

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

# **Evolución de los registros de oleaje en España: efecto de las actualizaciones de los modelos SIMAR/WANA sobre el régimen extremal. Estudio de caso en las Islas Canarias.**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



José Manuel Medina Jiménez

Dirigida por:

Dr. Miguel Vázquez Romero

Dr. José María Medina Villaverde

Madrid, 2026

## AGRADECIMIENTOS

---

Mi agradecimiento, en primer lugar, a los tutores de este Trabajo Fin de Máster, por la confianza depositada y por haberme permitido desarrollar esta investigación con plena autonomía en su enfoque, alcance y dimensión. Su respaldo ante la complejidad del tema abordado ha sido esencial para poder afrontar el trabajo con el rigor y la profundidad que exigía.

A Francisco Martínez Castellanos, por su apoyo constante a lo largo de mi trayectoria académica. Su estímulo, su criterio y su confianza han sido impulso en los momentos en los que era necesario avanzar un paso más.

A quienes, en distintos momentos de mi formación y ejercicio profesional, despertaron en mí la inquietud por comprender la ingeniería con espíritu crítico y vocación de excelencia. Profesores, compañeros y referentes que, aun sin saberlo, han contribuido a consolidar una manera de entender esta profesión basada en el rigor, la responsabilidad y la mejora continua.

A mi primo y socio, Óscar Jiménez Medina, compañero en esta etapa y en tantas otras, por compartir decisiones, desafíos y proyectos con lealtad y compromiso. La confianza mutua ha sido una base firme durante este proceso.

A mis amigos, por su lealtad discreta y su comprensión constante durante esta etapa de dedicación intensa. Gracias por seguir considerándome parte de cada encuentro y de cada momento compartido, incluso cuando las circunstancias no siempre permitían estar presente. Saber que permanecían ahí ha sido un apoyo silencioso y un recordatorio de lo verdaderamente importante.

Y a mi pareja, Yazmina, por su comprensión, su cariño y su apoyo incondicional. Su serenidad y su cercanía han sido fundamentales para sostener el ritmo y la exigencia de esta etapa.

A todos ellos, gracias por estar presentes y por contribuir, de una u otra forma, a que este trabajo haya sido posible.



## DEDICATORIA

---

A mi familia.

A quienes han compartido mi vida y a quienes, aun desde la distancia de la ausencia, continúan orientando mi camino.

A mi padre, quien despertó en mí la vocación por la ingeniería civil y me enseñó el valor del trabajo bien hecho, la responsabilidad y el compromiso. Su manera de entender la profesión permanece como referencia silenciosa en mi forma de ejercerla.

A mi hermana Esther, mi Estrella. Porque hay luces que no se apagan, solo cambian de lugar. Su fuerza y su intensidad siguen siendo claridad y guía en nuestro horizonte.

A mi madre, sostén firme e inquebrantable, ejemplo de constancia y entrega sin medida.

A mis hermanos y a mis sobrinos, continuidad de nuestra historia y motivo para avanzar. Ningún logro es plenamente individual cuando detrás existe un hogar que sostiene y permanece.

Cada minuto dedicado a esta etapa ha sido tiempo restado a estar con vosotros. Por eso, este trabajo es también una forma de agradecimiento.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO</b> .....	1
1.1. Motivación y relevancia para la ingeniería marítima .....	2
<b>1.2. Antecedentes</b> .....	3
<b>1.3. Contexto actual de los modelos de oleaje en España</b> .....	4
<b>1.4. Limitaciones y consideraciones de uso del conjunto de datos SIMAR/WANA</b> .....	5
<b>1.5. Estructura del documento</b> .....	6
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	9
2.1. Objetivo general.....	9
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	9
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b> .....	11
3.1. Fuentes de datos de oleaje en España.....	12
<b>3.2. Estudios previos sobre la fiabilidad y homogeneidad de las series SIMAR/WANA</b> .....	15
<b>3.3. Métodos habituales de validación y análisis extremal de bases históricas de oleaje</b> .....	17
<b>3.4. Justificación técnica y científica del presente estudio</b> .....	19
<b>4. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD/GAP EN EL CONOCIMIENTO</b> .....	21
4.1. Posibles inconsistencias entre versiones de modelo y su impacto en el análisis de temporales de oleaje .....	22
<b>4.2. Necesidad de un análisis por regiones litorales con validación instrumental</b> .....	23
<b>4.3. Riesgos para el diseño de obras marítimas derivados de asumir homogeneidad</b> .....	24
<b>4.4. Preguntas claves que aborda el TFM</b> .....	25
<b>5. PROPUESTA METODOLÓGICA</b> .....	29
5.1. Selección de boyas y puntos SIMAR de referencia .....	29

5.1.1. Criterios de selección de las boyas de referencia .....	29
5.1.2. Criterios de selección de los puntos SIMAR .....	30
5.1.3. Estructura espacial del conjunto de puntos analizados .....	30
5.1.4. Vinculación con el resto de la metodología .....	32
<b>5.2. Obtención y trazabilidad de datos .....</b>	<b>32</b>
5.2.1. Registros de boyas .....	34
5.2.2. Series numéricas SIMAR .....	34
5.2.3. Trazabilidad y coherencia temporal .....	35
<b>5.3. Preparación y tratamiento de los datos .....</b>	<b>36</b>
<b>5.4. Filtrado direccional y segmentación por sectores de oleaje .....</b>	<b>37</b>
<b>5.5. Segmentación de las series SIMAR por periodos de modelización .....</b>	<b>40</b>
5.5.1. SIMAR-44 (1958-2005) .....	41
5.5.2. WANA-HIRLAM (2006-2018) .....	41
5.5.3. WANA-HARMONIE (2018-actualidad) .....	41
5.5.4. Correspondencia temporal con los registros de boya .....	42
<b>5.6. Caracterización estadística de las series y análisis de coherencia temporal .....</b>	<b>42</b>
<b>5.7. Comparación pareada modelo-boya en periodos de solape temporal.....</b>	<b>45</b>
<b>5.8. Caracterización del régimen extremal del oleaje mediante el método POT–GPD .....</b>	<b>46</b>
<b>5.9. Herramientas de programación y análisis de datos .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CASOS DE ESTUDIO/APLICACIÓN A CASOS PRÁCTICOS .....</b>	<b>53</b>
6.1. Descripción de los tramos de costa y puntos analizados.....	55
<b>6.2. Resultados de los estadísticos básicos por punto y por periodo de modelización.....</b>	<b>58</b>
6.2.1. Representación y criterios de análisis .....	58
6.2.2. Resultados por regiones costeras .....	60
6.2.2.1. Norte peninsular .....	61
6.2.2.1.1. Media y desviación típica de $H_s$ y $T_p$ .....	62
6.2.2.1.2. Percentiles de la altura significativa ( $H_s$ ) y del periodo de pico ( $T_p$ ).....	66
6.2.2.1.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF) .....	69
6.2.2.1.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización .....	73

6.2.2.2. Oeste peninsular .....	73
6.2.2.2.1. <i>Media y desviación típica de Hs y Tp</i> .....	74
6.2.2.2.2. <i>Percentiles de la altura significativa (Hs) y del periodo de pico (Tp)</i> .....	77
6.2.2.2.3. <i>Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)</i> .....	81
6.2.2.2.4. <i>Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización</i> .....	84
6.2.2.3. Sur peninsular.....	85
6.2.2.3.1. <i>Media y desviación típica de Hs y Tp</i> .....	86
6.2.2.3.2. <i>Percentiles de Hs y Tp</i> .....	88
6.2.2.3.3. <i>Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)</i> .....	91
6.2.2.3.4. <i>Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización</i> .....	94
6.2.2.4. Este peninsular .....	95
6.2.2.4.1. <i>Media y desviación típica de Hs y Tp</i> .....	96
6.2.2.4.2. <i>Percentiles de la altura significativa (Hs) y del periodo de pico (Tp)</i> .....	98
6.2.2.4.3. <i>Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)</i> .....	101
6.2.2.4.4. <i>Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización</i> .....	104
6.2.2.5. Norte de canarias.....	105
6.2.2.5.1. <i>Media y desviación típica de Hs y Tp</i> .....	106
6.2.2.5.2. <i>Percentiles de la Hs y del Tp</i> .....	109
6.2.2.5.3. <i>Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)</i> .....	113
6.2.2.5.4. <i>Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización</i> .....	118
6.2.2.6. Sur de canarias .....	119
6.2.2.5.1. <i>Media y desviación típica de Hs y Tp</i> .....	120
6.2.2.5.2. <i>Percentiles de la altura significativa (Hs) y del periodo de pico (Tp)</i> .....	123
6.2.2.5.3. <i>Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)</i> .....	126
6.2.2.5.4. <i>Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización</i> .....	131
6.2.3. Síntesis comparativa y tendencias generales .....	132
6.3. Implicaciones de la no homogeneidad del régimen medio en el análisis del oleaje extremo ....	
.....	135
6.4. Contraste estadístico modelo-boya .....	136
6.4.1. Norte peninsular .....	138

6.4.1.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	138
6.4.1.2. Contraste estadístico modelo-boya para Tp.....	141
6.4.2. Oeste peninsular .....	145
6.4.2.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	145
6.4.2.2. Contraste estadístico modelo-boya para Tp.....	148
6.4.3. Sur peninsular.....	152
6.4.3.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	152
6.4.4. Este peninsular .....	159
6.4.4.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	159
6.4.4.2. Contraste estadístico modelo-boya para Tp.....	162
6.4.5. Norte de Canarias.....	166
6.4.5.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	166
6.4.5.2. Contraste estadístico modelo-boya para Tp.....	169
6.4.6. Sur de Canarias .....	173
6.4.6.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs.....	173
6.4.6.2. Contraste estadístico modelo-boya para Tp.....	176
6.4.7. Síntesis del contraste estadístico.....	179
6.5. Análisis del régimen extremal del oleaje: comparativa entre etapas de modelización y registros instrumentales.....	181
6.5.1. Consideraciones generales para la interpretación del régimen extremal.....	181
6.5.2. Norte peninsular .....	183
6.5.3. Oeste peninsular .....	187
6.5.4. Sur peninsular.....	192
6.5.5. Este peninsular .....	196
6.5.6. Norte de Canarias .....	201
6.5.7. Sur de Canarias .....	205
6.5.8. Síntesis del análisis extremal.....	210
<b>6.6. Patrones generales del comportamiento del oleaje a lo largo del litoral español .....</b>	<b>212</b>
<b>6.7. Caso de estudio: comportamiento del oleaje en el entorno insular canario.....</b>	<b>215</b>
6.7.1. Singularidad del entorno canario.....	215
6.7.2. Resultados estadísticos y extremales en Canarias.....	218
6.7.2.1. Norte de Canarias .....	218
6.7.2.2. Sur de Canarias .....	220
6.7.2.3. Análisis global.....	221

6.7.3. Influencia del límite del dominio de modelización .....	222
6.7.4. Implicaciones para el análisis del oleaje extremo .....	224
<b>7. RESULTADOS GLOBALES Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>227</b>
7.1. Marco interpretativo de la incertidumbre en el análisis extremal .....	228
7.2. Comparación general modelo–boya como base del análisis de oleaje extremo .....	229
7.3. Comparación regional de las magnitudes extremas de Hs estimadas por modelos y registros instrumentales .....	231
7.3.1. Norte peninsular .....	232
7.3.2. Oeste peninsular .....	232
7.3.3. Sur peninsular .....	233
7.3.4. Este peninsular (Mediterráneo).....	234
7.3.5. Norte de Canarias.....	235
7.3.6. Sur de Canarias .....	236
7.3.7. Síntesis regional .....	238
<b>7.4. Influencia de la configuración del sistema SIMAR/WANA en la estimación del oleaje extremal .....</b>	<b>242</b>
7.4.1. Concepto de altura de ola de proyecto en el contexto del estudio .....	242
7.4.2. Impacto de la longitud de las series en la altura de proyecto .....	244
7.4.3. Comparación de alturas de ola de proyecto por etapa de modelización .....	245
7.4.4. Ejemplo aplicado: influencia de la etapa SIMAR/WANA en el dimensionamiento de una actuación costera .....	247
7.3.4.1. Localización .....	247
7.3.4.2. Periodo de retorno de diseño .....	249
7.3.4.2.1. <i>Índice de Repercusión Económica (IRE)</i> .....	249
7.3.4.2.2. <i>Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA)</i> .....	250
7.3.4.2.3. <i>Periodo de retorno</i> .....	251
7.3.4.3. Comparativa selección altura de ola significativa en aguas profundas .....	251
7.5. Recomendaciones para el uso e interpretación de los datos SIMAR/WANA en proyectos de ingeniería marítima .....	256
7.5.1. Consideraciones generales sobre homogeneidad entre etapas .....	256
7.5.2. Marco de decisión para la selección del oleaje extremal .....	257
7.5.3. Gestión operativa del periodo de pico (Tp) .....	268

7.5.4. Consideraciones sobre propagación y uso en diseño .....	271
7.5.5. Implicaciones del estudio en términos de sostenibilidad en infraestructuras marítimas. .....	271
<b>7.6. Limitaciones del estudio y alcance de la generalización a otras zonas .....</b>	<b>273</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....</b>	<b>275</b>
8.1. Conclusiones principales del estudio.....	275
8.2. Implicaciones metodológicas e ingenieriles .....	280
8.2.1. Implicaciones metodológicas .....	280
8.2.2. Implicaciones ingenieriles.....	281
8.3. Líneas futuras de trabajo .....	282
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>286</b>
<b>10.ANEXO .....</b>	<b>289</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1._ Esquema conceptual del efecto de las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA sobre la representación estadística del oleaje y la estimación del régimen extremal. ....	28
Figura 2._ Localización geográfica puntos SIMAR y Boyas seleccionados. ....	31
Figura 3._ Diagrama de flujo de la propuesta metodológica adoptada para el análisis de la homogeneidad estadística y del régimen extremal del oleaje. ....	33
Figura 4._ Extracto representativo de un fichero original de boya, donde se identifican valores de ausencia de dato codificados como -9999.9, empleados como criterio de filtrado previo. ....	37
Figura 5._ Direcciones de oleaje incidentes consideradas en el análisis Boya Gran Canaria-Punto SIMAR 1017013. ....	39
Figura 6._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) correspondientes a las distintas etapas de modelización SIMAR. ....	44
Figura 7._ Análisis de estabilidad del umbral para el ajuste POT-GPD. Evolución de los parámetros de forma ( $\xi$ ) y escala ( $\sigma$ ) de la distribución Generalizada de Pareto, junto con el criterio de información de Akaike (AIC), en función del cuantil del umbral. La selección del umbral óptimo se basa en el compromiso entre la estabilidad de los parámetros y la minimización del AIC. ....	49
Figura 8._ Gráfico cuantílico-cuantílico (QQ-plot) de las excedencias sobre el umbral frente a la distribución GPD ajustada, correspondiente al periodo WANA-HARMONIE. La línea discontinua representa el ajuste teórico ideal. ....	50
Figura 9._ Dominio espacial del forzamiento atmosférico empleado en la generación del oleaje y localización de los puntos de estudio analizados. Se observa la posición relativa de Canarias respecto a los límites del campo de viento en los modelos atmosféricos utilizados. ....	54
Figura 10._ Extensión espacial del dominio de propagación del oleaje en el Atlántico Norte y posición relativa del litoral español y del archipiélago canario. La proximidad de Canarias al límite del dominio constituye un aspecto relevante en la interpretación del oleaje de origen remoto... ..	55
Figura 11._ Distribución espacial de los puntos SIMAR y de las boyas instrumentales seleccionadas, agrupados por tramos de costa y regiones de estudio (Zonas I-VI). ....	57
Figura 12._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 3080042. ....	62
Figura 13._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, para la Boya de Cabo de Peñas. ....	63
Figura 14._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 3080042. ....	65

Figura 15._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, para la Boya de Cabo de Peñas.....	65
Figura 16._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. ....	67
Figura 17._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas. ....	68
Figura 18._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. ....	68
Figura 19._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas.....	69
Figura 20._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. ....	70
Figura 21._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas. ....	71
Figura 22._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. ....	72
Figura 23._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas. ....	72
Figura 24._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. ....	75
Figura 25._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro y en el punto SIMAR 3002002. ....	76
Figura 26._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.....	77
Figura 27._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.....	77
Figura 28._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. ....	78
Figura 29._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.....	79
Figura 30._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. ....	80
Figura 31._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.....	80
Figura 32._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. ....	81

Figura 33._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo Silleiro.....	82
Figura 34._ Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. ....	83
Figura 35._ Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos temporales, en la boya de Cabo Silleiro.....	84
Figura 36._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	87
Figura 37._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	87
Figura 38._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	89
Figura 39._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata.....	89
Figura 40._ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	90
Figura 41._ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata.....	91
Figura 42._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	92
Figura 43._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata. ....	92
Figura 44._ Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. ....	93
Figura 45._ Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata. ....	94
Figura 46._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. ....	97
Figura 47._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Tarragona. ....	98
Figura 48._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. ....	99
Figura 49._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Tarragona. ....	100
Figura 50._ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. ....	100

Figura 51._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. ....	102
Figura 52._ Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Tarragona. ....	102
Figura 53._ Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. ....	103
Figura 54._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 1017013. ....	107
Figura 55._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 1017013. ....	107
Figura 56._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para la Boya de Gran Canaria. ....	108
Figura 57._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para la Boya de Gran Canaria. ....	109
Figura 58._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. ....	110
Figura 59._ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria. ....	111
Figura 60._ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. ....	112
Figura 61._ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria. ....	113
Figura 62._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. ....	114
Figura 63._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria. ....	115
Figura 64._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. ....	116
Figura 65._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria. ....	117
Figura 66._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. ....	120
Figura 67._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 4023009. ....	121
Figura 68._ Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para la Boya de Tenerife. ....	122

Figura 69._ Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, para la Boya de Tenerife. ....	123
Figura 70._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. ....	124
Figura 71._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. ....	124
Figura 72._ Percentiles de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. ....	125
Figura 73._ Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife. ....	126
Figura 74._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. ....	127
Figura 75._ Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife. ....	128
Figura 76._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. ....	128
Figura 77._ Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife. ....	130
Figura 78._ Contraste estadístico pareado de $H_s$ entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	139
Figura 79._ Contraste estadístico pareado de $H_s$ entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	139
Figura 80._ Contraste estadístico pareado de $H_s$ entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	140
Figura 81._ Contraste estadístico pareado de $H_s$ entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	141
Figura 82._ Contraste estadístico pareado de $T_p$ entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	142
Figura 83._ Contraste estadístico pareado de $T_p$ entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	143
Figura 84._ Contraste estadístico pareado de $T_p$ entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	144
Figura 85._ Contraste estadístico pareado de $T_p$ entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular). ....	144
Figura 86._ Contraste estadístico pareado de $H_s$ entre la serie SIMAR del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular). ....	146

Figura 87._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	146
Figura 88._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	147
Figura 89._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	148
Figura 90._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	149
Figura 91._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	150
Figura 92._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	151
Figura 93._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).....	151
Figura 94._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	153
Figura 95._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	153
Figura 96._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	155
Figura 97._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	155
Figura 98._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	156
Figura 99._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	157
Figura 100._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular). ....	158
Figura 101._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).....	158
Figura 102._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).....	160
Figura 103._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). ....	160
Figura 104._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).....	161

Figura 105._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). .....	162
Figura 106._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). .....	163
Figura 107._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). .....	164
Figura 108._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). .....	165
Figura 109._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular). .....	165
Figura 110._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	166
Figura 111._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	167
Figura 112._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	168
Figura 113._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	169
Figura 114._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	170
Figura 115._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	170
Figura 116._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	171
Figura 117._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias). .....	173
Figura 118._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). .....	173
Figura 119._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). .....	174
Figura 120._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). .....	175
Figura 121._ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). .....	176
Figura 122._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). .....	177

Figura 123._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).....	177
Figura 124._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).....	178
Figura 125._ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias). ....	179
Figura 126._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Peñas.....	184
Figura 127._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	184
Figura 128._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	185
Figura 129._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	186
Figura 130._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 considerando el periodo completo de la serie. ....	186
Figura 131._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo Silleiro. ....	188
Figura 132._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	188
Figura 133._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	189
Figura 134._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	190
Figura 135._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 considerando el periodo completo de la serie. ....	191
Figura 136._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Gata.....	192
Figura 137._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	193
Figura 138._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	194
Figura 139._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	195
Figura 140._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 considerando el periodo completo de la serie. ....	195

Figura 141._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Tarragona. ....	197
Figura 142._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	198
Figura 143._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	198
Figura 144._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	199
Figura 145._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 considerando el periodo completo de la serie. ....	200
Figura 146._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Gran Canaria. ....	201
Figura 147._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	202
Figura 148._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	203
Figura 149._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	203
Figura 150._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 considerando el periodo completo de la serie. ....	204
Figura 151._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Tenerife. ....	206
Figura 152._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa SIMAR-44. ....	206
Figura 153._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM. ....	207
Figura 154._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.....	208
Figura 155._ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 considerando el periodo completo de la serie. ....	209
Figura 156._ Sombra orográfica del archipiélago canario sobre el oleaje incidente del Atlántico Norte. La figura ilustra marcado efecto de abrigo y sombra orográfica inducido por el archipiélago canario sobre el oleaje de componente NW del Atlántico Norte, fenómeno clave para interpretar tanto las diferencias espaciales observadas en las magnitudes de Hs como las discrepancias entre etapas de modelización y registros instrumentales en el entorno insular. ....	216

Figura 157._ Influencia de la orografía insular de Tenerife en la exposición del litoral a los temporales del Atlántico Norte y Sur.....	217
Figura 158._ Salidas del visor del modelo Wavewatch III (Forecasting para el para el día 24 de agosto de 2023, concretamente para las horas 18:00 y 21:00 (hora Zulu). La situación de las Islas Canarias ha sido marcada con un rectángulo negro. Se observa la llegada de oleaje al Archipiélago Canario, desde el hemisferio sur, con periodos de pico entorno a los 18 s.....	222
Figura 159._ Localización geográfica seleccionada para la elaboración del ejemplo. La situación de la boya de Tenerife sur y el punto SIMAR 4023009 frente a la franja litoral seleccionada, permite utilizar sus datos para el análisis del clima marítimo del área de estudio.....	248
Figura 160._ Diagrama de decisión para la utilización de datos SIMAR/WANA en el análisis de oleaje extremo. ....	264
Figura 161._ Representación sintética del criterio de selección del oleaje de diseño en función del grado de divergencia entre configuraciones del modelo y de la criticidad de la actuación proyectada. ....	266

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1._ Etapas de modelización de la base de datos SIMAR consideradas en el estudio. ....	40
Tabla 2._ Regiones de estudio consideradas y correspondencia entre boyas de aguas profundas y puntos SIMAR asociados. ....	57
Tabla 3._ Comparación del comportamiento estadístico del oleaje entre modelos y registros instrumentales en las distintas regiones analizadas. ....	133
Tabla 4._ Patrones regionales identificados en la evolución del régimen medio de oleaje entre las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA. ....	134
Tabla 5._ Síntesis regional de los patrones del régimen de oleaje y del comportamiento del sistema SIMAR/WANA en el litoral español. ....	212
Tabla 6._ Comparación regional de las alturas significantes (Hs) extremales obtenidas mediante análisis POT-GPD para diferentes configuraciones del sistema SIMAR/WANA y registros de boya. ....	241
Tabla 7._ Comparación de alturas significantes extremas (Hs) para T = 68 años en el sur de Canarias: referencia instrumental y etapas del sistema SIMAR/WANA. ....	252
Tabla 8._ Matriz orientativa de decisión para la interpretación ingenieril de divergencias entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA en la estimación del oleaje extremal. ....	263

## RESUMEN

---

El dimensionamiento de infraestructuras marítimas se fundamenta en la adecuada caracterización del clima marítimo y, de manera particular, en la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno de diseño. En España, una de las principales fuentes de información para este propósito es la base histórica SIMAR, integrada por distintas configuraciones de modelización desarrolladas desde 1958 hasta la actualidad. La utilización conjunta de estas configuraciones como una única serie continua constituye una práctica habitual en estudios de clima marítimo. Sin embargo, la revisión bibliográfica realizada no ha identificado trabajos que examinen de forma explícita la coherencia estructural entre dichas configuraciones cuando se emplean de manera integrada en análisis extremales, lo que plantea una cuestión metodológica de alcance general en el uso de series modelizadas de larga duración.

El presente trabajo evalúa la consistencia estadística de las configuraciones que componen la base histórica SIMAR y cuantifica el efecto de su tratamiento conjunto o segmentado en la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno habituales en ingeniería marítima. El análisis se desarrolla a escala nacional, considerando distintos ámbitos litorales representativos y aplicando un procedimiento homogéneo en todos los casos de estudio, lo que permite comparar resultados bajo criterios uniformes y minimizar la variabilidad derivada de criterios metodológicos no uniformes.

En una primera fase se examina la estructura estadística básica de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico en cada configuración del modelo, evaluando posibles diferencias en medias, dispersión y percentiles representativos. Posteriormente, se contrasta el comportamiento de cada configuración con registros instrumentales de boyas en aguas profundas, con el fin de verificar la coherencia y el orden de magnitud de las variables consideradas. El análisis extremal se aborda mediante el método de excedencias sobre umbral, ajustando una distribución Generalizada de Pareto a la altura significativa del oleaje y estimando valores asociados a periodos de retorno de interés ingenieril tanto para cada configuración de manera independiente como para la serie integrada.

Los resultados evidencian que la integración directa de configuraciones desarrolladas bajo marcos técnicos no idénticos puede generar diferencias apreciables en la estimación de la altura significativa del oleaje extremal, cuya magnitud depende del ámbito geográfico considerado. Estas discrepancias no siempre se manifiestan con igual intensidad en los estadísticos centrales de la distribución, lo que pone de relieve la elevada sensibilidad de la cola ante posibles cambios en la

estructura de la serie y cuestiona la asunción implícita de continuidad estadística cuando se integran configuraciones sucesivas.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio pone de relieve que, antes de utilizar la base histórica SIMAR en un análisis extremal, resulta necesario comprobar si las distintas configuraciones de modelización que la integran mantienen un comportamiento estadísticamente consistente entre sí. Solo en ese caso puede justificarse su tratamiento como una única serie continua sin introducir efectos derivados de la evolución del propio modelo.

En términos técnicos, los resultados muestran que la estimación de la altura significativa extremal en aguas profundas puede presentar diferencias apreciables según se analice la base histórica SIMAR de forma conjunta o separando sus configuraciones. Esta circunstancia debe ser considerada al interpretar las magnitudes extremas empleadas en estudios de clima marítimo, dado que el procedimiento adoptado puede influir en el valor finalmente estimado.

## ABSTRACT

---

The design and verification of maritime infrastructures are fundamentally based on an adequate characterization of the maritime climate and, in particular, on the estimation of significant wave height associated with design return periods. In Spain, one of the main sources of information for this purpose is the SIMAR historical database, which integrates different modeling configurations developed from 1958 to the present. The combined use of these configurations as a single continuous time series constitutes common practice in maritime climate studies. However, the bibliographic review conducted has not identified studies that explicitly examine the structural coherence between these configurations when they are integrated within a single extreme value analysis, raising a methodological issue of broader relevance in the use of long-term modeled wave series.

The present work evaluates the statistical consistency of the configurations that compose the SIMAR historical database and quantifies the effect of their joint or segmented treatment on the estimation of significant wave height associated with return periods commonly used in maritime engineering. The analysis is conducted at a national scale, considering representative coastal domains and applying a homogeneous procedure across all case studies. This approach allows results to be compared under uniform criteria and minimizes variability arising from non-uniform methodological choices.

In a first stage, the basic statistical structure of significant wave height and peak period is examined for each model configuration, assessing potential differences in mean values, dispersion, and representative percentiles. Subsequently, the performance of each configuration is compared with instrumental buoy records in deep waters in order to verify the coherence and order of magnitude of the variables considered. Extreme value analysis is performed using the Peaks Over Threshold method, fitting a Generalized Pareto Distribution to significant wave height exceedances and estimating values associated with return periods of engineering interest, both for each configuration independently and for the integrated series.

The results demonstrate that the direct integration of configurations developed under non-identical technical frameworks may lead to appreciable differences in the estimation of extreme significant wave height, the magnitude of which depends on the geographical domain considered. These discrepancies are not always equally reflected in the central statistics of the distribution, highlighting the pronounced sensitivity of the distribution tail to potential structural changes in the series and calling into question the implicit assumption of statistical continuity when successive configurations are merged.

From a methodological perspective, the study highlights that, before using the SIMAR historical database in an extreme value analysis, it is necessary to verify whether the different modeling configurations that compose it exhibit statistically consistent behavior. Only under such conditions can they be justifiably treated as a single continuous series without introducing effects derived from the evolution of the modeling framework itself.

From a technical standpoint, the results indicate that the estimation of extreme significant wave height in deep waters may show appreciable differences depending on whether the SIMAR historical database is analyzed as an integrated whole or by separating its configurations. This circumstance should be taken into account when interpreting extreme values used in maritime climate studies, since the adopted treatment may influence the final estimated value.

## 1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

---

El dimensionamiento y verificación de infraestructuras marítimas y portuarias dependen de manera directa de la correcta caracterización del clima marítimo, y en particular de la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a determinados periodos de retorno de diseño, que constituye el parámetro de referencia en la definición de las condiciones extremas de proyecto.

En el contexto español, la disponibilidad de información sobre el estado del mar se apoya en la integración de registros instrumentales obtenidos mediante la red de boyas de Puertos del Estado y en bases históricas generadas mediante modelización numérica del oleaje, entre las que destaca el conjunto de datos SIMAR. Estas series modelizadas han permitido ampliar de forma significativa la cobertura temporal y espacial de la información disponible, facilitando la estimación de magnitudes extremas más allá de la duración limitada de los registros instrumentales.

La utilización creciente de bases históricas modelizadas en estudios de clima marítimo plantea, no obstante, determinadas consideraciones metodológicas que deben ser analizadas con rigor técnico. La evolución progresiva de los modelos numéricos, los cambios en el forzamiento atmosférico y las mejoras en la resolución espacial han contribuido a perfeccionar la capacidad de representación del oleaje, pero también han dado lugar a una base histórica construida a partir de distintas configuraciones del modelo a lo largo del tiempo.

Desde una perspectiva aplicada, resulta pertinente examinar hasta qué punto la integración de estas configuraciones en una única serie continua es compatible con una interpretación estadísticamente coherente del comportamiento extremal del oleaje. Esta cuestión adquiere especial relevancia cuando el análisis se orienta a la estimación de la altura significativa asociada a periodos de retorno elevados, dado que pequeñas variaciones en la representación de los estados de mar más energéticos pueden traducirse en diferencias apreciables en las magnitudes adoptadas para el diseño.

En este marco, el presente capítulo introduce el contexto técnico y metodológico del trabajo, expone su motivación en el ámbito de la ingeniería marítima y delimita los antecedentes, el entorno actual de los modelos de oleaje en España y las consideraciones asociadas al uso del conjunto de datos SIMAR/WANA, estableciendo así la base conceptual sobre la que se desarrolla el estudio.

### 1.1. Motivación y relevancia para la ingeniería marítima

La ingeniería marítima se fundamenta en la adecuada caracterización de las acciones ambientales que condicionan el comportamiento de las infraestructuras portuarias y costeras. Entre dichas acciones, el oleaje constituye el agente dominante en el dimensionamiento estructural, la verificación de estabilidad y la evaluación de sollicitaciones hidráulicas sobre diques, muelles y estructuras de abrigo. En este contexto, la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno habituales en la práctica ingenieril representa un elemento central en la definición de las condiciones de diseño.

La determinación de estas magnitudes extremas no es un ejercicio puramente estadístico, sino una decisión técnica con implicaciones directas en la seguridad, funcionalidad y coste de las infraestructuras. Variaciones en la altura significativa adoptada pueden traducirse en cambios apreciables en la sección estructural, en el volumen de material necesario o en las cotas de coronación previstas en proyecto. Por ello, la fiabilidad y coherencia de la base de datos utilizada para estimar dichas magnitudes adquiere una relevancia esencial en el proceso de toma de decisiones.

En España, la caracterización del clima marítimo se apoya en la combinación de registros instrumentales obtenidos mediante la red de boyas de Puertos del Estado y en series históricas generadas a partir de modelización numérica del estado del mar. La disponibilidad de la base histórica SIMAR en su configuración actual, ha permitido ampliar de manera significativa la cobertura temporal de la información, facilitando el análisis del oleaje extremo más allá del horizonte limitado de las mediciones instrumentales.

Sin embargo, la base histórica actualmente disponible no ha sido generada bajo una única configuración de modelización, sino que integra resultados correspondientes a distintas etapas de desarrollo del modelo a lo largo del tiempo. Estas actualizaciones responden a mejoras técnicas progresivas, pero introducen la necesidad de reflexionar sobre la coherencia estadística del conjunto cuando se emplea para la estimación de magnitudes extremas de diseño.

La motivación del presente trabajo se sitúa, por tanto, en la intersección entre la práctica ingenieril y la consistencia metodológica. Resulta pertinente analizar si la evolución del sistema de modelización puede influir en la estimación de la altura significativa asociada a periodos de retorno elevados y en qué medida dicha influencia debe ser considerada al interpretar los resultados obtenidos en estudios de clima marítimo. Esta cuestión no responde únicamente a un interés

académico, sino a la necesidad de garantizar que las decisiones adoptadas en el ámbito del diseño marítimo se apoyen en una base estadística técnicamente coherente y adecuadamente contextualizada.

En consecuencia, la relevancia del estudio radica en evaluar con rigor la relación entre la evolución de las herramientas de modelización y la estimación de magnitudes extremas empleadas en ingeniería marítima, aportando un marco de análisis que permita interpretar con mayor claridad el alcance y las implicaciones del uso de bases históricas modelizadas en el contexto nacional.

## **1.2. Antecedentes**

La caracterización del clima marítimo ha constituido históricamente uno de los pilares fundamentales en el desarrollo de la ingeniería portuaria y costera. En sus primeras etapas, la estimación de las condiciones de diseño se apoyaba principalmente en la recopilación de temporales históricos documentados, en observaciones visuales del estado de la mar realizadas desde buques en navegación y en registros meteorológicos costeros. Estas fuentes proporcionaban información cualitativa o semicuantitativa sobre la intensidad de los episodios más severos, pero presentaban limitaciones significativas en términos de precisión instrumental, continuidad temporal y cobertura espacial.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el desarrollo de campañas instrumentales localizadas y la implantación progresiva de redes permanentes de medida oceanográfica permitieron disponer de registros cuantitativos más fiables del estado del mar. No obstante, la extensión temporal de estas series era, en muchos casos, limitada, lo que condicionaba la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados. Esta circunstancia obligaba con frecuencia a incorporar márgenes de seguridad adicionales o a recurrir a métodos indirectos de extrapolación, práctica recogida en los principales manuales y recomendaciones técnicas internacionales (USACE, 2008; PIANC, 2019). Paralelamente al avance de la instrumentación, el desarrollo formal de la teoría de valores extremos proporcionó un marco probabilístico riguroso para la estimación de alturas significativas de oleaje asociadas a periodos de retorno específicos (Balkema y de Haan, 1974; Pickands, 1975; Davison y Smith, 1990; Coles, 2001). La incorporación progresiva de este enfoque permitió fundamentar de manera más sólida la extrapolación hacia horizontes temporales superiores a la duración de las series disponibles, convirtiéndose en una herramienta habitual en estudios de clima marítimo orientados al diseño.

Desde finales del siglo XX, la consolidación de modelos numéricos espectrales de oleaje forzados por campos atmosféricos supuso un cambio estructural en la caracterización del clima marítimo. Estos modelos hicieron posible la generación de series históricas continuas con cobertura espacial extensa y horizontes temporales superiores a los disponibles en registros instrumentales individuales. En el ámbito internacional, los hindcasts de oleaje se consolidaron como una fuente de información ampliamente empleada tanto en estudios climáticos como en aplicaciones de ingeniería (Cox y Swail, 2001; Reguero et al., 2012; Campos et al., 2016).

En España, este proceso se materializó en el desarrollo del sistema SIMAR-44, que proporciona información desde 1958 hasta 2005, y en su posterior continuidad mediante el sistema WANA, basado en sucesivas configuraciones atmosféricas. La integración de estas etapas ha dado lugar a una base histórica continua hasta la actualidad (Puertos del Estado, 2024), que constituye una referencia habitual en estudios de clima marítimo, proyectos portuarios y análisis de riesgo costero. La disponibilidad de esta base histórica ha ampliado de forma significativa la capacidad de estimar la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno habituales en ingeniería marítima. Sin embargo, la construcción de dicha serie a partir de configuraciones de modelización desarrolladas en momentos distintos y bajo marcos técnicos no idénticos introduce la necesidad de examinar con detalle el contexto bajo el cual los datos han sido generados y utilizados. Estos antecedentes técnicos y metodológicos configuran el punto de partida del análisis desarrollado en el presente trabajo.

### **1.3. Contexto actual de los modelos de oleaje en España**

En la actualidad, la caracterización del oleaje en el ámbito nacional se apoya de forma predominante en la base histórica SIMAR, gestionada por Puertos del Estado, que integra información generada mediante modelización numérica del estado de la mar desde finales de la década de 1950 hasta el presente. Esta base constituye una de las principales referencias técnicas en estudios de clima marítimo, tanto en proyectos portuarios como en actuaciones costeras y análisis de riesgo asociado al oleaje.

La configuración actual de SIMAR resulta de la integración de distintas etapas de modelización desarrolladas a lo largo del tiempo. El periodo comprendido entre 1958 y 2005 se corresponde con el subconjunto denominado SIMAR-44, generado a partir de modelización numérica forzada por campos atmosféricos históricos. A partir de 2006, la información procede del sistema WANA, que ha incorporado sucesivas actualizaciones vinculadas a la evolución de los modelos atmosféricos

empleados como forzamiento. Dentro de esta etapa pueden diferenciarse, de forma simplificada, una fase asociada al uso de HIRLAM y, desde 2018, una fase vinculada al modelo HARMONIE-AROME. Cada una de estas configuraciones se apoya en resoluciones espaciales, dominios de cálculo y esquemas de parametrización específicos.

Desde el punto de vista operativo, la base histórica se presenta al usuario como una serie continua y homogénea, lo que facilita su utilización directa en estudios técnicos. Esta continuidad aparente ha favorecido su empleo generalizado en la estimación de condiciones de oleaje asociadas a periodos de retorno habituales en ingeniería marítima, particularmente en lo que respecta a la altura significativa del oleaje en aguas profundas.

La amplia cobertura temporal y espacial de SIMAR ha permitido superar las limitaciones inherentes a la red instrumental, cuya extensión temporal varía según emplazamiento. En consecuencia, la modelización numérica se ha consolidado como una herramienta esencial en la práctica profesional, ampliando el horizonte de análisis y proporcionando una base común para la comparación de resultados en distintos puntos del litoral español.

No obstante, la integración en una única base histórica de resultados generados bajo configuraciones de modelización diferentes plantea la necesidad de examinar con detenimiento el marco técnico bajo el cual dichas series han sido construidas. La evolución progresiva de los modelos atmosféricos y de oleaje responde a mejoras en la capacidad de representación del estado de la mar, pero implica que la base histórica actual se apoya en configuraciones sucesivas que pueden diferir en aspectos relevantes desde el punto de vista estadístico.

En este contexto, resulta pertinente analizar con rigor cómo se estructura actualmente la base histórica SIMAR y cuál es el alcance de sus distintas etapas de modelización, como paso previo a la evaluación de su utilización en estudios orientados a la estimación del oleaje extremal.

#### **1.4. Limitaciones y consideraciones de uso del conjunto de datos SIMAR/WANA**

El conjunto de datos SIMAR/WANA constituye una herramienta de gran utilidad para la caracterización del clima marítimo en el litoral español, tanto por su cobertura temporal como por su resolución espacial. No obstante, como toda base histórica generada mediante modelización numérica, su utilización en estudios de ingeniería requiere una interpretación técnica adecuada y una consideración explícita de sus condicionantes.

En primer lugar, las series modelizadas dependen de la calidad del forzamiento atmosférico empleado en cada etapa, así como de la resolución espacial adoptada y de las parametrizaciones físicas implementadas en el modelo de oleaje. La representación de determinados estados de mar, en particular aquellos asociados a episodios de alta energía o a swell de largo recorrido, puede verse influida por estos factores. Por ello, la comparación con registros instrumentales disponibles en aguas profundas constituye una práctica recomendable para contextualizar los resultados obtenidos.

En segundo lugar, la base histórica actualmente disponible integra resultados generados bajo configuraciones sucesivas del modelo. Aunque dichas actualizaciones responden a mejoras progresivas en la capacidad de representación del estado del mar, la concatenación de etapas con características técnicas distintas implica que la serie completa no ha sido producida bajo un único marco de modelización constante en el tiempo. Esta circunstancia no invalida su utilización, pero exige tener presente el contexto bajo el cual cada tramo de la serie ha sido generado.

Asimismo, la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados mediante técnicas de análisis extremal depende no solo de la longitud total de la serie, sino también de la coherencia interna de los datos utilizados en el ajuste. La integración directa de resultados correspondientes a distintas configuraciones puede requerir una evaluación previa que permita asegurar que la interpretación estadística de la serie es consistente con el marco físico que la sustenta.

Por último, debe considerarse que las magnitudes obtenidas en aguas profundas constituyen condiciones de partida que, en aplicaciones de proyecto, deben ser transformadas y propagadas hasta la zona de actuación mediante modelos específicos. En consecuencia, la calidad y coherencia de la fase de caracterización del oleaje condicionan directamente las etapas posteriores del análisis. Estas consideraciones no limitan el valor del conjunto de datos SIMAR/WANA como referencia técnica nacional, pero subrayan la importancia de un uso fundamentado y contextualizado, especialmente cuando los resultados se emplean para la estimación de la altura significativa asociada a periodos de retorno habituales en ingeniería marítima.

## **1.5. Estructura del documento**

El trabajo se organiza en una secuencia de capítulos que desarrollan de forma progresiva el marco conceptual, la fundamentación metodológica y el análisis aplicado sobre las series de oleaje objeto

de estudio, siguiendo una lógica que avanza desde la contextualización general hasta la interpretación técnica de los resultados obtenidos.

Tras la presente introducción, el Capítulo 2 define el objetivo general y los objetivos específicos, estableciendo con precisión el alcance del análisis y delimitando las cuestiones que se abordan en relación con la coherencia temporal de la base histórica SIMAR, integrada por las distintas configuraciones de modelización desarrolladas desde 1958 hasta la actualidad, y su posible influencia en la caracterización estadística y extremal de la altura significativa del oleaje. Este capítulo fija el marco que orienta el desarrollo del estudio.

El Capítulo 3 desarrolla el estado del arte, en el que se revisan las principales fuentes de datos de oleaje disponibles en España, los antecedentes sobre validación y fiabilidad de las series SIMAR y WANA y los métodos habituales de análisis estadístico y extremal empleados en estudios de clima marítimo con aplicación al diseño de infraestructuras marítimas. Asimismo, se analiza la consideración de la coherencia temporal de series modelizadas de larga duración en la literatura científica. La revisión efectuada indica que, aunque existen estudios orientados a la validación de configuraciones específicas y a la evaluación de hindcasts de larga duración, no se han identificado trabajos que examinen de forma explícita la homogeneidad estructural entre las distintas configuraciones que integran la base histórica SIMAR.

En el Capítulo 4 se formaliza la necesidad que motiva el trabajo, partiendo de la hipótesis de que la integración en una única base histórica de resultados generados bajo configuraciones de modelización distintas podría introducir diferencias en la estructura estadística de la serie. En este apartado se delimitan las preguntas de investigación que guían el estudio y se plantea el problema desde una perspectiva metodológica, centrada en determinar si la utilización conjunta de las distintas configuraciones del modelo resulta estadísticamente coherente cuando se aplica a la caracterización del oleaje extremal.

El Capítulo 5 expone de manera detallada la metodología adoptada. Se describen los criterios de selección de los puntos de estudio en el litoral español, el procedimiento de validación frente a registros instrumentales en aguas profundas, el análisis estadístico básico de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico, así como la aplicación del método de excedencias sobre umbral para la estimación de la Hs asociada a periodos de retorno habituales en ingeniería marítima. Este capítulo garantiza la trazabilidad técnica del proceso seguido y la coherencia interna del análisis desarrollado.

El Capítulo 6 presenta los resultados obtenidos en los diferentes dominios geográficos del considerados del litoral español, analizando de forma comparada el comportamiento de las distintas configuraciones del modelo tanto en términos estadísticos como en la estimación de magnitudes extremales, e incorporando su contraste con las mediciones instrumentales disponibles.

El Capítulo 7 integra y examina los resultados desde una perspectiva metodológica e ingenieril, evaluando el alcance de las diferencias detectadas entre los modelos y analizando las implicaciones que puede tener el tratamiento conjunto o segmentado de la base histórica SIMAR en la estimación de la altura significativa asociada a periodos de retorno de interés en ingeniería marítima. A partir de este análisis se plantea, además, una propuesta metodológica orientada a facilitar la interpretación operativa de los resultados en estudios de clima marítimo aplicados al diseño de infraestructuras costeras y portuarias.

Finalmente, el Capítulo 8 recoge y organiza las conclusiones principales del estudio, precisando el alcance de los resultados obtenidos y sus implicaciones metodológicas. Asimismo, se plantean posibles líneas futuras de investigación orientadas a profundizar en la evaluación de la coherencia temporal de las series modelizadas de oleaje y en su aplicación en estudios de clima marítimo, vinculados al diseño y planificación de infraestructuras marítimas.

En conjunto, la estructura adoptada responde a un planteamiento lógico y progresivo que permite conectar el marco conceptual, el desarrollo metodológico y la interpretación aplicada, garantizando la consistencia interna del documento, la transparencia del proceso analítico desarrollado y la conexión entre el análisis científico de las series de oleaje y su interpretación práctica en el ámbito de la ingeniería marítima.

## 2. OBJETIVOS

---

La disponibilidad de series históricas extensas de oleaje generadas mediante modelización numérica ha ampliado significativamente las posibilidades de análisis del clima marítimo y de estimación de condiciones extremas con aplicación directa al diseño de infraestructuras costeras y portuarias. No obstante, la integración de datos procedentes de distintas etapas de modelización dentro de una misma base histórica plantea interrogantes sobre su coherencia temporal y sobre el posible efecto de las actualizaciones del sistema en la caracterización estadística del oleaje. En este contexto, el presente trabajo define los objetivos que orientan el análisis desarrollado, con el fin de evaluar de forma conjunta la estabilidad del sistema SIMAR/WANA y su impacto en la estimación del régimen extremal.

### 2.1. Objetivo general

Evaluar la coherencia temporal de las distintas configuraciones del modelo de oleaje empleadas en la base histórica SIMAR/WANA y cuantificar el efecto de sus actualizaciones en la caracterización estadística y extremal del oleaje en España, examinando las implicaciones que dichas variaciones pueden tener en la estimación de la altura significativa de oleaje extremal asociada a periodos de retorno utilizados, por lo general, en el diseño de infraestructuras marítimas.

### 2.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general, el trabajo se estructura en los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la estructura estadística básica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) y del periodo de pico ( $T_p$ ) en las distintas configuraciones del modelo que integran la base histórica SIMAR, evaluando posibles diferencias en medias, dispersión, percentiles representativos y forma general de la distribución.
2. Evaluar si las distintas configuraciones del modelo pueden considerarse estadísticamente homogéneas entre sí en lo relativo a la distribución de la altura significativa del oleaje, o si presentan diferencias que cuestionen su tratamiento conjunto como una única serie continua.

3. Contrastar los resultados modelizados con los registros instrumentales de boyas en aguas profundas asociadas a los puntos de estudio, aplicando un procedimiento homogéneo en todos los ámbitos geográficos analizados, con el fin de verificar la coherencia y el orden de magnitud de las variables consideradas en cada configuración del modelo.
4. Aplicar un análisis extremal de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ), basado en excedencias sobre umbral, para periodos de retorno habituales en ingeniería marítima tanto a cada una de las configuraciones del modelo como a la serie completa SIMAR considerada de forma integrada, comparando las estimaciones obtenidas con el fin de cuantificar la variación potencial en la  $H_s$  de diseño asociada al tratamiento segmentado o conjunto de la base histórica.
5. Examinar el comportamiento de las distintas configuraciones del modelo en los diferentes ámbitos litorales estudiados, evaluando si su respuesta estadística y extremal presenta un patrón consistente a escala nacional o si depende de las características específicas del régimen de oleaje en cada región.

