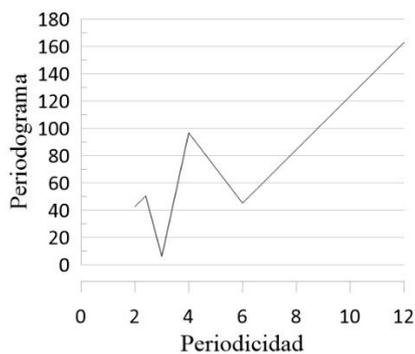


Ilustración 75: Análisis espectral del N.º de tormentas, utilizando los datos de la boya AGL (Elaboración propia).

Analizando los resultados, se puede observar como en este caso ninguna parte del espectro tiende a cero, por lo que indica que la serie tiene una tendencia.

Lo mismo sucede en la Ilustración 76, analizando el periodograma y densidad espectral del flujo de energía.

Periodograma y densidad espectral de la boyta AGL, para el parámetro flujo de energía

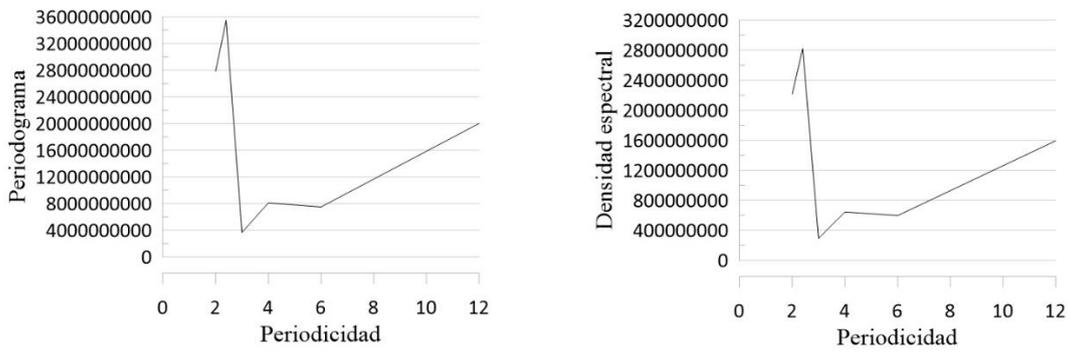


Ilustración 76: Análisis espectral del flujo de energía, utilizando los datos de la boyta AGL (Elaboración propia).

Con el análisis espectral, se ha comprobado que ambos parámetros siguen una tendencia, de todos modos, se procede a extraer la componente tendencial.

En la Ilustración 77, se representa tanto la serie temporal como sus componentes tendenciales.