### 3. ESTADO DEL ARTE

---

La caracterización del oleaje en ingeniería marítima se fundamenta en la integración de registros instrumentales obtenidos mediante redes de boyas y en los resultados procedentes de la modelización numérica del estado de mar, junto con la aplicación de herramientas estadísticas orientadas a describir tanto el régimen medio como el comportamiento extremal. Estas magnitudes constituyen la base para la definición de condiciones de proyecto en el diseño y verificación de infraestructuras portuarias y costeras, tal como recogen los principales marcos técnicos internacionales (PIANC, 2019; USACE, 2008) y las recomendaciones españolas en materia de clima marítimo.

En el contexto español, la evolución de los modelos empleados en la generación de las series SIMAR/WANA y el desarrollo progresivo de la red de boyas gestionada por Puertos del Estado han configurado un sistema de datos de referencia ampliamente utilizado en estudios y proyectos de ingeniería (Puertos del Estado, 2024). No obstante, la utilización de estas series exige una interpretación técnica rigurosa, especialmente cuando se integran resultados obtenidos bajo configuraciones numéricas diferentes en términos de forzamiento atmosférico, resolución espacial o formulación física.

La evaluación de la fiabilidad de los modelos de oleaje mediante comparación con registros instrumentales constituye una línea consolidada en la literatura científica. Los trabajos clásicos sobre la propagación dispersiva del swell a escala oceánica (Munk et al., 1963; Snodgrass et al., 1966) establecieron las bases físicas para el análisis del oleaje remoto, mientras que desarrollos posteriores han abordado la evaluación cuantitativa del comportamiento de modelos atmosférico-oceánicos frente a registros instrumentales, analizando sesgos, dispersión y capacidad de reproducción de eventos extremos (Caires y Sterl, 2005; Bidlot et al., 2007; Janssen, 2008). En este contexto se emplean métricas ampliamente aceptadas en la comunidad técnica, como el sesgo medio (Bias), el error cuadrático medio (RMSE), el índice de dispersión (Scatter Index) y el coeficiente de correlación lineal, utilizadas para cuantificar la capacidad del modelo para reproducir tanto el nivel medio como la variabilidad del oleaje frente a registros instrumentales (Caires y Sterl, 2005; Bidlot et al., 2007).

Desde la perspectiva del diseño marítimo, tanto PIANC (2019) como el Coastal Engineering Manual del USACE (2008) subrayan la necesidad de contrastar los resultados de modelos numéricos con

registros instrumentales disponibles antes de su utilización en el dimensionamiento de estructuras, especialmente en la estimación de oleajes asociados a periodos de retorno elevados.

En paralelo, la estimación del oleaje extremo se apoya en el marco teórico de la teoría de valores extremos. Los fundamentos matemáticos de la distribución Generalizada de Pareto para excedencias sobre umbral fueron establecidos por Balkema y de Haan (1974) y Pickands (1975), y su formalización estadística para aplicaciones prácticas se desarrolla en Davison y Smith (1990), Coles (2001) y Beirlant et al. (2004). En el ámbito del clima marítimo aplicado, tanto el análisis basado en máximos anuales como el método de excedencias sobre umbral han sido empleados de forma habitual en la estimación de niveles de retorno asociados a temporales severos, constituyendo procedimientos estándar en estudios de clima marítimo de apoyo al diseño.

Sin embargo, la cuestión relativa a la coherencia temporal de series numéricas generadas a partir de sucesivas actualizaciones del sistema de modelización ha recibido una atención más limitada. Cuando una base de datos integra resultados obtenidos con distintos modelos atmosféricos, resoluciones espaciales o parametrizaciones físicas, la hipótesis de homogeneidad estadística a lo largo del tiempo puede no estar garantizada. En tales casos, parte de la variabilidad detectada en la caracterización del régimen extremal puede estar asociada a modificaciones estructurales del sistema de cálculo y no exclusivamente a cambios en el clima marítimo.

En este marco, el presente capítulo revisa las principales fuentes de datos de oleaje disponibles en España, los estudios previos sobre la fiabilidad y coherencia temporal de las series SIMAR/WANA y los métodos habitualmente empleados en su validación y en el análisis extremal. Esta revisión permite situar el trabajo desarrollado dentro del conocimiento técnico existente y delimitar con precisión la aportación específica del estudio en relación con la evaluación crítica de la homogeneidad de las series modelizadas.

### **3.1. Fuentes de datos de oleaje en España**

La caracterización del oleaje en el litoral español se apoya fundamentalmente en dos fuentes de información complementarias, los registros instrumentales obtenidos mediante redes de medida en el mar y las series generadas a partir de modelos numéricos de oleaje. Ambas aportan información esencial, aunque presentan diferencias relevantes en términos de cobertura espacial, extensión temporal y naturaleza del dato disponible.

En el ámbito instrumental, la referencia nacional es la red de boyas gestionada por Puertos del Estado dentro del sistema de medida del estado del mar. Esta red proporciona registros continuos de altura significativa del oleaje, periodo de pico y dirección de propagación, así como, en determinados emplazamientos, información espectral completa. La distribución de las boyas a lo largo del litoral peninsular y en el archipiélago canario permite disponer de series representativas de los principales regímenes de oleaje que afectan a la costa española (Puertos del Estado, 2024).

El principal valor de los registros instrumentales radica en su carácter directo y en su capacidad para recoger episodios extremos reales sin mediación de hipótesis de modelización. No obstante, su cobertura espacial es necesariamente limitada y la longitud temporal de cada serie depende de la fecha de instalación y de la continuidad operativa del equipo. Esta circunstancia condiciona la estimación de niveles asociados a periodos de retorno elevados cuando se dispone únicamente de unas pocas décadas de datos.

Como complemento a la red instrumental, Puertos del Estado pone a disposición el conjunto de datos SIMAR, integrado por series históricas de viento y oleaje obtenidas mediante modelización numérica del estado de mar forzada por campos atmosféricos. Este tipo de reconstrucción retrospectiva del estado del mar, obtenida mediante la simulación numérica del oleaje a partir de campos atmosféricos históricos, se conoce como *hindcast*. A diferencia del registro instrumental directo, el *hindcast* no constituye una medición, sino una estimación modelizada de las condiciones pasadas, cuya calidad depende de la resolución, las parametrizaciones físicas y el forzamiento atmosférico empleados en cada etapa de cálculo.

Dicho conjunto de datos resulta de la concatenación de dos grandes subconjuntos, SIMAR-44 y WANA, lo que permite disponer de información desde 1958 hasta la actualidad (Puertos del Estado, 2024). El periodo 1958-2005 corresponde al subconjunto SIMAR-44, mientras que a partir de 2006 la información procede del sistema WANA, dentro del cual pueden distinguirse distintas fases asociadas a la evolución del modelo atmosférico empleado, en particular la etapa vinculada a HIRLAM y, desde 2018, la correspondiente a HARMONIE-AROME. Cada una de estas fases se apoya en configuraciones atmosféricas, resoluciones espaciales y esquemas de cálculo diferentes, aspecto que debe considerarse al emplear estas series en estudios de clima marítimo y en análisis de carácter extremal.

En el ámbito internacional, diversos trabajos han señalado que los productos de *hindcast* de larga duración, aunque constituyen herramientas fundamentales para la caracterización del clima

marítimo, pueden incorporar cambios estructurales asociados a la evolución de los modelos atmosféricos y de oleaje empleados en su generación, lo que exige una evaluación explícita de su coherencia cuando se utilizan con fines climáticos o extremos (Cox y Swail, 2001; Campos et al., 2016). Asimismo, el desarrollo de bases de datos globales de oleaje derivadas de modelos espectrales de tercera generación, como WAVEWATCH III, ha puesto de manifiesto la importancia de validar estos productos frente a observaciones instrumentales y de analizar su comportamiento en percentiles elevados cuando se destinan a aplicaciones de ingeniería costera (Reguero et al., 2012).

Las series derivadas de modelización numérica permiten disponer de una cobertura temporal más extensa y de una mayor densidad espacial de puntos respecto a la red instrumental. Esta ampliación temporal resulta especialmente significativa en estudios orientados a la estimación de oleaje extremo, donde la estabilidad del ajuste estadístico depende de la longitud de la serie disponible (Coles, 2001; Beirlant et al., 2004). Sin embargo, al tratarse de resultados obtenidos mediante modelos numéricos, su fiabilidad está condicionada por la calidad del forzamiento atmosférico, la resolución espacial adoptada y las formulaciones físicas empleadas en cada etapa de cálculo.

Junto a los sistemas específicamente desarrollados para el litoral español, existen conjuntos de datos de alcance global y europeo basados en reanálisis atmosféricos y oceánicos, como ERA5 del ECMWF, así como resultados derivados de modelos numéricos globales de oleaje, entre los que destaca WAVEWATCH III, ampliamente empleado en aplicaciones operativas y en estudios climáticos de gran escala (Hersbach et al., 2020). Estos sistemas proporcionan cobertura espacial continua a escala oceánica y permiten caracterizar el clima marítimo en dominios extensos. Sin embargo, su resolución espacial, la configuración de mallas y las parametrizaciones físicas utilizadas pueden diferir de las adoptadas en sistemas regionales diseñados específicamente para el entorno litoral español, lo que condiciona su aplicabilidad directa en estudios locales o portuarios.

En el ámbito del diseño portuario y costero, las recomendaciones técnicas señalan que la selección de la información ambiental de partida debe realizarse en función del emplazamiento, del grado de exposición al oleaje y del objetivo específico del estudio. Asimismo, establecen que los resultados obtenidos mediante modelización numérica deben contrastarse, siempre que sea posible, con registros instrumentales disponibles antes de su incorporación al proceso de dimensionamiento, con el fin de garantizar la coherencia física del análisis y la adecuada trazabilidad de las condiciones adoptadas (PIANC, 2019; USACE, 2008; Puertos del Estado, 2005).

En consecuencia, la caracterización del oleaje en España se fundamenta en la integración de registros instrumentales y series obtenidas mediante modelización numérica, cada una con fortalezas y limitaciones específicas en términos de cobertura espacial, extensión temporal y naturaleza de la información proporcionada. Su interpretación requiere considerar no solo estas características, sino también el marco técnico bajo el cual han sido generadas, especialmente cuando se emplean en estudios con implicaciones directas en el diseño y dimensionamiento de obras marítimas.

### **3.2. Estudios previos sobre la fiabilidad y homogeneidad de las series SIMAR/WANA**

La evaluación de la fiabilidad de las series de oleaje obtenidas mediante modelización numérica constituye una línea de investigación consolidada tanto en el ámbito internacional como en el contexto español. En el marco nacional, las bases SIMAR y el sistema WANA han sido ampliamente empleadas en estudios de clima marítimo, análisis de temporales y apoyo al diseño de infraestructuras portuarias y costeras, lo que ha motivado diversos trabajos orientados a contrastar su comportamiento frente a registros instrumentales disponibles.

La validación de modelos de oleaje mediante comparación con registros de boya se ha centrado habitualmente en el análisis de estadísticos globales y métricas de error, tales como el sesgo medio, el error cuadrático medio o el índice de dispersión, así como en la capacidad del modelo para reproducir estados de mar energéticos. Este planteamiento se inscribe en la práctica habitual de evaluación de modelos espectrales de oleaje forzados por campos atmosféricos, donde la coherencia entre resultados modelizados y registros instrumentales constituye un criterio esencial de fiabilidad (Caires y Sterl, 2005; Bidlot et al., 2007; Janssen, 2008). Este tipo de análisis comparativo ha sido igualmente aplicado a la comparación de distintos productos de hindcast en dominios oceánicos amplios, evidenciando que diferencias en los forzamientos atmosféricos y en las configuraciones del modelo pueden traducirse en variaciones apreciables en la estimación de eventos energéticos (Campos et al., 2016).

En el caso específico de SIMAR, la documentación técnica institucional indica que las series generadas resultan adecuadas para la caracterización del clima marítimo regional, si bien se advierte que la representación de los eventos más severos puede verse condicionada por la resolución espacial del modelo, la calidad del forzamiento atmosférico y las parametrizaciones físicas adoptadas (Puertos del Estado, 2024). Esta consideración es coherente con la literatura internacional sobre modelización de oleaje, en la que se reconoce que las discrepancias entre

modelo y medición tienden a intensificarse en la cola de la distribución, particularmente en situaciones asociadas a temporales intensos o a swell de largo recorrido.

No obstante, la revisión de la literatura indica que la mayor parte de los estudios se han centrado en comprobar si una versión concreta del modelo reproduce adecuadamente los registros de boya disponibles, evaluando su comportamiento mediante indicadores globales de error y su capacidad para representar temporales intensos. Aunque existen trabajos que han analizado la coherencia de hindcasts de larga duración desde el punto de vista climático y de su validación frente a observaciones (Cox y Swail, 2001), no se han identificado estudios que examinen de forma específica si las distintas etapas de un mismo sistema, generadas bajo configuraciones sucesivas del modelo, pueden considerarse estadísticamente equivalentes cuando se utilizan de manera conjunta para estimar el oleaje extremo.

Cuando una base de datos integra resultados obtenidos con diferentes forzamientos atmosféricos, resoluciones espaciales o formulaciones físicas, no puede asumirse automáticamente que todos los periodos describen el mismo comportamiento estadístico. En particular, si se emplean para calcular alturas asociadas a periodos de retorno elevados, resulta necesario comprobar que las posibles diferencias entre etapas no responden a cambios en el propio sistema de modelización, sino a variaciones reales del régimen de oleaje. Esta distinción es esencial para garantizar que las conclusiones extraídas reflejan el comportamiento físico del mar y no efectos derivados de la evolución del modelo.

La experiencia acumulada en reanálisis atmosféricos ha puesto de manifiesto que los cambios en los sistemas de asimilación, en las parametrizaciones físicas o en la resolución de malla pueden introducir discontinuidades estructurales en las series derivadas, incluso en ausencia de modificaciones apreciables en el régimen climático subyacente (Hersbach et al., 2020). Esta circunstancia adquiere especial relevancia cuando las series se emplean en análisis extremos, donde variaciones relativamente pequeñas en la representación de los estados de mar más energéticos pueden traducirse en diferencias significativas en la estimación de periodos de retorno.

A la luz de la revisión bibliográfica realizada y de la documentación técnica disponible, no se han identificado trabajos publicados que analicen de forma explícita la homogeneidad temporal estructural entre las distintas etapas operativas del sistema SIMAR/WANA cuando estas se emplean de manera integrada para la estimación del régimen extremal. La consideración explícita de esta

cuestión constituye, por tanto, un aspecto metodológico no abordado de forma específica en la literatura revisada.

En este contexto, la cuestión de la homogeneidad debe entenderse, desde una perspectiva estadística, como la invariancia de la estructura de la distribución entre etapas en ausencia de cambios físicos en el régimen de oleaje. Esta distinción resulta especialmente relevante al diferenciar entre estabilidad del régimen medio y estabilidad de la cola de la distribución, dado que la sensibilidad de los extremos a modificaciones en la modelización puede no manifestarse de forma apreciable en los estadísticos globales. La consideración explícita de esta problemática constituye el punto de partida del análisis desarrollado en el presente trabajo.

### **3.3. Métodos habituales de validación y análisis extremal de bases históricas de oleaje**

La utilización de bases históricas de oleaje con fines ingenieriles exige, de manera previa, una evaluación rigurosa de su fiabilidad y coherencia estadística. En el ámbito del clima marítimo, la validación de series generadas mediante modelización numérica se realiza habitualmente mediante su comparación con registros instrumentales disponibles, empleando métricas cuantitativas que permiten caracterizar sesgos sistemáticos y dispersión residual. Entre los estadísticos más empleados se encuentran el sesgo medio, el error cuadrático medio, el índice de dispersión y el coeficiente de correlación, cuya aplicación se encuentra ampliamente documentada en la literatura sobre evaluación de modelos de oleaje forzados por campos atmosféricos (Caires y Sterl, 2005; Bidlot et al., 2007; Janssen, 2008). Estos indicadores permiten valorar la capacidad del modelo para reproducir tanto el régimen medio como los estados de mar de mayor energía, si bien su interpretación debe contextualizarse en función de la localización y del periodo analizado.

Más allá de la validación puntual frente a registros instrumentales, la caracterización estadística de una base histórica de oleaje requiere el análisis de su distribución completa. Las funciones de distribución acumulada, los percentiles representativos y los estadísticos descriptivos básicos constituyen herramientas habituales para examinar la forma de la distribución y detectar posibles desviaciones entre conjuntos de datos. Este análisis preliminar resulta particularmente relevante cuando se pretende utilizar la serie con fines extremales, dado que la estabilidad del régimen medio no garantiza necesariamente la estabilidad de la cola de la distribución.

En el ámbito específico del análisis extremal, el marco teórico de referencia se fundamenta en la teoría de valores extremos. Dos enfoques principales han sido tradicionalmente empleados en climatología del oleaje y en ingeniería marítima, el análisis basado en máximos anuales y el método

de excedencias sobre umbral. El primero se apoya en la convergencia asintótica hacia la distribución Generalizada de Valores Extremos, mientras que el segundo se fundamenta en el resultado de Balkema y de Haan (1974) y Pickands (1975), que establece que las excedencias sobre un umbral suficientemente alto convergen hacia una distribución Generalizada de Pareto. La formalización estadística y los procedimientos de estimación asociados se desarrollan en Davison y Smith (1990), Coles (2001) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la base metodológica de numerosos estudios de clima marítimo.

El método de excedencias sobre umbral, conocido como POT (Peaks Over Threshold), permite utilizar un mayor número de observaciones situadas en la cola de la distribución en comparación con el enfoque basado en máximos anuales, al evitar limitar el análisis a un único valor extremo por año. No obstante, su aplicación requiere decisiones metodológicas específicas, entre las que destacan la selección de un umbral suficientemente elevado, la verificación de la independencia estadística de las excedencias y la comprobación de la estabilidad de los parámetros estimados. La elección del umbral suele apoyarse en diagnósticos gráficos y criterios estadísticos, como el análisis de estabilidad de los parámetros frente a distintos niveles de umbral o la utilización de criterios de información. Por su parte, la dependencia temporal inherente a las series de oleaje se aborda habitualmente mediante procedimientos de declustering, orientados a identificar eventos extremos estadísticamente independientes antes del ajuste de la distribución Generalizada de Pareto.

La sensibilidad de las estimaciones extremales a la selección del umbral y al tratamiento de la dependencia temporal ha sido objeto de análisis específico en estudios aplicados al clima marítimo, donde se pone de manifiesto que decisiones metodológicas aparentemente menores pueden afectar de manera apreciable a la estimación de niveles asociados a periodos de retorno elevados (Beguiría, 2005; Luceno et al., 2006).

Una vez ajustada la distribución Generalizada de Pareto a las excedencias seleccionadas, la estimación de periodos de retorno de interés ingenieril constituye el objetivo principal del análisis. La literatura especializada subraya que la extrapolación hacia periodos de retorno muy superiores a la duración de la serie implica un incremento significativo de la incertidumbre, dado que las estimaciones se apoyan en información limitada en la cola de la distribución (Coles, 2001; Beirlant et al., 2004). En consecuencia, la representación explícita de intervalos de confianza o bandas de incertidumbre forma parte de las buenas prácticas en estudios extremales aplicados al dimensionamiento de infraestructuras marítimas.

En conjunto, los métodos habituales de validación y análisis extremal combinan herramientas de comparación entre resultados de modelización numérica y registros instrumentales con el marco probabilístico de la teoría de valores extremos. No obstante, la correcta aplicación de estos procedimientos exige verificar previamente la coherencia temporal y la consistencia estadística de la serie analizada. Cuando una base histórica integra resultados generados bajo configuraciones de modelización distintas, la homogeneidad estructural de la distribución debe ser objeto de comprobación específica. Esta circunstancia adquiere especial relevancia en el análisis de la cola de la distribución y en la estimación de periodos de retorno de interés para la ingeniería marítima.

### **3.4. Justificación técnica y científica del presente estudio**

La revisión de las fuentes de datos disponibles y de la bibliografía técnica pone de manifiesto que la validación de modelos de oleaje frente a registros instrumentales constituye una práctica consolidada, al igual que la aplicación de la teoría de valores extremos para la estimación de periodos de retorno de interés ingenieril. Sin embargo, el empleo integrado de series generadas bajo distintas configuraciones de modelización introduce una cuestión adicional que no ha sido abordada de forma explícita en los estudios revisados, relativa a la coherencia temporal estructural de dichas series cuando se utilizan de manera conjunta en análisis extremales.

La evolución del sistema SIMAR/WANA ha supuesto la incorporación sucesiva de nuevos forzamientos atmosféricos, cambios en la resolución espacial y modificaciones en los esquemas de cálculo. Estas actualizaciones responden a avances en la capacidad de modelización, pero introducen modificaciones estructurales en el sistema generador de las series. Desde una perspectiva estadística, cuando una base histórica integra resultados obtenidos bajo configuraciones distintas, la hipótesis de homogeneidad temporal de la distribución no puede considerarse implícita y requiere una verificación específica, especialmente cuando el objetivo es estimar periodos de retorno asociados a eventos extremos.

Esta cuestión adquiere particular relevancia en ingeniería marítima, donde la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno elevados constituye una variable determinante en el dimensionamiento de infraestructuras portuarias y costeras. Pequeñas diferencias en la representación de los estados de mar más energéticos pueden traducirse en variaciones apreciables en la altura estimada para un mismo periodo de retorno, con implicaciones directas en la seguridad, el coste y la trazabilidad técnica de los proyectos.

En este contexto, el presente estudio se justifica por la necesidad de analizar de manera explícita la coherencia estadística entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA y de cuantificar cómo las transiciones entre versiones de modelo pueden modificar el régimen extremal del oleaje. El trabajo no persigue una descripción adicional del clima marítimo, sino evaluar el efecto que las sucesivas actualizaciones del sistema pueden tener sobre las alturas de oleaje asociadas a periodos de retorno utilizados en el diseño de infraestructuras marítimas.

Desde el punto de vista científico, la aportación del estudio consiste en aplicar al ámbito del clima marítimo una idea ya conocida en otros campos de la modelización numérica, según la cual los cambios introducidos en un modelo pueden generar variaciones en los resultados que no necesariamente responden a cambios reales en el fenómeno físico analizado. En términos aplicados, el trabajo propone interpretar las diferencias observadas entre las distintas etapas del sistema no como errores aislados, sino como una consecuencia de la evolución del propio modelo, circunstancia que debe tenerse en cuenta de forma explícita cuando los datos se utilizan para el diseño de infraestructuras marítimas.

La justificación del trabajo se apoya, por tanto, en la convergencia de tres elementos que interactúan entre sí, la evolución del sistema de modelización, la sensibilidad de la parte más extrema de la distribución a modificaciones estructurales y la relevancia directa de las magnitudes asociadas a eventos extremos en la toma de decisiones ingenieriles. La consideración conjunta de estos factores sustenta el fundamento técnico y científico del análisis desarrollado.

#### 4. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD/GAP EN EL CONOCIMIENTO

---

La revisión bibliográfica desarrollada en el estado del arte pone de manifiesto que la validación de modelos de oleaje frente a registros instrumentales y la aplicación de la teoría de valores extremos para la estimación de periodos de retorno constituyen prácticas consolidadas en el ámbito de la ingeniería marítima. Sin embargo, el uso operativo de bases históricas generadas mediante modelización numérica ha evolucionado en paralelo a la propia mejora de los sistemas de cálculo, incorporando nuevos forzamientos atmosféricos, resoluciones espaciales y configuraciones de propagación.

En el caso del sistema SIMAR/WANA, la base histórica disponible en España integra resultados generados en distintas etapas de modelización, desarrolladas bajo configuraciones técnicas y esquemas de cálculo no equivalentes. Aunque estas actualizaciones responden a mejoras en la representación numérica del oleaje, la utilización conjunta de dichas etapas en análisis estadísticos de largo plazo introduce una cuestión metodológica relevante, relacionada con la posible existencia de discontinuidades estructurales derivadas del propio sistema de modelización y no de variaciones físicas reales en el clima marítimo.

En la práctica habitual, cuando se elaboran estudios de clima marítimo a partir de series generadas mediante modelización numérica, se tiende a utilizar la serie completa como un conjunto continuo, sin segmentación explícita por etapas de modelización. Esta aproximación supone asumir la continuidad estadística de la serie histórica. Sin embargo, si las distintas configuraciones del sistema presentan diferencias en la estructura de la distribución, la hipótesis de homogeneidad temporal no puede considerarse garantizada y debe ser objeto de comprobación específica.

Esta problemática adquiere especial relevancia en el ámbito del oleaje extremal, donde pequeñas variaciones en la representación de la parte alta de la distribución pueden traducirse en diferencias apreciables en las magnitudes asociadas a determinados periodos de retorno. Dado que dichas magnitudes intervienen de forma directa en el dimensionamiento y verificación de obras portuarias y costeras, la existencia de posibles inconsistencias entre versiones de modelo deja de ser una cuestión puramente estadística para convertirse en un aspecto con implicaciones técnicas y económicas concretas.

El presente capítulo se orienta, por tanto, a identificar de manera estructurada la necesidad que motiva el trabajo y el vacío específico en el conocimiento que aborda el estudio, delimitando con

precisión el problema metodológico, su alcance y su relevancia para la práctica profesional en ingeniería marítima.

#### **4.1. Posibles inconsistencias entre versiones de modelo y su impacto en el análisis de temporales de oleaje**

La base de datos SIMAR/WANA integra resultados procedentes de distintas etapas de modelización que incorporan cambios en el forzamiento atmosférico, en la resolución espacial, en el dominio de cálculo y en la configuración numérica del modelo de oleaje. Desde el punto de vista operativo, estas actualizaciones responden a mejoras técnicas progresivas en la capacidad de representación del estado de mar. Sin embargo, desde una perspectiva estadística, la concatenación de etapas generadas bajo configuraciones no idénticas plantea una cuestión que requiere análisis específico.

Si las distintas etapas del sistema presentan diferencias en la estructura de sus distribuciones, no puede asumirse de forma automática que la serie completa represente un proceso estadísticamente coherente a lo largo del tiempo. En tal caso, la integración conjunta directa de todas las etapas en una única base histórica podría introducir discontinuidades asociadas a cambios en el sistema generador y no necesariamente a variaciones reales en el régimen físico del oleaje.

Esta posible circunstancia adquiere especial relevancia en el análisis de temporales extremos. La estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados se fundamenta en la caracterización de la parte más extrema de la distribución, donde pequeñas diferencias en los parámetros de ajuste pueden amplificarse al extrapolar hacia horizontes temporales largos. En presencia de cambios estructurales entre etapas, dichas diferencias podrían trasladarse de forma directa a las alturas extremas obtenidas.

La utilización de la serie completa sin segmentación implica asumir que la estructura estadística de la distribución permanece constante en el tiempo. Esta hipótesis, sin embargo, no puede considerarse garantizada sin una verificación previa. La existencia de divergencias en medias, percentiles altos o parámetros extremos entre configuraciones podría dar lugar a estimaciones que no reflejen de manera coherente el comportamiento de ninguna de las etapas consideradas por separado.

En este marco, resulta necesario examinar de forma explícita si la utilización conjunta de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA puede introducir inconsistencias con impacto potencial en el análisis de temporales de oleaje y en la estimación de magnitudes extremas. La delimitación

rigurosa de esta cuestión constituye el punto de partida del presente capítulo y fundamenta la necesidad metodológica que motiva el desarrollo del estudio.

#### **4.2. Necesidad de un análisis por regiones litorales con validación instrumental**

El comportamiento del oleaje en el litoral español presenta una marcada diversidad regional asociada a factores como la exposición directa al Atlántico, la recurrencia de temporales de largo recorrido, la presencia de regímenes de fetch limitado en el Mediterráneo o la singularidad geométrica y dinámica del entorno insular canario. Estas diferencias condicionan no solo los valores medios de la altura significativa de oleaje, sino también la forma de la distribución y, en particular, el comportamiento de su tramo extremo.

En este contexto, el análisis conjunto de una base histórica sin diferenciación regional puede enmascarar comportamientos propios de cada ámbito y dificultar la detección de posibles inconsistencias entre etapas de modelización. La sensibilidad de la cola de la distribución a variaciones en el forzamiento atmosférico, en la resolución espacial o en la configuración del modelo no necesariamente se manifiesta de manera homogénea en todos los dominios geográficos. En regiones dominadas por temporales atlánticos persistentes y elevada energía media, las discrepancias relativas entre etapas pueden resultar moderadas, mientras que en entornos de menor energía o carácter más episódico, pequeñas variaciones estructurales en la modelización pueden traducirse en diferencias apreciables en los periodos de retorno estimados.

Desde una perspectiva metodológica, esta heterogeneidad justifica la necesidad de estructurar el análisis por regiones litorales diferenciadas, de modo que la evaluación de la coherencia estadística entre etapas se realice bajo contextos físicos comparables. La segmentación regional no responde a un criterio meramente descriptivo, sino a la conveniencia de separar los posibles efectos derivados de la evolución del sistema de modelización de las particularidades propias del régimen de oleaje en cada ámbito.

La disponibilidad de registros instrumentales representativos en todas las regiones analizadas refuerza esta aproximación. La comparación con mediciones en aguas profundas permite incorporar un contraste físico independiente frente al cual interpretar la magnitud de los temporales más intensos y la coherencia entre etapas del sistema. Sin esta referencia externa, el análisis quedaría restringido a comparaciones internas entre configuraciones del modelo, sin un elemento objetivo que permita valorar la consistencia física de las diferencias detectadas.

En consecuencia, la combinación de segmentación regional y validación instrumental en cada ámbito geográfico constituye una condición metodológica necesaria para examinar con rigor la posible no homogeneidad entre etapas del sistema SIMAR/WANA y para valorar su influencia en la caracterización extremal del oleaje.

### **4.3. Riesgos para el diseño de obras marítimas derivados de asumir homogeneidad**

El dimensionamiento de infraestructuras marítimas se fundamenta, entre otros aspectos, en la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a determinados periodos de retorno. Estas magnitudes condicionan de forma directa la definición de las acciones de proyecto y, en consecuencia, influyen en la configuración estructural y funcional de diques, muelles y demás obras marítimas. Por ello, la consistencia estadística de la serie empleada para caracterizar el régimen extremal constituye un elemento técnico esencial del proceso de análisis.

La utilización de la serie histórica completa del sistema SIMAR/WANA sin segmentación por etapas supone asumir implícitamente que el proceso estadístico subyacente es homogéneo en el tiempo. Esta hipótesis implica considerar que la estructura de la distribución de la altura significativa del oleaje, incluidos sus parámetros extremales, permanece estable a lo largo de las distintas configuraciones del modelo. Sin embargo, si las etapas que componen la base histórica incorporan diferencias estructurales en la representación del oleaje, la integración conjunta directa de los datos puede dar lugar a estimaciones extremales que no reflejen con precisión el comportamiento específico de ninguna de las configuraciones consideradas de manera independiente.

Desde una perspectiva metodológica, esta circunstancia introduce un factor adicional de incertidumbre. La altura asociada a un mismo periodo de retorno podría depender, en parte, de la etapa de modelización utilizada en el análisis, no necesariamente como consecuencia de variaciones reales del clima marítimo, sino debido a modificaciones en la configuración del sistema de modelización (forzamiento atmosférico, resolución espacial o las parametrizaciones físicas que caracterizan cada etapa del sistema). En tal caso, la interpretación de los resultados como expresión exclusiva del régimen físico del oleaje podría resultar incompleta si no se considera explícitamente esta posible fuente de variabilidad.

El efecto potencial de esta situación se amplifica en el tramo extremo de la distribución, donde pequeñas variaciones en la forma de la cola pueden traducirse en diferencias apreciables al extrapolar hacia periodos de retorno elevados. En este contexto, asumir homogeneidad sin una

verificación previa puede generar una percepción de estabilidad estadística que no incorpore de forma explícita la posible dispersión estructural entre etapas.

Esta cuestión no implica, por sí misma, que las estimaciones obtenidas carezcan de validez, pero sí subraya la importancia de reconocer y documentar con claridad el marco metodológico bajo el cual se derivan. La trazabilidad del proceso de caracterización extremal requiere identificar la etapa de modelización empleada y considerar su coherencia interna, especialmente cuando los resultados se integran en estudios con implicaciones técnicas relevantes. La transparencia en la identificación de la fuente de datos y en la evaluación de su consistencia estadística refuerza la solidez del análisis y facilita una interpretación técnicamente fundamentada de las magnitudes extremas.

En este sentido, el análisis explícito de la homogeneidad entre etapas debe entenderse como un ejercicio de control metodológico orientado a mejorar la comprensión de la incertidumbre estructural asociada a la base histórica utilizada. Cuando se detecten diferencias entre configuraciones del sistema, resulta técnicamente recomendable considerar dicha circunstancia de forma explícita en la fase de estudio del clima marítimo, a fin de contextualizar adecuadamente las magnitudes extremas obtenidas y su grado de estabilidad estadística.

#### **4.4. Preguntas claves que aborda el TFM**

A partir de la necesidad identificada en los apartados precedentes, el presente trabajo se estructura en torno a un conjunto de preguntas de investigación orientadas a examinar de forma crítica la coherencia temporal del sistema SIMAR/WANA y sus implicaciones en la estimación del oleaje extremal en España.

Las cuestiones centrales que guían el estudio pueden sintetizarse en los siguientes términos:

1. ¿Puede considerarse estadísticamente homogénea la serie histórica SIMAR, actualmente en uso, integrada por resultados generados mediante distintas configuraciones de modelización (SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE), cuando se emplea de manera conjunta para la caracterización extremal de la altura significativa del oleaje?

Esta cuestión examina si la concatenación de series obtenidas bajo configuraciones atmosféricas, resoluciones espaciales y esquemas de cálculo diferentes es compatible con la hipótesis de invariancia temporal de la distribución, especialmente en su tramo extremo.

2. En caso de detectarse diferencias entre etapas, ¿qué impacto potencial pueden tener sobre la estimación de la altura significativa del oleaje extremal asociada a determinados periodos de retorno?

Esta cuestión se centra específicamente en la sensibilidad del tramo extremo de la distribución y en la posible variabilidad de las magnitudes derivadas en función de la configuración de modelización considerada.

3. ¿Existe coherencia entre los valores de altura significativa del oleaje extremal obtenidos con cada etapa del modelo SIMAR y los registros instrumentales de las boyas en aguas profundas correspondientes a los puntos de estudio?

Esta cuestión examina si las distintas configuraciones de modelización reproducen de manera consistente la magnitud del oleaje extremo registrado en aguas profundas, permitiendo evaluar la consistencia física de las estimaciones derivadas del modelo.

4. ¿Presenta la posible no homogeneidad un comportamiento uniforme a escala nacional o manifiesta una dependencia regional asociada a las características del régimen de oleaje en cada ámbito litoral?

Esta pregunta introduce explícitamente la dimensión geográfica del problema y reconoce la diversidad dinámica existente entre el Atlántico peninsular, el Mediterráneo y el entorno insular canario.

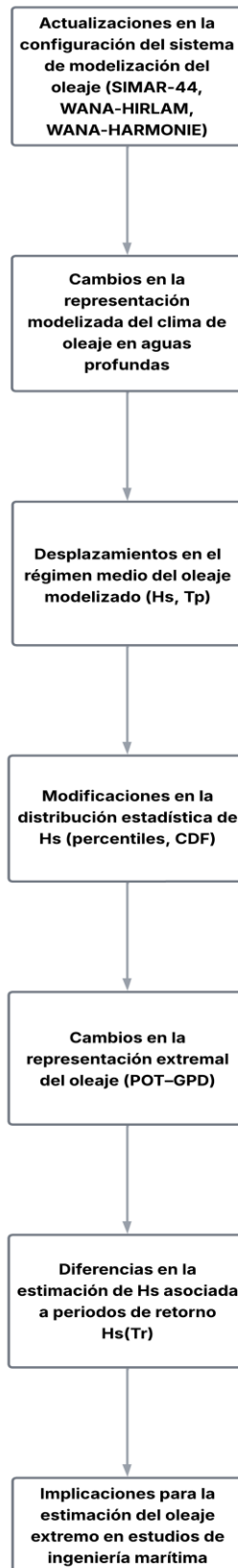
5. ¿La utilización conjunta de las distintas configuraciones que integran la base histórica SIMAR, tratadas como una única serie temporal continua, puede introducir incertidumbre estructural adicional en la estimación de la altura significativa extremal asociada a un mismo periodo de retorno?

Esta cuestión plantea si la integración conjunta de las distintas configuraciones que componen la base histórica bajo una única serie puede alterar la estabilidad estadística del ajuste extremal y generar una dispersión no identificada entre etapas. En caso afirmativo, ello implicaría que la utilización de la base histórica SIMAR en estudios de clima marítimo debe tener en cuenta que los datos no proceden de un único modelo homogéneo, sino de distintas configuraciones de modelización desarrolladas en diferentes etapas.

En conjunto, estas preguntas delimitan el marco analítico del estudio y orientan el desarrollo de los capítulos posteriores hacia la evaluación crítica de la coherencia estadística entre etapas del sistema SIMAR/WANA y su repercusión en la estimación del oleaje extremo con fines ingenieriles.

Las cuestiones planteadas anteriormente pueden interpretarse como distintas manifestaciones de un mismo problema conceptual relacionado con la evolución de las configuraciones del sistema de modelización del oleaje. Con el fin de sintetizar este planteamiento, la Figura 1 presenta un esquema conceptual simplificado de la relación entre las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA, los posibles cambios en la representación estadística del oleaje modelizado y sus implicaciones en la estimación del régimen extremal.

Este esquema conceptual resume el marco del problema abordado en el presente trabajo y sirve de base para el planteamiento metodológico descrito en el capítulo siguiente.



**Figura 1.\_** Esquema conceptual del efecto de las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA sobre la representación estadística del oleaje y la estimación del régimen extremal.

Fuente: Elaboración propia

## 5. PROPUESTA METODOLÓGICA

---

### 5.1. Selección de boyas y puntos SIMAR de referencia

La selección de los puntos de análisis constituye un aspecto clave de la metodología adoptada, ya que condiciona tanto la representatividad espacial del estudio como la validez de las comparaciones entre registros numéricos e instrumentales. En coherencia con los objetivos planteados, la elección de nodos SIMAR y boyas de referencia se ha realizado atendiendo a criterios técnicos, geográficos y operativos, con el fin de garantizar un análisis robusto del régimen de oleaje extremo y de su posible evolución asociada a las distintas generaciones de modelos empleados por Puertos del Estado.

El estudio se articula en torno a un conjunto acotado pero representativo de puntos distribuidos a lo largo de las principales fachadas marítimas españolas, incluyendo tanto el ámbito peninsular como el archipiélago canario. En cada zona se ha seleccionado, siempre que ha sido posible, una **pareja formada una boya y un nodo SIMAR próximo**, de manera que pueda realizarse una comparación directa entre datos modelizados y registros instrumentales bajo condiciones oceanográficas similares.

#### 5.1.1. Criterios de selección de las boyas de referencia

Las boyas de referencia se han seleccionado a partir de la Red de Boyas de Puertos del Estado, atendiendo a los siguientes criterios:

- **Representatividad regional:** se han elegido boyas, situadas en aguas profundas, que caracterizan adecuadamente las principales fachadas marítimas españolas (Norte, Oeste, Sur y Este peninsular), así como dos boyas adicionales en el Archipiélago Canario (fachadas norte y sur), que constituyen el caso de estudio principal del trabajo.
- **Calidad y continuidad del registro:** se han priorizado boyas con series temporales suficientemente largas, con una cobertura temporal adecuada y sin interrupciones prolongadas que comprometan el análisis extremal.
- **Compatibilidad temporal:** se ha verificado la existencia de periodos de solape efectivos entre los registros de boya y los distintos tramos de la serie SIMAR, condición necesaria para la comparación directa entre datos modelizados y observados.

- **Uso habitual como referencia instrumental** en estudios de validación y análisis de clima marítimo en España.

Las boyas se consideran en este trabajo como una **fente independiente de referencia**, sin asumirlas a priori como “verdad absoluta”, sino como el mejor registro instrumental disponible frente al cual contrastar la coherencia y estabilidad de los resultados derivados de los modelos numéricos.

### 5.1.2. Criterios de selección de los puntos SIMAR

Los nodos SIMAR se han seleccionado con base en los siguientes criterios:

- **Proximidad espacial a la boya asociada**, de forma que ambos registros estén sometidos a condiciones de generación y propagación del oleaje comparables a escala regional.
- **Disponibilidad temporal de datos**: se ha priorizado la selección de nodos con series largas y continuas, que permiten descomponer la base SIMAR en los distintos periodos de modelización oficiales (SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE).
- **Interés desde el punto de vista del diseño marítimo**: los nodos seleccionados corresponden a zonas de uso habitual en estudios de clima marítimo y en el dimensionamiento de obras portuarias y costeras, lo que refuerza la aplicabilidad práctica de los resultados.
- **Posibilidad de comparación con registros instrumentales**: se ha comprobado la existencia de boyas operativas cercanas, con un solape temporal suficiente para permitir comparaciones modelo-medida consistentes.

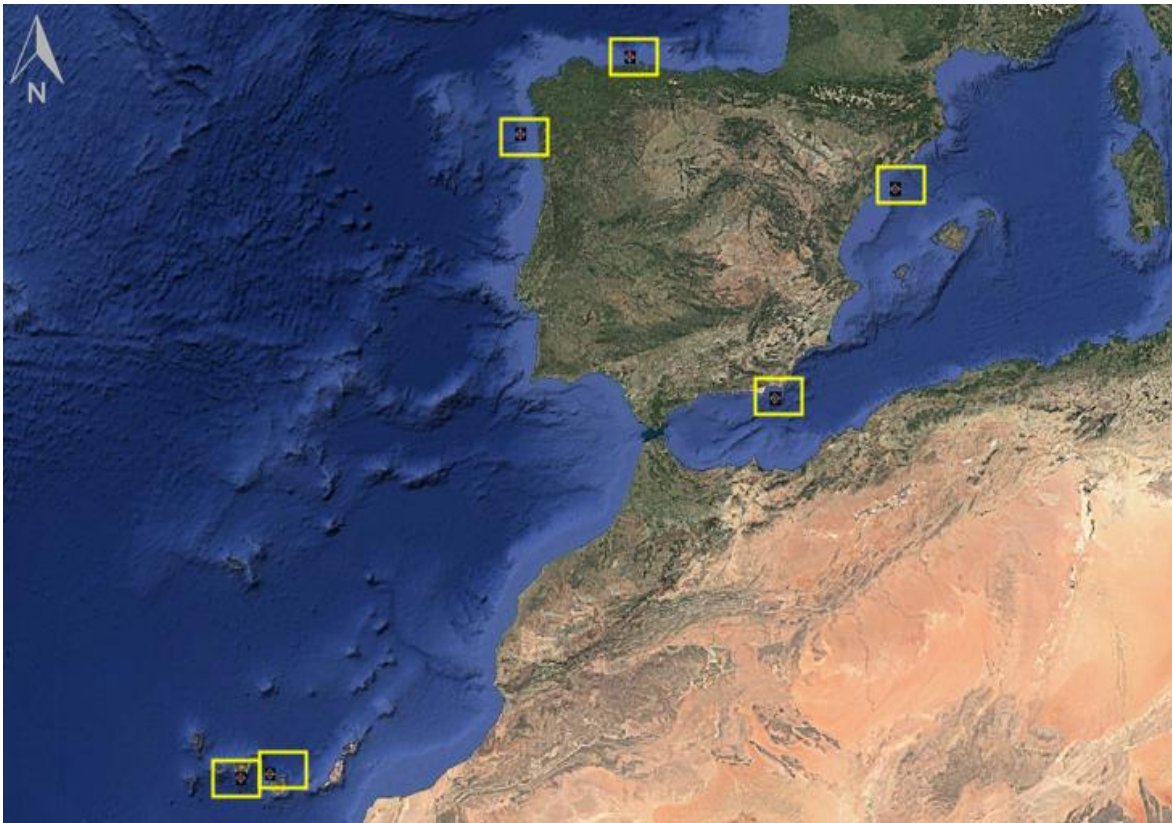
Cada punto SIMAR se analiza tanto considerando el periodo completo disponible como de forma segmentada en función de las distintas versiones de modelo que lo componen, permitiendo evaluar explícitamente el efecto de las actualizaciones del sistema de modelización sobre el régimen de oleaje extremo.

### 5.1.3. Estructura espacial del conjunto de puntos analizados

De acuerdo con los criterios anteriores, el conjunto final de puntos seleccionados se estructura de la siguiente forma:

- **Costa peninsular:**
  - Fachada Norte (Atlántico): Boya de Cabo de Peñas- Punto SIMAR 3080042
  - Fachada Oeste (Atlántico): Boya de Cabo Silleiro- Punto SIMAR 3002002
  - Fachada Sur (Mediterráneo): Boya Cabo de Gata- Punto SIMAR 2056079
  - Fachada Este (Mediterráneo): Boya de Tarragona- Punto SIMAR 2102128
  
- **Archipiélago Canario:**
  - Fachada Norte (Atlántico) Boya de Gran Canaria- Punto SIMAR 1017013
  - Fachada Sur (Atlántico): Boya de Tenerife- Punto SIMAR 4023009

Esta selección permite analizar, de forma coherente y comparable, cómo las distintas versiones de los modelos SIMAR/WANA afectan al régimen de oleaje extremo en contextos oceanográficos diversos, y evaluar hasta qué punto dichas diferencias están respaldadas, o no, por los registros instrumentales.



**Figura 2.\_** Localización geográfica puntos SIMAR y Boyas seleccionados.  
Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía base de Google Earth.

#### **5.1.4. Vinculación con el resto de la metodología**

La selección de nodos SIMAR y boyas de referencia constituye el punto de partida del esquema metodológico desarrollado en este trabajo. Sobre esta base se articula, de forma secuencial y coherente, el conjunto de fases posteriores, que incluyen la obtención y trazabilidad de los datos, el tratamiento y depuración de las series temporales, la segmentación de los registros SIMAR en función de los distintos periodos de modelización, y la aplicación del análisis estadístico y extremal.

Este planteamiento garantiza que tanto los puntos SIMAR como las boyas instrumentales sean analizados bajo criterios homogéneos, permitiendo una comparación consistente entre modelos y registros observados, y asegurando la reproducibilidad y robustez del procedimiento adoptado, en línea con la práctica habitual en ingeniería marítima y costera.

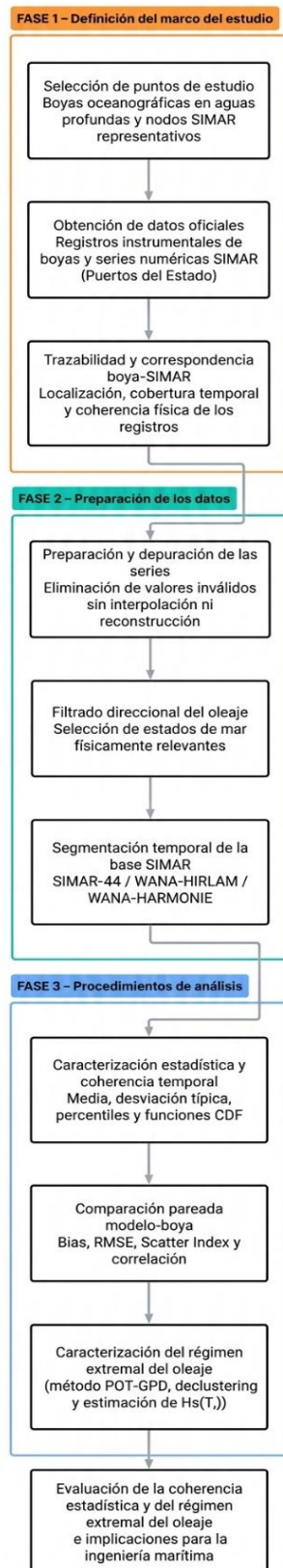
Con el fin de facilitar la comprensión global del procedimiento seguido, la Figura 3 presenta un diagrama de flujo sintético de la propuesta metodológica adoptada en el presente trabajo. El esquema resume las principales fases del análisis, desde la selección de los puntos de estudio y la preparación de las series hasta la caracterización estadística, la comparación modelo-boya y el análisis extremal del oleaje.

Este esquema permite situar de forma conjunta las distintas etapas del procedimiento y entender la relación existente entre los análisis desarrollados en los apartados siguientes.

#### **5.2. Obtención y trazabilidad de datos**

Los datos de oleaje empleados en el presente trabajo proceden exclusivamente de fuentes oficiales de Puertos del Estado, garantizando su trazabilidad, consistencia documental y uso conforme a las condiciones establecidas por dicho organismo.

La estrategia de obtención de datos se ha estructurado en dos niveles complementarios. Por un lado, registros instrumentales de oleaje procedentes de boyas oceanográficas, utilizados como referencia para la validación y comparación de los resultados del análisis estadístico y, por otro, series numéricas del conjunto SIMAR, empleadas como representación modelizada del clima marítimo en puntos próximos a las boyas seleccionadas.



**Figura 3.\_** Diagrama de flujo de la propuesta metodológica adoptada para el análisis de la homogeneidad estadística y del régimen extremal del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.1. Registros de boyas

Las series de oleaje procedentes de boyas oceanográficas empleadas en el presente estudio corresponden a registros instrumentales in situ integrados en la red de observación de Puertos del Estado. Estas series presentan una frecuencia temporal horaria, conforme a los estándares operativos del sistema instrumental, y abarcan periodos de registro prolongados, que se extienden desde mediados del año 1997 hasta la actualidad, en función del emplazamiento considerado.

Las boyas seleccionadas se localizan en aguas profundas, con el objetivo de disponer de registros representativos del oleaje incidente no alterado por efectos locales asociados a la interacción con el fondo marino o a procesos costeros de transformación del oleaje. Esta condición resulta especialmente relevante para garantizar la coherencia metodológica con los nodos SIMAR analizados y para la correcta comparación entre registros instrumentales y series numéricas.

Los registros instrumentales incluyen un conjunto de parámetros derivados del análisis espectral del oleaje, entre los que se encuentran la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el periodo de pico ( $T_p$ ). La altura significativa, definida como una magnitud integral representativa del contenido energético del estado de mar, constituye la variable principal empleada en el análisis estadístico y extremal desarrollado en este trabajo. El periodo de pico, asociado a la frecuencia espectral dominante, se utiliza como parámetro complementario para la caracterización del oleaje y para el análisis conjunto de la estructura energética de los temporales.

La obtención de los datos de boya se ha realizado a través del portal oficial de Puertos del Estado (Portus), utilizando los formatos suministrados por el propio organismo. En todos los casos se ha preservado íntegramente la estructura original de los ficheros y los metadatos asociados, garantizando la trazabilidad de la información, la coherencia interna de las series temporales y la reproducibilidad del análisis llevado a cabo.

### 5.2.2. Series numéricas SIMAR

Una vez seleccionada cada boya de referencia, se ha asociado a la misma un nodo del conjunto SIMAR de Puertos del Estado situado en su entorno próximo. La selección del nodo SIMAR se ha realizado atendiendo a criterios de proximidad espacial y representatividad regional del clima marítimo dominante, evitando asumir a priori una equivalencia estadística entre las series numéricas y los registros instrumentales. La evaluación de dicha equivalencia, así como de sus

posibles limitaciones, constituye precisamente uno de los objetivos centrales del presente Trabajo Fin de Máster.

El conjunto SIMAR está constituido por series temporales de oleaje obtenidas a partir de modelización numérica, y no de registros instrumentales directos. Estas series se generan mediante la aplicación de modelos espectrales de oleaje forzados por campos atmosféricos históricos, proporcionando estimaciones continuas de los principales parámetros del oleaje. La base de datos SIMAR ofrece información horaria desde 1958 hasta la actualidad, con una cobertura espacial extensa en el entorno marítimo español, tanto en aguas abiertas como en zonas próximas a la costa.

La serie SIMAR no responde a una única configuración de modelización invariable en el tiempo, sino que integra resultados correspondientes a distintas etapas operativas, asociadas a diferentes modelos atmosféricos y configuraciones de oleaje que han ido evolucionando a lo largo de las décadas. La identificación y segmentación temporal de estas etapas de modelización, así como su tratamiento diferenciado, se aborda de forma específica en el apartado 5.4, al constituir un elemento clave en el análisis de la coherencia temporal de la base de datos.

En el marco del presente estudio se han considerado exclusivamente puntos SIMAR representativos de condiciones del oleaje en aguas profundas. De este modo, los datos analizados son coherentes con los registros de boya empleados como referencia y con el objetivo de caracterizar el oleaje no afectado por efectos locales de fondo o de interacción con estructuras.

Conviene señalar que, según la documentación oficial de Puertos del Estado, los datos SIMAR resultan adecuados para la caracterización del clima marítimo regional. No obstante, el propio organismo advierte que, en situaciones de temporales muy extremos, los modelos numéricos pueden presentar limitaciones en la reproducción de los valores máximos de altura de ola, recomendándose la comparación con registros instrumentales siempre que estos se encuentren disponibles.

### **5.2.3. Trazabilidad y coherencia temporal**

Para cada punto de estudio se ha definido de forma explícita la serie de boya empleada, su intervalo temporal efectivo de registro, el punto SIMAR asociado y la cobertura temporal correspondiente, así como la relación espacial entre ambos puntos. Esta correspondencia se ha documentado mediante la identificación de las coordenadas y la profundidad característica de cada emplazamiento, con el fin de asegurar una correcta contextualización física de los datos utilizados.

Los datos descargados, tanto de boyas como de nodos SIMAR, se han conservado íntegramente en su formato original, sin introducir modificaciones estructurales en los ficheros fuente. Cualquier tratamiento posterior, incluyendo filtrado, segmentación temporal o análisis estadístico y extremal, se ha realizado exclusivamente sobre copias derivadas de las series originales, manteniendo en todo momento la trazabilidad entre los resultados obtenidos y los registros de partida.

Esta aproximación metodológica garantiza que todas las comparaciones desarrolladas en el presente Trabajo Fin de Máster se apoyan en datos plenamente identificables, reproducibles y coherentes con las especificaciones técnicas de Puertos del Estado. Asimismo, evita introducir supuestos implícitos sobre la calidad, homogeneidad o consistencia temporal de las series, aspectos que se abordan y evalúan de forma explícita en los apartados de resultados.

### **5.3. Preparación y tratamiento de los datos**

Una vez obtenidas las series temporales de oleaje correspondientes a los registros instrumentales de boya y a los nodos SIMAR asociados, se ha llevado a cabo una fase básica de preparación de los datos, previa a los análisis estadísticos y extremales.

El objetivo de esta fase ha sido garantizar que las series empleadas no contengan registros manifiestamente inválidos desde el punto de vista técnico, manteniendo en todo momento la trazabilidad y la integridad de la información original.

El tratamiento aplicado ha sido intencionadamente limitado y transparente, restringiéndose exclusivamente a la identificación y eliminación de valores erróneos explícitamente codificados en los ficheros suministrados por Puertos del Estado. En particular, se han considerado como no válidos aquellos registros que presentan valores de relleno convencionales empleados por el organismo para indicar ausencia de dato o fallo de medida, tales como **-9999.9**, según el campo y el formato del fichero.

A modo ilustrativo, la Figura 4 muestra un extracto representativo de un fichero original de boya, donde se observan valores codificados como **-9999.9**, empleados por Puertos del Estado para indicar ausencia de dato. Estos registros han sido excluidos del análisis.

Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo	Altura Signif. del Oleaje(m)	Periodo Medio Tm(s)	Periodo de Pico(s)	Distancia del Oleaje a la Orilla (m)	Intensidad de la Ola	Mediana de la Oleaje	Medio de Proced.(0-1)	Medio de proced.	Pico de obtencion de los dato
6	7	1998	20	0	0 0.83	3.87	6.4	1.16	5.36	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
6	7	1998	21	0	0 1.0	3.79	5.69	1.45	6.2	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
6	7	1998	22	0	0 1.34	4.02	5.12	2.09	5.65	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
6	7	1998	23	0	0 1.53	4.1	4.92	2.6	5.16	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	0	0	0 1.6	4.2	5.94	2.44	6.0	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	1	0	0 1.36	3.97	5.81	2.09	5.71	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	2	0	0 1.34	3.99	4.92	2.32	5.21	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	3	0	0 1.44	4.05	4.74	2.38	4.87	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	4	0	0 1.37	4.02	5.01	2.09	5.28	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	5	0	0 1.34	4.06	5.02	1.95	4.64	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
7	7	1998	6	0	0 1.31	4.04	5.69	2.24	5.87	1	-9999.9	-9999.9	-9999.9	2
16	8	2002	17	0	0 1.99	8.13	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9
16	8	2002	18	0	0 1.87	8.13	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9
16	8	2002	19	0	0 1.76	7.97	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9
16	8	2002	20	0	0 1.76	7.97	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9
16	8	2002	21	0	0 1.52	7.81	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9
16	8	2002	22	0	0 1.52	8.13	-9999.9	-9999.9	-9999.9	3	-9999.9	-9999.9	-9999.9	-9999.9

**Figura 4.\_** Extracto representativo de un fichero original de boya, donde se identifican valores de ausencia de dato codificados como -9999.9, empleados como criterio de filtrado previo.

Fuente: Elaboración propia.

Este criterio se ha aplicado de forma uniforme a todas las variables analizadas, tanto en las series de boya como en las series SIMAR, sin introducir correcciones adicionales ni sustituciones de valores. Los registros identificados como no válidos han sido excluidos del análisis, sin recurrir a interpolación temporal, reconstrucción de series ni suavizado de datos, con el fin de no alterar la estructura estadística original de las series temporales.

Las series resultantes se han mantenido en su resolución temporal original (horaria), conservando la totalidad de los registros válidos disponibles tras el filtrado descrito. No se ha aplicado ningún tipo de integración conjunta temporal ni sincronización forzada entre registros de boya y modelo, dado que los análisis posteriores se centran en propiedades estadísticas globales y no en la comparación directa de eventos individuales.

Este enfoque garantiza que los análisis desarrollados en el presente TFM se apoyan en datos observados y modelizados tratados de forma coherente, reproducible y plenamente trazable, evitando introducir supuestos implícitos sobre la calidad, homogeneidad o fiabilidad de las series, que constituyen precisamente uno de los aspectos a evaluar en el estudio comparativo entre modelos SIMAR y registros instrumentales.

#### 5.4. Filtrado direccional y segmentación por sectores de oleaje

Con el fin de centrar el análisis estadístico y extremal en los estados de mar con capacidad real de incidir sobre las franjas costeras objeto de estudio, se ha aplicado un filtrado direccional previo a las series de oleaje analizadas, tanto en los registros de las boyas como de los puntos SIMAR. Este

filtrado se concibe como un criterio de selección física del oleaje incidente, orientado a discriminar aquellos frentes de oleaje tipo *swell* potencialmente relevantes desde el punto de vista de la exposición costera, descartando direcciones que no aportan información significativa para los objetivos del trabajo.

El filtrado direccional se ha definido atendiendo a la orientación general del litoral y a la exposición marítima dominante de cada ámbito regional, de modo que el análisis extremal se restringe a los sectores direccionales desde los que el oleaje puede alcanzar la franja costera considerada. Este planteamiento permite focalizar el análisis en el oleaje incidente físicamente relevante y evitar la inclusión de estados de mar asociados a direcciones cuya contribución resulta marginal o nula en el contexto del estudio.

Dado que el objetivo del trabajo es evaluar la homogeneidad estadística entre etapas del sistema de modelización en aguas profundas, y no definir condiciones específicas de diseño para una obra concreta, no se ha desarrollado una sectorización extremal independiente por subsectores angulares. Este nivel de desagregación, recomendable en estudios de proyecto detallado, se plantea como línea futura de investigación.

Conviene señalar que el presente TFM no tiene por objeto el análisis detallado de los efectos de sombra, abrigo o transformación del oleaje debidos a obstáculos geográficos, ni la evaluación cuantitativa de dichos procesos mediante modelos de propagación. En consecuencia, no se ha realizado ningún tipo de corrección direccional basada en cálculos de difracción, refracción o bloqueo del oleaje.

No obstante, en determinados ámbitos de estudio se ha considerado oportuno tener en cuenta, de forma cualitativa y prudente, la presencia de obstáculos geográficos claramente dominantes y próximos al punto de medida, cuando estos introducen una limitación evidente a la llegada del oleaje desde ciertos sectores direccionales. En estos casos, la exclusión de direcciones no responde a un análisis de sombra propiamente dicho, sino a un criterio físico básico de selección del oleaje potencialmente incidente.

Este planteamiento se ha aplicado, por ejemplo, en la fachada norte del archipiélago canario, donde la proximidad de islas de gran entidad al emplazamiento de la boya de Gran Canaria condiciona de forma directa la llegada del oleaje desde determinados sectores. En estos casos, se han descartado direcciones cuya incidencia queda claramente limitada por la configuración insular inmediata.



**Figura 5.\_ Direcciones de oleaje incidentes consideradas en el análisis Boya Gran Canaria-Punto SIMAR 1017013.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

En el ámbito mediterráneo, y en particular en puntos como la boya de Tarragona, se es consciente de que la presencia del archipiélago balear puede influir en la propagación del oleaje desde determinados sectores direccionales. No obstante, en este caso se ha optado deliberadamente por no introducir una segmentación direccional adicional asociada a posibles efectos de sombra lejana, manteniendo un único sector direccional coherente con la exposición regional del litoral.

La definición de múltiples sectores direccionales para un mismo punto de estudio, en función de distintos grados de abrigo o bloqueo, implicaría una ampliación significativa del análisis, con la consiguiente multiplicación de casos y resultados, y excedería el alcance metodológico y los objetivos del presente TFM. Dado que el propósito principal del trabajo es evaluar la coherencia temporal de los registros de oleaje y el efecto de las distintas etapas de modelización sobre el régimen extremal, se ha considerado que dicha ampliación no resulta necesaria ni proporcional a la finalidad del estudio.

En todos los casos, el filtrado direccional se ha aplicado de forma coherente tanto a los registros instrumentales de boya como a los puntos SIMAR asociados, utilizando la dirección del oleaje como variable de referencia. Los registros excluidos no han sido modificados ni corregidos, sino simplemente descartados del análisis posterior, preservando en todo momento la integridad y trazabilidad de las series originales.

Este enfoque metodológico permite concentrar el análisis extremal en el oleaje incidente relevante desde un punto de vista físico, evitando introducir hipótesis implícitas sobre procesos de propagación no abordados en el presente trabajo, y garantizando al mismo tiempo la coherencia interna, la transparencia y el rigor técnico de la metodología aplicada.

### 5.5. Segmentación de las series SIMAR por periodos de modelización

Una vez obtenidas y depuradas las series temporales de oleaje correspondientes a cada punto SIMAR, se ha realizado su segmentación temporal en función de las distintas etapas de modelización que componen la base de datos SIMAR, de acuerdo con la información técnica y los rangos cronológicos establecidos por Puertos del Estado. Las principales características de cada una de las etapas de modelización consideradas se resumen en la Tabla 1.

Esta segmentación responde a la constatación de que la serie SIMAR no constituye una única serie homogénea desde el punto de vista de su generación, sino que integra resultados procedentes de diferentes configuraciones de modelos atmosféricos y de oleaje, con resoluciones espaciales y temporales variables, que han ido evolucionando a lo largo del tiempo. La separación explícita de estos periodos permite analizar de forma diferenciada la coherencia interna de cada etapa y evaluar su influencia sobre los resultados estadísticos y del análisis extremal.

En este trabajo, la serie SIMAR completa se ha descompuesto en tres subseries, correspondientes a las principales etapas operativas identificadas por Puertos del Estado, que se describen a continuación.

**Tabla 1.** \_Etapas de modelización de la base de datos SIMAR consideradas en el estudio.

Etapa SIMAR	Periodo temporal	Sistema atmosférico	Modelo(s) de oleaje	Resolución temporal oleaje	Observaciones
SIMAR-44	1958–2005	RCA3.5 (ERA-40 / ERA-Interim)	WaveWatch III	Horaria	Reanálisis climático de largo plazo
WANA-HIRLAM	2006–2018	HIRLAM	WAM / WaveWatch III	3–6 h → horaria (desde 2012)	Periodo transicional
WANA-HARMONIE	2018–actualidad	HARMONIE-AROME	WAM / WaveWatch III	Horaria	Referencia operativa actual

*Fuente: Elaboración propia a partir de la información técnica de Puertos del Estado. La tabla resume las principales características de las distintas etapas de modelización que componen la base de datos SIMAR. Los rangos temporales y configuraciones indicados se corresponden con la información técnica proporcionada por Puertos del Estado y se emplean exclusivamente con fines de segmentación metodológica de las series.*

### 5.5.1. SIMAR-44 (1958-2005)

El primer periodo corresponde al denominado SIMAR-44, basado en reconstrucciones climáticas de largo plazo. En esta etapa, el oleaje se obtiene mediante el modelo espectral WaveWatch III, forzado por campos de viento generados a partir del modelo atmosférico regional RCA3.5 de AEMET, a su vez alimentado por los reanálisis globales ERA-40 (1958-2000) y ERA-Interim (2001-2005).

Durante este periodo, la serie de oleaje presenta ya una resolución temporal horaria, con mallas de resolución variable en función del dominio considerado, que oscilan entre resoluciones del orden de decenas de kilómetros en dominios abiertos y resoluciones más finas en áreas anidadas de interés regional, como el Golfo de Cádiz, Canarias o el litoral cantábrico. La duración de este periodo, cercana a cinco décadas, lo convierte en el tramo con mayor longitud temporal dentro de la base de datos SIMAR.

### 5.5.2. WANA-HIRLAM (2006-2018)

El segundo periodo corresponde a la etapa WANA-HIRLAM, asociada a la explotación operativa del sistema WANA, forzado por el modelo atmosférico HIRLAM, con una resolución espacial y temporal sensiblemente superior a la de los reanálisis climáticos anteriores.

En esta etapa se emplean distintos modelos espectrales de oleaje, fundamentalmente WAM y WaveWatch III, con esquemas de anidamiento progresivamente más refinados. La resolución temporal del oleaje evoluciona dentro del propio periodo, pasando de cadencias de 3-6 horas en los primeros años a una resolución horaria a partir de 2012, en paralelo a mejoras en el forzamiento atmosférico y en las configuraciones de malla, que alcanzan resoluciones del orden de pocos kilómetros en numerosos dominios costeros.

### 5.5.3. WANA-HARMONIE (2018-actualidad)

El tercer periodo corresponde al sistema WANA-HARMONIE, operativo desde finales de 2018, forzado por el modelo atmosférico HARMONIE-AROME, caracterizado por una resolución espacial y temporal aún más elevada. En esta etapa, tanto los campos de viento como las variables de oleaje presentan resolución horaria, y se emplea un sistema jerárquico de mallas anidadas que alcanza resoluciones del orden de 2 km o inferiores en áreas de especial interés, como Canarias, Baleares o el Estrecho de Gibraltar.

Este periodo representa el estado actual del sistema SIMAR y constituye la referencia operativa más reciente para la caracterización del clima marítimo modelizado.

#### **5.5.4. Correspondencia temporal con los registros de boya**

Con el fin de garantizar la coherencia en el análisis comparativo entre series numéricas y registros instrumentales, los datos de boya se han segmentado, dentro de su propia cobertura temporal, en subperiodos coincidentes con las etapas de modelización de la serie SIMAR. De este modo, el análisis se ha estructurado en tres intervalos temporales equivalentes: hasta 2005, entre 2006 y 2018, y desde 2018 hasta la actualidad.

Esta estrategia permite evaluar de forma consistente las diferencias estadísticas y extremas entre modelos y registros instrumentales dentro de cada etapa de modelización, evitando comparaciones implícitas entre series generadas bajo configuraciones numéricas sustancialmente distintas.

La segmentación descrita en este apartado constituye un elemento central de la metodología, al permitir aislar el efecto de las sucesivas actualizaciones de los modelos atmosféricos y de oleaje sobre los resultados obtenidos, y sienta la base para el análisis de coherencia temporal y de sensibilidad de los extremos desarrollado en los apartados posteriores.

#### **5.6. Caracterización estadística de las series y análisis de coherencia temporal**

Una vez establecida la segmentación temporal de la base de datos SIMAR conforme a sus distintas etapas de modelización, se plantea la necesidad de caracterizar estadísticamente las series resultantes y evaluar su coherencia temporal. Este paso constituye un elemento central de la metodología, ya que permite analizar de forma objetiva el comportamiento de las magnitudes de oleaje a lo largo del tiempo y valorar en qué medida los cambios introducidos en los sistemas de modelización pueden dar lugar a discontinuidades estadísticas en las series numéricas.

El objetivo de este apartado no es validar un modelo concreto ni cuantificar su ajuste respecto a la observación, sino examinar la consistencia interna de las series y detectar posibles cambios estructurales en su comportamiento estadístico asociados a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización. Este enfoque resulta especialmente relevante en el caso de SIMAR, cuya serie temporal no es homogénea desde el punto de vista metodológico y combina diferentes configuraciones numéricas, forzamientos atmosféricos y resoluciones espaciales, siguiendo una lógica similar a la de otros productos de reanálisis ampliamente utilizados en climatología y ciencias atmosféricas (Von Storch y Zwiers, 1999; Wilks, 2011).

En el marco del presente trabajo, se entiende por homogeneidad temporal la invariancia de las propiedades estadísticas fundamentales de la serie de oleaje frente a la segmentación por etapas de modelización, en ausencia de cambios físicos significativos en el forzamiento climático. Esta homogeneidad se evalúa tanto en el régimen medio (medias y percentiles intermedios) como en la estructura de la cola alta de la distribución, de especial interés para el análisis extremal.

En este contexto, se denomina incertidumbre estructural a la variabilidad en las estimaciones estadísticas y extremales que no puede atribuirse a la variabilidad natural del clima marítimo ni al error muestral, sino a diferencias inherentes a la configuración, forzamiento y dominio de los sistemas de modelización empleados en cada etapa.

La caracterización estadística se aborda mediante un análisis sin emparejamiento temporal, en el que cada serie se analiza de forma independiente, sin exigir coincidencia exacta entre los instantes temporales del modelo y de la boya. Este planteamiento permite estudiar la evolución de los estadísticos de oleaje sin que los resultados estén condicionados por la disponibilidad simultánea de datos observados, lo que resulta fundamental para evaluar tendencias internas y posibles rupturas estadísticas en series de larga duración.

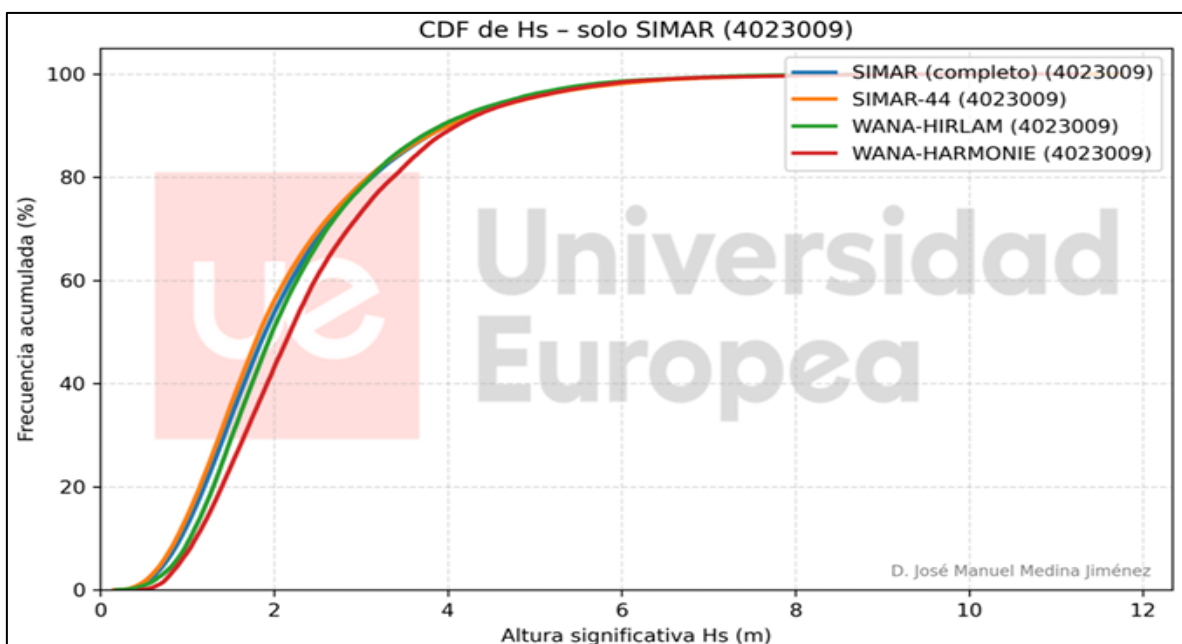
El análisis se aplica tanto a las series numéricas SIMAR como a los registros instrumentales de las boyas de Puertos del Estado, considerando en ambos casos únicamente los periodos en los que existen datos válidos y aplicando criterios homogéneos de filtrado direccional y depuración de registros. En el caso de las boyas, la segmentación temporal se realiza exclusivamente sobre los intervalos que presentan solape real con cada una de las etapas SIMAR, con el fin de garantizar la coherencia metodológica entre periodos analizados.

La caracterización estadística incluye el cálculo de estadísticos descriptivos básicos y de percentiles representativos tanto del régimen medio como de la cola alta de la distribución del oleaje, así como la obtención de funciones de distribución acumulada (CDF) para las variables principales consideradas. Estas herramientas permiten describir de forma integral la estructura estadística de las series y evaluar si los distintos bloques temporales presentan comportamientos compatibles o si, por el contrario, evidencian diferencias sistemáticas atribuibles a los cambios de modelización.

Desde el punto de vista metodológico, este análisis persigue responder, de manera ordenada y objetiva, a las siguientes cuestiones fundamentales:

- Determinar si las distintas etapas de modelización de SIMAR pueden considerarse estadísticamente coherentes entre sí o si introducen cambios apreciables en la distribución de las variables de oleaje.
- Identificar si dichos cambios afectan de manera similar al régimen medio y al régimen alto, o si se concentran preferentemente en los percentiles elevados, de especial interés para aplicaciones de ingeniería marítima.
- Evaluar en qué medida las series instrumentales de boya muestran una estructura estadística estable a lo largo del tiempo, sirviendo como referencia instrumental para contextualizar la evolución de las series numéricas.

El análisis de coherencia temporal desarrollado en este apartado constituye, por tanto, un paso previo imprescindible antes de abordar tanto la comparación directa modelo-boya como el análisis extremal del oleaje. Sólo a partir de una caracterización estadística rigurosa y segmentada es posible interpretar correctamente las diferencias observadas entre modelos y registros instrumentales, así como valorar el impacto real de las actualizaciones de los sistemas de modelización sobre el régimen de oleaje y sus extremos.



**Figura 6.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) correspondientes a las distintas etapas de modelización SIMAR.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.7. Comparación pareada modelo-boya en periodos de solape temporal

Una vez caracterizada la estructura estadística interna de las series y evaluada su coherencia temporal, se aborda la comparación directa entre los registros numéricos de SIMAR y los registros instrumentales de boya. A diferencia del análisis desarrollado en el apartado anterior, este contraste se plantea mediante un enfoque pareado, restringido exclusivamente a los instantes temporales en los que existe coincidencia exacta entre ambas fuentes de datos, tal y como es habitual en la evaluación comparativa de modelos de oleaje frente a mediciones in situ.

El objetivo de este análisis no es evaluar la homogeneidad temporal de las series, sino cuantificar el desempeño relativo de las distintas etapas de modelización de SIMAR frente a los registros instrumentales, identificando la presencia de diferencias recurrentes en el comportamiento estadístico, niveles de dispersión y posibles diferencias en la capacidad de representación de las principales variables de oleaje. Este planteamiento permite analizar en qué medida las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización se traducen en cambios en la capacidad de reproducir las magnitudes observadas, bajo un marco de comparación estrictamente controlado en el tiempo, siguiendo prácticas ampliamente utilizadas en la validación de modelos de oleaje (Caires y Sterl, 2005; Bidlot et al., 2007).

La comparación pareada se realiza considerando únicamente la intersección temporal exacta entre cada bloque SIMAR y la serie de boya correspondiente, de modo que cada par de valores analizados comparte el mismo instante temporal. Este criterio garantiza que las diferencias identificadas no estén condicionadas por la variabilidad natural del clima marítimo entre periodos distintos, sino que puedan atribuirse, de forma preferente, a las características propias de cada etapa de modelización y a su formulación numérica.

El análisis se desarrolla de manera diferenciada para la serie SIMAR completa y para cada una de las etapas de modelización consideradas (SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE), lo que permite evaluar de forma específica el efecto de cada configuración del modelo. La comparación se centra en las variables principales del estudio (altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) y periodo de pico ( $T_p$ )) y se apoya en un conjunto de métricas estadísticas y representaciones gráficas habitualmente empleadas en la evaluación comparativa de modelos de oleaje.

En particular, se emplean diagramas de dispersión modelo-boya, junto con indicadores cuantitativos como el sesgo medio (bias), el error cuadrático medio (RMSE), el índice de dispersión (Scatter Index) y el coeficiente de correlación lineal. Estas métricas permiten caracterizar de forma

complementaria la magnitud del error, la dispersión relativa y el grado de asociación lineal entre modelo y observación, facilitando una interpretación comparativa entre las distintas etapas de modelización sin recurrir a umbrales absolutos de aceptación, en coherencia con el objetivo del estudio y con enfoques habituales en la literatura (Taylor, 2001).

Este análisis pareado constituye un paso intermedio fundamental entre la caracterización estadística no condicionada temporalmente y el análisis extremal del oleaje. Sus resultados proporcionan el contexto necesario para interpretar, en los apartados posteriores, las diferencias observadas en el régimen extremal y valorar en qué medida estas pueden estar relacionadas con cambios en la capacidad del modelo para reproducir los estados de mar más energéticos.

### **5.8. Caracterización del régimen extremal del oleaje mediante el método POT-GPD**

Con el fin de caracterizar el comportamiento de los eventos de oleaje más energéticos y evaluar el efecto de las distintas etapas de modelización sobre el régimen extremal, se ha aplicado un enfoque basado en la teoría de valores extremos mediante el análisis de excedencias sobre umbral (*Peaks Over Threshold*, POT), ajustando una distribución Generalizada de Pareto (GPD) a los valores seleccionados. Este planteamiento se apoya en el resultado clásico de la teoría de valores extremos según el cual, para umbrales suficientemente altos, la distribución de las excedencias converge a una GPD (Balkema y de Haan, 1974; Pickands, 1975), y constituye una metodología ampliamente empleada en climatología del oleaje y en aplicaciones de ingeniería marítima (Davison y Smith, 1990; Coles, 2001; Beirlant et al., 2004).

A diferencia de los análisis estadísticos desarrollados en los apartados anteriores, centrados en la estructura global de las series y en la comparación de estadísticos representativos, el análisis extremal se focaliza exclusivamente en la cola alta de la distribución de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ). Este enfoque permite describir de forma específica el comportamiento probabilístico de los estados de mar más severos y proporciona la base para la estimación de periodos de retorno asociados a periodos largos, de especial interés para el análisis de seguridad y la evaluación de infraestructuras marítimas.

El análisis POT-GPD se aplica tanto a las series numéricas SIMAR como a los registros instrumentales de boya, partiendo en todos los casos de series previamente depuradas y sometidas a filtrado direccional. En el caso de SIMAR, el análisis se realiza de forma independiente para cada una de las etapas de modelización consideradas, con el objetivo de evaluar el impacto de las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización sobre la representación del régimen extremal. En el

caso de las boyas, el análisis se lleva a cabo utilizando la totalidad de la serie temporal disponible hasta la fecha, sin segmentación por periodos, con el fin de maximizar la robustez estadística del ajuste y disponer de una referencia instrumental única y estable frente a la cual contextualizar los resultados obtenidos con los modelos numéricos.

Debe señalarse que los registros instrumentales de boya pueden presentar vacíos temporales asociados a fallos de transmisión o incidencias operativas durante episodios de oleaje intenso. Esta circunstancia es inherente a los sistemas de medida en mar abierto y puede implicar que algunos máximos asociados a temporales severos no queden completamente registrados en la serie instrumental. No obstante, con el fin de preservar la integridad del registro observado, no se ha realizado ninguna reconstrucción ni interpolación de dichos intervalos. En consecuencia, el análisis extremal se basa exclusivamente en los datos realmente registrados por las boyas, debiendo interpretarse los resultados correspondientes a la cola extrema teniendo en cuenta esta posible limitación del registro instrumental.

Dado que el enfoque POT requiere aproximar la independencia entre los eventos extremos, las excedencias sobre el umbral se someten a un proceso de *declustering* temporal. Las excedencias separadas por menos de una ventana fija se consideran pertenecientes a un mismo episodio energético y dicho episodio se representa mediante su valor máximo, reteniéndose un único pico independiente. En este estudio se adopta una ventana de 120 h (5 días), criterio operativo habitual en estudios de clima marítimo para minimizar la dependencia entre picos consecutivos en series de oleaje. De este modo, las excedencias se definen como:

$$y = H_{s,pico} - u$$

y se ajusta una distribución GPD a la variable  $y$ , definida con origen en el umbral  $u$ .

Bajo el marco POT clásico, se asume que la ocurrencia de picos independientes por encima del umbral sigue un proceso de Poisson con tasa anual  $\lambda$ , y que las excedencias  $y$  se distribuyen según una GPD (Davison y Smith, 1990; Coles, 2001). La función de distribución acumulada de la GPD puede expresarse como:

$$G(y) = 1 - \left(1 + \xi \frac{y}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}$$

$$y > 0, 1 + \xi \frac{y}{\sigma} > 0$$

donde  $\xi$  es el parámetro de forma y  $\sigma$  el parámetro de escala. A partir de este ajuste y de la tasa  $\lambda$ , los periodos de retorno  $z_T$  asociados a un periodo de retorno  $T$  se obtienen, en el marco POT, mediante:

$$z_T = u + \frac{\sigma}{\xi} [(\lambda T)^\xi - 1], (\xi \neq 0)$$

$$z_T = u + \sigma \ln(\lambda T), (\xi = 0)$$

lo que permite comparar de forma consistente el régimen extremal entre distintas series y etapas de modelización.

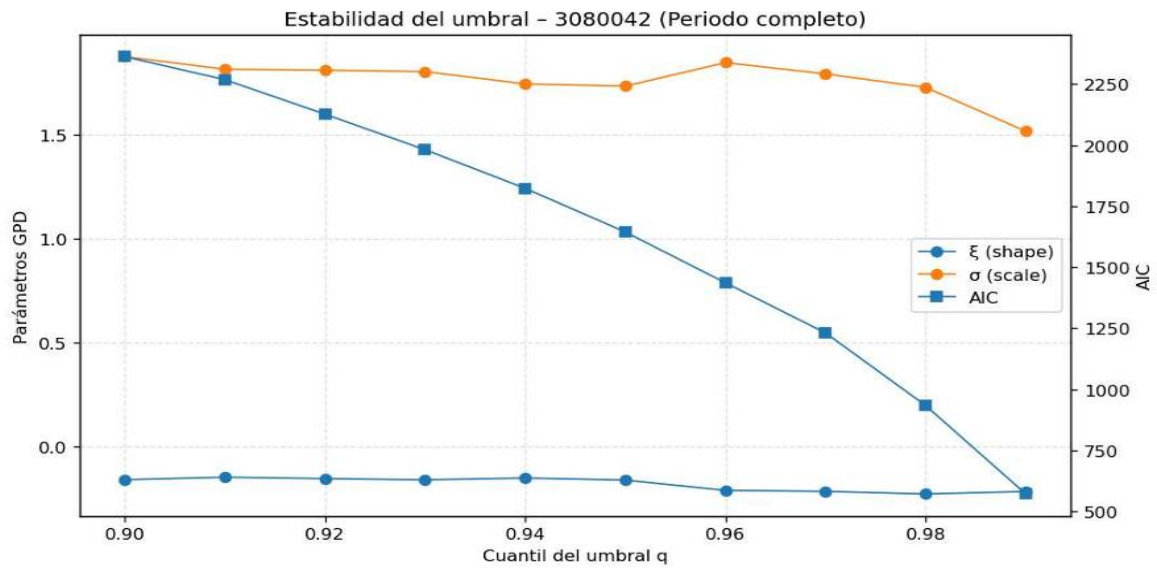
La selección del umbral  $u$  constituye un elemento crítico del análisis POT. En este trabajo, el umbral se determina de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La elección final del umbral se interpreta como un compromiso objetivo entre calidad de ajuste y parsimonia, evitando tanto la inclusión de estados de mar no estrictamente extremos (asociados a umbrales excesivamente bajos) como la pérdida de estabilidad estadística derivada de un número reducido de excedencias para umbrales demasiado altos (Coles, 2001; Beirlant et al., 2004).

No obstante, el valor del umbral obtenido mediante el criterio AIC no se adopta de forma automática, sino que se contrasta adicionalmente con los diagnósticos habituales de estabilidad de los parámetros de la GPD y con la tasa de excedencias resultante, con el objetivo de evitar la selección de umbrales excesivamente bajos que puedan incluir estados de mar no representativos del régimen extremal.

La idoneidad del umbral seleccionado y la robustez del ajuste se evalúan mediante diagnósticos estándar ampliamente aceptados en la literatura especializada:

1. El análisis de estabilidad de los parámetros  $\xi$  y  $\sigma$  frente a variaciones del umbral.
2. La inspección de gráficos cuantílico-cuantílico (QQ-plots), que permiten contrastar los cuantiles empíricos de las excedencias con los cuantiles teóricos de la distribución ajustada.

Estos diagnósticos permiten verificar la consistencia del modelo en la cola de la distribución y detectar posibles desviaciones sistemáticas en la representación de los valores extremos (Davison y Smith, 1990; Coles, 2001). A modo ilustrativo, la Figura 7 presenta un ejemplo representativo del análisis de estabilidad del umbral y del comportamiento del AIC que sustenta la selección adoptada en el presente estudio.

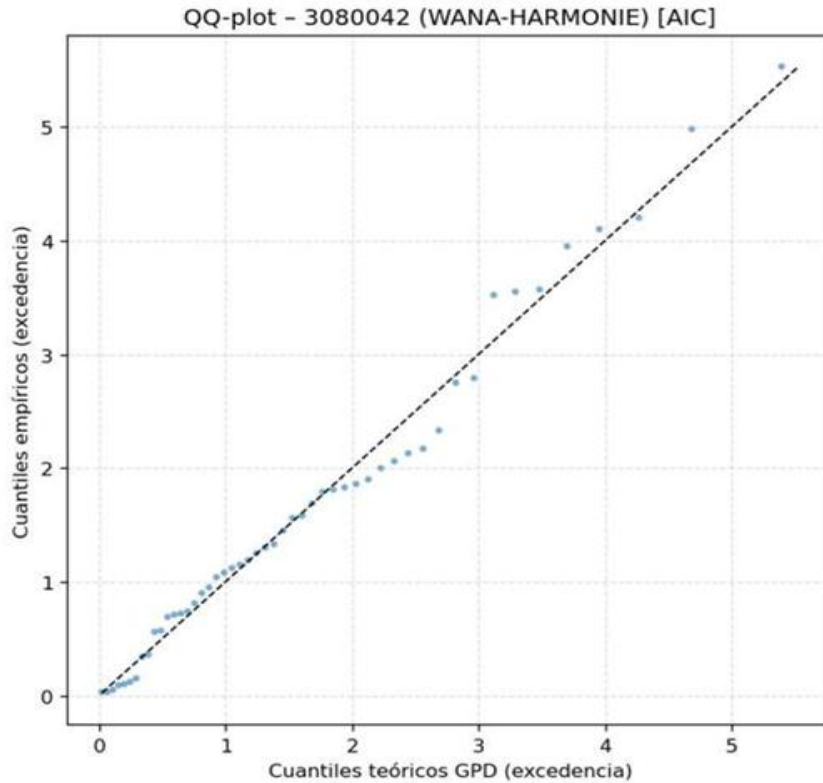


**Figura 7.\_** Análisis de estabilidad del umbral para el ajuste POT-GPD. Evolución de los parámetros de forma ( $\xi$ ) y escala ( $\sigma$ ) de la distribución Generalizada de Pareto, junto con el criterio de información de Akaike (AIC), en función del cuantil del umbral. La selección del umbral óptimo se basa en el compromiso entre la estabilidad de los parámetros y la minimización del AIC.

Fuente: Elaboración propia.

De forma complementaria, la calidad del ajuste se ha evaluado mediante gráficos cuantílico-cuantílico (QQ-plots) de las excedencias frente a la distribución GPD ajustada, de acuerdo con los diagnósticos estándar recomendados en la teoría de valores extremos (Davison y Smith, 1990; Coles, 2001). Estos gráficos permiten comprobar de manera visual la adecuación del modelo en la cola de la distribución, contrastando los cuantiles empíricos de las excedencias observadas con los cuantiles teóricos de la distribución ajustada, y detectar posibles desviaciones sistemáticas en la representación de los valores más extremos.

Un alineamiento próximo de los puntos respecto a la recta identidad indica una buena capacidad del modelo para reproducir el comportamiento probabilístico de los eventos extremos (Coles, 2001). La Figura 8 muestra un ejemplo representativo de QQ-plot correspondiente a una de las etapas de modelización analizadas, en el que se observa un alineamiento satisfactorio entre los cuantiles empíricos de las excedencias y los cuantiles teóricos de la GPD ajustada en la mayor parte del rango, sin evidenciar desviaciones sistemáticas. Las ligeras discrepancias observadas en los cuantiles más extremos son coherentes con la variabilidad esperable asociada a un número limitado de eventos y no comprometen la idoneidad del ajuste POT-GPD adoptado.



**Figura 8.\_** Gráfico cuantílico-cuantílico (QQ-plot) de las excedencias sobre el umbral frente a la distribución GPD ajustada, correspondiente al periodo WANA-HARMONIE. La línea discontinua representa el ajuste teórico ideal. Fuente: Elaboración propia.

Los criterios metodológicos empleados en este apartado se ajustan a las recomendaciones clásicas de la teoría de valores extremos y a prácticas consolidadas en estudios de oleaje y aplicaciones de ingeniería marítima (Balkema y de Haan, 1974; Pickands, 1975; Davison y Smith, 1990; Coles, 2001; Beirlant et al., 2004). Asimismo, el enfoque adoptado es coherente con la práctica habitual en la caracterización del régimen extremal del oleaje en el ámbito del diseño y evaluación de infraestructuras portuarias, tal y como se recoge en las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) y en manuales técnicos de referencia como el *Coastal Engineering Manual* del U.S. Army Corps of Engineers.

A efectos de facilitar la interpretación y comparación de los resultados extremales obtenidos, se han considerado como referencia periodos de retorno habitualmente empleados en ingeniería costera y portuaria, en particular valores del orden de 68, 225 y 475 años. Estos valores son representativos de los niveles de seguridad habitualmente adoptados en el dimensionamiento de infraestructuras marítimas y costeras de acuerdo con los criterios probabilísticos establecidos en las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM), que relacionan la probabilidad de fallo admisible con la vida útil y el tipo de infraestructura.

Dichos periodos de retorno se utilizan exclusivamente como puntos de comparación entre las distintas series y etapas de modelización analizadas, sin que ello implique en ningún caso un criterio de diseño ni una condición de validez del ajuste. La utilidad estadística de estimaciones asociadas a retornos largos depende de forma directa de la longitud del registro y del número de picos independientes disponibles. Por tanto, los resultados correspondientes a periodos de retorno elevados deben interpretarse con cautela, especialmente en series con cobertura temporal limitada, siendo su inclusión fundamentalmente orientativa y comparativa dentro del marco del presente estudio.

### **5.9. Herramientas de programación y análisis de datos**

La implementación de la metodología descrita en los apartados anteriores se ha llevado a cabo mediante el desarrollo de herramientas propias de programación, con el objetivo de garantizar un tratamiento homogéneo de los datos, la trazabilidad de los procesos aplicados y la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Dado el elevado volumen de información manejada, así como la necesidad de aplicar de forma sistemática criterios estadísticos y extremales a múltiples series temporales y periodos de modelización, se ha optado por un enfoque basado en procedimientos automatizados frente a métodos manuales.

El entorno de análisis empleado se basa en el lenguaje de programación Python, ampliamente utilizado en aplicaciones científicas y de ingeniería por su versatilidad, la disponibilidad de librerías especializadas y su capacidad para integrar de forma coherente el tratamiento de datos, el análisis estadístico y la generación de resultados gráficos y tabulares. El uso de este entorno permite una clara separación entre los datos de entrada, los procedimientos de análisis y los productos finales, facilitando la aplicación consistente de la metodología definida y la revisión crítica del proceso seguido.

Las herramientas desarrolladas permiten gestionar de forma unificada tanto las series numéricas procedentes de la base de datos SIMAR como los registros instrumentales de las boyas de Puertos del Estado, preservando en todo momento la estructura temporal original de los datos y evitando la introducción de interpolaciones o reconstrucciones no justificadas, ajenas a los registros originales. Las operaciones de filtrado direccional, depuración de valores erróneos, segmentación temporal por etapas de modelización y selección de subconjuntos de datos se realizan de manera explícita y controlada, garantizando que los análisis posteriores se fundamentan exclusivamente en información válida y comparable.

En el ámbito del análisis estadístico y extremal, las herramientas de programación integran de forma coherente los distintos pasos metodológicos descritos en los apartados 5.6, 5.7 y 5.8, incluyendo el cálculo de estadísticos descriptivos, la obtención de distribuciones acumuladas, la aplicación del enfoque POT-GPD, la selección automática del umbral mediante el criterio de información de Akaike, el declustering temporal de eventos extremos y la estimación de periodos de retorno, junto con la evaluación de la incertidumbre asociada. Este planteamiento metodológico permite aplicar criterios idénticos a todas las series analizadas, evitando sesgos derivados de decisiones ad hoc y facilitando la comparación objetiva entre las distintas etapas de modelización y los registros instrumentales.

Asimismo, los procedimientos implementados incorporan rutinas específicas para la generación de productos finales en formatos estándar, tales como tablas de resultados y representaciones gráficas reproducibles, que se integran directamente en los apartados de resultados y discusión del presente trabajo. La separación clara entre la fase de procesamiento de datos y la fase de análisis e interpretación garantiza que las conclusiones del estudio se apoyan en resultados obtenidos de forma sistemática, transparente y verificable.

En coherencia con el enfoque general del TFM, las herramientas de programación se conciben exclusivamente como un soporte metodológico para la aplicación rigurosa de los análisis estadísticos y extremales, y no como un objeto de estudio en sí mismas. Por este motivo, el trabajo se centra en la descripción de los criterios metodológicos adoptados y en la presentación e interpretación de los resultados obtenidos, sin incluir detalles de implementación informática, asegurando así que el contenido principal del documento permanece alineado con los objetivos científicos y de ingeniería marítima planteados.

## 6. CASOS DE ESTUDIO/APLICACIÓN A CASOS PRÁCTICOS

---

Una vez definida la metodología de análisis y las herramientas empleadas para la caracterización estadística y extremal del oleaje, en el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de su aplicación sistemática a los distintos puntos y tramos de costa analizados. El objetivo fundamental de este capítulo es trasladar el marco metodológico desarrollado en el Capítulo 5 a casos reales del litoral español, evaluando de forma cuantitativa el comportamiento de las distintas etapas de modelización de la base de datos SIMAR en comparación con los registros instrumentales de la red de boyas de Puertos del Estado.