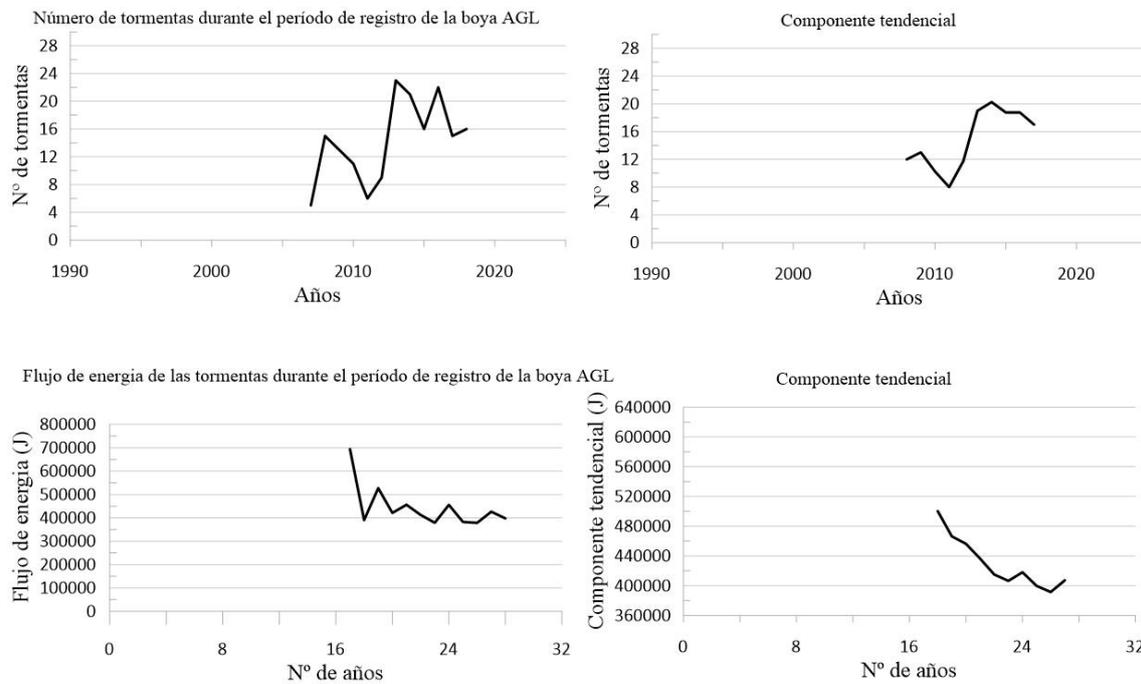


Ilustración 77: Series temporales y componentes tendenciales de los parámetros de tormentas de la boyta AGL (Elaboración propia).

En este caso, el número de tormentas tiende a crecer con el paso de los años, sin embargo, observando el flujo de energía se puede ver que en este espacio de tiempo, la tendencia es negativa.

A continuación, en la Tabla 12, se procede a observar si las tendencias adquiridas anteriormente se pueden considerar significativas, o, por lo contrario, el pendiente de la componente tendencial no es lo suficientemente fuerte durante el período de tiempo.

	VALOR DE HS	TAU DE KENDALL	S	P-VALOR	ALPHA	PENDIENTE DE SEN	CONTRASTE HYPÓTESIS (5% SIGNIFICANCIA)
FLUJO DE ENERGIA	Test de Mann-Kendall	-0.778	-35	0.001	0.05	-10342	Tendencia
NÚMERO DE TORMENTAS	Test de Mann-Kendall	0.315	14	0.243	0.05	0.964	Tendencia

Tabla 12: Resumen de los resultados estadísticos de Mann-Kendall para el N.º de tormenta y su flujo de energía de la boya AGL (Elaboración propia).

Tras analizar la Tabla 12, se puede corroborar que con este nivel de significancia, ambos parámetros poseen de una componente tendencial significativa, y nuevamente, para el flujo de energía, el valor de la pendiente de sen es negativo, pues la tendencia es negativa.

Finalmente, en la Ilustración 78, se muestran los resultados de las correlaciones entre estos parámetros y los índices climáticos NAO, EAP y ENSO.

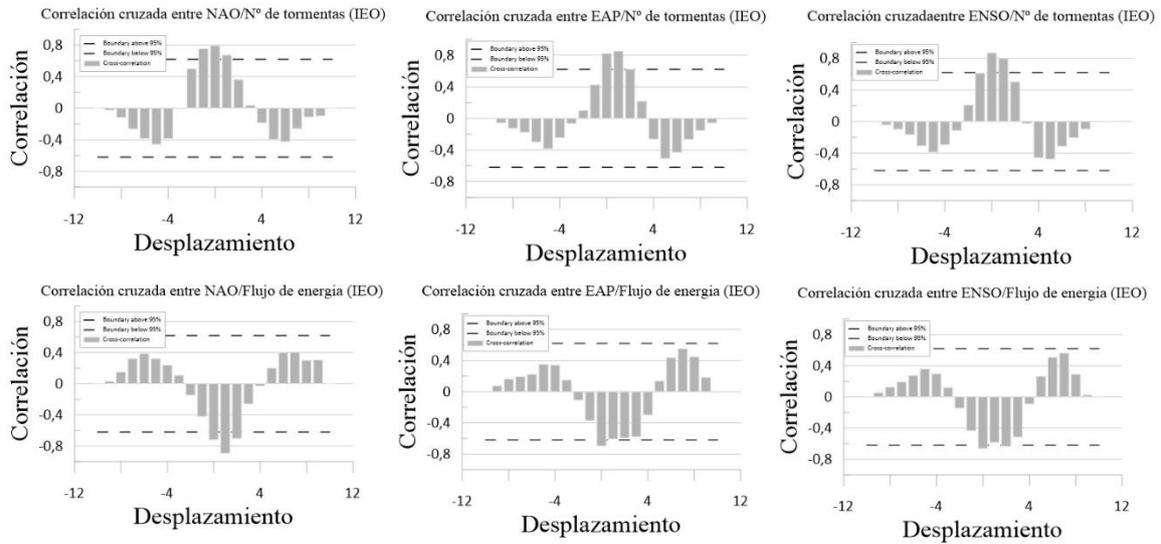


Ilustración 78: Correlaciones cruzadas entre índices climáticos y parámetros de tormentas de la boya AGL (Elaboración propia).