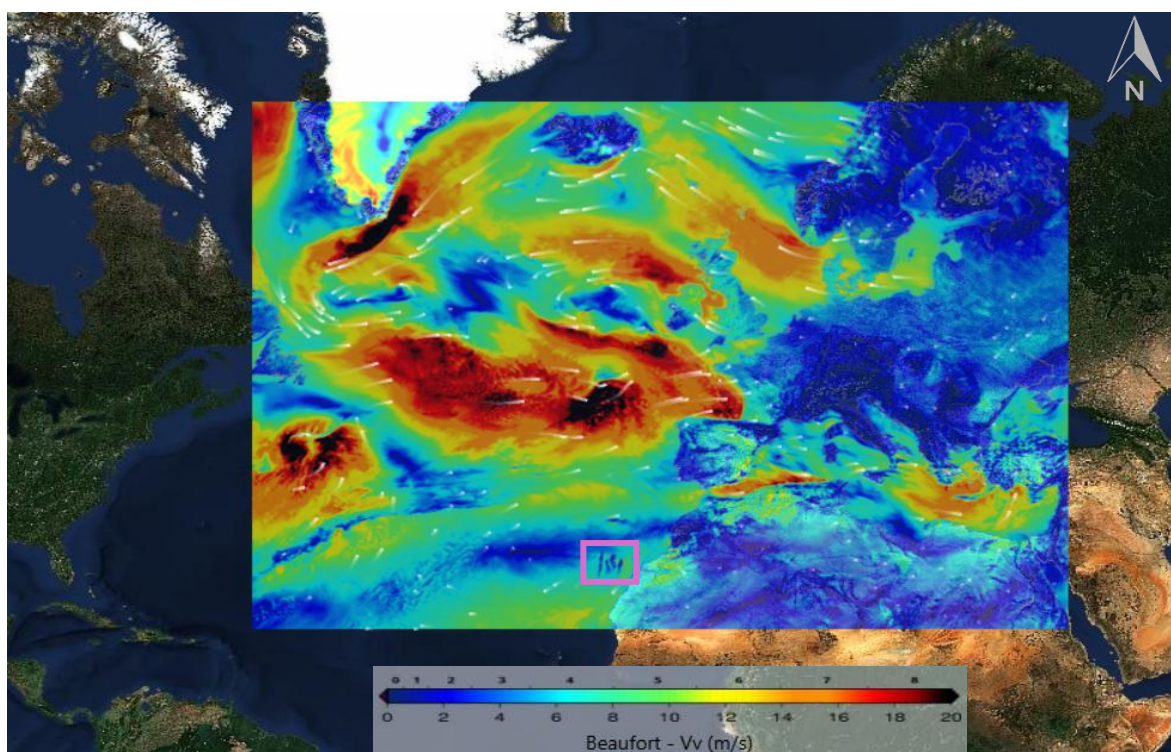
El análisis se estructura de forma progresiva y jerárquica, comenzando por la descripción del ámbito espacial de estudio y de los puntos considerados, para posteriormente presentar los resultados de los estadísticos básicos y del régimen extremal del oleaje a escala puntual. Este planteamiento permite, en una primera fase, identificar diferencias y tendencias asociadas a cada punto y a cada periodo de modelización y, en una segunda fase, integrar dichos resultados en comparaciones a escala de tramo de costa y de región, facilitando una interpretación coherente de los patrones espaciales observados.

En primer lugar, se describen los tramos de costa y los puntos de análisis seleccionados, incluyendo tanto nodos de la base de datos SIMAR como boyas instrumentales representativas de las distintas áreas de estudio. A continuación, se presentan los resultados de los estadísticos básicos del oleaje, desglosados por punto y por etapa de modelización, con el fin de establecer una base comparativa previa a la evaluación del régimen extremal. Sobre esta base, se analizan posteriormente los resultados del oleaje extremo obtenidos mediante el enfoque POT-GPD, comparando de forma directa los valores extremos estimados a partir de los modelos numéricos y de los registros instrumentales en cada localización.

Conviene señalar que las diferencias regionales que se analizan en este capítulo no responden únicamente a las características físicas propias del clima marítimo en cada tramo de costa, sino también a aspectos estructurales inherentes a los sistemas de modelización empleados. En particular, tanto los modelos de oleaje como los modelos atmosféricos que proporcionan su forzamiento operan sobre dominios espaciales finitos, definidos a escala oceánica y regional, con condiciones de contorno que pueden influir en la representación del oleaje, especialmente en lo relativo a la propagación de frentes de oleaje swell de origen remoto y a la generación local asociada al viento.

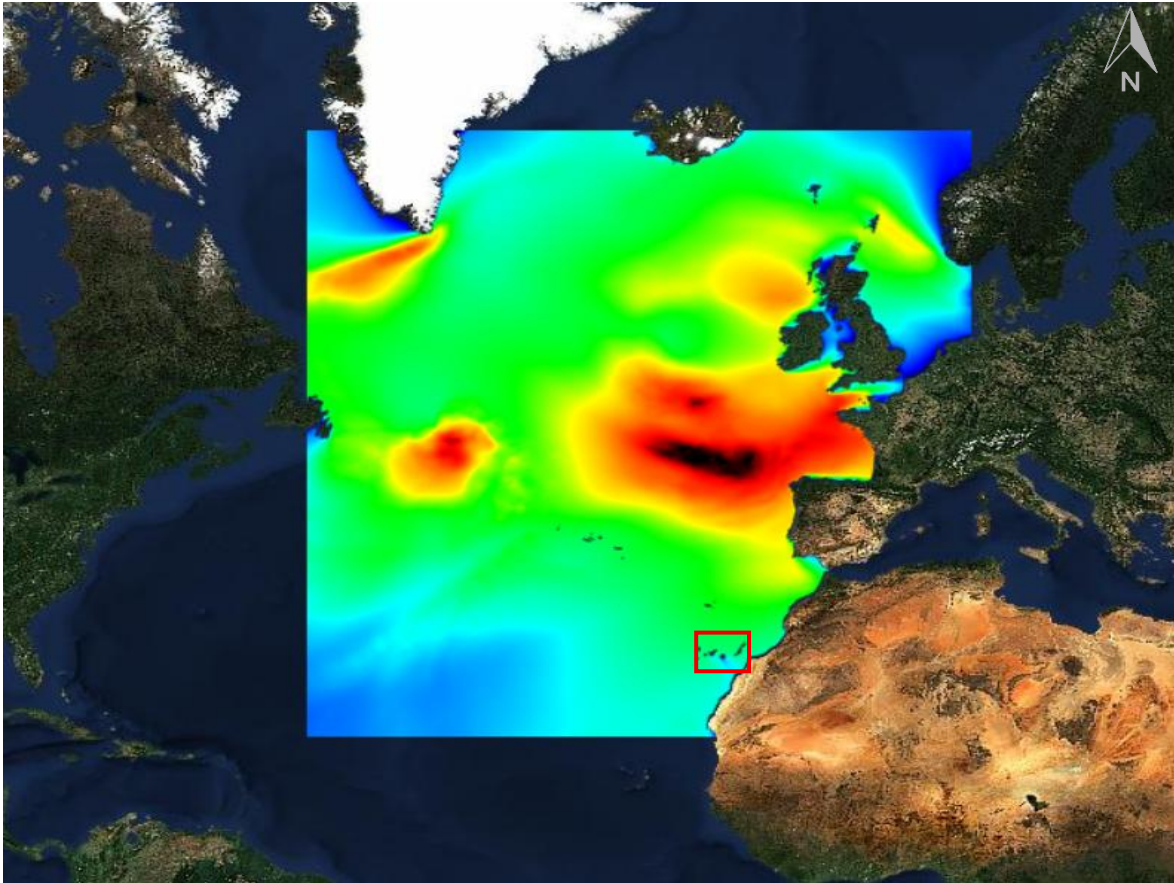
En este contexto, determinadas regiones del litoral español presentan una posición relativa más próxima a los límites de dichos dominios. Tal es el caso del archipiélago canario, que se sitúa en el extremo suroccidental del dominio atlántico de los modelos de oleaje y en una zona de transición relevante en los campos de viento utilizados como forzamiento atmosférico. Esta circunstancia no implica una mayor relevancia intrínseca del oleaje en Canarias respecto a otros tramos del litoral español, sino una potencial mayor sensibilidad a los efectos de contorno y a las decisiones asociadas a la extensión espacial y resolución de los modelos, aspecto que ha sido señalado en trabajos previos sobre la modelización del clima marítimo en el Atlántico oriental y en el entorno canario (Medina y Méndez, 2006; Vicente et al., 2010; Megías-Dorado, 2024).

Las Figuras 9 y 10 ilustran de forma esquemática la extensión espacial de los dominios de propagación del oleaje y de generación del viento empleados en los sistemas de modelización, así como la posición relativa de los puntos de estudio analizados en el presente trabajo. Estas figuras no tienen un carácter cuantitativo ni pretenden evaluar la calidad de los modelos, sino que aportan un marco conceptual para contextualizar la interpretación de los resultados regionales que se presentan en los subapartados siguientes.



**Figura 9.** \_ Dominio espacial del forzamiento atmosférico empleado en la generación del oleaje y localización de los puntos de estudio analizados. Se observa la posición relativa de Canarias respecto a los límites del campo de viento en los modelos atmosféricos utilizados.

Fuente: Elaboración propia a partir del visor Portus-Puertos del Estado.



**Figura 10.** Extensión espacial del dominio de propagación del oleaje en el Atlántico Norte y posición relativa del litoral español y del archipiélago canario. La proximidad de Canarias al límite del dominio constituye un aspecto relevante en la interpretación del oleaje de origen remoto.

Fuente: Elaboración propia a partir del visor Portus-Puertos del Estado.

A partir de este marco, el capítulo desarrolla el análisis de resultados siguiendo un enfoque escalonado, desde la escala puntual hasta la síntesis regional, culminando con un análisis detallado del caso de las Islas Canarias. Este enfoque permite evaluar de forma coherente el efecto de las distintas etapas de modelización de SIMAR sobre la caracterización del clima marítimo y del régimen extremal del oleaje, sentando las bases para la discusión global de resultados que se presentan en el próximo capítulo.

### 6.1. Descripción de los tramos de costa y puntos analizados

De acuerdo con los criterios metodológicos definidos en el Capítulo 5, el presente estudio se aplica a un conjunto de tramos representativos del litoral español, incluyendo tanto la península como el archipiélago canario, y abarcando los principales ámbitos oceanográficos de interés: el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. La selección de los tramos de costa y de los puntos de análisis se ha realizado con el objetivo de disponer de una base de datos coherente y comparable, que permita

contrastar de forma directa los registros numéricos de la base de datos SIMAR con registros instrumentales de oleaje en aguas profundas.

Como criterio fundamental de selección, se ha exigido la existencia simultánea de una boya de oleaje perteneciente a la red de Puertos del Estado y de un punto SIMAR próximo, representativo del régimen de oleaje en aguas profundas. Esta condición garantiza que la comparación entre modelos y registros instrumentales se realice bajo condiciones oceanográficas equivalentes, minimizando la influencia de procesos locales asociados a la interacción con el fondo.

De forma previa a la selección definitiva de los puntos de estudio, se ha analizado la cobertura temporal de los registros instrumentales disponibles, priorizando aquellas boyas con mayor continuidad desde su puesta en servicio. Este criterio resulta especialmente relevante para el análisis del régimen extremal del oleaje, ya que la longitud de la serie condiciona de manera directa la robustez estadística de las estimaciones de valores extremos y periodos de retorno. En este sentido, se han evitado estaciones con registros excesivamente fragmentados o con periodos de funcionamiento muy reducidos.

Adicionalmente, con el fin de asegurar que los registros analizados correspondan a condiciones de oleaje en aguas profundas, se han establecido criterios mínimos de profundidad del fondeo de las boyas, diferenciados por ámbito regional y atendiendo a las características típicas del oleaje dominante en cada zona. Estos umbrales se han definido de forma conservadora, de modo que se descarte la posible influencia del fondo en el oleaje. En particular, se han adoptado los siguientes criterios de profundidad mínima:

- **Atlántico Norte peninsular:** profundidad mínima de 500 m.
- **Atlántico Oeste peninsular:** profundidad mínima de 400 m.
- **Atlántico Sur peninsular:** profundidad mínima de 450 m.
- **Mar Mediterráneo (zonas sur y este):** profundidad mínima de 600 m.
- **Archipiélago canario:** profundidad mínima de 500 m.

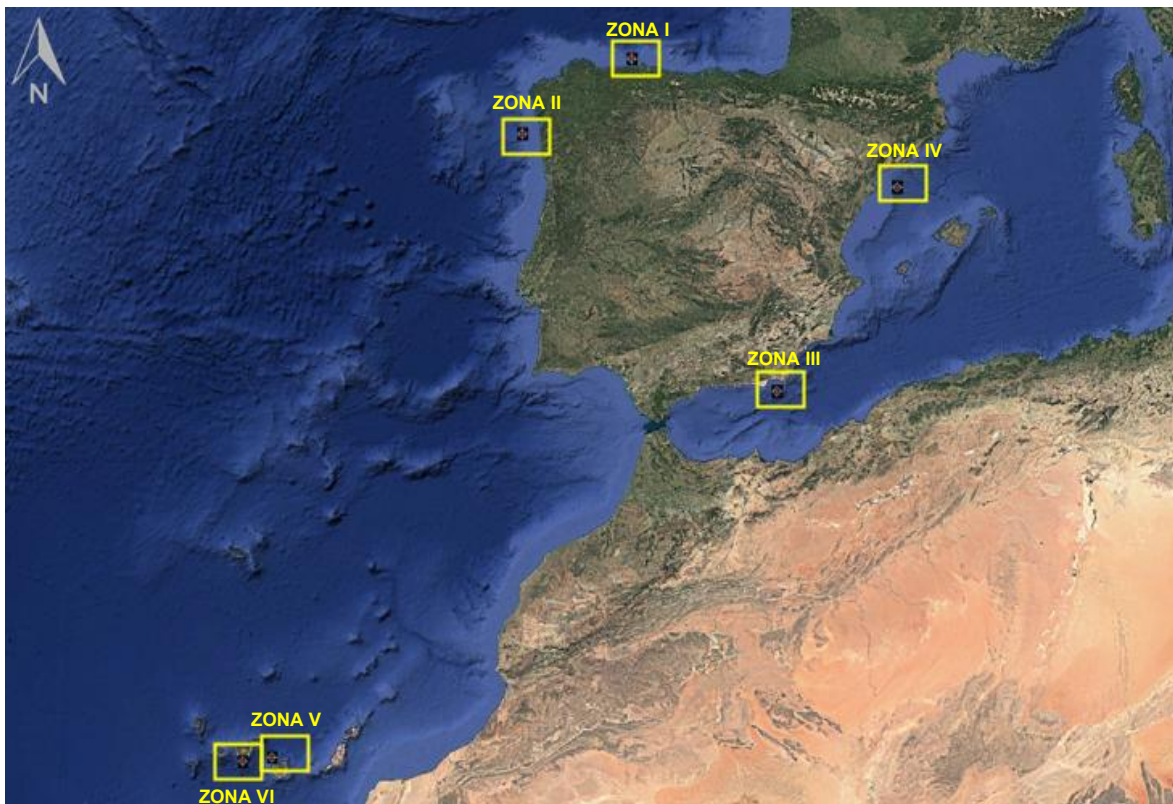
En la Tabla 2 se presenta un resumen de los ámbitos geográficos analizados, incluyendo las boyas de oleaje seleccionadas, su profundidad de fondeo y los puntos SIMAR asociados, utilizados como referencia numérica para la caracterización estadística y extremal del oleaje en cada zona de estudio.

**Tabla 2.\_** Regiones de estudio consideradas y correspondencia entre boyas de aguas profundas y puntos SIMAR asociados.

Localización	Ámbito geográfico	Medio	Boya de Aguas Profundas	Profundidad del fondeo (m)	Punto SIMAR asociado
Zona I	Norte peninsular	Océano Atlántico	Cabo de Peñas	615	SIMAR 3080042
Zona II	Oeste peninsular	Océano Atlántico	Cabo Silleiro	600	SIMAR 3002002
Zona III	Sur peninsular	Mar Mediterráneo	Cabo de Gata	600	SIMAR 2056079
Zona IV	Este peninsular	Mar Mediterráneo	Tarragona	688	SIMAR 2102128
Zona V	Archipiélago canario	Océano Atlántico	Gran Canaria	710	SIMAR 1017013
Zona VI	Archipiélago canario	Océano Atlántico	Tenerife	600	SIMAR 4023009

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado.*

La localización geográfica de los puntos SIMAR y de las boyas seleccionadas se muestra en la Figura 11, donde se aprecia su distribución a lo largo del litoral español y del archipiélago canario. Esta configuración espacial permite analizar el comportamiento de las distintas etapas de modelización de SIMAR bajo regímenes de oleaje contrastados, así como evaluar posibles diferencias regionales en la representación del oleaje medio y extremo por parte de los modelos numéricos.



**Figura 11.\_** Distribución espacial de los puntos SIMAR y de las boyas instrumentales seleccionadas, agrupados por tramos de costa y regiones de estudio (Zonas I-VI).

*Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía base de Google Earth.*

## **6.2. Resultados de los estadísticos básicos por punto y por periodo de modelización**

Una vez definidos los puntos de estudio y la correspondencia entre nodos SIMAR y boyas en aguas profundas, se procede a analizar los estadísticos descriptivos básicos del oleaje con el objetivo de caracterizar el comportamiento medio de las series y evaluar la coherencia entre las distintas etapas de modelización de SIMAR.

Este análisis se realiza de forma no pareada, considerando de manera independiente cada serie (modelo o boya) dentro de su periodo de validez, y se centra en las variables principales del estudio, la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) y el periodo de pico ( $T_p$ ). Para cada punto y periodo de modelización se han calculado estadísticos representativos del régimen medio y alto de la distribución, incluyendo la media, la desviación típica y percentiles característicos.

Dado el elevado volumen de resultados generado y con el fin de facilitar su interpretación, en el cuerpo del documento se presentan figuras que integran la información de los estadísticos calculados.

### **6.2.1. Representación y criterios de análisis**

Con el fin de facilitar la interpretación y comparación de los resultados obtenidos, el análisis de los estadísticos básicos se apoya en un conjunto de representaciones gráficas comparativas que permiten integrar de forma coherente la información procedente de las distintas etapas de modelización y de los registros instrumentales. Esta estrategia responde al elevado volumen de datos analizados y a la necesidad de evaluar, de manera sistemática, posibles diferencias entre modelos sin recurrir exclusivamente a tablas numéricas extensas.

Las representaciones adoptadas se orientan a caracterizar tanto el comportamiento global del oleaje como las condiciones de oleaje más energético, manteniendo el análisis dentro de un marco descriptivo previo al estudio extremal. De este modo, se pretende identificar si las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR introducen modificaciones apreciables en la estructura estadística de las series, ya sea en términos de tendencia central, dispersión o comportamiento de los percentiles elevados.

Para ello, los resultados se analizan mediante los siguientes tipos de representación:

### **a) Media y desviación típica por periodo de modelización**

En primer lugar, se representan la media y la desviación típica de las variables analizadas (principalmente Hs y Tp) para cada periodo de modelización considerado. Estas magnitudes permiten describir de forma directa el régimen medio del oleaje y su variabilidad asociada, constituyendo una referencia básica para la comparación entre etapas.

La comparación conjunta de estos parámetros permite detectar posibles diferencias persistentes en el nivel medio del oleaje, así como cambios en la dispersión de los registros, que pueden estar relacionados con modificaciones en la formulación del modelo, en la resolución espacial o en la representación de los procesos de generación y propagación del oleaje.

### **b) Funciones de distribución acumulada (CDF)**

Como complemento al análisis basado en estadísticos descriptivos, se emplean funciones de distribución acumulada (CDF) para cada una de las series y periodos considerados. Este tipo de representación permite evaluar el comportamiento estadístico del oleaje a lo largo de todo su rango de valores, proporcionando una visión integrada de la estructura de la distribución.

La comparación entre las CDFs asociadas a las distintas etapas de modelización y a los registros instrumentales facilita la identificación de diferencias sistemáticas entre modelos, así como la detección de posibles cambios localizados en rangos específicos de la distribución. En particular, este análisis permite valorar si las discrepancias observadas afectan de manera homogénea al conjunto del clima de oleaje o si se concentran preferentemente en las condiciones de mayor energía, aspecto de especial interés como paso previo al análisis específico del régimen extremal.

### **c) Percentiles representativos del régimen alto (P50-P99)**

De forma complementaria, se analizan percentiles seleccionados de la distribución (P50, P75, P90, P95 y P99), que permiten caracterizar de manera progresiva la transición desde las condiciones más frecuentes del oleaje hasta los estados de mar de mayor energía.

Este tipo de representación resulta especialmente útil para evaluar posibles diferencias en los tramos superiores de la distribución sin recurrir aún a un ajuste específico de valores extremos. Variaciones sistemáticas en los percentiles más elevados pueden poner de manifiesto cambios

relevantes en la representación de los estados de mar energéticos asociados a las distintas etapas de modelización, permitiendo identificar, de forma preliminar, posibles diferencias en la representación de los estados de mar de mayor energía, antes de realizar el análisis específico del régimen extremal del oleaje.

#### ***d) Criterios de interpretación***

La interpretación conjunta de las representaciones anteriores permite identificar de manera objetiva distintos aspectos relevantes del comportamiento estadístico del oleaje, tales como la presencia de diferencias recurrentes entre etapas de modelización, cambios en el grado de dispersión de las series, modificaciones en la forma global de la distribución y divergencias específicas en los tramos superiores de la misma.

Estos elementos constituyen indicadores clave para evaluar la coherencia estadística entre las distintas etapas de modelización y los periodos analizados, y proporcionan una base sólida para la interpretación de los resultados del análisis del régimen extremal que se desarrolla en los apartados siguientes.

### **6.2.2. Resultados por regiones costeras**

Los resultados de los estadísticos básicos del oleaje se presentan en este apartado con el objetivo de analizar el comportamiento estadístico de las series consideradas y su evolución a lo largo de las distintas etapas de modelización de la base de datos SIMAR. El análisis se realiza aplicando criterios homogéneos a todos los puntos de estudio, lo que permite comparar de forma consistente los resultados obtenidos en cada localización y periodo temporal.

Dado que el litoral español presenta una marcada diversidad en cuanto al régimen de oleaje, el análisis se estructura agrupando los puntos de estudio por tramos de costa con un comportamiento estadístico comparable. En particular, se distinguen los tramos del océano Atlántico peninsular, el archipiélago canario (también integrado en el dominio atlántico, pero próximo al límite de la malla de los modelos) y el mar Mediterráneo.

Esta diferenciación se basa en las particularidades dinámicas y en el contexto de modelización propios de cada región marítima analizada, lo que permite evaluar con mayor precisión la respuesta de las distintas etapas del sistema SIMAR frente a los registros instrumentales disponibles.

Para cada tramo considerado, se analizan de manera conjunta los resultados correspondientes a los nodos SIMAR y, cuando procede, a los registros instrumentales de boya, atendiendo a la evolución de los valores medios, la dispersión, la forma global de la distribución y el comportamiento de los percentiles representativos. El análisis se apoya en las representaciones gráficas descritas en el apartado 6.2.1 y se centra en la identificación de variaciones consistentes entre periodos de modelización, así como en la evaluación de posibles cambios en la estructura estadística del oleaje.

En esta fase, el análisis se mantiene en un plano descriptivo y comparativo, sin abordar aún la caracterización específica de los eventos extremos. El objetivo es establecer una base estadística sólida que permita contextualizar, en los apartados posteriores, las diferencias observadas en el análisis del régimen extremal del oleaje.

#### **6.2.2.1. Norte peninsular**

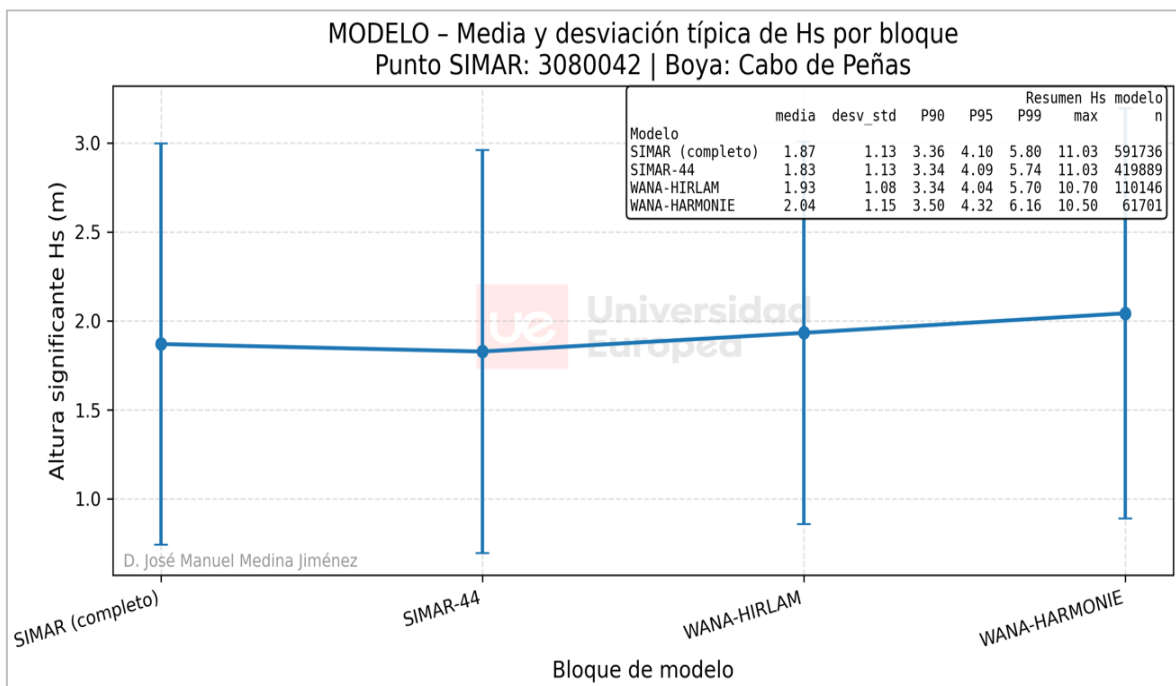
El norte peninsular constituye el ámbito más exigente del conjunto analizado desde el punto de vista del régimen de oleaje, al encontrarse directamente expuesto a los temporales del Atlántico Norte. Se trata de un entorno dominado por episodios energéticos persistentes y por la presencia frecuente de swell de largo recorrido, lo que tiende a acentuar la presencia de estados de mar energéticos en los percentiles altos y en la cola de la distribución. En este contexto, las diferencias entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA, aunque puedan ser moderadas en estadísticos centrales, pueden traducirse en discrepancias más relevantes al caracterizar los estados de mar más energéticos, que son los que condicionan la estimación extremal.

El análisis se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Cabo de Peñas y el punto SIMAR 3080042. La proximidad espacial entre ambos y la profundidad del fondeo permiten asumir condiciones de oleaje en aguas profundas, no afectadas por interacción con el fondo ni por procesos costeros locales. La boya se encuentra fondeada a una profundidad aproximada de 615 m y dispone de cobertura temporal desde mediados de 1997, proporcionando una base suficientemente extensa para el contraste estadístico entre las distintas etapas del sistema y el registro instrumental.

### 6.2.2.1.1. Media y desviación típica de Hs y Tp

El análisis de la media y la desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) constituye una primera aproximación para evaluar la coherencia estadística entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA. Estos estadísticos permiten identificar si las sucesivas actualizaciones del modelo introducen cambios consistentes en el régimen medio del oleaje o si, por el contrario, las series pueden considerarse estadísticamente homogéneas desde un punto de vista global.

En el punto SIMAR 3080042, los resultados muestran (Figura 12) una ligera tendencia al incremento del valor medio de Hs en las configuraciones más recientes del sistema. Este patrón indica que las distintas etapas de modelización no reproducen exactamente el mismo nivel medio de energía del oleaje, observándose valores progresivamente mayores desde SIMAR-44 hacia WANA-HARMONIE.



**Figura 12.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 3080042.

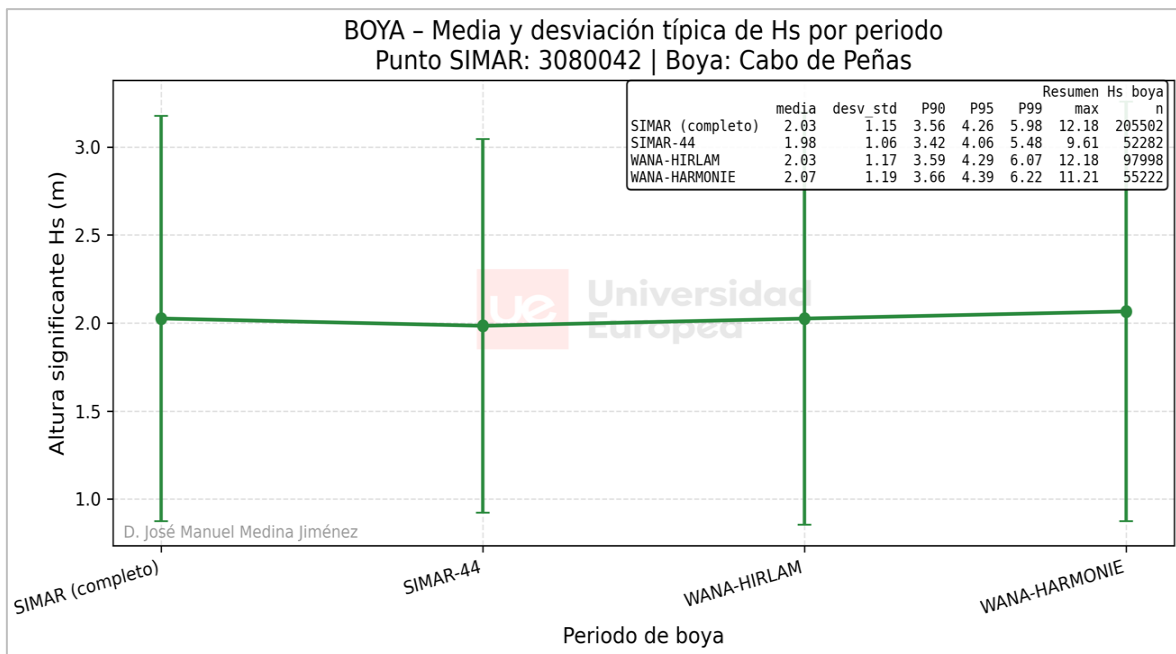
Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento es coherente con las diferencias estructurales existentes entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA, asociadas principalmente a cambios en el forzamiento atmosférico, la resolución espacial del modelo y determinadas parametrizaciones físicas del oleaje. En este contexto, el desplazamiento del valor medio no debe interpretarse como una variación del

clima marítimo real, sino como una consecuencia de la evolución del propio sistema de modelización.

En contraste con lo observado en la media, la desviación típica de Hs se mantiene en rangos muy similares entre los distintos periodos de modelización. Este resultado indica que la variabilidad del oleaje se reproduce de forma relativamente consistente entre configuraciones, de modo que las diferencias detectadas entre etapas afectan principalmente al nivel medio del oleaje y no al grado de dispersión de los estados de mar.

El comportamiento del registro instrumental refuerza esta interpretación. En la boya de Cabo de Peñas (Figura 13), los valores medios y los niveles de dispersión de Hs se mantienen esencialmente estables a lo largo de los distintos periodos considerados, sin evidenciar cambios estructurales asociados a las etapas de modelización del sistema. La estabilidad del registro instrumental sugiere que las diferencias detectadas en las series modelizadas responden fundamentalmente a las actualizaciones introducidas en el sistema SIMAR/WANA.



**Figura 13.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para la Boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

Esta estabilidad del registro instrumental pone de manifiesto que las variaciones detectadas entre las distintas etapas SIMAR/WANA responden a las propias actualizaciones del sistema de modelización y no a cambios reales en el régimen medio del oleaje.

La información de la boya se introduce, por tanto, únicamente como marco de referencia y control de coherencia, sin carácter de validación, dado que la evaluación específica de la aproximación de cada modelo a las mediciones instrumentales se aborda de forma diferenciada en apartados posteriores.

En conjunto, los resultados muestran que las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA presentan diferencias moderadas en el nivel medio de Hs, mientras que la dispersión de la serie se mantiene en rangos similares entre periodos. Esta falta de equivalencia en el régimen medio justifica el análisis segmentado por etapas adoptado en el presente trabajo, ya que la utilización conjunta de las distintas configuraciones podría introducir sesgos en la caracterización estadística del oleaje.

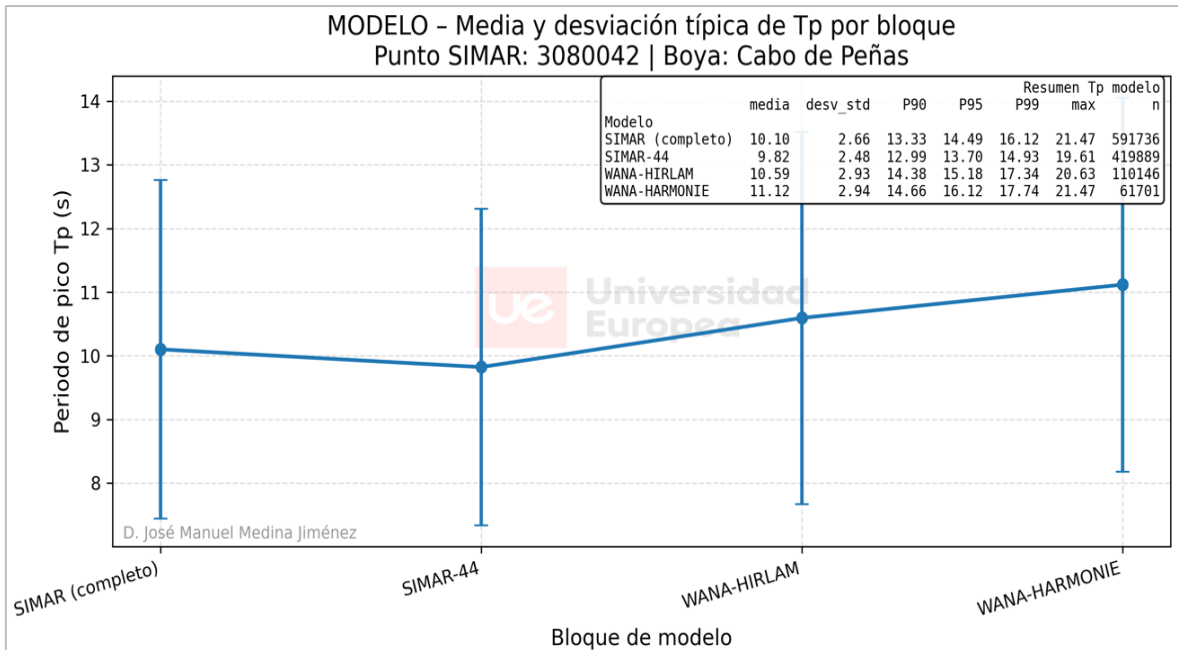
En este contexto, las series correspondientes a los distintos periodos no pueden considerarse equivalentes en términos de régimen medio de oleaje, lo que justifica el análisis segmentado por etapas adoptado en este trabajo. Esta diferenciación resulta necesaria para interpretar correctamente los resultados posteriores, en particular los relativos a los percentiles elevados y al régimen extremal del oleaje.

Aunque las diferencias detectadas en la media de Hs no se emplean directamente en el dimensionamiento de obras marítimas, sí condicionan la distribución del oleaje y el punto de partida del análisis de los estados de mar más energéticos.

El análisis de la media y la desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) permite evaluar la posible existencia de diferencias sistemáticas entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA en lo que respecta a la escala temporal característica de los estados de mar. Al igual que en el caso de la altura de ola significativa (Hs), el objetivo de este apartado es comprobar si las sucesivas actualizaciones del modelo introducen cambios apreciables en el régimen medio del periodo o si, por el contrario, los distintos periodos pueden considerarse comparables desde este punto de vista.

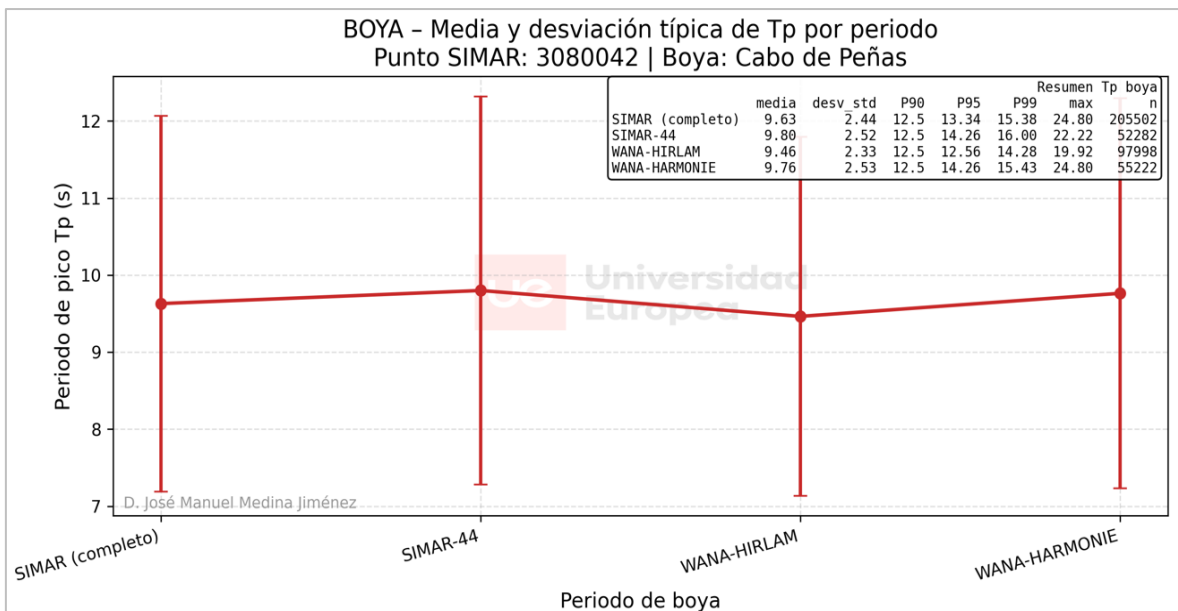
En el punto SIMAR 3080042, los resultados muestran un incremento gradual del valor medio de  $T_p$  entre las distintas etapas de modelización, con valores ligeramente inferiores en SIMAR-44 y valores progresivamente mayores en las configuraciones más recientes del sistema, alcanzándose los valores más elevados en WANA-HARMONIE (Figura 14). Este incremento se produce de forma progresiva entre periodos consecutivos y sin discontinuidades asociadas a las transiciones entre

modelos. No obstante, las diferencias entre etapas son moderadas y se desarrollan dentro de rangos de variación similares.



**Figura 14.\_** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 3080042.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 15.\_** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para la Boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

La desviación típica de  $T_p$  presenta valores comparables entre los distintos periodos de modelización, con amplitudes elevadas y un solapamiento significativo entre modelos. Este comportamiento indica que, aunque el valor medio de  $T_p$  muestra una ligera tendencia creciente, la variabilidad del periodo de pico es suficientemente amplia como para que los distintos periodos de modelización describan rangos temporales muy similares. En consecuencia, el periodo de pico no permite diferenciar de forma clara las distintas etapas de modelización a partir de los estadísticos básicos, a diferencia de lo observado para la altura significativa del oleaje.

En el caso de la serie observada en la boya de Cabo de Peñas (Figura 15), se observa la evolución de la media y la desviación típica de  $T_p$  para los distintos periodos considerados. El registro instrumental presenta valores medios y niveles de dispersión comparables entre periodos, sin evidenciar cambios estructurales asociados a las etapas de modelización. La estabilidad del registro instrumental refuerza la interpretación de que no se producen modificaciones relevantes en el régimen temporal dominante del oleaje a lo largo del intervalo analizado.

En conjunto, los resultados indican que la media de  $T_p$  presenta un incremento gradual entre las distintas etapas SIMAR/WANA, si bien las diferencias entre periodos son moderadas y se producen dentro de rangos de variación muy similares, con un amplio solapamiento entre modelos. Desde esta perspectiva, las distintas etapas de modelización pueden considerarse comparables en términos del periodo de pico medio y de su dispersión.

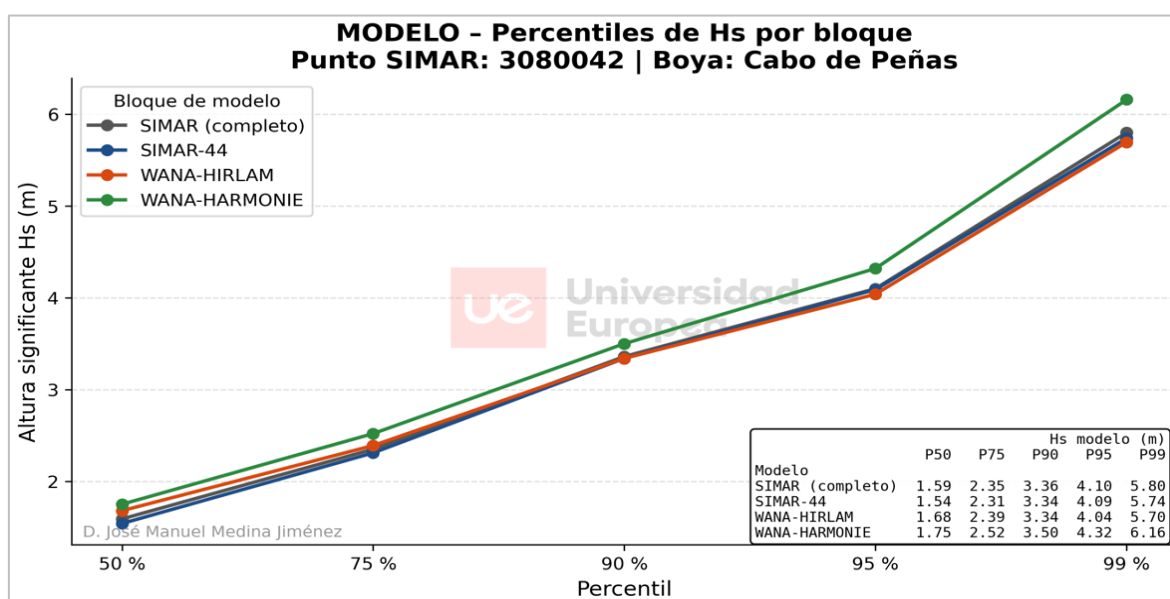
Este comportamiento contrasta con el observado para la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ), donde las diferencias entre periodos son más acusadas. Desde el punto de vista de la caracterización del clima marítimo, ello permite centrar el análisis posterior en las variaciones asociadas a  $H_s$  y, en particular, a los percentiles elevados, manteniendo el periodo de pico como una variable complementaria cuyo comportamiento medio se mantiene relativamente estable entre periodos de modelización.

#### *6.2.2.1.2. Percentiles de la altura significativa ( $H_s$ ) y del periodo de pico ( $T_p$ )*

El análisis de percentiles permite profundizar en la comparación entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA, evaluando cómo se distribuyen los valores de  $H_s$  y  $T_p$  más allá de su comportamiento medio. En particular, el estudio de percentiles elevados resulta especialmente relevante para identificar posibles diferencias en la representación de los estados de mar más energéticos y para contextualizar el análisis posterior del régimen extremal del oleaje.

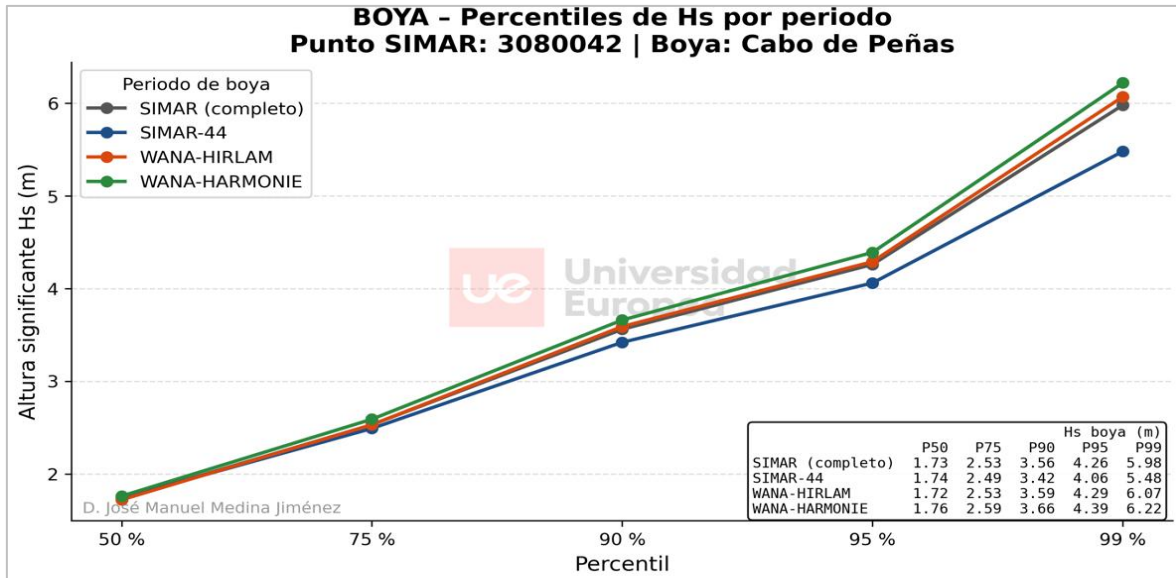
En el caso de la altura significativa del oleaje, los resultados muestran que las diferencias entre las distintas etapas de modelización se intensifican progresivamente hacia percentiles elevados (Figuras 16 y 17). Mientras que en los percentiles centrales (P50-P75) los valores asociados a las distintas configuraciones presentan un comportamiento relativamente próximo, las discrepancias aumentan a partir de P90 y se acentúan en los percentiles más altos (P95-P99). Este patrón indica que las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización no solo afectan al régimen medio de Hs, sino que modifican de forma apreciable la representación de los estados de mar más energéticos, amplificando las diferencias en la cola alta de la distribución.

Este comportamiento se observa de forma consistente en las series modelizadas y, con menor intensidad, en la serie observada de la boya de Cabo de Peñas. En el registro instrumental, las diferencias entre periodos son más contenidas y presentan un mayor solapamiento, lo que resulta coherente con la estabilidad del clima real de oleaje a lo largo del intervalo analizado. Debe tenerse en cuenta, además, que la primera segmentación temporal de la serie de boya corresponde a un intervalo de menor duración que los periodos posteriores, circunstancia que aconseja prudencia en la interpretación de los percentiles más elevados asociados a dicha etapa.



**Figura 16.\_** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042.

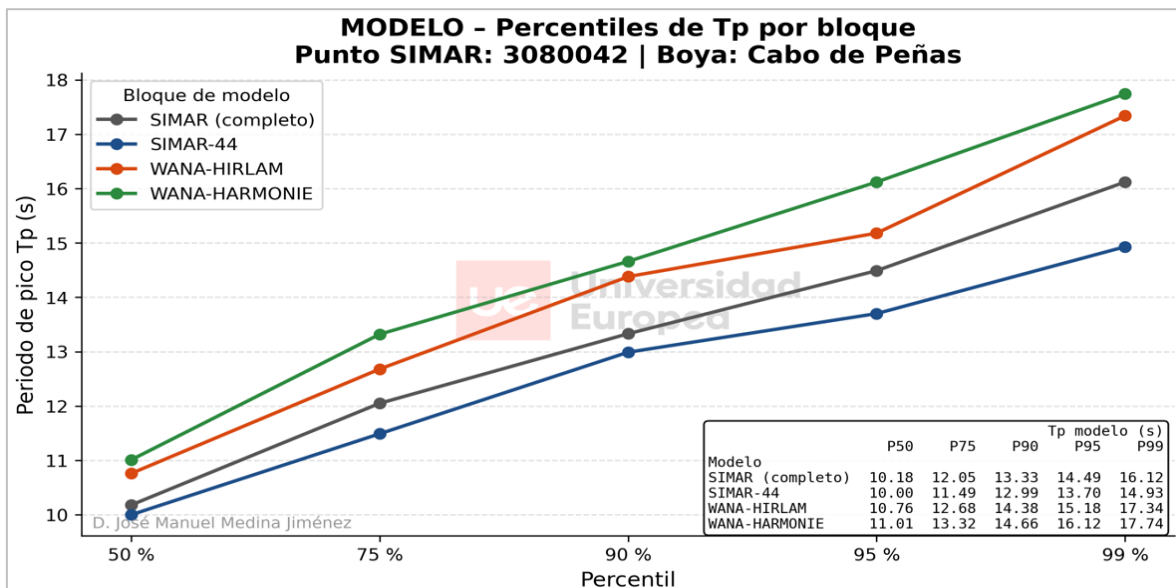
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 17.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

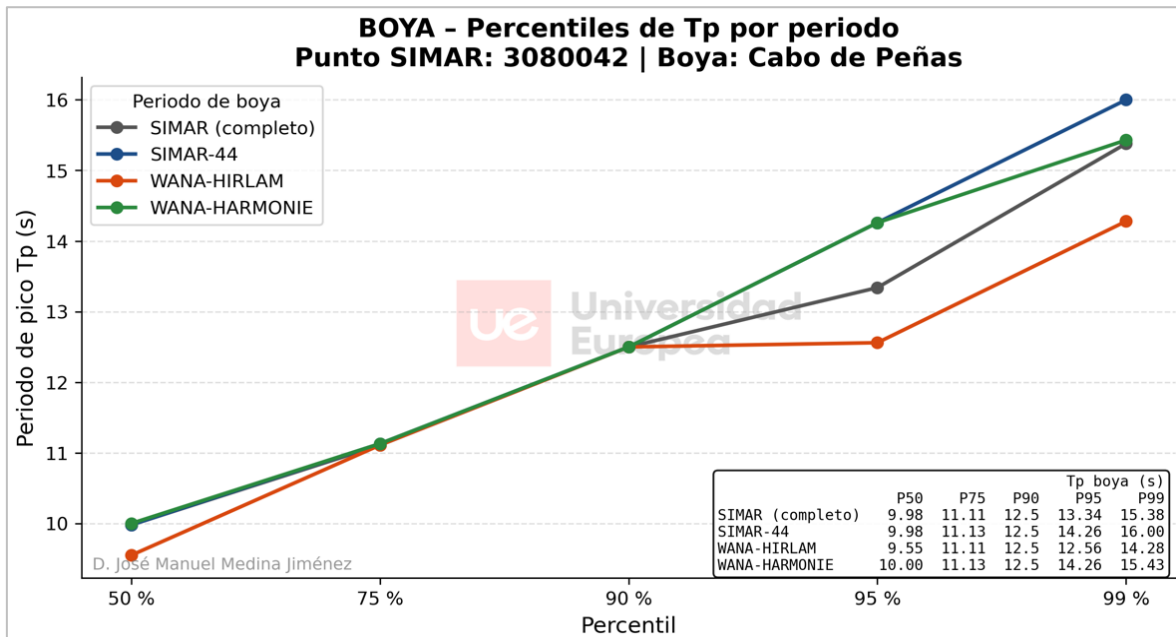
En lo que respecta al periodo de pico, los resultados del modelo muestran un incremento progresivo de los percentiles de  $T_p$  entre las distintas etapas de modelización, con valores mayores en las configuraciones más recientes y una separación creciente hacia los percentiles altos (Figura 18). Este patrón sugiere que las actualizaciones del sistema introducen un desplazamiento en la representación del periodo característico del oleaje, especialmente en los estados de mar asociados a mayores periodos.



**Figura 18.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042.

Fuente: Elaboración propia.

En la serie observada de la boya (Figura 19), los percentiles bajos y medios de  $T_p$  presentan valores muy similares entre los distintos periodos temporales considerados, lo que indica que el régimen habitual del periodo de pico no muestra variaciones apreciables asociadas a la segmentación temporal adoptada. En los percentiles más altos, las diferencias entre periodos no siguen un patrón progresivo ni ordenado, observándose variaciones irregulares entre etapas.



**Figura 19.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas..  
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el análisis de percentiles pone de manifiesto que las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA introducen diferencias apreciables en la representación estadística del oleaje, especialmente en la cola alta de la distribución de  $H_s$ . Estas discrepancias resultan particularmente relevantes para el análisis extremal posterior, al afectar directamente a la caracterización de los estados de mar más energéticos.

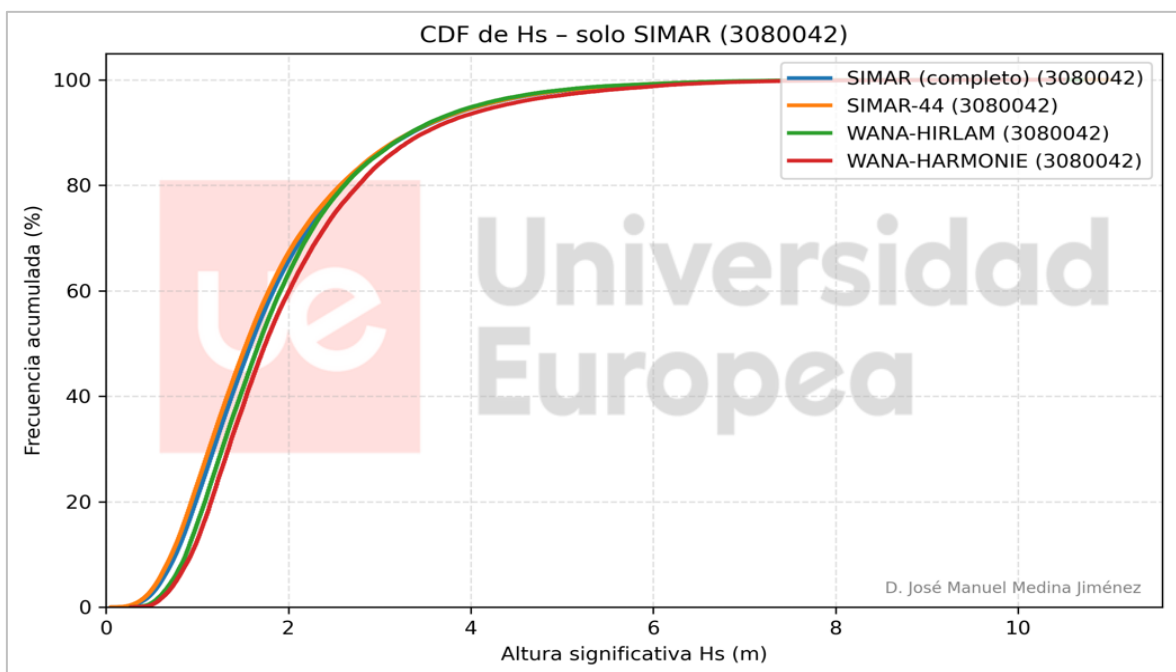
### 6.2.2.1.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)

La comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF) permite analizar de forma integrada el comportamiento estadístico completo de las series de oleaje, complementando la información obtenida a partir de los estadísticos básicos y de los percentiles. A diferencia de estos últimos, las CDF permiten evaluar simultáneamente el régimen central y la cola alta de la distribución, facilitando la identificación de desplazamientos globales o cambios en la forma de la distribución asociados a las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA.

En el caso de la altura significativa del oleaje, las Figuras 20 y 21 muestran que las CDF correspondientes a las distintas etapas presentan un comportamiento similar en los valores bajos y medios de  $H_s$ , concentrándose las diferencias a partir de valores intermedios-altos.

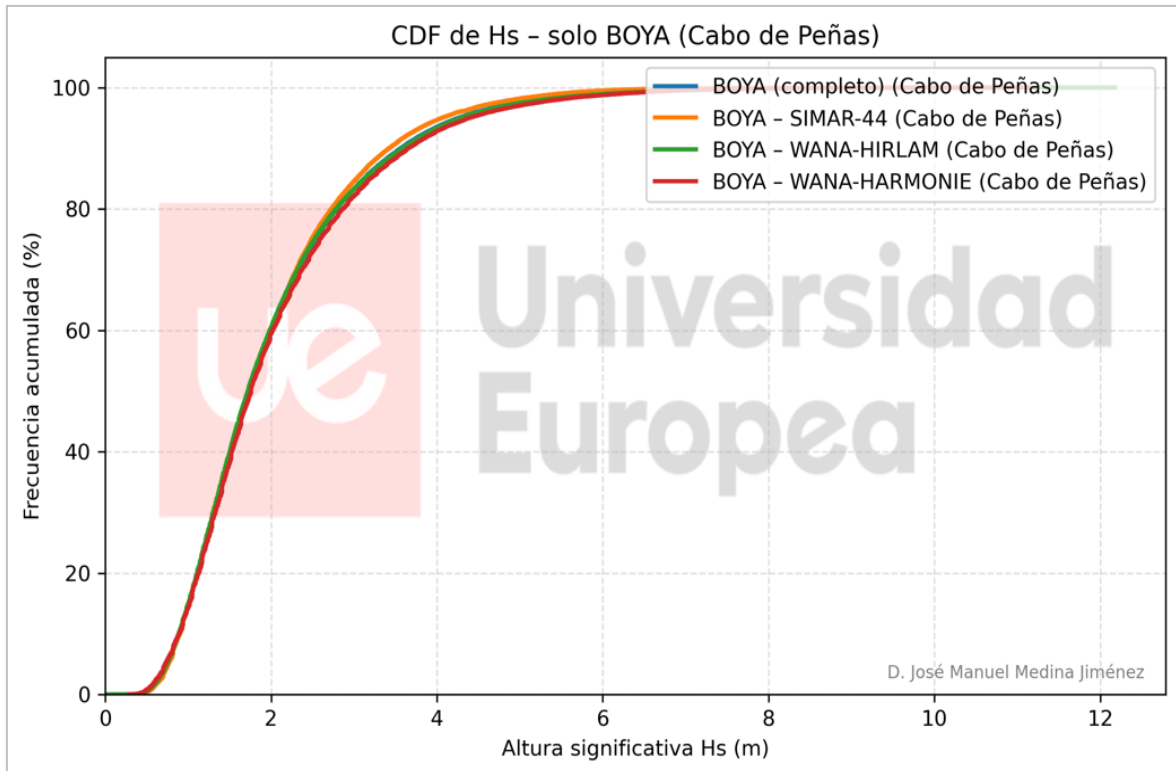
En la serie modelizada (Figura 20), las versiones más recientes del modelo muestran un desplazamiento progresivo de la CDF hacia valores más elevados de  $H_s$ , lo que se traduce en una menor frecuencia acumulada para un mismo valor de altura significativa. Este comportamiento es coherente con lo observado en el análisis de percentiles y confirma que las actualizaciones del sistema de modelización afectan principalmente a la representación de los estados de mar más intensos, sin alterar de forma sustancial la estructura global de la distribución en el rango central.

En la serie observada de la boya de Cabo de Peñas (Figura 21), las CDF asociadas a los distintos periodos temporales muestran un mayor solapamiento a lo largo de prácticamente todo el rango de  $H_s$ . Las diferencias entre curvas son reducidas y no siguen un patrón ordenado entre etapas, lo que es consistente con la estabilidad del clima real de oleaje en la zona de estudio.



**Figura 20.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042.

Fuente: Elaboración propia.



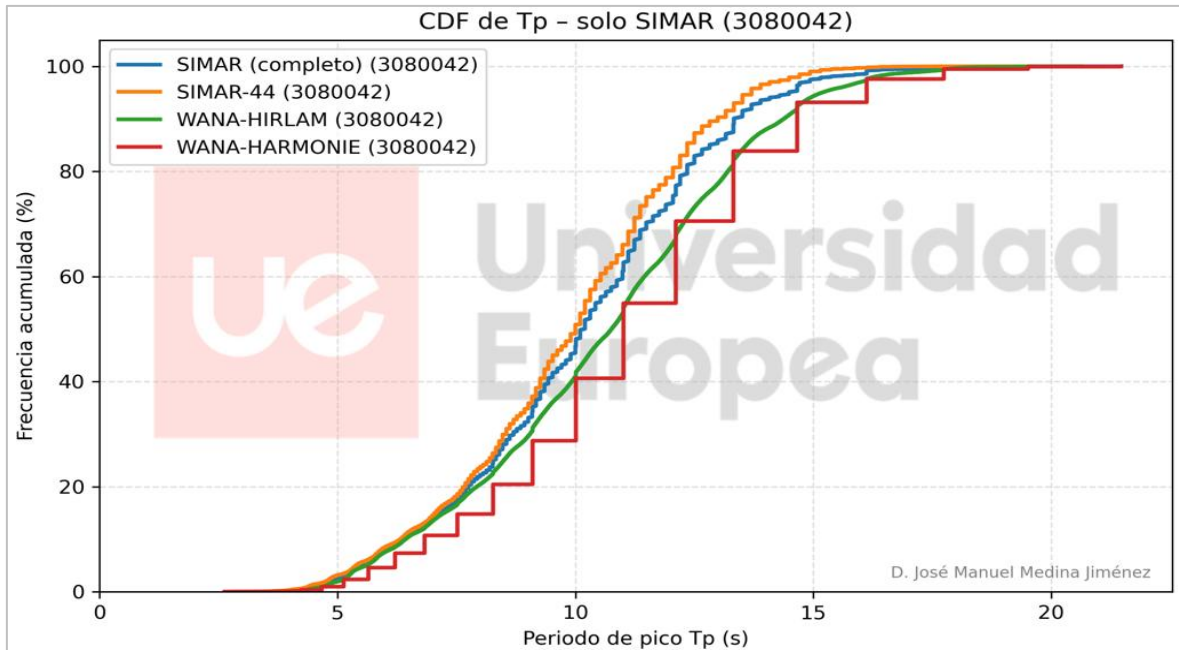
**Figura 21.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al periodo de pico, las Figuras 22 y 23 ponen de manifiesto un comportamiento diferenciado entre las series modelizadas y el registro instrumental.

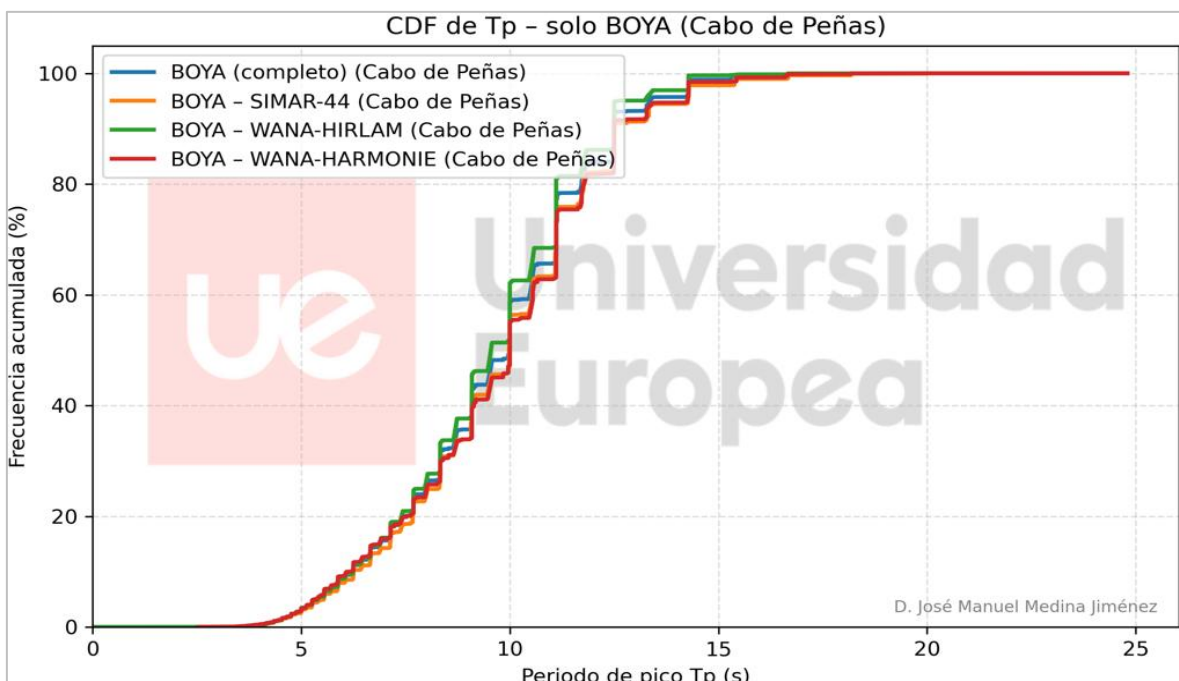
En el modelo (Figura 22), las CDF muestran un desplazamiento progresivo hacia valores mayores de  $T_p$  en las etapas más recientes, especialmente en el tramo superior de la distribución. Este resultado indica que las actualizaciones del sistema de modelización influyen en la representación de los estados de mar asociados a periodos de pico más largos, de forma coherente con lo observado en el análisis de percentiles.

Por el contrario, en la serie observada de la boya (Figura 23), las CDF de  $T_p$  presentan un elevado grado de solapamiento en los valores bajos y medios, sin evidenciar desplazamientos consistentes asociados a los distintos periodos temporales considerados. En el tramo superior de la distribución, las diferencias entre curvas no siguen un patrón ordenado, lo que refuerza la conclusión de que no se observa una evolución sistemática del periodo de pico real asociada a las etapas SIMAR/WANA.



**Figura 22.** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 23.** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el análisis de las funciones de distribución acumulada muestra que las diferencias entre las distintas etapas de modelización se expresan de forma distinta según la variable analizada.

En el caso de la altura significativa del oleaje, las discrepancias entre etapas se concentran principalmente en la cola alta de la distribución, evidenciando un desplazamiento progresivo hacia valores más elevados en las versiones más recientes del modelo. En el caso del periodo de pico, las CDF del modelo muestran un desplazamiento global de la distribución entre etapas, mientras que en el registro instrumental de la boya no se observa una evolución sistemática asociada a los periodos considerados.

#### *6.2.2.1.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización*

El análisis conjunto de los estadísticos básicos, los percentiles y las funciones de distribución acumulada permite evaluar la homogeneidad estadística de las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA en el norte peninsular. Los resultados muestran que las series correspondientes a los distintos periodos no pueden considerarse estrictamente homogéneas, al detectarse desplazamientos consistentes en la distribución del oleaje entre etapas de modelización, especialmente en el caso de la altura significativa.

La comparación con los registros instrumentales de la boya de Cabo de Peñas indica que dichos desplazamientos no se corresponden con una evolución coherente del clima marítimo real, ya que las series observadas no muestran una variación ordenada asociada a los periodos considerados. En consecuencia, las diferencias detectadas entre etapas se interpretan como resultado de las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización y no como una señal de variabilidad climática.

Desde esta perspectiva, los distintos periodos de modelización no pueden considerarse equivalentes desde el punto de vista estadístico, lo que refuerza la necesidad de analizar las series de forma segmentada por etapas.

#### **6.2.2.2. Oeste peninsular**

El litoral correspondiente al oeste peninsular presenta un régimen de oleaje igualmente dominado por la influencia del Atlántico Norte, aunque con una mayor variabilidad direccional y una menor persistencia de temporales que en el ámbito cantábrico. La exposición directa al océano abierto favorece la presencia frecuente de swell procedente del cuadrante oeste-noroeste, lo que contribuye a mantener una contribución significativa de estados de mar energéticos en los percentiles altos de la distribución. En este contexto, la comparación entre configuraciones del

sistema SIMAR/WANA permite evaluar en qué medida las distintas etapas de modelización reproducen de forma coherente los episodios de mayor energía del clima marítimo en este sector.

El estudio se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Cabo de Silleiro y el punto SIMAR 3002002. La proximidad espacial entre ambos y la profundidad de emplazamiento permiten asumir condiciones de oleaje en aguas profundas, no afectadas por interacción con el fondo ni por procesos costeros locales, lo que garantiza la comparabilidad entre las series modelizadas y el registro instrumental.

La boya de Cabo de Silleiro presenta una profundidad de fondeo del orden de 600 m y dispone de cobertura temporal de registro direccional de oleaje desde mediados del año 2003. En consecuencia, el periodo de comparación entre los registros instrumentales y la etapa SIMAR-44 resulta más limitado que en otros ámbitos del estudio, circunstancia que se tiene en cuenta en la interpretación de los resultados, especialmente en la evaluación de percentiles altos y del comportamiento extremal del oleaje.

En este contexto, el estudio se orienta a evaluar el comportamiento de los principales estadísticos de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico, así como la forma de sus funciones de distribución acumulada, con el fin de identificar posibles diferencias entre las distintas etapas del sistema de modelización. Este examen permite valorar el grado de homogeneidad estadística entre configuraciones y determinar si las discrepancias observadas responden a cambios introducidos en la estructura del modelo o a variaciones propias del régimen de oleaje en el sector considerado.

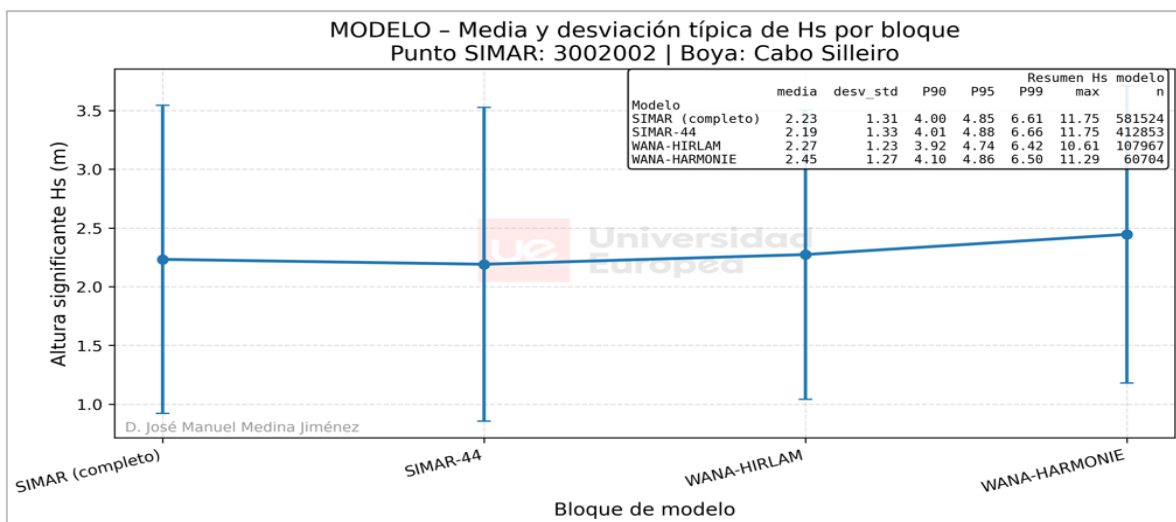
#### *6.2.2.2.1. Media y desviación típica de $H_s$ y $T_p$*

El análisis de la media y la desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) y del periodo de pico ( $T_p$ ) en el oeste peninsular permite evaluar la coherencia estadística entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA y comprobar si las sucesivas actualizaciones del sistema introducen cambios apreciables en el régimen medio del oleaje y en su escala temporal característica.

En el punto SIMAR 3002002, la evolución de la media de  $H_s$  por periodos de modelización, representada en la Figura 24, muestra diferencias moderadas entre etapas, con valores medios más bajos asociados a la etapa SIMAR-44 y valores progresivamente superiores en las versiones más recientes. Este comportamiento indica, de forma análoga a lo observado en el norte peninsular, que las distintas etapas de modelización no son estrictamente homogéneas en términos de nivel medio del oleaje, al apreciarse un desplazamiento consistente de la media de  $H_s$  entre modelos.

No obstante, estas diferencias se desarrollan de forma gradual, sin saltos abruptos entre periodos consecutivos.

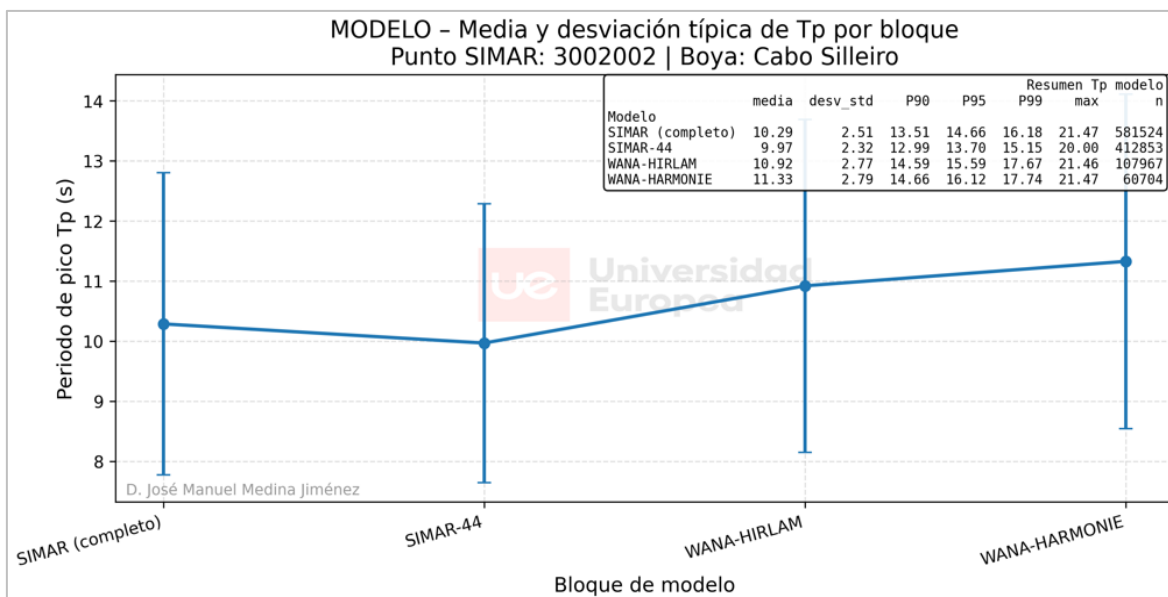
La desviación típica de  $H_s$ , igualmente representada en la Figura 24, presenta valores del mismo orden de magnitud en todas las etapas analizadas, con un solapamiento amplio de los rangos de variabilidad. Este resultado pone de manifiesto que, aunque el nivel medio del oleaje varía entre periodos de modelización, la dispersión de la serie se mantiene relativamente estable, lo que sugiere que las actualizaciones del sistema afectan principalmente al valor medio de  $H_s$  y no a la estructura general de la variabilidad del oleaje.



**Figura 24.** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002.

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al periodo de pico (Figura 25), la evolución de la media de  $T_p$  en el modelo muestra igualmente un incremento progresivo desde las etapas más antiguas hacia las más recientes, siguiendo un patrón coherente con el observado en el norte peninsular. Sin embargo, la desviación típica de  $T_p$  es elevada y presenta un solapamiento significativo entre periodos, lo que indica que las diferencias en el régimen medio del periodo de pico son moderadas y se desarrollan dentro de rangos temporales similares.

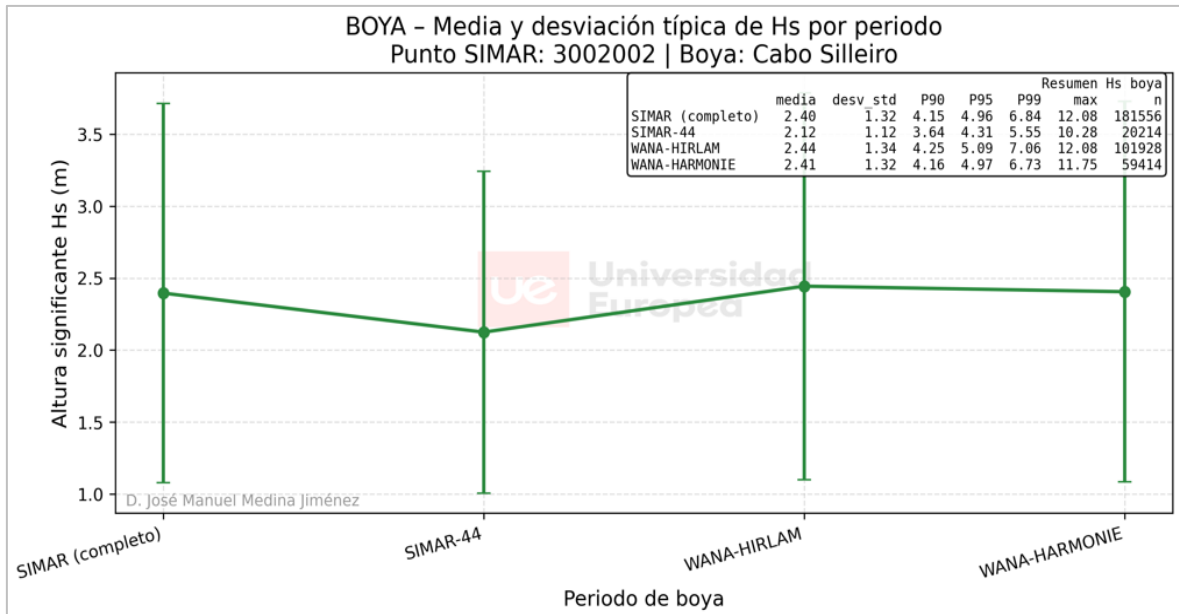


**Figura 25.** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro y en el punto SIMAR 3002002.

Fuente: Elaboración propia.

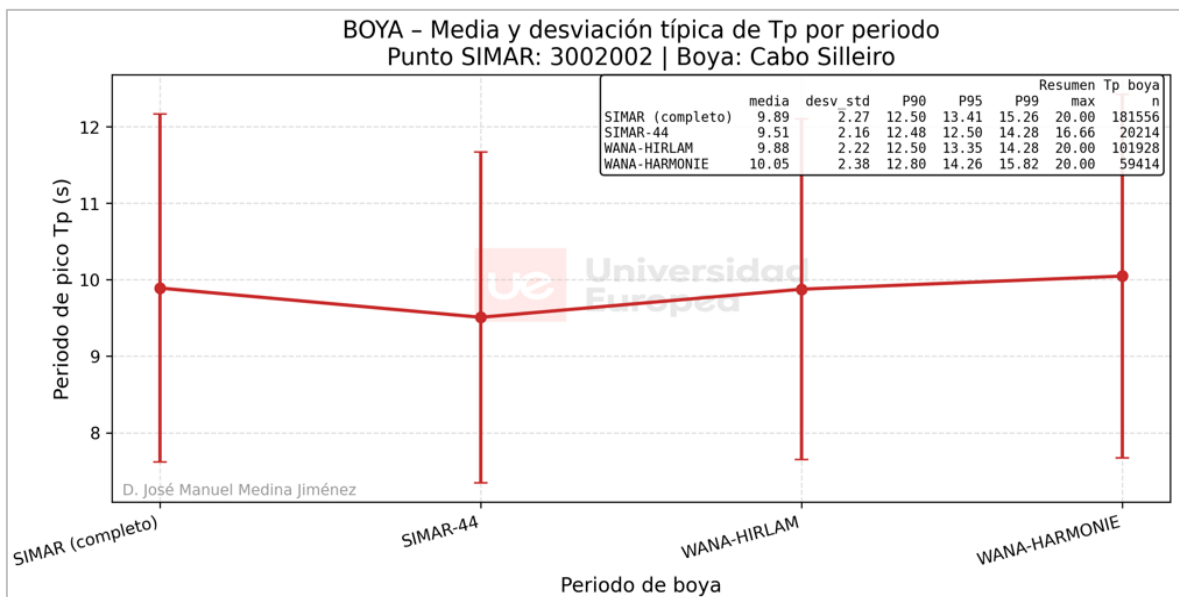
La serie observada de la boya de Cabo Silleiro, muestra valores medios y niveles de dispersión comparables tanto para Hs (Figura 26) como para Tp (Figura 27) a lo largo de los distintos periodos temporales considerados, sin evidenciar cambios estructurales asociados a la segmentación por etapas SIMAR/WANA. Este comportamiento es coherente con la estabilidad del clima real de oleaje en el sector y permite interpretar que las diferencias detectadas en las series modelizadas responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización y no a variaciones persistentes de las condiciones marítimas reales.

En conjunto, los resultados del oeste peninsular confirman que las distintas etapas SIMAR/WANA presentan diferencias sistemáticas en la media de la altura significativa del oleaje, mientras que la dispersión de la serie se mantiene en rangos similares entre periodos. En el caso del periodo de pico, las diferencias entre etapas son más contenidas y se producen dentro de rangos ampliamente solapados, lo que refuerza su papel como variable complementaria en la caracterización del clima marítimo frente a la altura significativa del oleaje.



**Figura 26.** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 27.** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro.

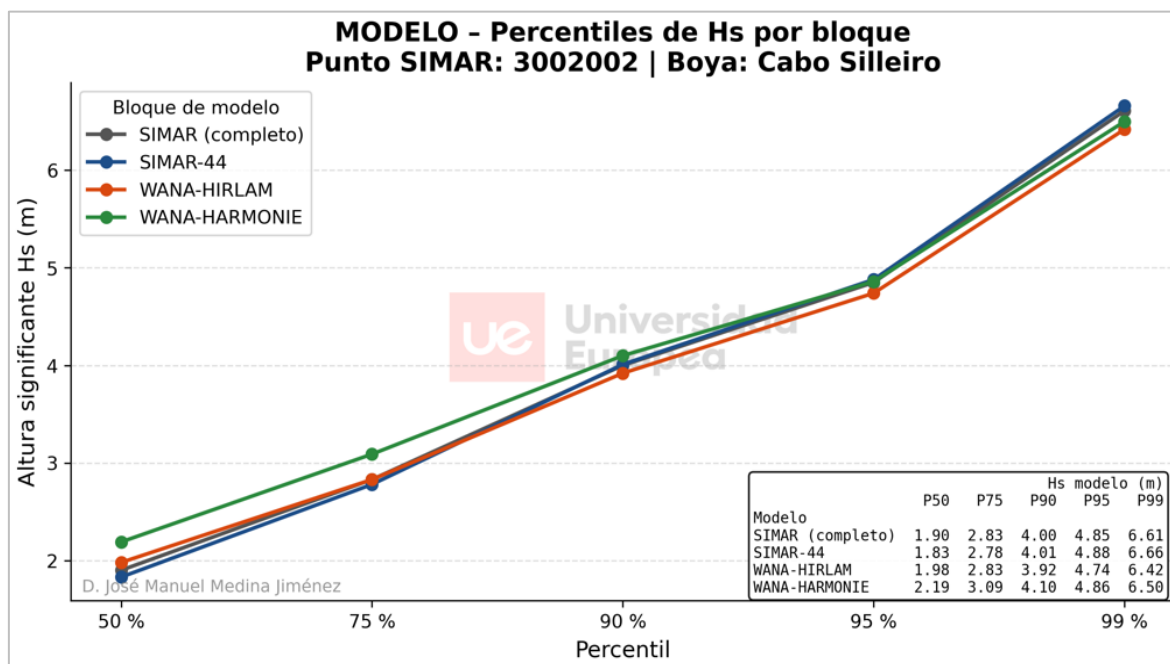
Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.2.2. Percentiles de la altura significativa (Hs) y del periodo de pico (Tp)

El análisis de percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) evidencia un desplazamiento entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA a lo largo de toda la distribución. Este comportamiento indica que las actualizaciones del sistema de modelización afectan no solo a los

valores extremos, sino también al régimen central del oleaje. La Figura 28 muestra cómo este desplazamiento se mantiene de forma coherente desde percentiles intermedios hasta los percentiles más elevados.

Este patrón indica un desplazamiento global de la distribución de Hs introducido por las actualizaciones del sistema de modelización, que afecta tanto al régimen central como a los valores altos, y no se limita exclusivamente a la cola de la distribución.



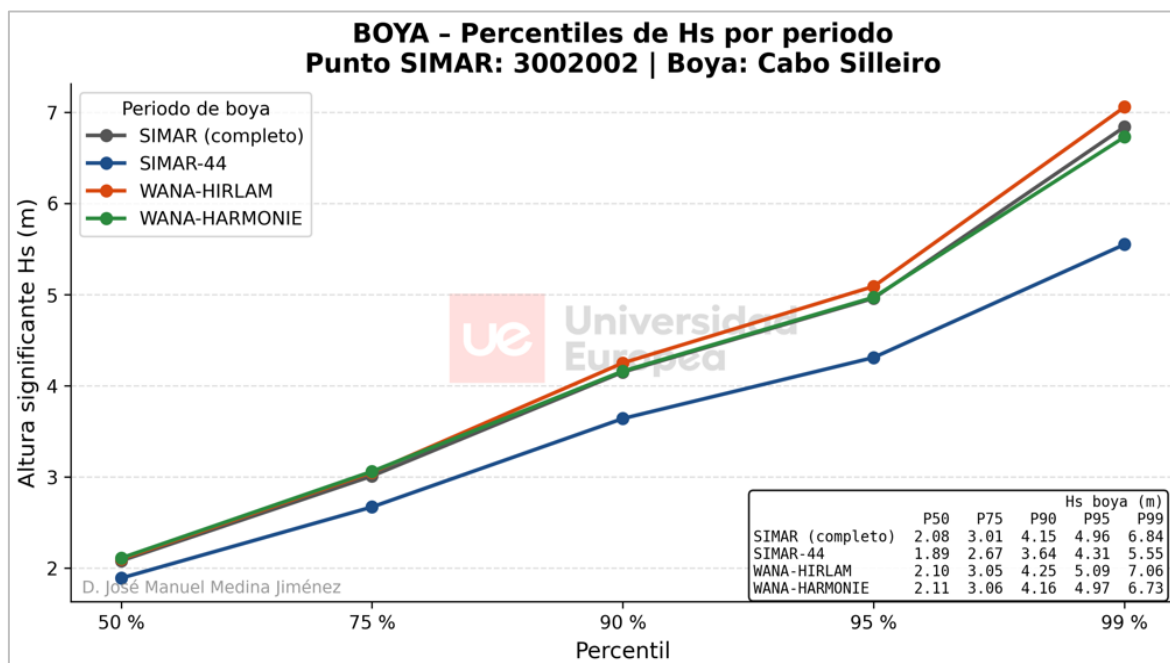
**Figura 28.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002.

Fuente: Elaboración propia.

En la serie de la boya, representada en la Figura 29, los percentiles de Hs presentan un mayor solapamiento entre periodos y no siguen una evolución ordenada asociada a las etapas SIMAR/WANA. En particular, las diferencias observadas en los percentiles elevados (P90-P99) no muestran un patrón progresivo entre periodos y responden a la propia naturaleza de los extremos en series observadas: dependen de un número reducido de temporales severos cuya ocurrencia no es uniforme en el tiempo. En consecuencia, estas variaciones no deben interpretarse como indicativas de un cambio real del clima marítimo, sino como fluctuaciones esperables en registros instrumentales segmentados temporalmente.

Los percentiles del periodo de pico obtenidos a partir del modelo (Figura 30) presentan igualmente una separación progresiva entre etapas, con valores de  $T_p$  sistemáticamente mayores en las

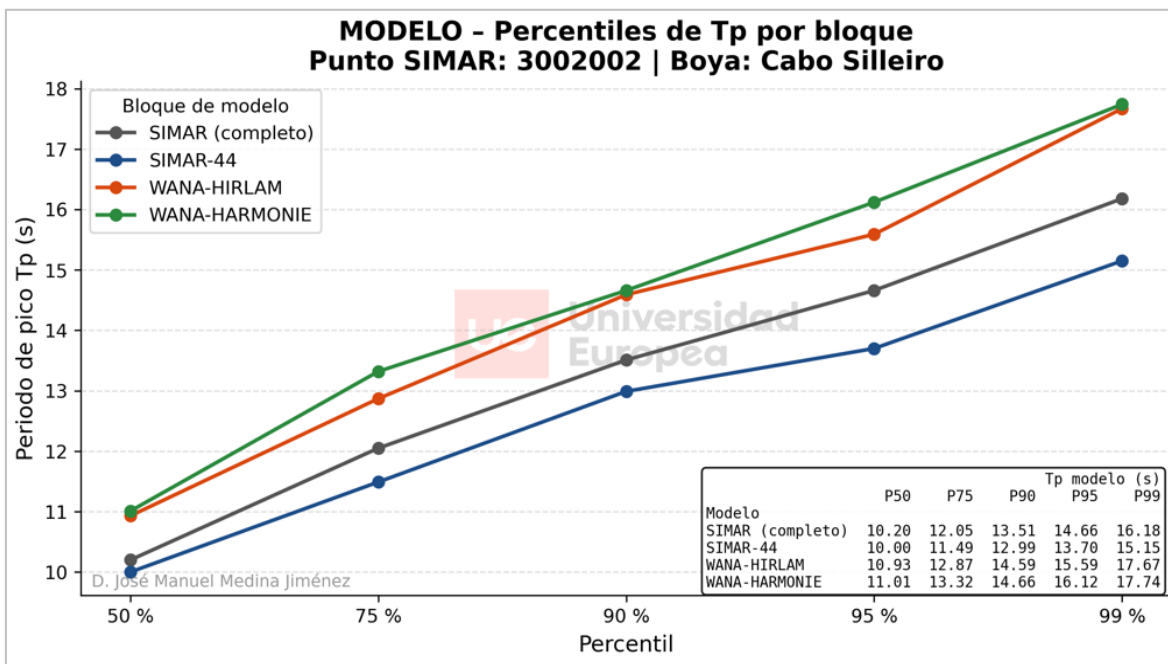
versiones más recientes. Este desplazamiento es perceptible desde percentiles intermedios y se acentúa en los percentiles elevados, lo que indica que las actualizaciones del sistema de modelización afectan también a la escala temporal característica del oleaje representado, especialmente en estados de mar asociados a mayores periodos.



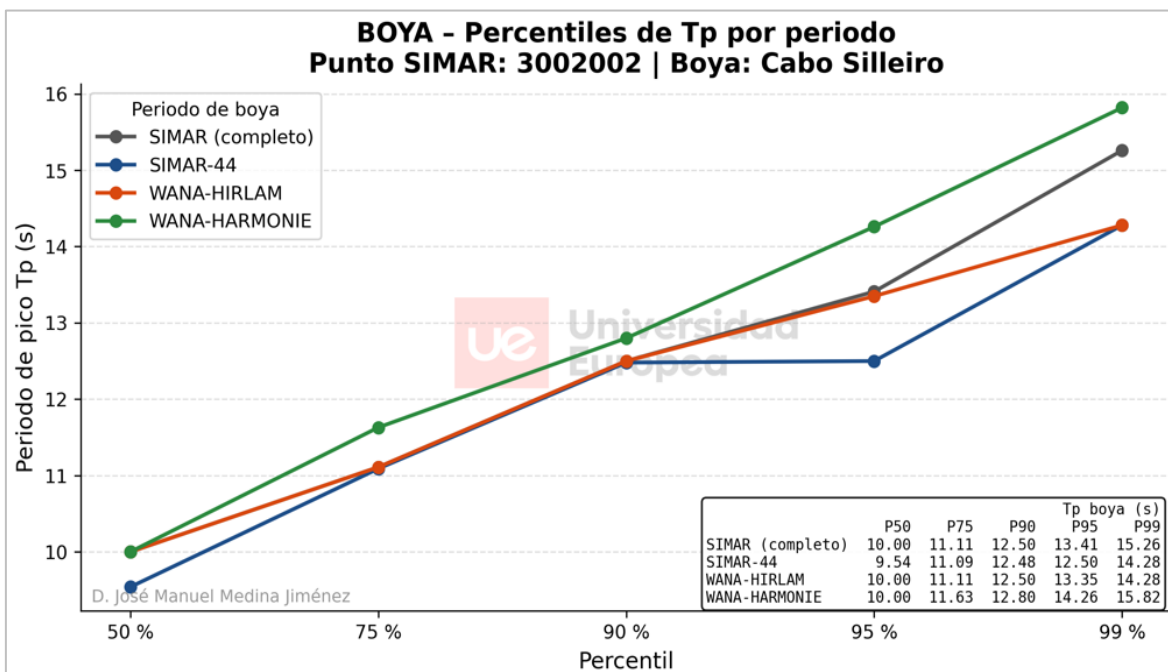
**Figura 29.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro. Fuente: Elaboración propia.

En la boya de Cabo Silleiro (Figura 31) los percentiles de  $T_p$  no muestran una evolución sistemática asociada a los periodos de modelización. Tanto en percentiles centrales como en los elevados, las diferencias entre periodos son irregulares y no siguen un patrón ordenado, lo que confirma que no se identifica una señal temporal real del periodo de pico coherente con la segmentación SIMAR/WANA. De nuevo, esta ausencia de señal climática refuerza la interpretación de que los desplazamientos observados en el modelo responden a las actualizaciones del sistema de modelización y no a cambios reales del clima marítimo.

En conjunto, el análisis de percentiles en el oeste peninsular muestra que las diferencias sistemáticas se concentran en las series modelizadas, afectando de forma consistente a Hs y, en menor medida, a  $T_p$ , mientras que la serie observada no presenta una evolución ordenada entre periodos. Esta combinación de resultados permite atribuir los desplazamientos identificados a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.



**Figura 30.** Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002. Fuente: Elaboración propia.

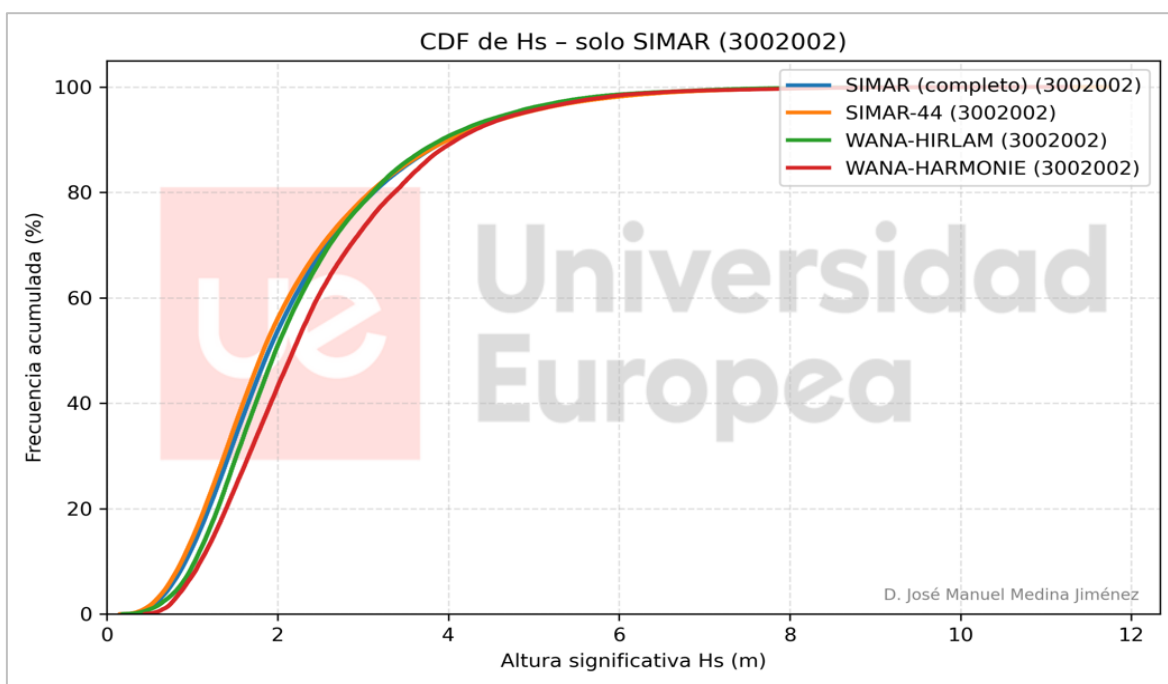


**Figura 31.** Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en la boya de Cabo Silleiro. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2.2.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)

La comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF) permite identificar posibles desplazamientos en la distribución estadística de  $H_s$  y  $T_p$  entre las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA y contrastarlos con el registro instrumental.

En el caso de las series modelizadas, las CDF de  $H_s$  representadas en la Figura 32 muestran desplazamientos apreciables entre las distintas etapas de modelización a lo largo de buena parte de la distribución. Las versiones más recientes del modelo tienden a situarse sistemáticamente hacia valores más elevados de  $H_s$  para un mismo nivel de probabilidad acumulada, lo que confirma que las actualizaciones del sistema introducen cambios en la caracterización global del oleaje, coherentes con los desplazamientos previamente identificados en la media y en los percentiles elevados.