Lo primero que llama la atención son los límites tanto superiores como inferiores, estos son más grandes que los realizados anteriormente, ya que como se ha comentado anteriormente, el número de observaciones en este caso es mucho menor, por lo que existe una mayor incertidumbre.

Por otro lado, se puede observar que existen correlaciones muy elevadas entre el n.º de tormentas y los índices de la NAO, EAP y ENSO. Esto quiere decir que a medida que incrementan los índices climáticos, también lo hacen el n.º de tormentas.

Como la componente tendencial del flujo de energía para la boya AGL (apartado 4.6) era negativa, así lo refleja el análisis de correlación cruzada.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Para entender la finalidad de este estudio, es importante empezar las conclusiones analizando las posibles incertidumbres que existen y que pueden llevar a que el estudio este sujeto a mejores resultados.

Desde los inicios de los tiempos, la sociedad ha tendido a discretizar el espacio temporal de tal modo que resulte más fácil organizarse y vivir en sociedad. Esta discretización se realiza en concreto fraccionando el tiempo en lo que se conoce como segundo, minutos, horas, días, meses años etc.

Sin embargo, que para la sociedad sea más cómodo fraccionar el tiempo de esta manera no significa que en la naturaleza también sea de esta misma manera. Por ejemplo, lo que para la sociedad se puede definir como día, entendiendo día como el lapso de tiempo que tarda la Tierra en realizar una rotación completa, es de 24 horas, en la naturaleza, técnicamente es de 23 horas, 56 minutos y 4.09 segundos.

Como se ha visto, este estudio se ha empezado eliminando la correlación serial promediando los datos de manera semanal y mensual. Este hecho, no significa que este promediado sea el correcto, es decir, a lo mejor para obtener unos mejores resultados, el promediado óptimo sería por ejemplo promediando los datos cada dos semanas y tres días o de un mes y quince días etc.

Otro motivo el cual tras analizar todos los resultados es importante remarcar, es la gran dificultad que existe hoy en día para poder obtener datos oceanográficos de buena calidad. En la actualidad, es muy frecuente encontrar saltos en las series temporales los cuales no hacen más que complicar el estudio. Es por ese motivo que uno de los principales objetivos de este estudio ha sido comparar dos registros de oleaje de boyas que geográficamente se encuentran muy cerca.

Tras observar-lo y discutirlo en el apartado 4, se puede concluir que efectivamente, no se pueden comparar los resultados de ambas boyas directamente, pues al tratarse de diferentes espacios temporales, las componentes tendenciales de sus parámetros pueden estar sujetas a variaciones en su pendiente.

Tras analizar los resultados, tanto del promediado semanal como del mensual, en ambas boyas se puede corroborar y concluir que los estudios de tendencias son y aunque estén sometidos a un mayor rango de incertidumbre mejores utilizando el promediado mensual que el semanal. Este hecho, como se ha comentado anteriormente, no quita que el estudio en sí, pueda obtener mejores resultados si se utilizase un promediado diferente.

Por otro lado, tras entender el papel que juegan los índices climáticos a día de hoy, se ha podido concluir que en primer lugar las series temporales de los patrones del Atlántico Norte, en general, tienen tendencias positivas, por lo que esto conlleva a una incremento en los gradientes de presiones. Este hecho hace incrementar las temperaturas y las precipitaciones en esa zona.

Además, los resultados de las correlaciones cruzadas, hace corroborar la hipótesis inicial el cual permite entender este estudio como una relación causa-efecto en la que una variación del índice climático, hará variar las variables meteorológicas en esa zona, que a su vez se afectarían en el oleaje.