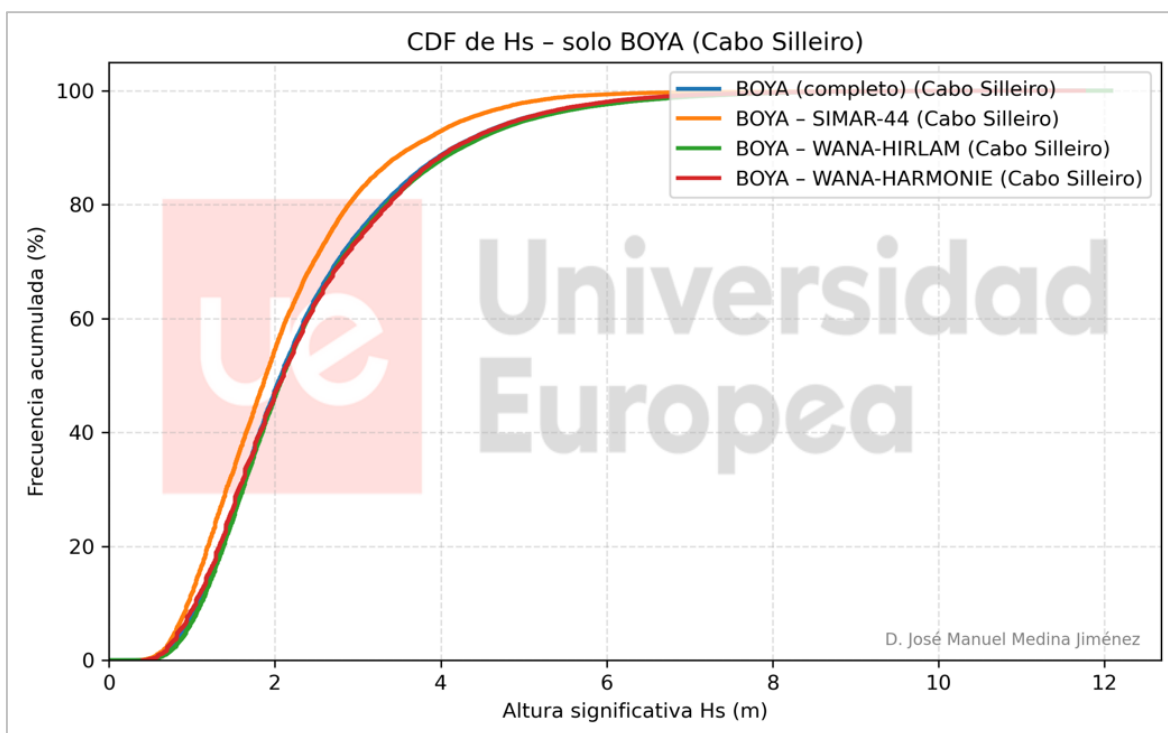
**Figura 32.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002.

Fuente: Elaboración propia.

En el registro instrumental de la boya de Cabo Silleiro (Figura 33), las funciones de distribución acumulada de  $H_s$  muestran un comportamiento globalmente coherente entre los distintos periodos temporales considerados, si bien se aprecia un ligero desplazamiento de la curva correspondiente al periodo SIMAR-44 hacia valores más bajos de  $H_s$ .

Este comportamiento no se mantiene en los periodos posteriores, cuyas CDF presentan un elevado grado de solapamiento entre sí, lo que sugiere una estabilidad del régimen de oleaje real a lo largo del intervalo analizado. El desplazamiento observado en la etapa SIMAR-44 puede atribuirse principalmente a efectos de muestreo asociados a la menor longitud del registro y a la segmentación temporal de una serie instrumental continua, más que a un cambio estructural del clima marítimo.

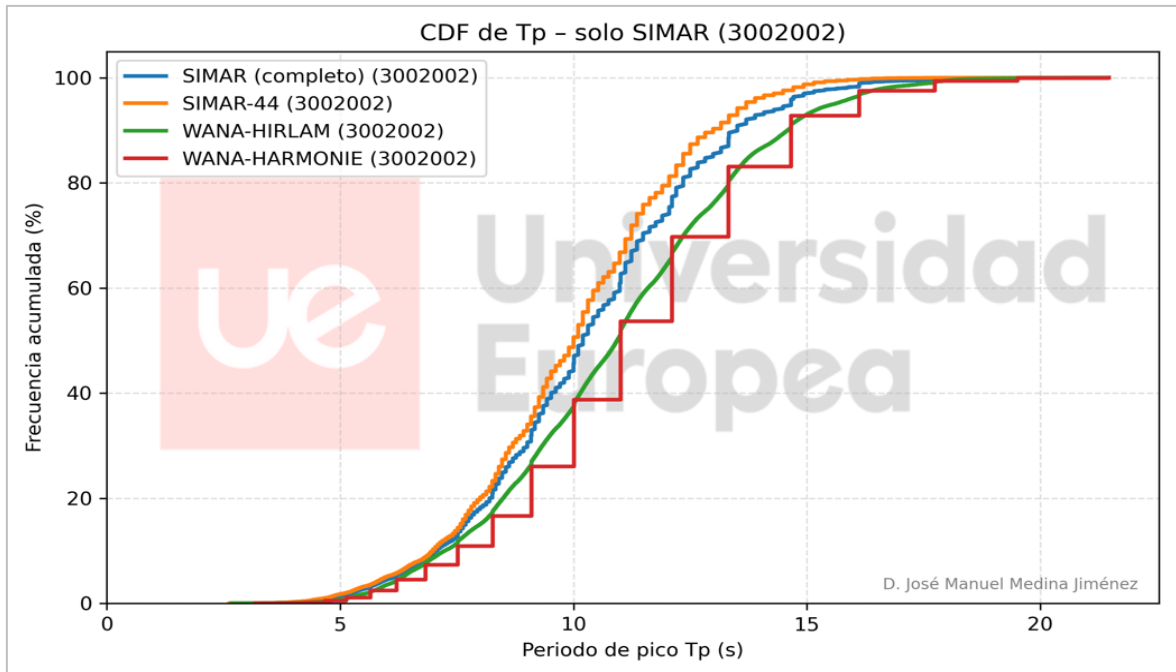
En este contexto, la información procedente de la boya permite descartar que los desplazamientos consistentes observados en las series modelizadas respondan a una evolución real del oleaje, reforzando su interpretación como consecuencia de las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.



**Figura 33.** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo Silleiro.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa desplazamientos moderados entre etapas (Figura 34), con una tendencia de las versiones más recientes a representar periodos de pico ligeramente mayores para una misma probabilidad acumulada. No obstante, el solapamiento entre curvas es amplio, lo que indica que las diferencias introducidas por las sucesivas actualizaciones del modelo afectan de forma secundaria a la escala temporal característica del oleaje en comparación con la altura significativa.



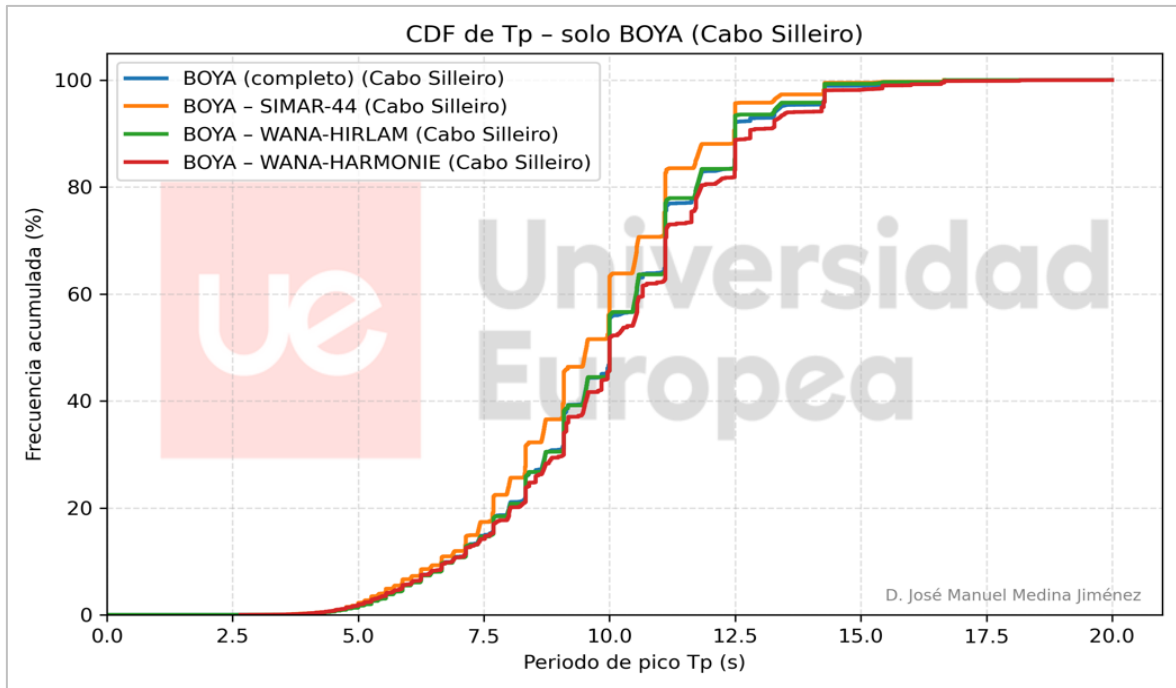
**Figura 34.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3002002.

Fuente: Elaboración propia.

En la serie observada de la boya (Figura 35), las funciones de distribución acumulada del periodo de pico  $T_p$  presentan un elevado grado de solapamiento entre los distintos periodos temporales considerados. Aunque se aprecian ligeras diferencias locales entre curvas en determinados rangos de la distribución, estas no siguen un patrón progresivo ni coherente asociado a la segmentación temporal adoptada.

Este comportamiento indica que, en el registro instrumental, no se detecta una evolución sistemática del periodo de pico del oleaje a lo largo del intervalo analizado. En consecuencia, las diferencias observadas en las CDF de  $T_p$  correspondientes a las distintas etapas de modelización no pueden atribuirse a cambios reales en el clima marítimo, sino que deben interpretarse como resultado de las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.

En conjunto, el análisis de las funciones de distribución acumulada en el oeste peninsular es coherente con los resultados obtenidos a partir de los estadísticos básicos y del análisis de percentiles. Las diferencias entre las distintas etapas SIMAR/WANA se manifiestan de forma más clara en la altura significativa del oleaje, especialmente en los rangos altos de la distribución, mientras que el periodo de pico presenta un comportamiento más estable y sin una evolución sistemática asociada a la segmentación temporal.



**Figura 35.** Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos temporales, en la boya de Cabo Silleiro.

Fuente: Elaboración propia.

La ausencia de desplazamientos ordenados en las CDF correspondientes al registro instrumental permite descartar que las diferencias observadas en las series modelizadas respondan a cambios reales en el clima de oleaje del área de estudio, reforzando la interpretación de que dichas diferencias están asociadas fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.

#### 6.2.2.2.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización

El análisis estadístico del oleaje en el oeste peninsular pone de manifiesto que las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA no constituyen una serie estrictamente homogénea, aunque sí presentan una transición gradual y coherente entre versiones. En particular, la altura significativa del oleaje muestra diferencias sistemáticas entre periodos de modelización, que se manifiestan tanto en los estadísticos básicos como, de forma más acusada, en los percentiles elevados y en la cola alta de la distribución. Estas diferencias indican que las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización modifican la representación de los estados de mar más energéticos, sin que se identifiquen discontinuidades abruptas entre etapas consecutivas.

Por el contrario, el periodo de pico presenta un comportamiento comparativamente más estable. Aunque en las series modelizadas se observa un ligero desplazamiento hacia valores mayores en las versiones más recientes, las diferencias entre periodos son moderadas y se desarrollan dentro de rangos ampliamente solapados. En la serie observada de la boya de Cabo Silleiro no se detecta una evolución sistemática del periodo de pico asociada a la segmentación temporal, lo que permite descartar que los cambios observados en el modelo respondan a una modificación real del clima marítimo.

En conjunto, los resultados del oeste peninsular confirman que las diferencias detectadas entre las distintas etapas SIMAR/WANA están asociadas principalmente a las actualizaciones del sistema de modelización y afectan de manera preferente a la caracterización de la intensidad del oleaje, representada por  $H_s$ , mientras que la escala temporal dominante de los estados de mar, representada por  $T_p$ , se mantiene relativamente estable.

### **6.2.2.3. Sur peninsular**

El litoral correspondiente al sur peninsular presenta un régimen de oleaje diferenciado respecto a los sectores atlánticos analizados previamente, al encontrarse influido por el dominio mediterráneo y por su posición de transición entre ambos sistemas oceánicos. En este entorno, el oleaje suele generarse bajo condiciones de fetch más limitado y está asociado a estados de mar generalmente menos desarrollados y de periodo más corto, con una mayor dependencia de los sistemas meteorológicos regionales.

El estudio se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Cabo de Gata y el punto SIMAR 2056079. La localización y profundidad de este punto, del orden de 600 m, permiten asumir condiciones de oleaje en aguas profundas, no afectadas directamente por interacción con el fondo ni por procesos costeros locales. La serie observada de la boya proporciona así una referencia instrumental independiente para evaluar la coherencia de las distintas etapas de modelización del sistema SIMAR/WANA en un entorno caracterizado por una clara influencia mediterránea.

La disponibilidad temporal de los registros instrumentales, cuyo inicio se sitúa en el año 2004, condiciona el periodo común de comparación entre los datos observados y las distintas etapas de modelización. En consecuencia, la superposición temporal con la etapa SIMAR-44 resulta más limitada que en otros sectores del estudio, circunstancia que se tiene en cuenta en la interpretación

de los resultados, especialmente en el análisis de percentiles elevados y del comportamiento extremal del oleaje.

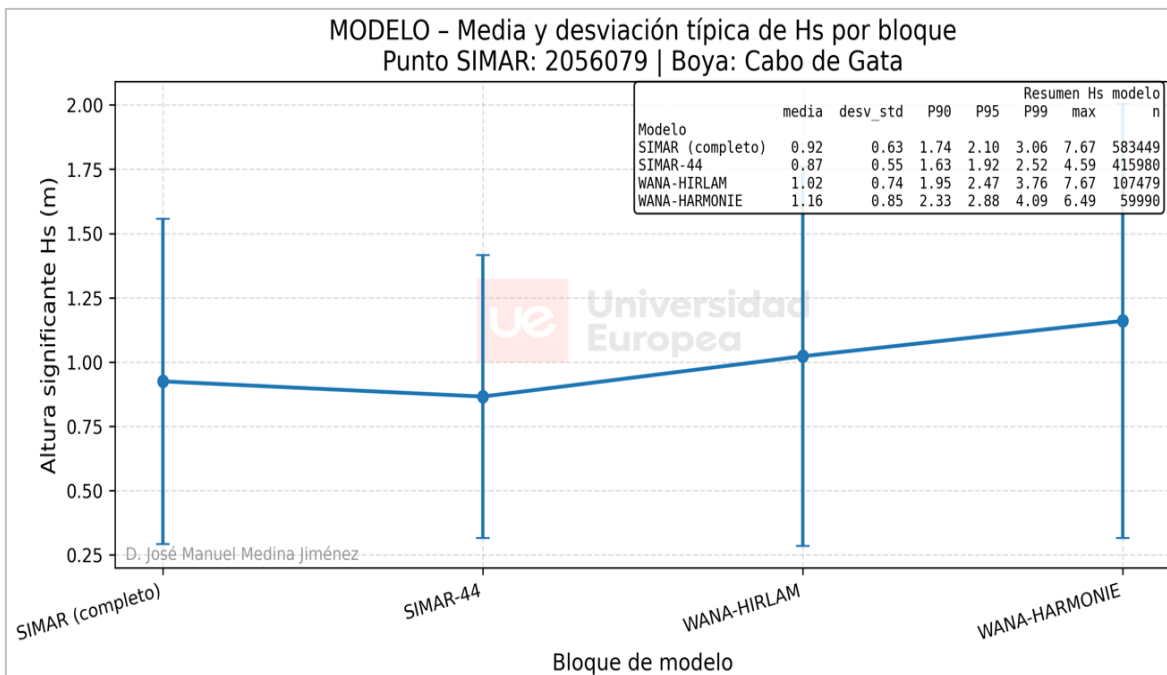
Una vez descrito con detalle el procedimiento de análisis en los ámbitos del norte y oeste peninsular, el estudio correspondiente al sur peninsular se presenta de forma más sintética con el fin de evitar reiteraciones metodológicas. En consecuencia, se incorporan únicamente aquellas figuras estrictamente necesarias para la interpretación de los resultados, remitiéndose el conjunto completo de representaciones gráficas y resultados detallados a la Ficha nº 3 del Anexo.

#### *6.2.2.3.1. Media y desviación típica de Hs y Tp*

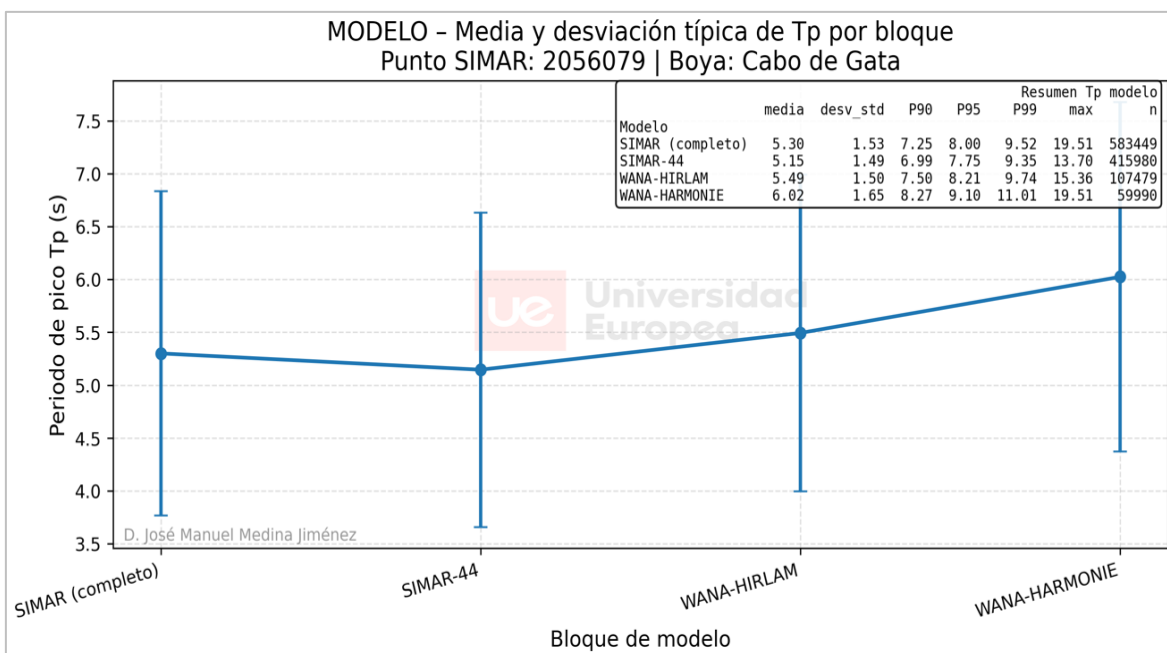
El análisis de la media y la desviación típica de Hs y Tp en el sur peninsular, a partir del punto SIMAR 2056079 y la boya de Cabo de Gata, muestra un comportamiento más atenuado que el observado en los sectores atlánticos norte y oeste, coherente con el menor nivel energético del oleaje en este sector.

En las series modelizadas (Figura 36), la media de Hs presenta diferencias moderadas entre las distintas etapas SIMAR/WANA, con valores medios ligeramente inferiores en SIMAR-44 y un incremento progresivo en las versiones más recientes, alcanzando los valores más elevados en WANA-HARMONIE. No obstante, estas variaciones se desarrollan dentro de un rango reducido de alturas, coherente con el carácter menos energético del clima marítimo en este sector. La desviación típica de Hs muestra valores comparables entre periodos, con un solapamiento amplio de los rangos de variabilidad, lo que indica que las actualizaciones del sistema afectan principalmente al nivel medio representado y no introducen cambios sustanciales en la dispersión de la serie.

En el caso del periodo de pico modelizado (Figura 37), la media de Tp también refleja un incremento suave desde las etapas más antiguas hacia las más recientes, aunque con diferencias absolutas reducidas. La desviación típica de Tp es elevada en relación con el valor medio y presenta un solapamiento significativo entre periodos, lo que sugiere que las distintas etapas describen escalas temporales muy similares y que las diferencias detectadas en el valor medio no permiten una discriminación clara entre modelos a partir de estos estadísticos básicos.



**Figura 36.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079.  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 37.\_** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079.  
 Fuente: Elaboración propia.

La serie observada de la boya de Cabo de Gata (véase ficha nº3 del Anexo I) muestra valores medios de Hs y Tp muy estables entre los distintos periodos temporales considerados, sin evidenciar

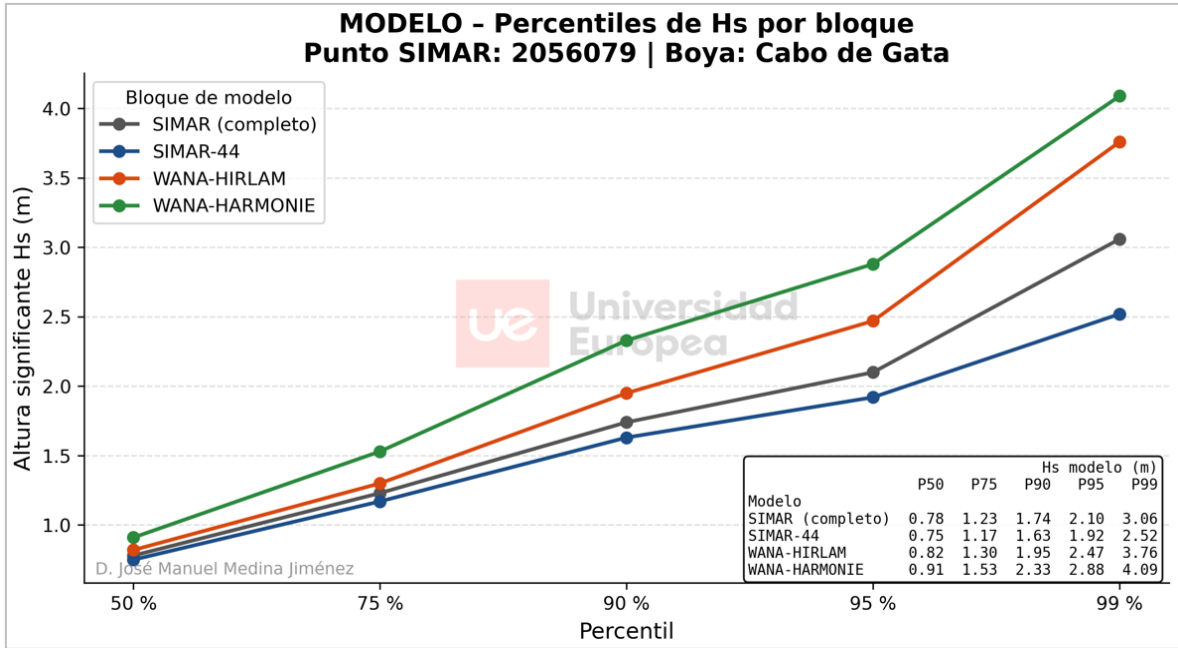
tendencias sistemáticas asociadas a la segmentación por etapas SIMAR/WANA. Del mismo modo, los niveles de dispersión se mantienen en rangos similares a lo largo de toda la serie, lo que es consistente con la estabilidad del clima real de oleaje en el sector sur peninsular y con su menor variabilidad energética respecto a los dominios atlánticos abiertos.

En conjunto, los resultados indican que, en el sur peninsular, las diferencias entre etapas de modelización se manifiestan de forma más atenuada que en los sectores atlánticos norte y oeste. La altura significativa del oleaje presenta ligeros desplazamientos del valor medio entre modelos, mientras que el periodo de pico mantiene un comportamiento particularmente estable. La coherencia observada en los registros instrumentales refuerza la interpretación de que las variaciones detectadas en las series modelizadas responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización SIMAR/WANA y no a cambios estructurales del clima marítimo real en esta zona.

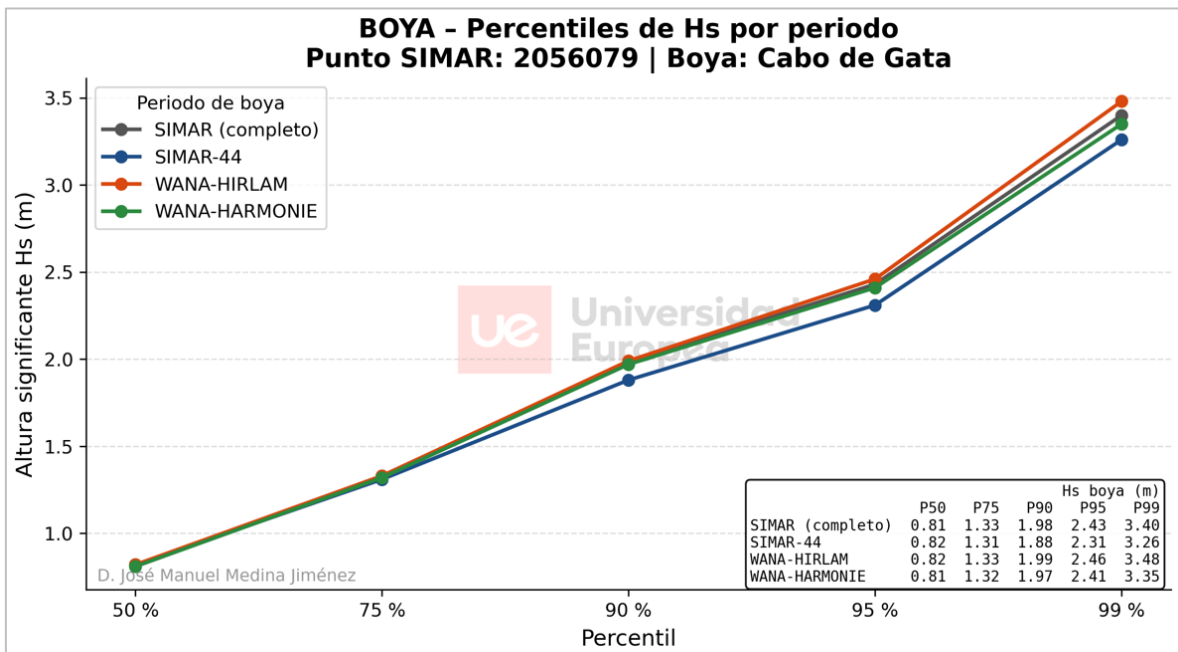
#### *6.2.2.3.2. Percentiles de Hs y Tp*

En el punto SIMAR 2056079, los percentiles de la altura significativa del oleaje (Figura 38) muestran una separación progresiva entre etapas de modelización a medida que se avanza hacia percentiles elevados. Mientras que en los percentiles bajos y medios (P50-P75) las diferencias entre modelos son moderadas, estas se incrementan claramente a partir de P90 y se acentúan en los percentiles más altos (P95-P99). Las etapas más recientes del sistema (WANA-HIRLAM y, especialmente, WANA-HARMONIE) presentan de forma sistemática valores de Hs superiores a los obtenidos con SIMAR-44, situándose la serie SIMAR completa en una posición intermedia. Este patrón indica que las actualizaciones del sistema de modelización afectan de forma más acusada a la representación de la cola alta de la distribución de Hs que a los valores centrales.

En la serie observada de la boya de Cabo de Gata (Figura 39), los percentiles de Hs presentan un comportamiento diferente. Las curvas correspondientes a los distintos periodos temporales muestran valores muy próximos entre sí en la mayor parte de la distribución, con diferencias reducidas incluso en los percentiles elevados. No se identifica un desplazamiento progresivo ni ordenado entre periodos que pueda interpretarse como una evolución coherente del clima real de oleaje. Este comportamiento es coherente con la estabilidad del régimen de oleaje en el sector y refuerza la interpretación de que las diferencias observadas en los resultados modelizados no responden a cambios estructurales de las condiciones marítimas reales.



**Figura 38.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. Fuente: Elaboración propia.

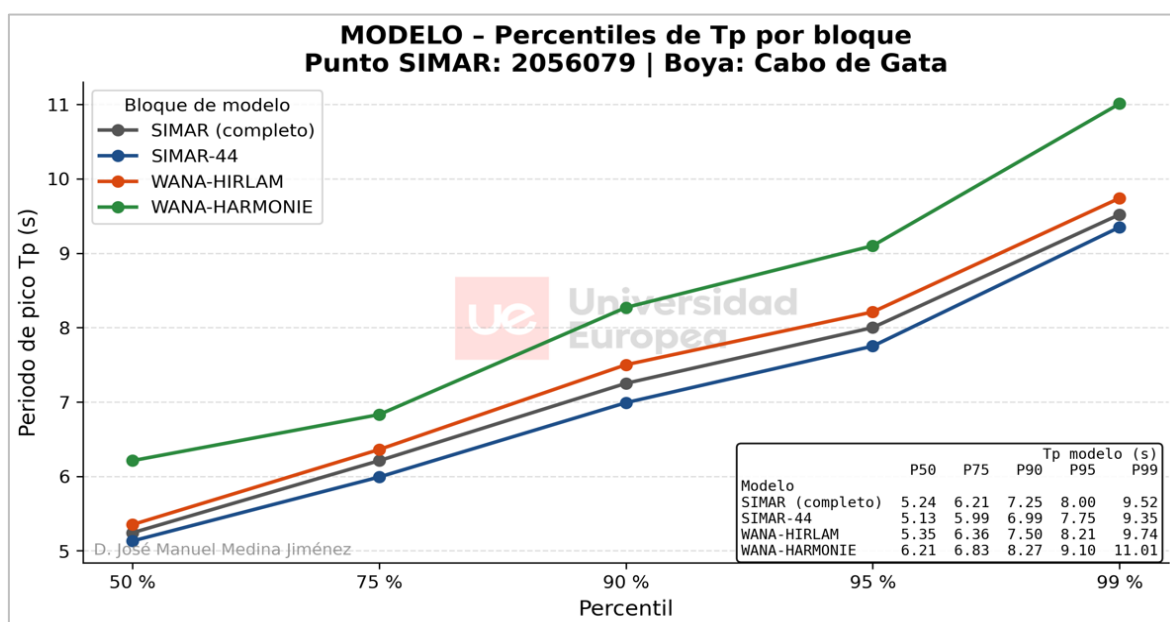


**Figura 39.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al periodo de pico, los percentiles de  $T_p$  (Figura 40) obtenidos en el modelo muestran igualmente una separación entre etapas de modelización, aunque de menor magnitud relativa que en el caso de Hs. Las versiones más recientes tienden a presentar valores de  $T_p$

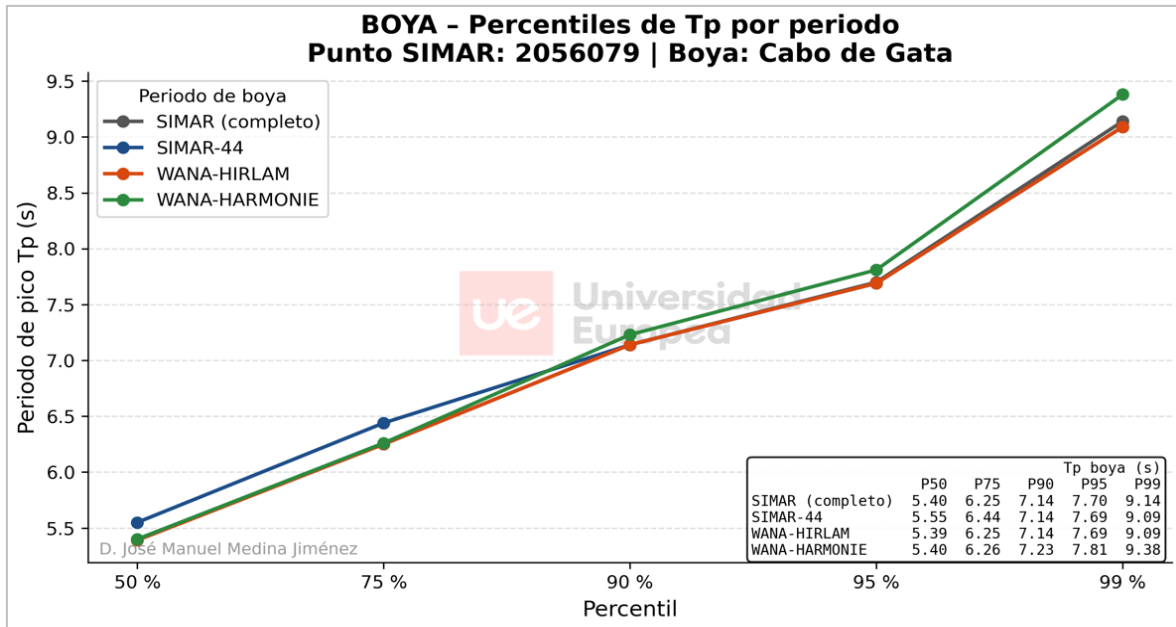
superiores a lo largo de toda la distribución, con diferencias que se hacen más visibles en los percentiles altos. No obstante, estas diferencias se desarrollan dentro de rangos ampliamente solapados, lo que indica que el comportamiento temporal característico del oleaje mantiene una coherencia razonable entre etapas.

Por el contrario, en el registro instrumental de la boya (Figura 41), los percentiles de  $T_p$  muestran un elevado grado de solapamiento entre periodos temporales, sin evidenciar desplazamientos progresivos ni patrones coherentes asociados a la segmentación temporal. Este resultado confirma que no se detecta una evolución sistemática del periodo de pico real en el área de estudio y que, por tanto, los cambios observados en las series modelizadas no pueden atribuirse a modificaciones del clima marítimo.



**Figura 40.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el análisis de percentiles en el sur peninsular muestra un comportamiento coherente con el observado en los sectores atlánticos, aunque con diferencias más moderadas debido al menor nivel energético del régimen de oleaje en este sector. Las diferencias entre etapas SIMAR/WANA se concentran principalmente en la representación de los valores elevados de  $H_s$ , mientras que el periodo de pico presenta una mayor estabilidad relativa. La ausencia de un comportamiento ordenado en los percentiles de las series observadas refuerza la interpretación de que los desplazamientos detectados en las distribuciones modelizadas responden a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización y no a cambios reales del clima de oleaje en el sector.



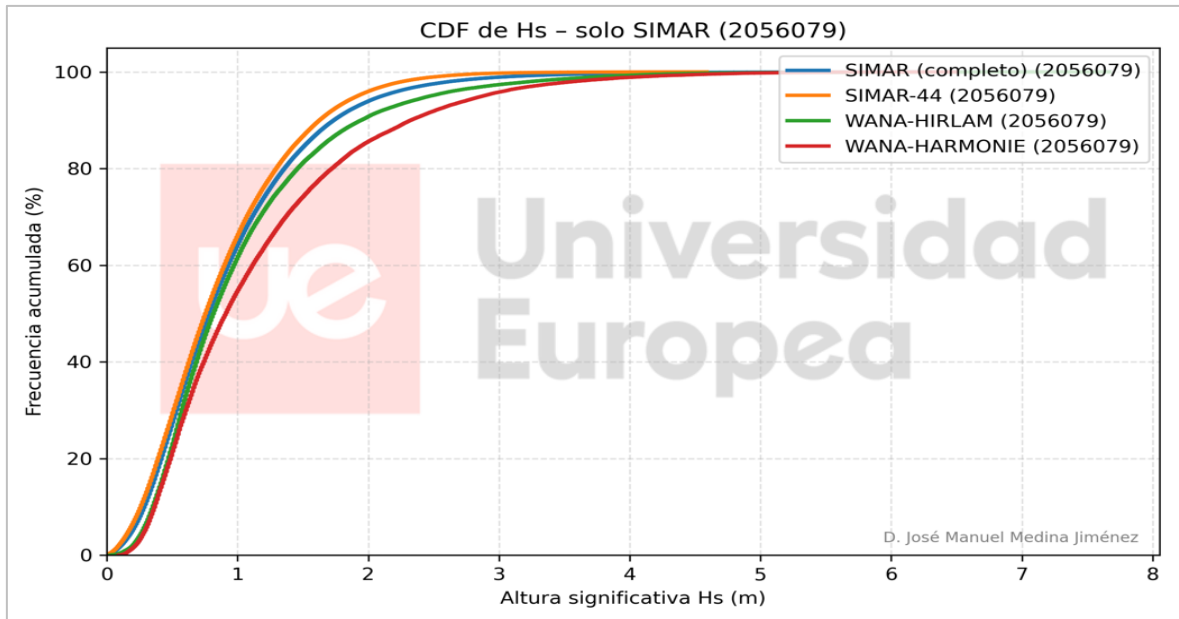
**Figura 41.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata..

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.3.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)

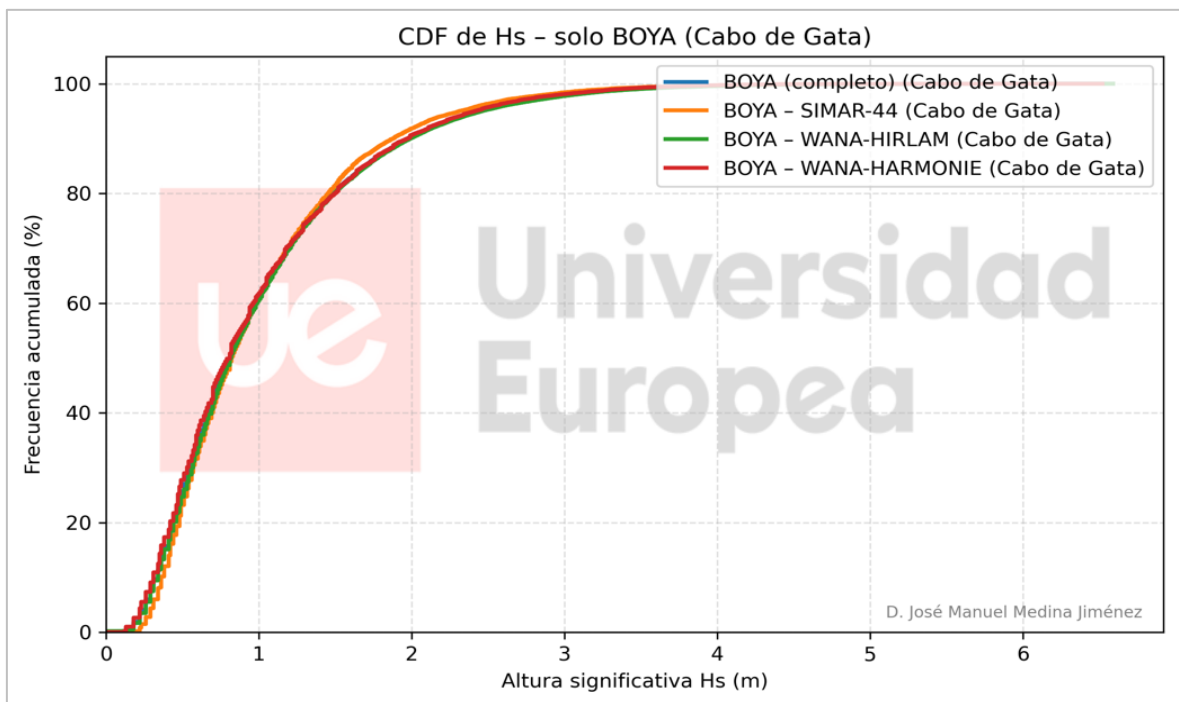
En el caso de la altura significativa del oleaje, las CDF obtenidas a partir de las series modelizadas en el punto SIMAR 2056079 (Figura 42) muestran desplazamientos apreciables entre etapas, especialmente visibles en el tramo medio y alto de la distribución. Las versiones más recientes del sistema tienden a desplazar la curva hacia valores superiores de  $H_s$ , lo que indica una mayor probabilidad acumulada de alcanzar alturas de ola más elevadas para un mismo nivel de frecuencia. Este comportamiento es coherente con lo observado previamente en los análisis de media, desviación típica y percentiles, y pone de manifiesto que las sucesivas actualizaciones del modelo introducen modificaciones sistemáticas en la representación estadística del oleaje, incluso en un entorno de menor energía media como el sur peninsular.

Por su parte, las CDF de  $H_s$  obtenidas a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Gata (Figura 43) presentan un grado elevado de solapamiento entre los distintos periodos temporales considerados. Si bien se aprecia una ligera separación de la curva correspondiente al periodo SIMAR-44 en el tramo central de la distribución, no se identifica un desplazamiento progresivo ni ordenado entre etapas que pueda interpretarse como una evolución sistemática del clima de oleaje real.



**Figura 42.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079.

Fuente: Elaboración propia.

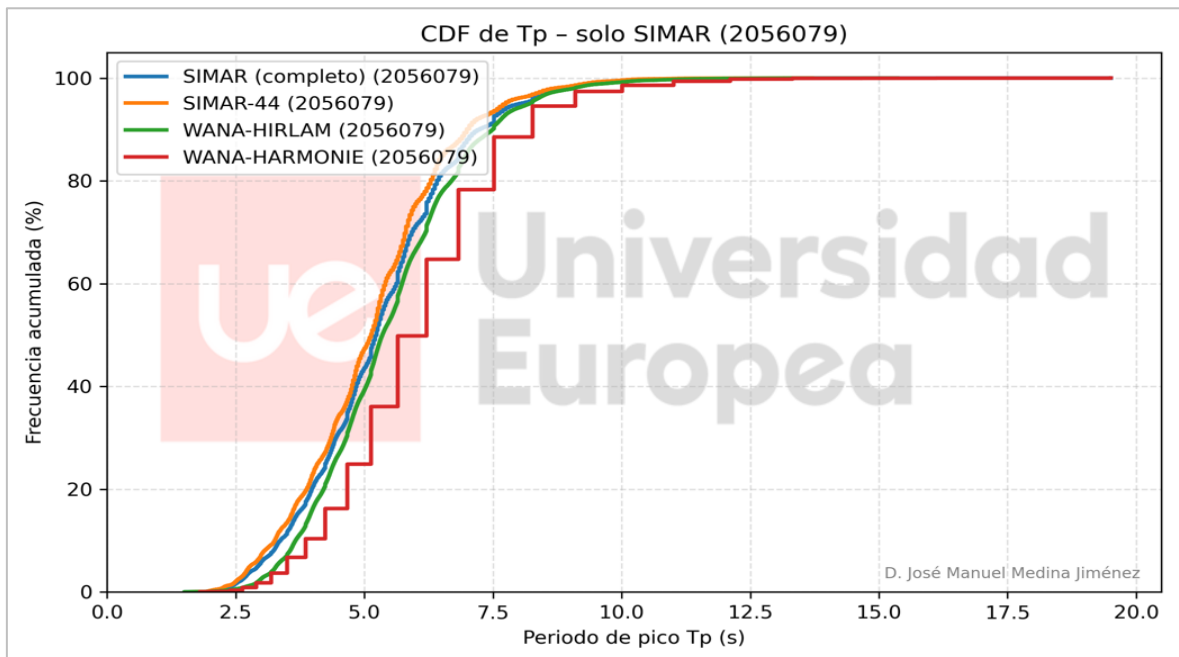


**Figura 43.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata.

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el periodo de pico, las CDF obtenidas (Figura 44) a partir de las series modelizadas muestran igualmente desplazamientos entre etapas, aunque de menor entidad relativa que los

observados para Hs. Las versiones más recientes del modelo tienden a representar una mayor probabilidad acumulada de periodos de pico más largos, especialmente en el tramo medio-alto de la distribución. Este comportamiento es consistente con los incrementos detectados en los percentiles elevados de  $T_p$  y confirma que las actualizaciones del sistema afectan también a la escala temporal característica del oleaje, si bien de forma más moderada que en el caso de la altura significativa.



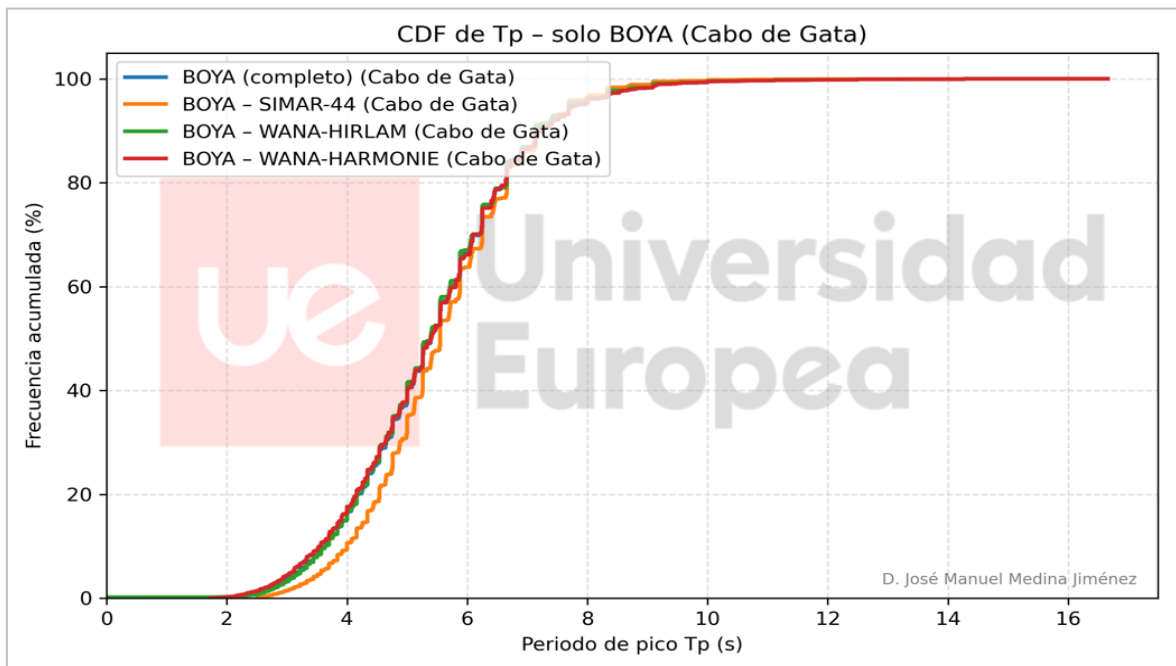
**Figura 44.** Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2056079.

Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, las CDF de  $T_p$  obtenidas a partir de la boya de Cabo de Gata (Figura 45) muestran un comportamiento muy similar entre los distintos periodos, con curvas prácticamente coincidentes a lo largo de toda la distribución. No se observa ningún desplazamiento progresivo ni un comportamiento ordenado asociado a la segmentación temporal, lo que sugiere que el periodo de pico real se mantiene globalmente estable a lo largo del intervalo analizado. Este resultado refuerza la interpretación de que las diferencias detectadas en las series modelizadas de  $T_p$  responden a cambios introducidos por el propio sistema de modelización y no a modificaciones reales del clima marítimo en la zona.

En conjunto, el análisis de las CDF en el sur peninsular confirma que las diferencias entre las distintas etapas SIMAR/WANA se manifiestan de forma más clara en las series modelizadas,

mientras que los registros instrumentales no muestran una evolución apreciable del clima de oleaje asociada a la segmentación temporal. Esta coherencia entre análisis refuerza la conclusión de que los desplazamientos observados en las series del modelo deben atribuirse fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización y no a variaciones reales de las condiciones marítimas en el área de estudio.



**Figura 45.** Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos temporales, en la boya de Cabo de Gata.

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.3.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización

El análisis estadístico realizado para el sur peninsular pone de manifiesto que las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA no constituyen una serie estrictamente homogénea desde el punto de vista estadístico, especialmente en lo que respecta a la altura significativa del oleaje. En las series modelizadas se identifican desplazamientos progresivos en los valores medios, en los percentiles elevados y en la forma de las funciones de distribución acumulada, lo que indica que las sucesivas actualizaciones del sistema introducen cambios consistentes en la representación del oleaje.

Estos desplazamientos son coherentes con los observados previamente en el norte y oeste peninsular, si bien su magnitud es menor, en consonancia con el menor nivel energético característico del sur peninsular y con la influencia combinada de oleaje atlántico atenuado y

condiciones del mediterráneo. Aun así, el patrón de cambio entre etapas es consistente y apunta a modificaciones internas del sistema de modelización más que a variaciones aleatorias.

Por el contrario, el análisis de los registros instrumentales de la boya de Cabo de Gata no evidencia variaciones coherentes del clima de oleaje asociadas a la segmentación temporal por etapas SIMAR/WANA. Tanto los estadísticos básicos como los percentiles y las funciones de distribución acumulada muestran un comportamiento estable entre periodos, sin desplazamientos progresivos ni patrones ordenados que puedan interpretarse como una evolución real del régimen de oleaje.

En consecuencia, la comparación conjunta entre modelo y registros instrumentales permite atribuir las diferencias detectadas en las series modelizadas del sur peninsular a las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR/WANA, y no a cambios reales del clima marítimo.

#### **6.2.2.4. Este peninsular**

El litoral correspondiente al este peninsular presenta un régimen de oleaje dominado por la dinámica mediterránea, caracterizado por episodios generalmente más breves y asociados a condiciones de fetch más limitado que en las fachadas atlánticas previamente analizadas. Como consecuencia, el régimen de oleaje suele estar dominado por estados de mar de desarrollo moderado y periodos medios relativamente bajos asociados a mar de viento generado en el propio Mediterráneo. Sin embargo, la variabilidad meteorológica regional puede dar lugar a episodios puntuales con periodos de pico más elevados, reflejando la coexistencia de distintos tipos de estados de mar en este sector.

El estudio se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Tarragona y el punto SIMAR 2102128. La localización y profundidad de este punto permiten asumir condiciones representativas de oleaje en aguas profundas, sin influencia significativa de procesos costeros locales, lo que facilita el contraste entre las series modelizadas y el registro instrumental.

La serie instrumental de la boya de Tarragona presenta un inicio de registro a finales del año 2004, lo que condiciona el periodo común de comparación entre los datos observados y las distintas etapas de modelización. En consecuencia, la superposición temporal con la etapa SIMAR-44 resulta más limitada que en otros ámbitos del estudio, circunstancia que se tiene en cuenta en la interpretación de los resultados, especialmente en el análisis de percentiles elevados y del comportamiento extremal del oleaje.

En este contexto, el estudio se orienta a evaluar el comportamiento de los principales estadísticos de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico, así como la forma de sus funciones de distribución acumulada, con el fin de identificar posibles diferencias entre las distintas etapas del sistema de modelización SIMAR/WANA. Dada la menor longitud de la serie instrumental y la menor energía media del oleaje en este sector, el análisis se presenta con un enfoque más sintético.

En consecuencia, se incluyen únicamente aquellas figuras estrictamente necesarias para la interpretación de los resultados, mientras que el conjunto completo de representaciones gráficas se recoge de forma sistemática en la ficha nº 4 del anexo del presente documento. Este planteamiento permite mantener la coherencia metodológica del análisis sin sobrecargar el cuerpo principal del documento y garantiza al mismo tiempo la trazabilidad del proceso seguido.

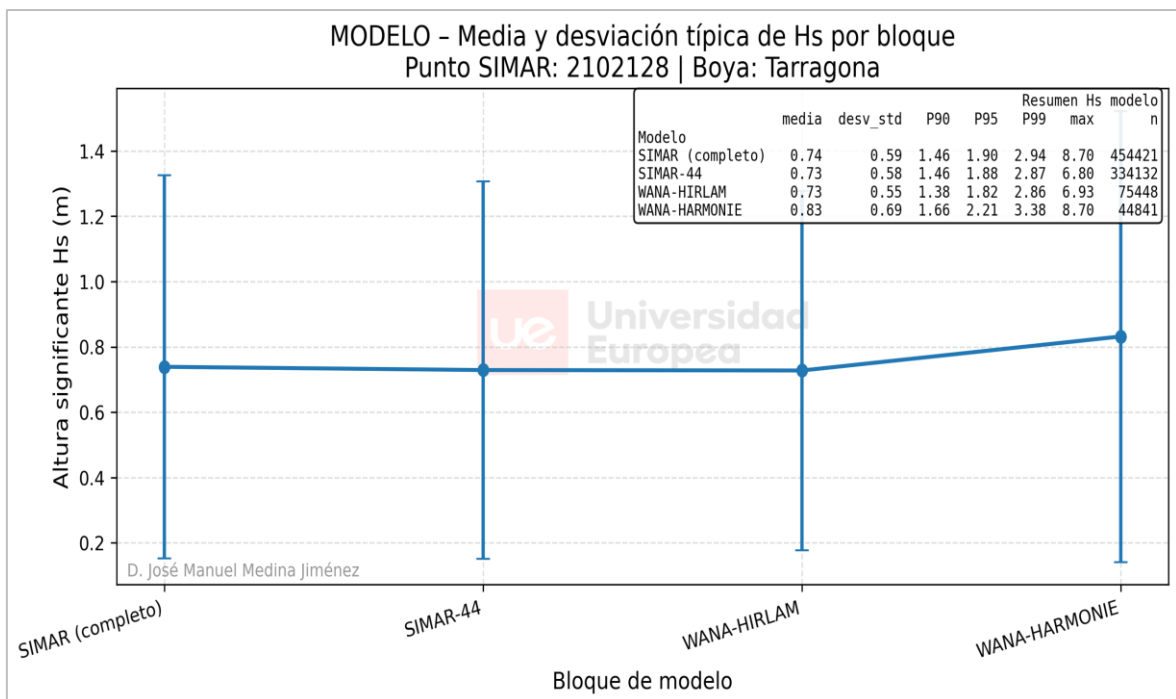
#### *6.2.2.4.1. Media y desviación típica de Hs y Tp*

El análisis de la media y la desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) y del periodo de pico (Tp) en el ámbito del este peninsular se ha realizado siguiendo exactamente el mismo procedimiento aplicado en los restantes ámbitos geográficos del estudio, lo que garantiza la coherencia metodológica y la comparabilidad de los resultados entre regiones y etapas de modelización.

En las series correspondientes al modelo (Figura 46), los resultados ponen de manifiesto un comportamiento muy similar entre las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM, tanto en los valores medios como en la dispersión de Hs y Tp. Las medias prácticamente coinciden y las desviaciones típicas presentan magnitudes comparables, lo que indica que ambas configuraciones del sistema ofrecen una representación estadística equivalente del régimen medio del oleaje en este ámbito. Este comportamiento es coherente con la fuerte superposición de las distribuciones observada entre ambas etapas..

Esta similitud no implica que el sistema de modelización no haya evolucionado, sino que, en el contexto del este peninsular, las modificaciones introducidas entre SIMAR-44 y WANA-HIRLAM no resultan suficientemente relevantes como para generar cambios detectables en los estadísticos integrados del oleaje. En esta región predominan estados de mar de desarrollo limitado y una elevada variabilidad temporal, de modo que las diferencias entre configuraciones del modelo quedan en gran medida absorbidas por la variabilidad natural del propio sistema cuando se analizan valores medios y dispersión.

Por el contrario, la transición a la etapa WANA-HARMONIE introduce un cambio claramente apreciable en las series modelizadas. En esta etapa se observa un incremento de la media de Hs acompañado de un ligero aumento de la dispersión de la serie, así como un aumento de los valores medios y de la dispersión del Tp. Este comportamiento indica una respuesta estadística diferenciada del oleaje modelizado, asociada a un cambio de mayor entidad en el sistema de modelización, que se manifiesta incluso en un ámbito donde las etapas anteriores mostraban resultados muy similares.



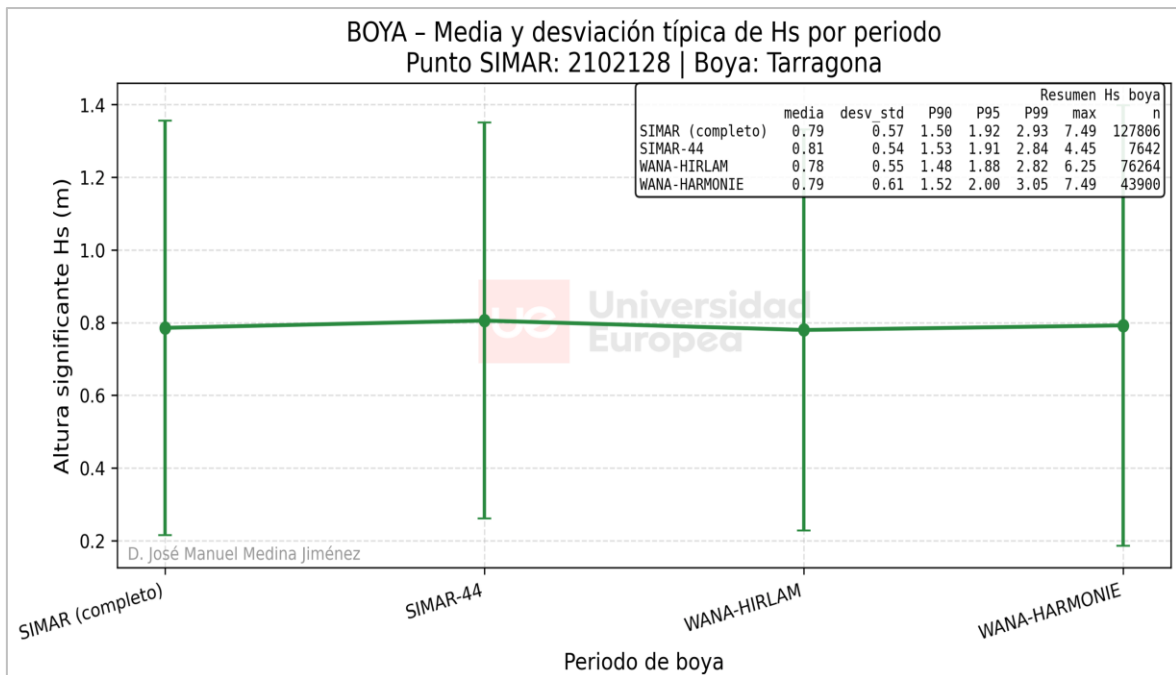
**Figura 46.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128.

Fuente: Elaboración propia.

En los registros de boya, tanto Hs como Tp presentan valores medios estables y desviaciones típicas similares entre los distintos periodos considerados, sin que se identifiquen tendencias ni variaciones apreciables entre etapas. Este comportamiento sugiere que el régimen medio del oleaje observado en el este peninsular se mantiene esencialmente constante a lo largo del periodo analizado.

Debe tenerse en cuenta que el registro instrumental en este ámbito comienza a finales del año 2004, lo que implica que el tamaño muestral disponible durante la etapa SIMAR-44 es sensiblemente menor que en las etapas posteriores. Esta circunstancia aconseja interpretar con cautela las pequeñas diferencias observadas en los estadísticos correspondientes a dicho periodo.

No obstante, esta limitación no altera la conclusión general de estabilidad del régimen medio observado, ya que no se detectan cambios coherentes ni persistentes en las series instrumentales.



**Figura 47.** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Tarragona.

Fuente: Elaboración propia.

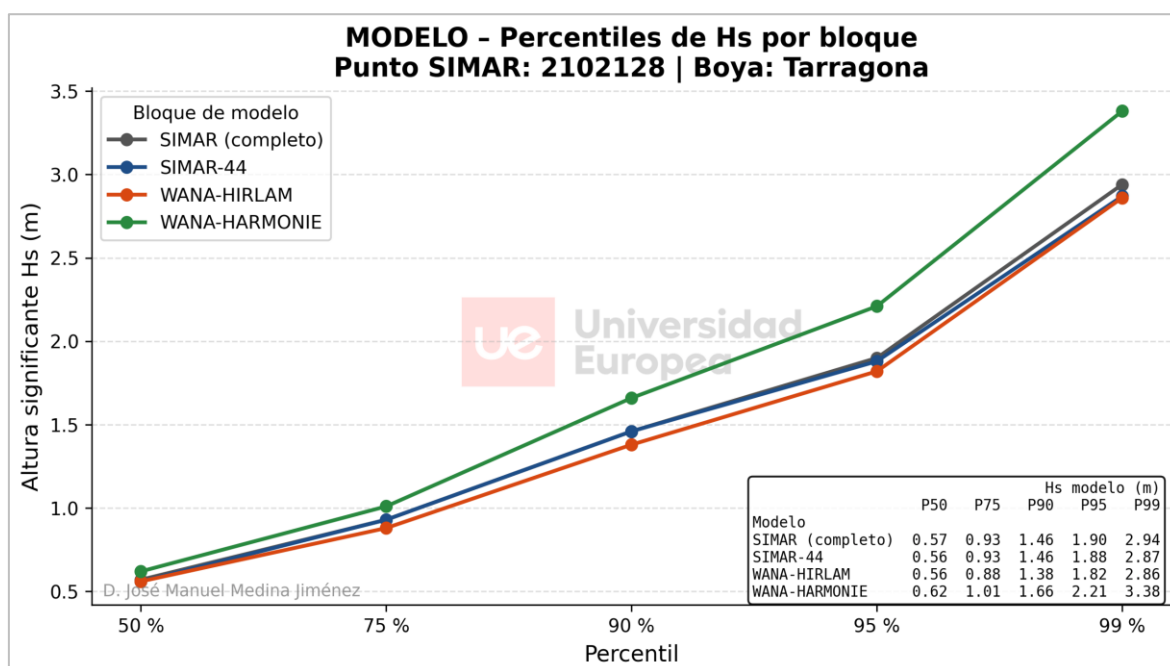
En conjunto, el análisis de la media y la desviación típica de Hs y Tp en el este peninsular muestra un patrón claramente definido: las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM ofrecen una representación estadística muy similar del régimen medio del oleaje, mientras que la etapa WANA-HARMONIE introduce cambios apreciables en los estadísticos del modelo. La ausencia de una señal equivalente en los registros de boya indica que estos cambios no responden a una evolución real del clima marítimo, sino a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.

#### 6.2.2.4.2. Percentiles de la altura significativa (Hs) y del periodo de pico (Tp)

En las series modelizadas (Figura 48), los percentiles de Hs correspondientes a las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM muestran valores muy próximos entre sí a lo largo de todo el rango analizado. Este elevado grado de solapamiento se observa tanto en percentiles centrales como en percentiles altos, lo que indica que ambas etapas representan de forma muy similar no solo el régimen medio del oleaje, sino también los estados de mar más energéticos en el ámbito del este peninsular.

Por el contrario, la etapa WANA-HARMONIE presenta un desplazamiento claro de los percentiles hacia valores superiores, especialmente a partir del percentil P90 y de forma más acusada en los

percentiles P95 y P99. Este comportamiento refleja una mayor representación de estados de mar asociados a alturas significantes de oleaje elevadas, lo que pone de manifiesto una respuesta diferenciada del sistema en la cola alta de la distribución. La progresiva separación entre WANA-HARMONIE y las etapas anteriores conforme se avanza hacia percentiles extremos es coherente con el patrón identificado en otros ámbitos geográficos del estudio.



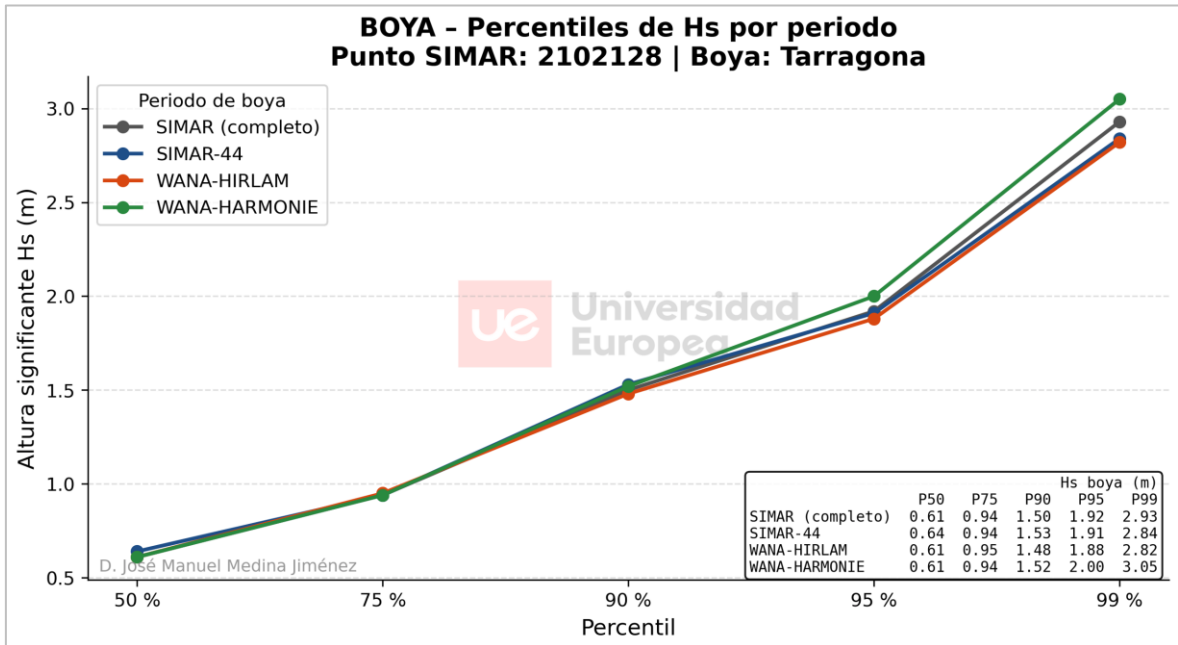
**Figura 48.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. Fuente: Elaboración propia.

En los registros instrumentales de la boya (Figura 49), los percentiles de Hs presentan una notable estabilidad entre periodos, con diferencias reducidas y sin apreciarse una evolución ordenada entre etapas. Las pequeñas variaciones observadas en los percentiles altos deben interpretarse con cautela, especialmente en la etapa SIMAR-44, debido al menor tamaño muestral disponible en este ámbito. No obstante, en conjunto, los resultados no evidencian un desplazamiento consistente de la cola de la distribución que pueda interpretarse como una evolución real del clima marítimo.

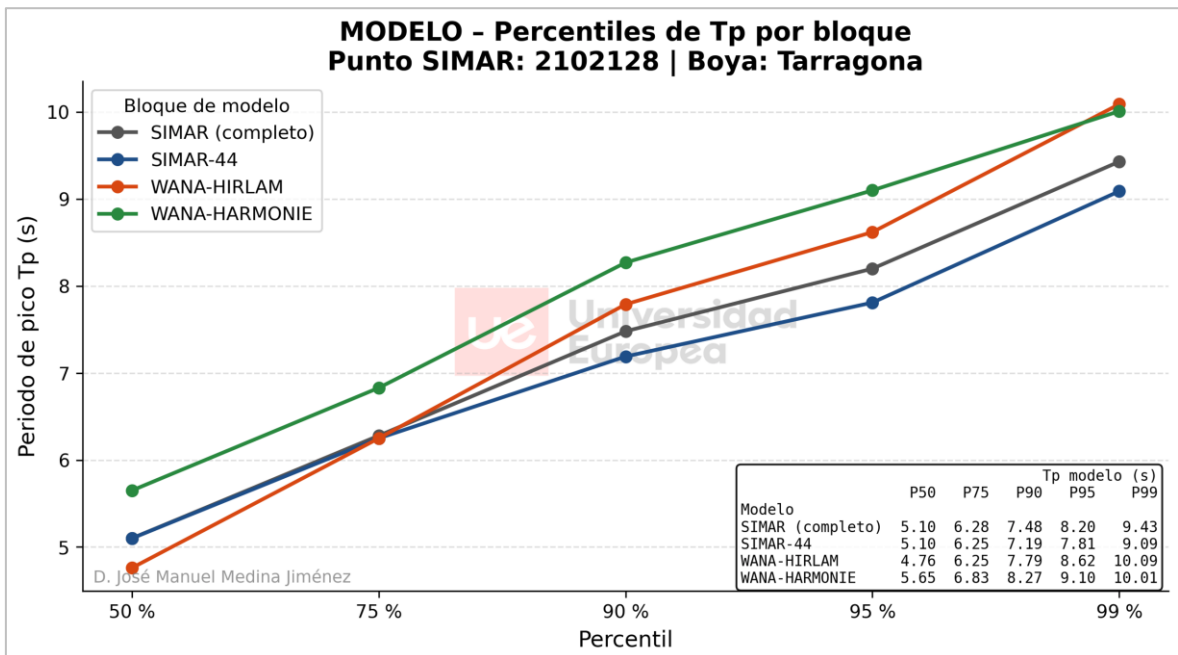
El análisis de los percentiles de  $T_p$  (Figura 50) muestra, en las series modelizadas, un comportamiento similar al observado para Hs. Las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan percentiles muy próximos en todo el rango analizado, lo que refuerza la idea de una representación equivalente de la escala temporal del oleaje en ambas configuraciones del sistema.

La etapa WANA-HARMONIE muestra un incremento progresivo de los percentiles de  $T_p$ , especialmente en los valores altos de la distribución (P90-P99). Este comportamiento sugiere una

mayor representación de estados de mar asociados a periodos característicos más largos en la configuración más reciente del modelo. El desplazamiento observado resulta además consistente con la tendencia detectada en los percentiles altos de Hs, lo que apunta a una modificación en la caracterización de los estados de mar más energéticos en esta etapa de modelización.



**Figura 49.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos temporales, en la boya de Tarragona. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 50.** Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128. Fuente: Elaboración propia.

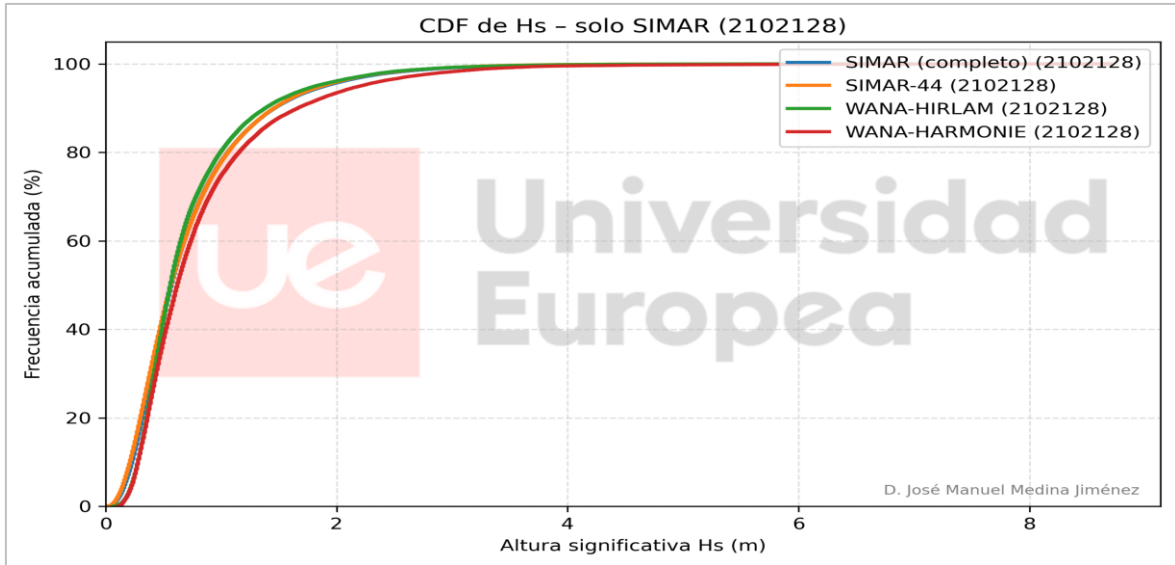
En los datos de boya, los percentiles de  $T_p$  permanecen prácticamente constantes entre periodos, sin que se identifiquen diferencias sistemáticas ni desplazamientos progresivos hacia valores mayores. Al igual que en el caso de  $H_s$ , la menor extensión temporal del registro durante la etapa SIMAR-44 aconseja una interpretación prudente de las pequeñas diferencias observadas, que no alteran la conclusión general de estabilidad del régimen observado.

De esta forma, el análisis de percentiles en el este peninsular refuerza las conclusiones obtenidas a partir de los estadísticos básicos. Mientras que las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan un comportamiento estadístico muy similar tanto en percentiles centrales como en percentiles extremos, la etapa WANA-HARMONIE introduce un desplazamiento claro y progresivo de las colas de las distribuciones de  $H_s$  y, en menor medida, de  $T_p$ . La ausencia de una señal equivalente en los registros instrumentales indica que estas diferencias responden a las actualizaciones del sistema de modelización y no a cambios estructurales del clima marítimo real, lo que justifica el análisis segmentado por etapas en los estudios posteriores del régimen extremal del oleaje.

#### *6.2.2.4.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)*

En las series modelizadas (Figura 51), las CDF de  $H_s$  correspondientes a las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM muestran un elevado grado de solapamiento a lo largo de prácticamente todo el rango de alturas, lo que indica una representación muy similar de la distribución completa del oleaje en ambas configuraciones del sistema. Esta coincidencia se mantiene tanto en los valores bajos y medios como en el tramo superior de la distribución, reforzando la conclusión de que, en el ámbito del este peninsular, ambas etapas ofrecen una caracterización estadística equivalente del régimen de oleaje.

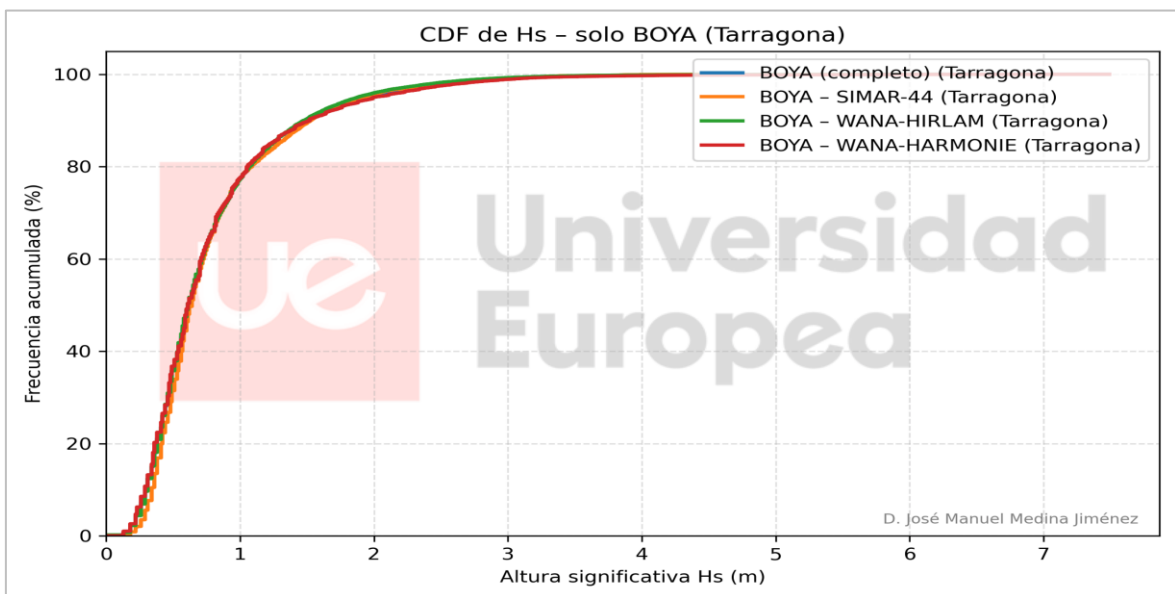
Por el contrario, la CDF correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE presenta un desplazamiento apreciable hacia valores superiores de  $H_s$ , especialmente apreciable en el tramo alto de la distribución. Este desplazamiento indica que, para una misma probabilidad acumulada, la modelización más reciente asigna valores de altura significante mayores que las etapas anteriores, coherentemente con el incremento observado en medias, desviaciones típicas y percentiles altos. La separación progresiva entre las curvas conforme se avanza hacia probabilidades acumuladas elevadas pone de manifiesto que las diferencias entre etapas se concentran principalmente en los estados de mar más energéticos.



**Figura 51.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128.

Fuente: Elaboración propia.

En los registros de boya (Figura 52), las CDF de  $H_s$  correspondientes a los distintos periodos considerados se superponen de forma muy estrecha, sin apreciarse una evolución ordenada entre etapas. Las pequeñas diferencias locales observadas pueden atribuirse a la variabilidad natural del oleaje y a las diferencias en el tamaño muestral, especialmente en la etapa SIMAR-44, pero no evidencian cambios estructurales en la distribución del oleaje observado. Este comportamiento confirma la estabilidad del régimen real de  $H_s$  en el este peninsular durante el periodo analizado.



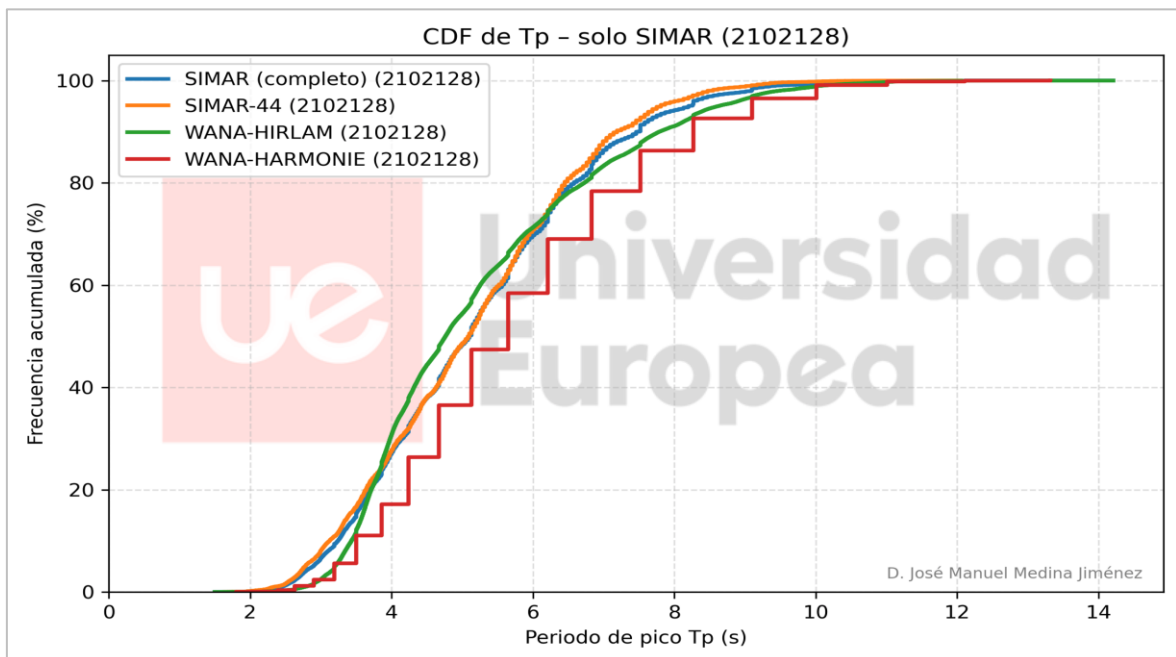
**Figura 52.\_** Funciones de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos temporales, en la boya de Tarragona.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las CDF de  $T_p$  en las series modelizadas (Figura 53) muestra un patrón similar al observado para  $H_s$ , aunque con diferencias menos acusadas. Las curvas correspondientes a SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan nuevamente un elevado grado de solapamiento, lo que indica una representación muy similar de la distribución completa de los periodos de pico en ambas etapas.

La etapa WANA-HARMONIE, en cambio, muestra un desplazamiento de la CDF hacia valores de  $T_p$  ligeramente superiores, especialmente en el tramo medio y alto de la distribución. Este comportamiento refleja una mayor presencia de estados de mar con periodos característicos más largos en la modelización más reciente, en coherencia con los incrementos detectados en los percentiles altos de  $T_p$ . No obstante, la magnitud de este desplazamiento es menor que en el caso de  $H_s$ , lo que confirma el carácter secundario de  $T_p$  frente a la altura significativa en la diferenciación entre etapas.

En los datos de boya, las CDF de  $T_p$  correspondientes a los distintos periodos se mantienen prácticamente coincidentes en todo el rango de valores, sin que se observen diferencias persistentes ni cambios en la forma de la distribución. Al igual que en  $H_s$ , la estabilidad de las curvas indica la ausencia de una evolución significativa del régimen temporal del oleaje observado en el ámbito mediterráneo.



**Figura 53.** Funciones de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 2102128.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación de las funciones de distribución acumulada en el este peninsular integra y refuerza los resultados obtenidos a partir de los estadísticos básicos y los percentiles. Mientras que las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan distribuciones prácticamente coincidentes tanto para Hs como para Tp, la etapa WANA-HARMONIE introduce un desplazamiento claro y coherente de las CDF, más acusado en la altura significativa del oleaje y concentrado en la parte alta de la distribución.

La ausencia de desplazamientos equivalentes en las CDF de las series instrumentales confirma que estas diferencias no responden a cambios reales del clima marítimo, sino a las actualizaciones del sistema de modelización.

#### *6.2.2.4.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización*

El análisis conjunto de los estadísticos básicos, los percentiles y las funciones de distribución acumulada permite realizar una síntesis comparativa del comportamiento estadístico del oleaje en el este peninsular a lo largo de las distintas etapas del sistema de modelización SIMAR/WANA. Esta síntesis facilita la identificación de patrones comunes y diferencias relevantes entre periodos, integrando la información obtenida de forma coherente y consistente.

En las series modelizadas, las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM muestran un comportamiento estadístico muy similar tanto Hs como para el Tp. Esta similitud se manifiesta en valores medios prácticamente coincidentes, dispersiones comparables, percentiles superpuestos y funciones de distribución acumulada que presentan un elevado grado de solapamiento. En el contexto del este peninsular, ambas etapas proporcionan, por tanto, una representación estadística equivalente del régimen medio y de los estados de mar más representativos, sin que se identifiquen diferencias sistemáticas entre ellas.

La etapa WANA-HARMONIE, en cambio, presenta un comportamiento claramente diferenciado en las series modelizadas. Los resultados muestran un desplazamiento progresivo de los estadísticos hacia valores superiores, más acusado en la altura significativa del oleaje y concentrado especialmente en la parte alta de las distribuciones. Este patrón se refleja de forma consistente en medias, desviaciones típicas, percentiles elevados y en la forma de las funciones de distribución acumulada, indicando una respuesta estadística distinta del sistema de modelización en esta etapa respecto a las anteriores.

En los registros instrumentales de la boya, el comportamiento estadístico del oleaje se mantiene notablemente estable entre los distintos periodos considerados. Tanto Hs como Tp presentan valores medios, dispersiones, percentiles y funciones de distribución acumulada muy similares, sin desplazamientos coherentes ni cambios estructurales entre etapas. Las pequeñas diferencias observadas, particularmente en la etapa SIMAR-44, se explican por el menor tamaño muestral disponible en este ámbito y no alteran la conclusión general de estabilidad del régimen observado.

La comparación conjunta entre modelos y registros instrumentales permite concluir que las diferencias detectadas entre periodos de modelización en el este peninsular responden fundamentalmente a las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA y no a una evolución real del clima marítimo.

#### **6.2.2.5. Norte de canarias**

El norte del archipiélago canario presenta un régimen de oleaje caracterizado por la influencia predominante del swell procedente del Atlántico Norte. A diferencia de los ámbitos mediterráneos analizados previamente, este sector se encuentra expuesto a trenes de oleaje de largo recorrido generados en latitudes más septentrionales, lo que favorece la presencia de estados de mar con periodos de pico relativamente elevados incluso en condiciones de altura significativa moderada.

El estudio se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Gran Canaria, situada en aguas profundas a una profundidad aproximada de 780 m al norte de la isla, y el punto SIMAR 1017013, localizado en sus proximidades. La profundidad y localización de ambos puntos permiten considerar que describen condiciones representativas de oleaje en aguas profundas, sin influencia directa de procesos costeros locales.

En el caso de la boya de Gran Canaria, los registros de oleaje direccional se encuentran disponibles desde mediados del año 2003, por lo que el periodo común de análisis entre los datos observados y las distintas etapas de modelización se inicia a partir de dicha fecha. En consecuencia, la superposición temporal con la etapa SIMAR-44 resulta más limitada que en otros ámbitos del estudio, circunstancia que se tiene en cuenta en la interpretación de los resultados, especialmente en el análisis de percentiles elevados y del comportamiento extremal del oleaje.

La localización de la boya, al norte de Gran Canaria, se encuentra parcialmente condicionada por la presencia de la isla de Tenerife, que introduce un efecto de sombra para determinados sectores direccionales. Este condicionante ha sido considerado en la definición de las direcciones de oleaje

utilizadas en el presente estudio (véase Figura 5), garantizando que las trayectorias analizadas correspondan a propagación en mar abierto y evitando la influencia de procesos locales asociados al apantallamiento insular.

Bajo estas consideraciones, el estudio se orienta a evaluar el comportamiento de los principales estadísticos de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico, así como la forma de sus funciones de distribución acumulada, con el fin de identificar posibles diferencias entre las distintas etapas del sistema de modelización SIMAR/WANA y valorar la coherencia de su representación del régimen de oleaje en este entorno insular.

#### *6.2.2.5.1. Media y desviación típica de Hs y Tp*

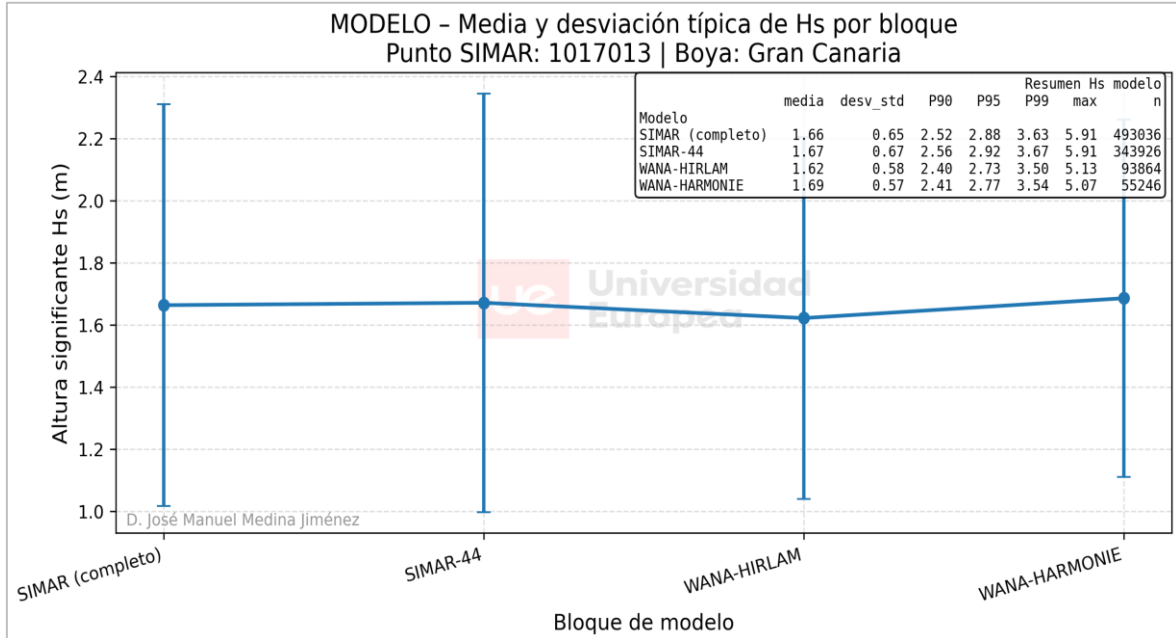
El análisis de la media y la desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) y del periodo de pico (Tp) en el norte de Canarias se ha realizado siguiendo el mismo procedimiento metodológico aplicado en los restantes ámbitos del estudio, lo que permite una comparación directa entre las distintas etapas del sistema de modelización SIMAR/WANA y los registros instrumentales disponibles.

En las series correspondientes al modelo (Figura 54), los valores medios de Hs se mantienen relativamente estables entre las distintas etapas de modelización, con magnitudes muy próximas entre sí. Las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan valores medios prácticamente coincidentes, mientras que la etapa WANA-HARMONIE muestra un ligero incremento respecto a las anteriores. Estas diferencias, no obstante, son moderadas y se sitúan dentro de un rango coherente con la variabilidad natural del oleaje en este ámbito atlántico.

La desviación típica de Hs en el modelo presenta valores comparables entre etapas, sin cambios abruptos en su magnitud. Este comportamiento indica que la dispersión del régimen de oleaje modelizado se mantiene esencialmente constante a lo largo de las distintas configuraciones del sistema, sin evidencias de una ampliación significativa del rango de condiciones representadas en términos de altura significativa.

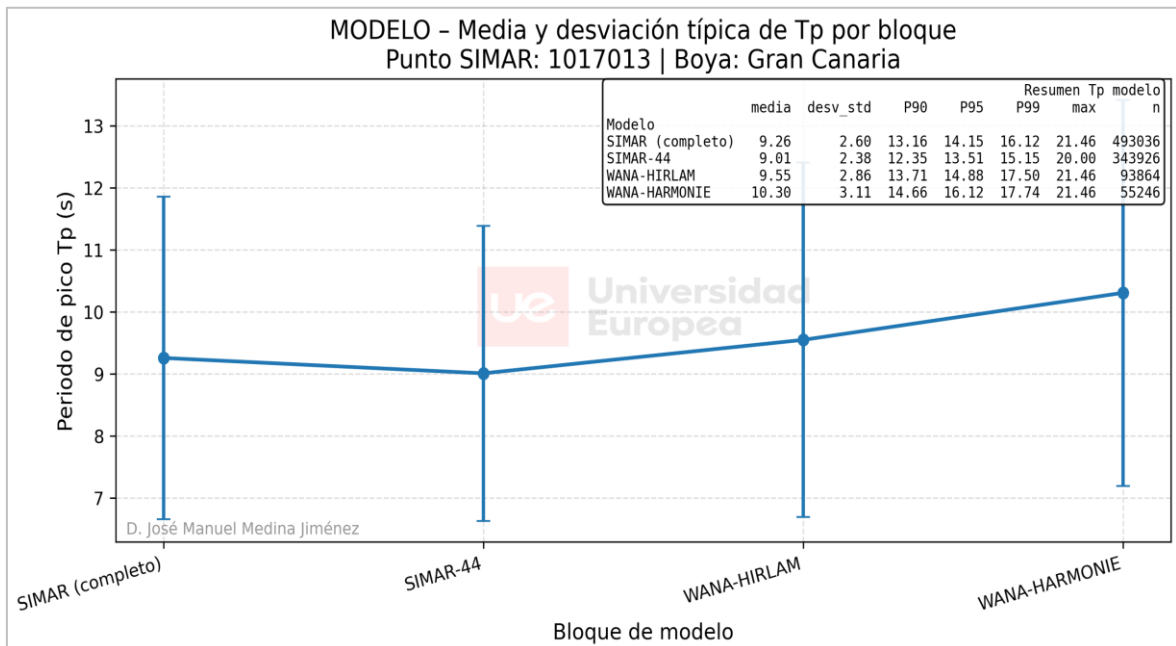
En cuanto al Tp (Figura 55), las series modelizadas muestran una evolución más marcada entre etapas. Los valores medios de Tp aumentan progresivamente desde SIMAR-44 hasta WANA-HARMONIE, observándose un incremento más acusado en la etapa más reciente. Este comportamiento va acompañado de un aumento de la desviación típica, lo que sugiere una mayor variabilidad en la representación de los periodos característicos del oleaje en la modelización más

reciente. Este patrón es coherente con una mayor representación de estados de mar asociados a periodos de pico más largos en el modelo, característica esperable en un entorno de exposición atlántica.



**Figura 54.** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 1017013.

Fuente: Elaboración propia.



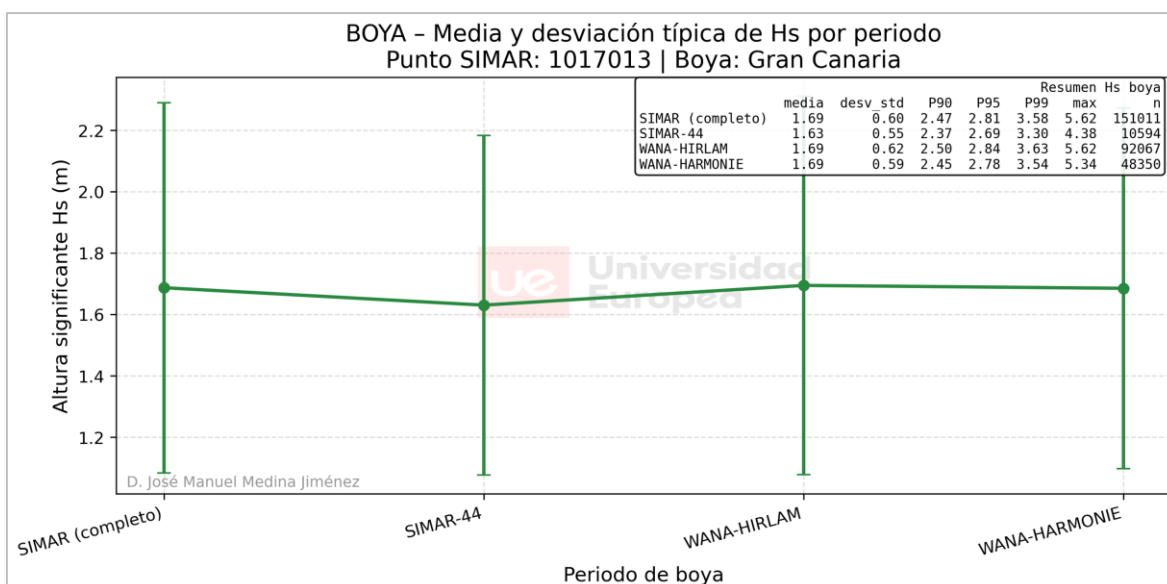
**Figura 55.** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 1017013.

Fuente: Elaboración propia.

Los registros de la boya de Gran Canaria (Figura 56) muestran, para Hs, valores medios muy estables entre los distintos periodos considerados, con oscilaciones reducidas y sin una tendencia definida entre etapas. La desviación típica asociada presenta magnitudes similares, lo que indica que tanto el régimen medio como su dispersión permanecen esencialmente constantes a lo largo del periodo analizado.

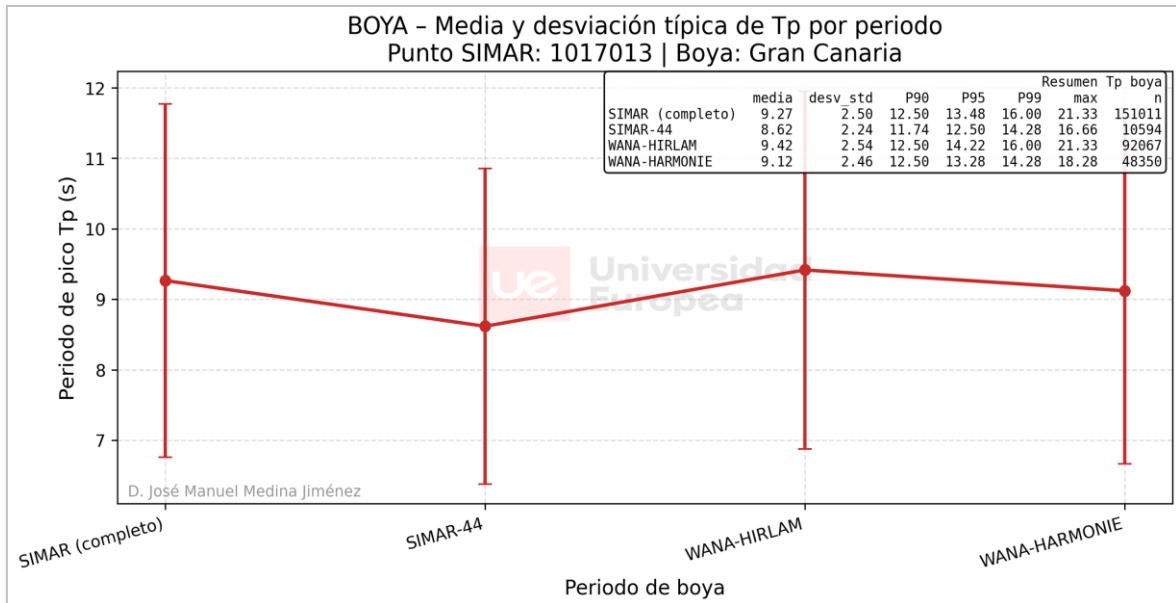
En relación con Tp (Figura 57), los datos instrumentales evidencian una mayor variabilidad entre periodos, aunque sin un patrón progresivo claramente definido. Los valores medios presentan ligeras diferencias entre etapas, con desviaciones típicas comparables, lo que sugiere que estas variaciones responden principalmente a la variabilidad natural del oleaje y al tamaño muestral disponible en cada periodo, más que a cambios estructurales del régimen observado.

En conjunto, el análisis de medias y desviaciones típicas en el norte de Canarias muestra un comportamiento diferenciado entre Hs y Tp. Mientras que la altura significativa del oleaje presenta una elevada estabilidad tanto en las series modelizadas como en los registros instrumentales, el periodo de pico evidencia una mayor sensibilidad a las distintas etapas de modelización en el caso del modelo, especialmente en la transición hacia WANA-HARMONIE. La ausencia de una señal equivalente en los registros de boya sugiere que estas diferencias responden fundamentalmente a las actualizaciones del sistema de modelización y no a una evolución significativa del régimen real del oleaje, en coherencia con el planteamiento general del trabajo.



**Figura 56.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para la Boya de Gran Canaria.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 57.\_** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para la Boya de Gran Canaria.