Después de discutir las correlaciones entre los distintos parámetros del oleaje con los distintos índices climáticos, se puede concluir que el parámetro que tenía mayores correlaciones con los índices climáticos y que, por tanto, era más influenciado por variaciones del clima, es el período de pico.

Los últimos resultados presentados, corresponden al análisis de tormentas de esas boyas, y en estos se pueden destacar dos cosas.

En primer lugar, tras analizar las componentes tendenciales de los parámetros número de tormentas y flujo de energía, se puede concluir que en general, la tendencia es a ir incrementando con el paso de los años, es decir, un incremento en el número de tormentas y en la intensidad de estas.

Y en segundo lugar, existen buenas correlaciones entre los índices climáticos y los parámetros del análisis de tormentas, de tal modo que se puede decir que un incremento en los índices climáticos puede comportar a un incremento en el número e intensidad de las tormentas.

5.2. Trabajo futuro

Ahora que se ha terminado el estudio, se puede decir que también existen muchas cosas por hacer y complementar.

En primer lugar, este trabajo pretende ser una metodología general para estudiar si existen correlaciones entre los índices climáticos y los distintos parámetros que caracterizan el oleaje. De tal modo, que sería interesante en futuros trabajos, realizar este mismo estudio, pero en diferentes zonas al sur del Atlántico, con el fin de comprobar si un incremento de las tormentas en el norte del Atlántico comporta un clima menos tormentoso y más húmedo en el Sur y en su defecto se puede observar en el oleaje.

En segundo lugar, sería interesante realizar el mismo estudio, utilizando en ambas boyas el mismo período de tiempo, ya que de esta manera se podría ver si el oleaje ha variado mucho con respecto a la diferencia geográfica.

Finalmente, en tercer lugar se podrían incorporar proyecciones para el próximo invierno en esa zona, y de este modo poder predecir en cierto modo los futuros eventos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bechini, A., & Vetrano, A. (2013). Management and storage of in situ oceanographic data: An ECM-based approach. *Information Systems*, 38(3), 351–368. <https://doi.org/10.1016/j.is.2012.10.004>
- Casals-Prat, M., & Sierra, J. P. (2010). Trend analysis of wave storminess: wave direction and its impact on harbour agitation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Casas-Prat, M., & Sierra, J. P. (2012). Trend analysis of wave direction and associated impacts on the Catalan coast. *Climatic Change*, 115(3–4), 667–691. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0466-9>
- Castillo, E. (1988). *Extreme Value Theory in Engineering* (1st ed.).
- Charles, E., Idier, D., Thiébot, J., Cozannet, G. le, Pedreros, R., Ardhuin, F., & Planton, S. (2012). Present wave climate in the bay of biscay: Spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. *Journal of Climate*, 25(6), 2020–2039. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00086.1>
- Com, F. (n.d.). *Schematic drawing of configurable lidar wind profile measurements at 10 levels Seawatch® Wind Lidar Buoy road transportable for safe and efficient mobilisation SEAWATCH® Wind Lidar Buoy during type validation deployment against the Ijmuiden offshore met mast SEAWATCH® Wind Lidar Buoy towed in Frøya*.
- Conjunto de datos_REDEXT. (2015). *Puertos Del Estado*, 1–5. https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_2.pdf
- del Estado, P. (1990). *CLIMA EXTREMAL DEL OLEAJE*.
- Derber, J., & Rosati, A. (1989). A Global Oceanic Data Assimilation System. *Journal of Physical Oceanography*, 1333–1347.
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). Applications of Remote Sensing in Satellite Oceanography: A Review. *Aquatic Procedia*, 4, 579–584. <https://doi.org/10.1016/j.aapro.2015.02.075>
- Ferreira, B. Y. A., & de Haan, L. (2015). On the block maxima method in extreme value theory: PWM estimators. *Annals of Statistics*, 43(1), 276–298. <https://doi.org/10.1214/14-AOS1280>
- Flores, J. (2008). *TEMA 2-PROPAGACIÓN DEL OLEAJE TEMA 3-CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE*.
- Gómez, J. (2021). *Informe anual de clima medio en la Boya de Zierbena*.
- Gómez Lahoz, M. (2014). *MODELOS DE PREDICCIÓN DE VIENTO Y OLEAJE*. <https://www.puertos.es/es-es/ROM/Documents/Modelos%20para%20prediccion%20de%20viento%20y%20oleaje.pdf>
- Grabemann, I., Groll, N., Möller, J., & Weisse, R. (2015). Climate change impact on North Sea wave conditions: a consistent analysis of ten projections. *Ocean Dynamics*, 65(2), 255–267. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0800-z>

- He, S., Yu, J. Y., Yang, S., & Fang, S. W. (2020). ENSO's impacts on the tropical Indian and Atlantic Oceans via tropical atmospheric processes: observations versus CMIP5 simulations. *Climate Dynamics*, 54(11–12), 4627–4640. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05247-w>
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727–732. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>
- IEO-Santander. (n.d.). *Boya Océano-meteorológica Augusto González de Linares. índices climáticos*. (2021, May 31). Universidad de Hamburgo.
- Josefina Tito, M., Zamanillo, E., & Díaz, E. (n.d.). METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE FRECUENCIA EN VARIABLES HIDROLÓGICAS. In *UNER. Ruta Pcial. 11 Km* (Vol. 22, Issue 2).
- Jota. (2020, October 19). *NAO y AO: su influencia en el clima de España*.
- Kelmansky, D. M. (2008). *Gráficos Cuantil-Cuantil (Q-Q plots)*.
- Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.004>
- Losada, M. Á. (2018). *Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo: ROM 1.1-18*. www.puertos.es/es-es/ROM
- Mann H.B. (1945). *Nonparametric tests against trend*.
- Markose, S., Alentorn, A., Markose#, S., & Alentorn#, A. (2005). *Option Pricing and the Implied Tail Index with the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution Option Pricing and the Implied Tail Index with the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution 1*. <https://www.researchgate.net/publication/24128724>
- Ministerio de Transporte, M. y A. U. (1992). *Puertos del Estado*.
- Nauleau, P., Apostolakis, I., McGarry, M., & Konofagou, E. (2018). Cross-correlation analysis of pulse wave propagation in arteries: *in vitro* validation and *in vivo* feasibility. *Physics in Medicine & Biology*, 63(11), 115006. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aabe57>
- NOAA Center for Weather and Climate Prediction. (2012a, January 10). *Climate Prediction Center*. NOAA.
- NOAA Center for Weather and Climate Prediction. (2012b, January 10). *Climate Prediction Center - EAP*.
- Nussbaumer H.J. (1982). *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms* (Second Edition).
- Palomino Monzón, M. del C., & Almazán Gárate, J. L. (2000). *Descripción, media y análisis del oleaje*.
- Periáñez, R. (2010). *Fundamentos de Ocenografía Dinámica*. Secretariado de publicaciones UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

- Rasilla, D., García-Codron, J. C., Garmendia, C., Herrera, S., & Rivas, V. (2018). Extreme wave storms and atmospheric variability at the Spanish coast of the Bay of Biscay. *Atmosphere*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/atmos9080316>
- Reguero, B. G., Losada, I. J., & Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Rodríguez Rodríguez, G. (2006). *Métodos de Análisis Espectral del Oleaje. Estudio Comparativo. ROM 0_3-91*. (1991).
- Sánchez-Arcilla, A. (2005). *Condiciones extremas de oleaje en clima torrencial. El caso catalán*. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2200>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*.
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2000). *Time Series Analysis and Its Applications*.
- Somavilla, R. (2021). *Notas sobre organización de archivos de oleaje de la boya AGL*.
- Teng, C. C., Bernard, L., Taft, B., & Burdette, M. (2005). A compact wave and ocean data buoy system. *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, 2005*, 2005, 1249–1254. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639926>
- Tomisa, T., Krajcar, S., Tomiša, T., & Pinezić, D. (2008). *Multipurpose marine Buoy Modelling coordinated operation of two independently owned hydro power plants in same basin View project MEET-Multidisciplinary and multi-context demonstration of EGS exploration and Exploitation Techniques and potentials View project Multipurpose Marine Buoy*. <https://www.researchgate.net/publication/251861903>
- Ulazia, A., & Penalba, M. (2017). *Wave energy trends over the Bay of Biscay and the consequences for wave energy converters*.
- Webb, P. (n.d.). *Introduction to Oceanography*. <http://rwu.pressbooks.pub/webboceanography>