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.5.2. Percentiles de la Hs y del Tp

El análisis de percentiles permite profundizar en el comportamiento del oleaje más allá de los valores medios, evaluando la respuesta de las distintas etapas de modelización SIMAR/WANA tanto en el régimen habitual (percentiles intermedios) como en la cola alta de la distribución, asociada a estados de mar más energéticos.

El análisis de percentiles de la Hs en el punto SIMAR 1017013 (Figura 58) pone de manifiesto la existencia de diferencias sistemáticas entre las distintas etapas de modelización, cuyo alcance varía en función del tramo de la distribución considerado.

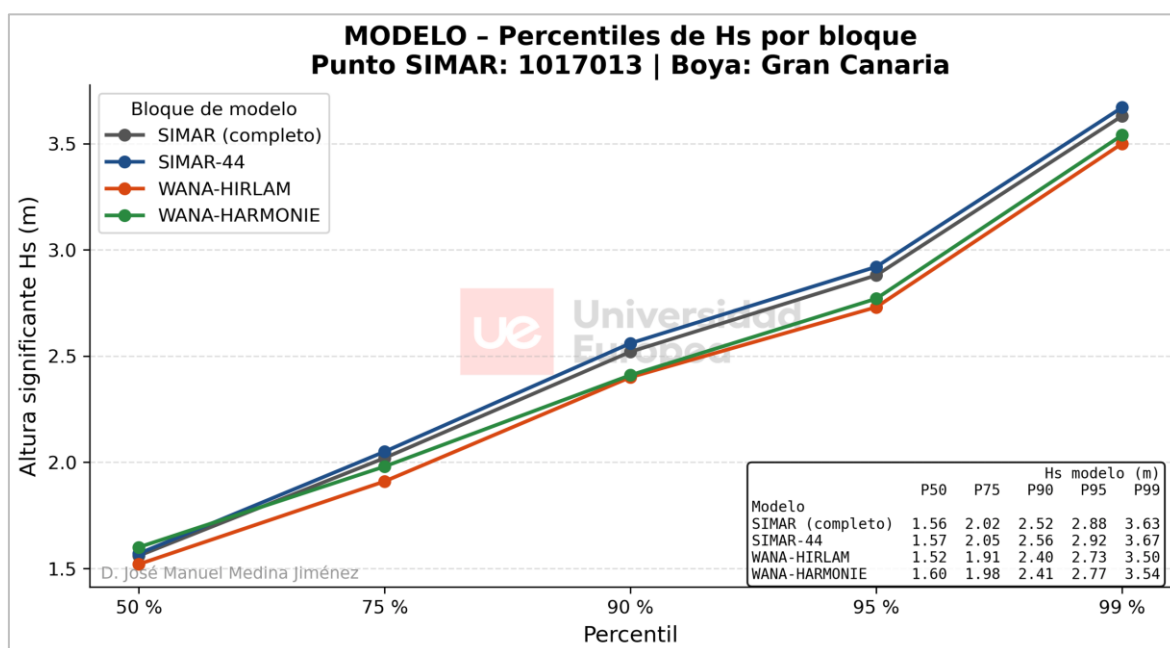
En los percentiles bajos (P50), las diferencias entre etapas son reducidas, lo que indica una representación relativamente próxima del oleaje más frecuente. No obstante, a partir de percentiles intermedios (P75), las divergencias comienzan a ser claramente apreciables. En este rango, la etapa SIMAR-44 presenta valores superiores a WANA-HIRLAM, con una diferencia del orden de 0,14 m en P75 (2,05 m frente a 1,91 m), equivalente a aproximadamente un 7 % en términos relativos.

Esta separación se mantiene y se intensifica ligeramente en los percentiles altos. En P90, la diferencia entre SIMAR-44 y WANA-HIRLAM alcanza 0,16 m, mientras que en P95 se sitúa en 0,19 m. En el extremo de la distribución (P99), la diferencia se mantiene en torno a 0,17 m. Estos

resultados evidencian una tendencia de la etapa SIMAR-44 a presentar valores de Hs ligeramente más elevados en el tramo alto de la distribución.

La etapa WANA-HARMONIE introduce un ajuste adicional en la forma de la distribución. En percentiles bajos se sitúa ligeramente por encima de SIMAR-44, mientras que en percentiles intermedios y altos adopta valores intermedios entre SIMAR-44 y WANA-HIRLAM. Este comportamiento indica una modificación progresiva en la representación de la cola alta de la distribución, sin discontinuidades abruptas entre etapas.

En conjunto, los resultados muestran que las diferencias entre etapas de modelización en el norte de Canarias no afectan de forma significativa al oleaje más frecuente, pero sí introducen desplazamientos moderados, coherentes y cuantificables en los percentiles altos, directamente asociados a la representación de los estados de mar más energéticos.

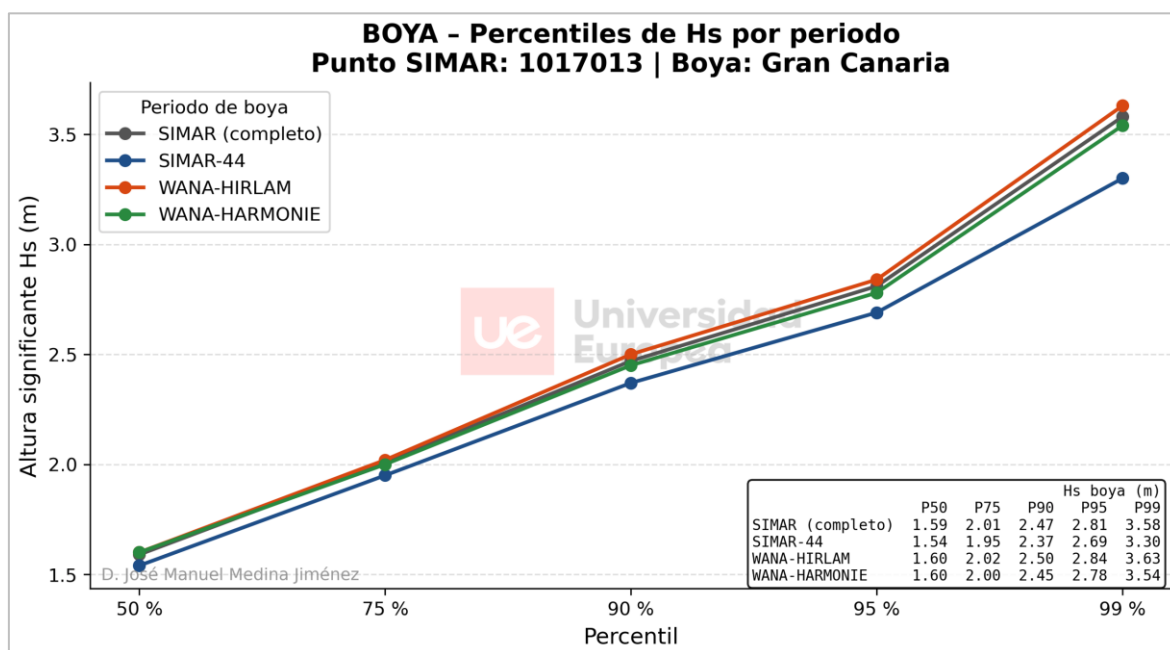


**Figura 58.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. Fuente: Elaboración propia.

En la boya de Gran Canaria (Figura 59), los percentiles de la altura significativa del oleaje muestran una elevada estabilidad en los percentiles bajos e intermedios (P50–P75), lo que indica un régimen de oleaje frecuente altamente consistente a lo largo del tiempo.

En los percentiles altos (P90–P99) se observa una mayor dispersión entre periodos, con diferencias que alcanzan aproximadamente 0,10 y 0,15 m en P90–P95 y hasta 0,33 m en P99. Estas variaciones se concentran en la cola alta de la distribución, asociada a un número reducido de episodios de oleaje intenso, y presentan cruces entre periodos sin seguir un patrón progresivo ni temporalmente coherente.

Este comportamiento es consistente con la naturaleza estadística de los percentiles extremos, altamente sensibles a la ocurrencia puntual de temporales intensos y al tamaño efectivo de la muestra en cada periodo, y no implica necesariamente una modificación del régimen real de oleaje. La ausencia de desplazamientos persistentes y monotónicos en los percentiles altos impide identificar una señal estructural del clima marítimo a partir de los registros instrumentales, indicando que las diferencias observadas responden a la variabilidad natural del régimen extremo y no a una evolución climática del oleaje en este ámbito.



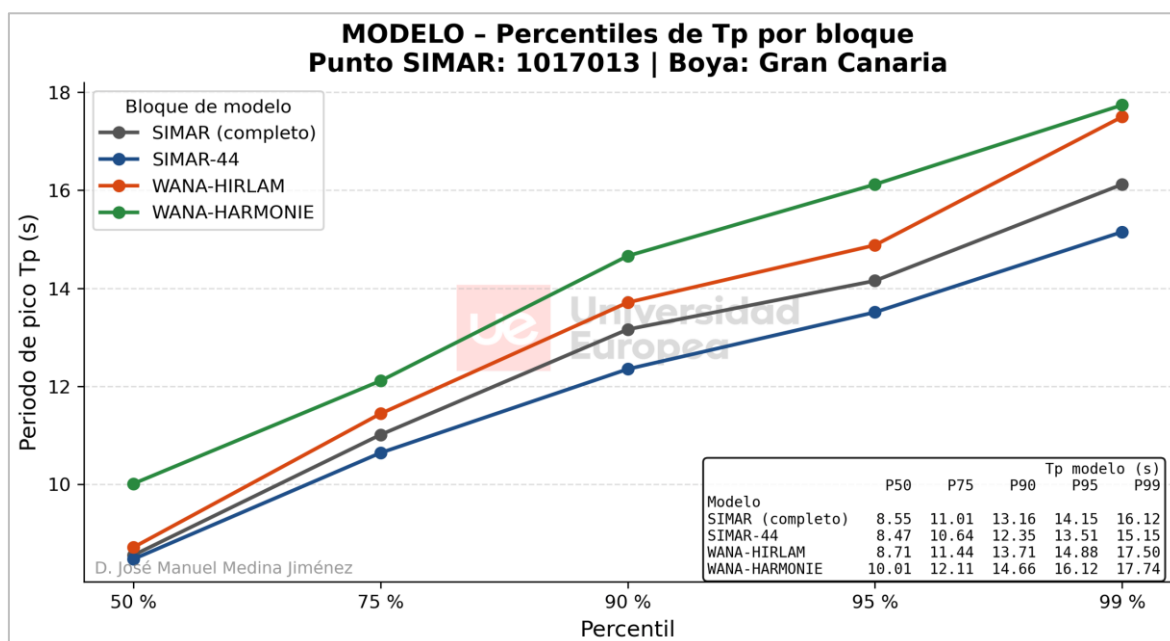
**Figura 59.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de percentiles del  $T_p$  (Figura 60) pone de manifiesto una mayor sensibilidad a los cambios entre etapas de modelización que la observada en la Hs, especialmente en el caso del modelo. En los percentiles bajos e intermedios (P50–P75), las diferencias entre etapas son ya apreciables, con valores sistemáticamente inferiores en SIMAR-44 y un incremento progresivo en WANA-HIRLAM y, de forma más acusada, en WANA-HARMONIE. Este comportamiento indica que las sucesivas

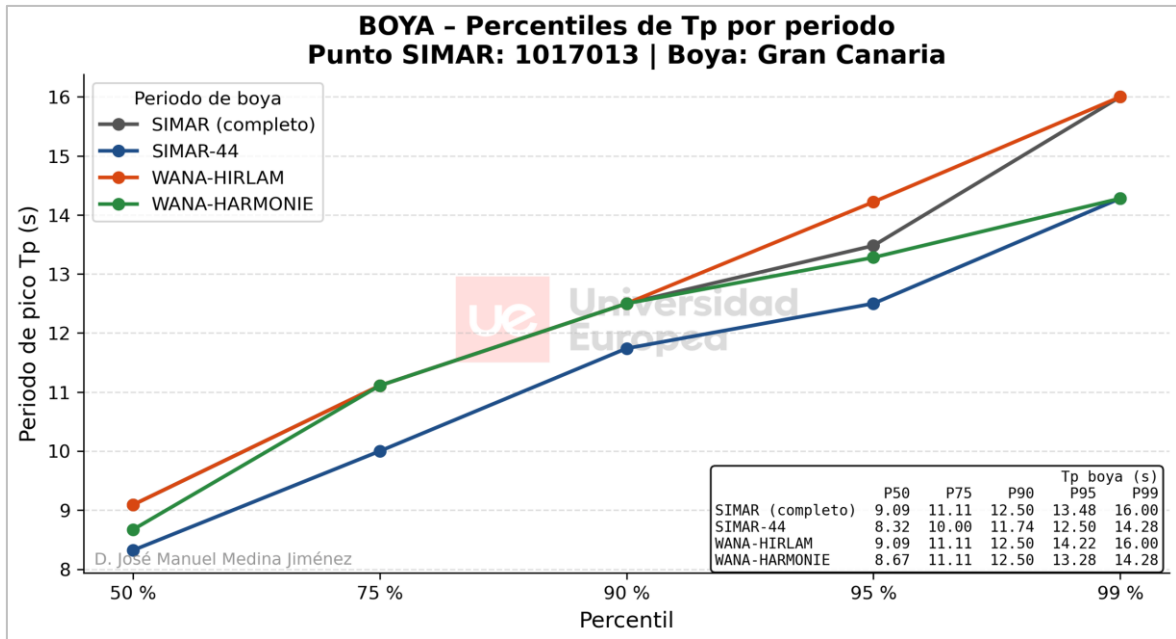
actualizaciones del sistema afectan no solo a los estados de mar extremos, sino también a la caracterización de la escala temporal del oleaje más frecuente.

En los percentiles altos (P90–P99), la separación entre etapas se intensifica de forma clara y estructurada. La transición hacia WANA-HARMONIE se traduce en un aumento consistente de  $T_p$  en toda la cola alta de la distribución, alcanzando diferencias del orden de varios segundos respecto a SIMAR-44. Este patrón evidencia una modificación en la representación de los estados de mar más desarrollados, con trenes de ola más largos, sin que ello implique necesariamente un cambio en la energía media del oleaje.

En los registros instrumentales de la boya de Gran Canaria (Figura 61), los percentiles de  $T_p$  muestran un comportamiento distinto. Aunque se observa una dispersión apreciable en los percentiles altos, las diferencias entre periodos no siguen un patrón progresivo ni coherente, produciéndose cruces entre curvas y cambios en el orden relativo de los percentiles. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del periodo de pico, altamente sensible a la ocurrencia puntual de episodios con oleaje largo y al tamaño efectivo de la muestra disponible en cada periodo, y puede atribuirse a la variabilidad natural del régimen extremo más que a una evolución estructural del clima marítimo.



**Figura 60.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 61.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria.  
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el análisis de percentiles de  $H_s$  y  $T_p$  confirma que, en el norte de Canarias (correspondiente al abanico de direcciones objeto de estudio), las diferencias entre etapas de modelización SIMAR/WANA se manifiestan de forma más clara en los percentiles altos, siendo especialmente relevantes en el periodo de pico.

Mientras que los registros instrumentales no muestran desplazamientos coherentes ni persistentes que permitan inferir cambios significativos en el régimen real de oleaje, el modelo introduce modificaciones estructuradas en la representación de los estados de mar más energéticos y desarrollados.

Estos resultados respaldan la interpretación de que las variaciones detectadas responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, y no a una evolución real del clima marítimo en este ámbito.

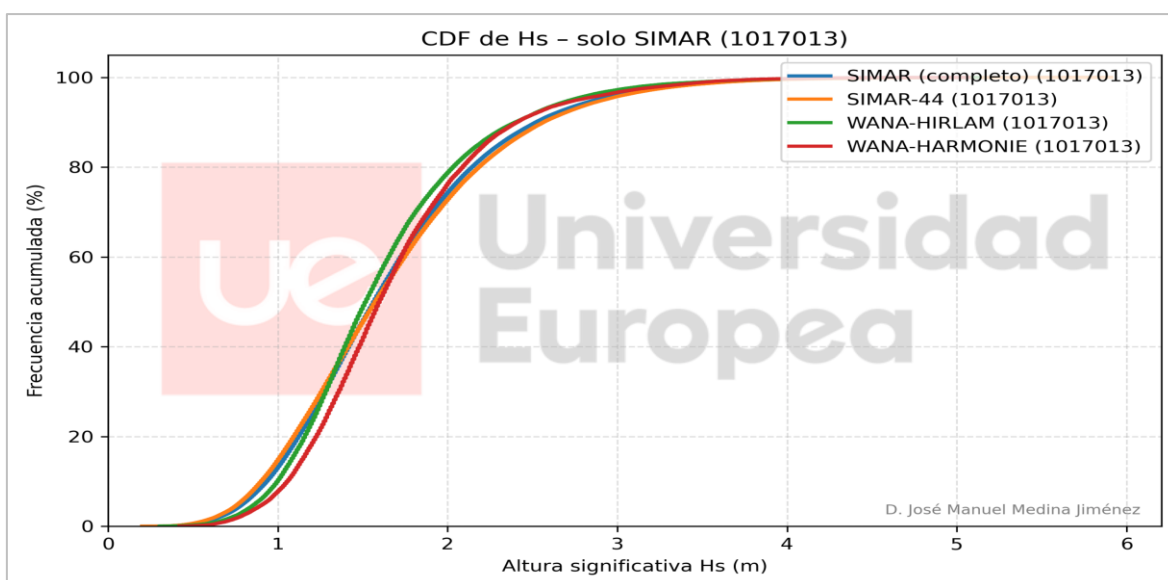
#### 6.2.2.5.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)

Las CDF de  $H_s$  en el modelo (Figura 62) presentan un comportamiento globalmente coherente, con una separación limitada entre curvas que se concentra en el tramo central de la distribución y, en menor medida, en su cola alta. En términos prácticos, las diferencias observadas indican que, para una misma frecuencia acumulada, las etapas no asignan exactamente la misma altura significativa, aunque los desplazamientos son moderados y no presentan discontinuidades abruptas.

Se aprecia que las curvas correspondientes a las distintas etapas quedan muy próximas en el rango de  $H_s$  más frecuente, mientras que en la zona de mayor pendiente de la función de distribución acumulada, asociada a estados de mar más energéticos, aparecen diferencias de posición entre etapas. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos a partir del análisis por percentiles, evidenciando que las diferencias entre etapas se manifiestan principalmente en el tramo alto de la distribución.

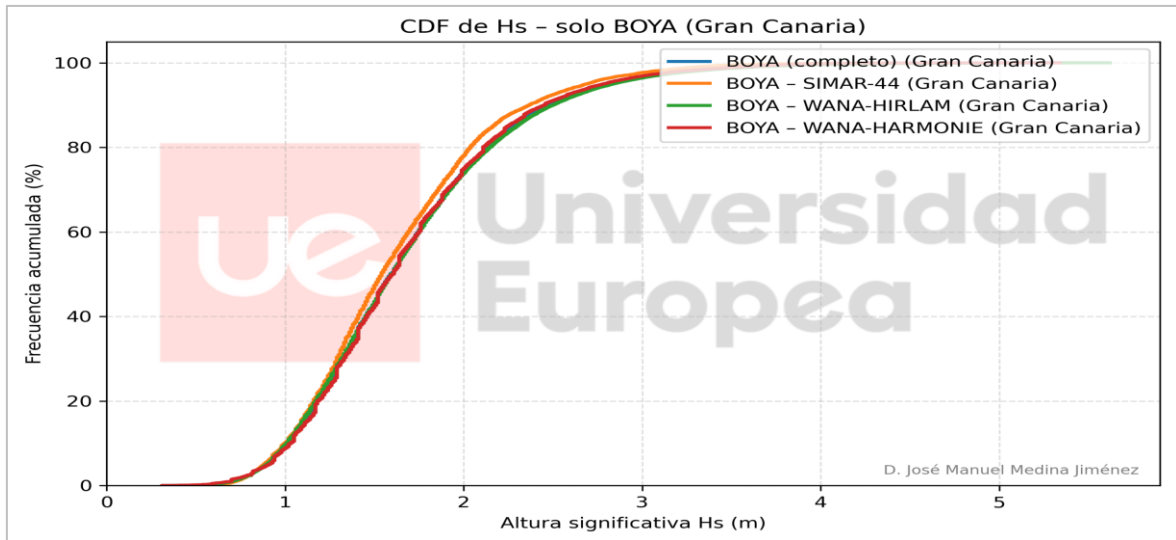
En la boya (Figura 63), las CDF de  $H_s$  muestran una superposición muy alta entre periodos, con diferencias visualmente pequeñas y sin desplazamientos progresivos entre etapas. Las curvas se mantienen prácticamente coincidentes en el rango de  $H_s$  más frecuente, y las ligeras divergencias detectables se concentran en el tramo superior de la distribución, donde el resultado es más sensible a la ocurrencia de episodios intensos concretos y al tamaño efectivo de muestra de cada periodo.

La ausencia de una separación sistemática entre periodos en la CDF instrumental refuerza que no se observa una señal robusta de cambio estructural del régimen real de  $H_s$  en este ámbito. En este sentido, las pequeñas discrepancias entre curvas deben interpretarse como variabilidad estadística natural del régimen extremo y no como una evolución consistente del clima marítimo, debiendo tener en cuenta, además, la limitación de registros de la boya correspondientes al periodo SIMAR-44.



**Figura 62.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013.

Fuente: Elaboración propia.



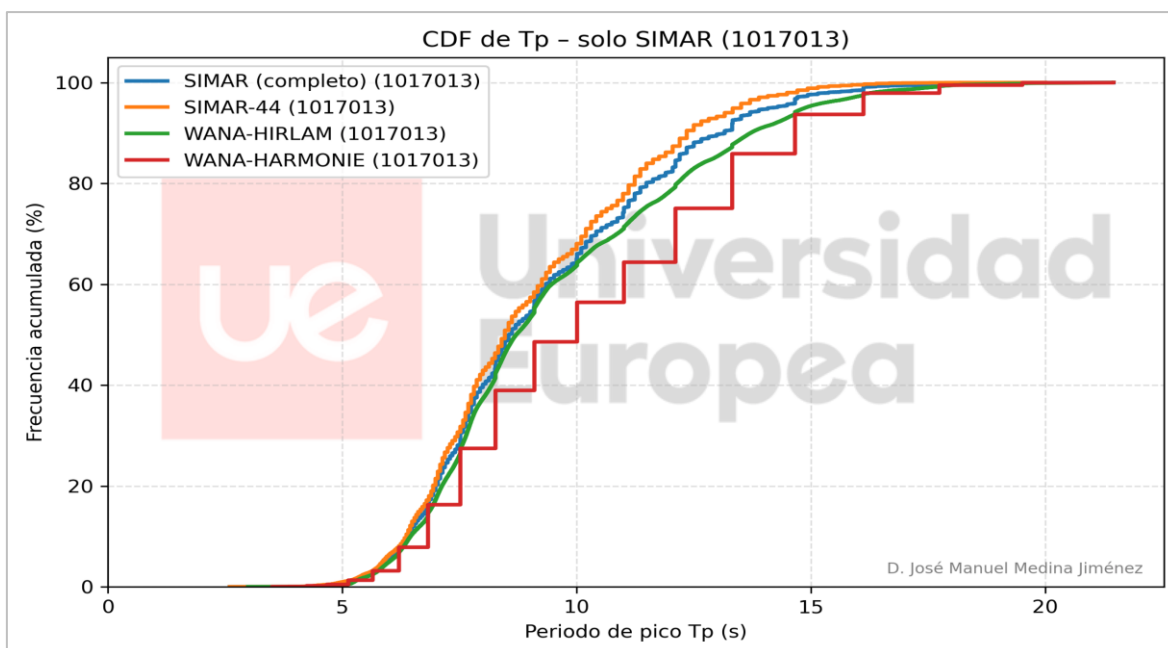
**Figura 63.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de  $T_p$ , las CDF del modelo (Figura 64) evidencian diferencias más perceptibles que en  $H_s$ . La posición relativa de las curvas indica que las distintas etapas asignan de forma diferente la escala temporal del oleaje, manifestándose desplazamientos en una parte amplia de la distribución, no únicamente en la cola.

La etapa WANA-HARMONIE se diferencia de forma más clara, mostrando una distribución desplazada hacia periodos mayores respecto a etapas anteriores en buena parte del rango de  $T_p$ . La coherencia del desplazamiento (curvas separadas sin cruces relevantes en el tramo central) sugiere que no se trata de variaciones puntuales, sino de un cambio estructurado en la representación estadística de la distribución del periodo de pico en el sistema de modelización, especialmente relevante en estados de mar desarrollados.

En los registros instrumentales (Figura 65), las funciones de distribución acumulada del periodo de pico ( $T_p$ ) presentan diferencias más visibles que las observadas en la altura significativa, especialmente en el rango intermedio y alto de la distribución, asociado a estados de mar con oleaje más desarrollado. No obstante, a diferencia de lo observado en la serie modelizada, las curvas correspondientes a los distintos periodos no mantienen un ordenamiento temporal progresivo, apreciándose cruces entre periodos y variaciones en la posición relativa de las CDF en función del rango de  $T_p$  considerado.



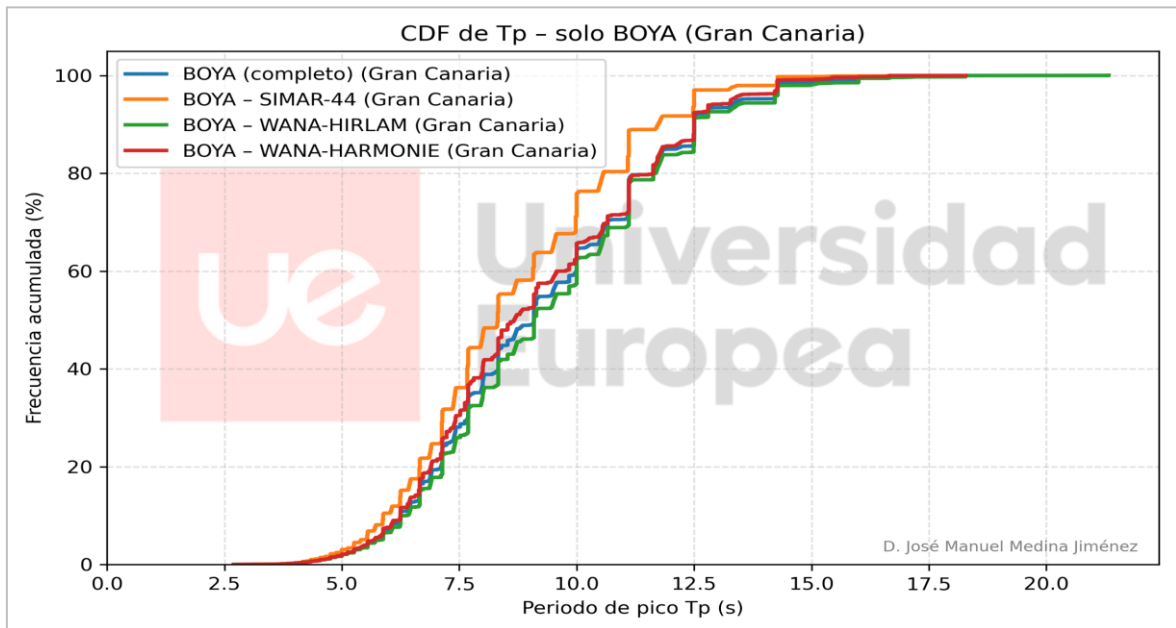
**Figura 64.** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 1017013.

Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento es coherente con la propia naturaleza del periodo de pico medido por la boya, que depende en gran medida de la presencia puntual de episodios con oleaje de mayor periodo. En consecuencia, los valores altos de  $T_p$  pueden variar sensiblemente entre periodos en función de que dichos episodios estén o no representados en el registro disponible. Esta circunstancia resulta especialmente relevante en la etapa SIMAR-44, cuya cobertura temporal es más reducida debido a que el registro de oleaje direccional comienza a mediados de 2003, lo que limita el número de temporales intensos incluidos en dicho periodo.

No obstante, los registros instrumentales permiten caracterizar de forma robusta el clima marítimo del ámbito de estudio, mostrando un régimen general estable y sin evidencias de cambios persistentes en el tiempo. Por este motivo, aunque la boya presenta diferencias apreciables en los percentiles altos de  $T_p$ , la ausencia de un patrón temporal claro y sostenido impide interpretar estas variaciones como una evolución estructural del clima marítimo. En este contexto, la interpretación de la parte alta de la distribución debe realizarse con cautela, al estar condicionada por el número y la intensidad de los temporales registrados en cada periodo y no por una evolución coherente del régimen de oleaje.

La comparación mediante funciones de distribución acumulada confirma el patrón ya identificado a partir de los estadísticos básicos y del análisis de percentiles.



**Figura 65.\_** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Gran Canaria.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la altura significativa del oleaje, las series modelizadas muestran ligeros desplazamientos entre etapas de modelización, mientras que los registros instrumentales de la boya mantienen una distribución altamente estable, sin evidencias de una señal temporal robusta. En lo que respecta al periodo de pico, el modelo presenta diferencias más estructuradas entre etapas, con una separación más clara en la transición hacia WANA-HARMONIE, mientras que la boya muestra una mayor variabilidad sin un patrón progresivo ni persistente en el tiempo, compatible con la variabilidad natural del oleaje y con las limitaciones asociadas al número de episodios registrados en cada periodo.

En conjunto, la evidencia aportada por las funciones de distribución acumulada refuerza que, en el ámbito del norte de Canarias, las diferencias detectadas en las series SIMAR/WANA responden principalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, mientras que el registro instrumental no proporciona indicios consistentes de una evolución estructural del clima marítimo durante el periodo analizado.

#### *6.2.2.5.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización*

El análisis conjunto de los estadísticos básicos, los percentiles y las funciones de distribución acumulada permite realizar una síntesis comparativa del comportamiento estadístico del oleaje en el norte de Canarias a lo largo de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA. Esta visión integrada facilita la identificación de patrones comunes y de diferencias relevantes entre periodos, así como la evaluación de su coherencia temporal a partir de la comparación entre series modelizadas y registros instrumentales.

En las series modelizadas, las distintas etapas de modelización muestran un comportamiento globalmente coherente, si bien con diferencias estructuradas que se hacen más evidentes a medida que se analizan estadísticos asociados a estados de mar más energéticos. En términos de Hs, las diferencias entre etapas son moderadas y se concentran principalmente en la cola alta de la distribución, mientras que el régimen más frecuente permanece relativamente estable. En el caso del Tp, las diferencias entre etapas resultan más acusadas y afectan a una parte más amplia de la distribución, destacando la transición hacia WANA-HARMONIE, que introduce una representación distinta de la escala temporal del oleaje, especialmente en los estados de mar más desarrollados.

Por el contrario, los registros instrumentales de la boya de Gran Canaria muestran un comportamiento estadístico notablemente estable en el régimen medio, tanto para Hs como para Tp, sin desplazamientos persistentes ni tendencias temporales coherentes entre periodos. Las variaciones observadas en los percentiles más altos, especialmente en el periodo de pico, están controladas por un número limitado de episodios de oleaje intenso, circunstancia inherente al análisis de extremos y común a todos los periodos considerados. No obstante, este efecto resulta más acusado en aquellas etapas con menor cobertura temporal, como SIMAR-44, donde la representación de los percentiles elevados es más sensible a la presencia o ausencia de unos pocos temporales.

En conjunto, estas variaciones no siguen un patrón progresivo ni persistente y son compatibles con la variabilidad natural del oleaje extremo, sin constituir una señal de evolución estructural del clima marítimo.

La comparación entre modelos y registros instrumentales permite concluir que las diferencias detectadas entre periodos de modelización en el norte de Canarias responden fundamentalmente

a las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR/WANA y no a una evolución estructural del clima marítimo real.

#### **6.2.2.6. Sur de canarias**

El sur del archipiélago canario presenta un régimen de oleaje claramente diferenciado respecto a los restantes ámbitos analizados. La presencia de las islas introduce un importante efecto de apantallamiento frente a los temporales dominantes del Atlántico Norte, lo que se traduce en un clima marítimo generalmente menos energético. No obstante, este sector recibe con cierta frecuencia mar de fondo de largo recorrido generado en latitudes sur del Atlántico, caracterizado por alturas significantes de oleaje moderadas y periodos de pico elevados.

El estudio se ha desarrollado mediante la comparación entre los registros instrumentales de la boya de Tenerife Sur, situada en aguas profundas a una profundidad aproximada de 710 m al sur de la isla, y el punto SIMAR 4023009, seleccionado por su proximidad espacial. La profundidad y localización de ambos puntos permiten asumir condiciones representativas de oleaje en aguas profundas, sin influencia directa de procesos costeros locales.

En el caso de la boya de Tenerife Sur, los registros de oleaje direccional se encuentran disponibles desde mediados del año 2003, por lo que el periodo común de análisis entre los datos observados y las distintas etapas de modelización se inicia a partir de dicha fecha. En consecuencia, la superposición temporal con la etapa SIMAR-44 resulta más limitada que en otros ámbitos del estudio, circunstancia que se tiene en cuenta en la interpretación de los resultados, especialmente en el análisis de percentiles elevados y del comportamiento extremal del oleaje.

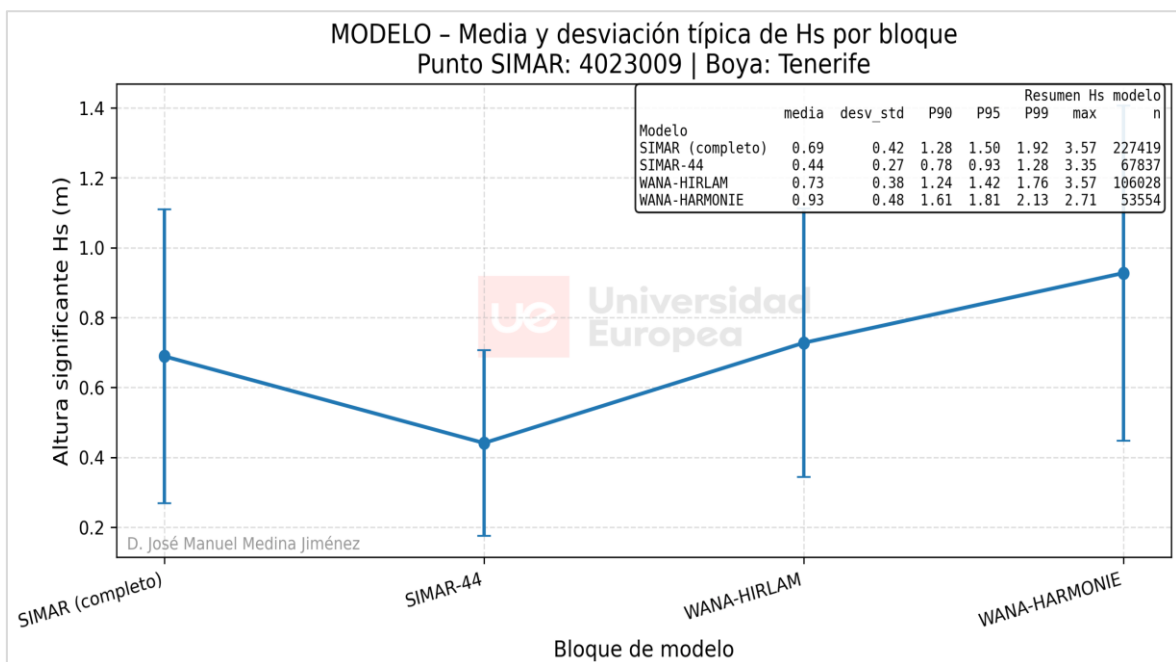
La localización de la boya, al sur de Tenerife, se encuentra condicionada por la configuración insular del archipiélago, con la presencia de las islas de Gran Canaria, La Gomera y El Hierro, que pueden introducir efectos de sombra para determinados sectores direccionales. Este condicionante ha sido considerado en la selección de las direcciones de oleaje analizadas en el presente estudio, garantizando que las trayectorias consideradas correspondan a propagación en mar abierto y evitando la influencia de obstáculos insulares próximos.

Bajo estas consideraciones, el estudio se orienta a evaluar el comportamiento de los principales estadísticos de la altura significativa del oleaje y del periodo de pico, así como la forma de sus funciones de distribución acumulada, con el fin de identificar posibles diferencias entre las distintas

etapas del sistema de modelización SIMAR/WANA y valorar la coherencia de su representación del régimen de oleaje en este entorno insular.

#### 6.2.2.5.1. Media y desviación típica de Hs y Tp

En lo que respecta a la serie modelizada (Figura 66), los valores medios de Hs muestran diferencias claras entre etapas. La etapa SIMAR-44 presenta un nivel medio sensiblemente inferior (0,44 m) y una dispersión también menor (0,27 m) respecto al resto de periodos. A partir de WANA-HIRLAM, el régimen medio se sitúa en valores más altos (media = 0,73 m,  $\sigma = 0,38$  m) y la transición a WANA-HARMONIE supone un incremento adicional (media = 0,93 m,  $\sigma = 0,48$  m). Este comportamiento se refleja igualmente en los percentiles donde, por ejemplo, el P95 pasa de 0,93 m en SIMAR-44 a 1,42 m en WANA-HIRLAM y a 1,81 m en WANA-HARMONIE, confirmando que el desplazamiento no afecta solo al promedio, sino al conjunto del régimen, con especial impacto en la parte alta de la distribución.



**Figura 66.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009.

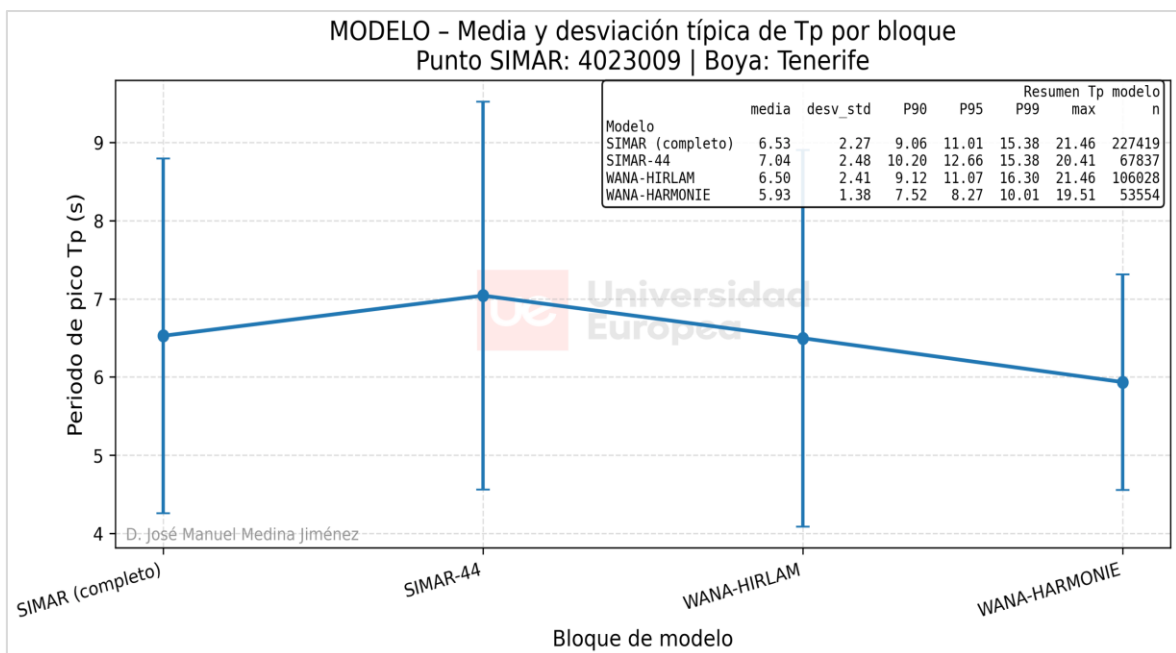
Fuente: Elaboración propia.

En Tp (Figura 67) se observa un patrón distinto. La etapa SIMAR-44 presenta el mayor valor medio (7,04 s) y una dispersión elevada (2,48 s). En WANA-HIRLAM el valor medio desciende a 6,50 s ( $\sigma = 2,41$  s), y en WANA-HARMONIE se aprecia un descenso más marcado tanto en la media (5,93 s) como, sobre todo, en la dispersión ( $\sigma = 1,38$  s). De forma coherente, los percentiles altos

disminuyen notablemente en WANA-HARMONIE (por ejemplo, P95 = 8,27 s frente a 11,07 y 12,66 s en etapas previas), lo que indica un cambio relevante en la caracterización temporal de los estados de mar más desarrollados dentro de la serie modelizada.

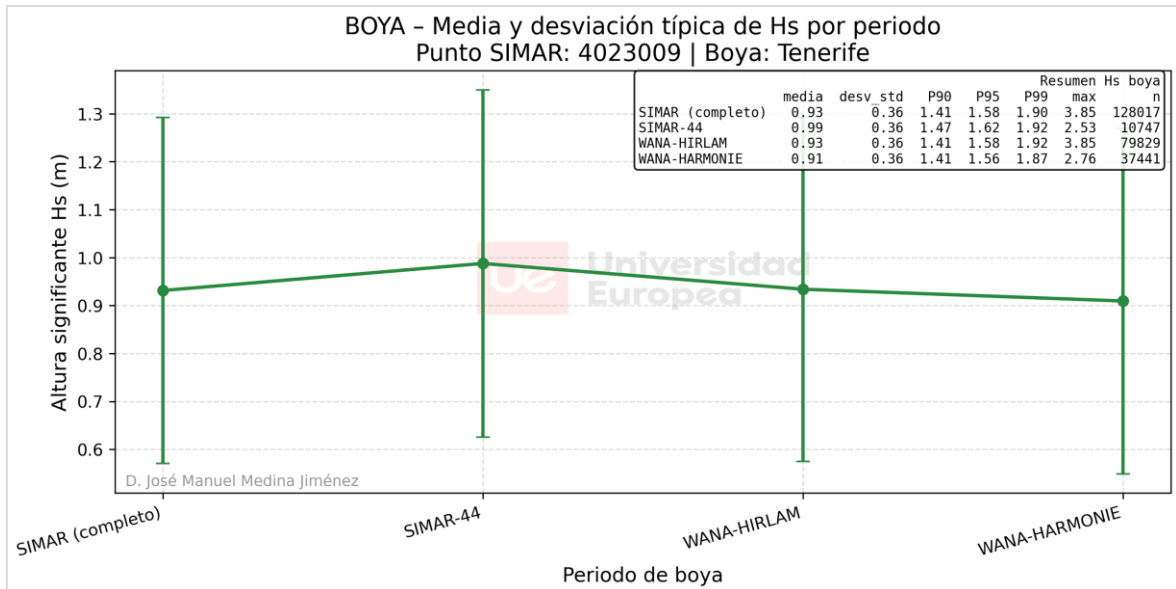
En conjunto, los estadísticos básicos del modelo evidencian que no presentan un comportamiento estadístico equivalente. Hs aumenta de manera significativa desde SIMAR-44 hasta WANA-HARMONIE, mientras que Tp reduce su nivel medio y, especialmente, su variabilidad en la última etapa.

En la boya (Figura 68), la media de Hs se mantiene en un rango muy estrecho entre periodos y con una desviación típica prácticamente constante. Los percentiles de referencia muestran diferencias moderadas sin un desplazamiento progresivo entre etapas. Este comportamiento es compatible con una estabilidad del régimen medio observado en el periodo analizado, dentro de la variabilidad esperable entre submuestras.



**Figura 67.\_** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, para el punto SIMAR 4023009.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 68.\_** Media y desviación típica de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, para la Boya de Tenerife.

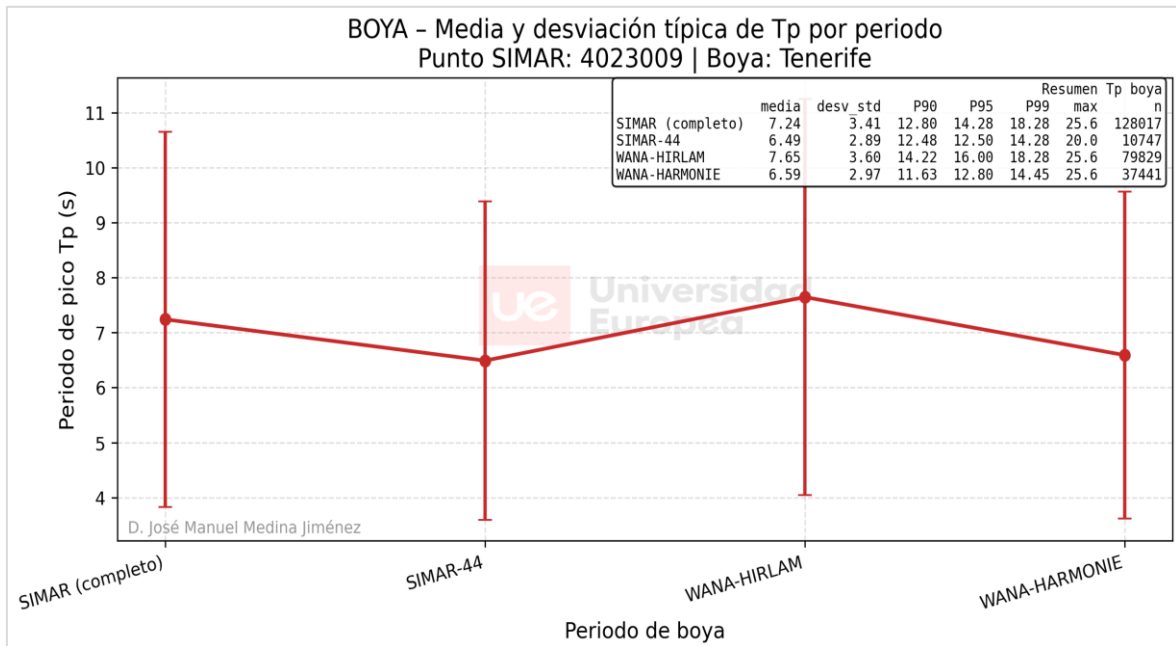
Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al  $T_p$  (Figura 69), las medias presentan mayor variación entre periodos y la dispersión se mantiene elevada. Sin embargo, el orden temporal no es progresivo, donde el máximo promedio se alcanza en el periodo WANA-HIRLAM (7,65 s) y el menor en las etapas SIMAR-44 / WANA-HARMONIE. En los percentiles altos ocurre algo similar, el P95 varía entre 12,5 s (SIMAR-44) y 16,0 s (WANA-HIRLAM), sin un patrón monotónico. Esta falta de direccionalidad temporal, unida a la menor cobertura de SIMAR-44 (por inicio del registro direccional en 2003), aconseja interpretar con cautela las diferencias en la cola alta de  $T_p$ , que puede verse más condicionada por la presencia o ausencia de unos pocos temporales con periodos dominantes elevados.

Por tanto, a partir de medias y desviaciones típicas, el modelo muestra cambios relevantes entre etapas en el sur de Canarias, observándose un incremento progresivo de Hs y la reducción de  $T_p$  (sobre todo, de su variabilidad) en WANA-HARMONIE. En contraste, el registro instrumental presenta Hs estable y un  $T_p$  variable, pero sin tendencia temporal coherente, con especial atención a la menor longitud de la etapa SIMAR-44 por disponibilidad de registroa desde 2003.

Bajo el enfoque del trabajo, estos resultados refuerzan que los desplazamientos identificados en la serie modelizada responden principalmente a cambios entre etapas del

sistema SIMAR/WANA, mientras que el registro instrumental no aporta una señal robusta de cambio estructural del régimen medio en el periodo considerado.



**Figura 69.** Media y desviación típica del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, para la Boya de Tenerife.

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.5.2. Percentiles de la altura significativa ( $H_s$ ) y del periodo de pico ( $T_p$ )

En los modelos (Figura 70) se observan diferencias claras y coherentes entre etapas en toda la gama de percentiles analizados. La etapa SIMAR-44 presenta sistemáticamente los valores más bajos, con lo que indica una representación sensiblemente más contenida del régimen de oleaje. En WANA-HIRLAM, los percentiles se incrementan de forma apreciable mientras que la transición a WANA-HARMONIE supone un desplazamiento adicional y consistente de toda la distribución hacia valores más elevados.

Este patrón progresivo, que se acentúa a medida que se avanza hacia percentiles altos (P90–P99), confirma que las actualizaciones del sistema de modelización tienen un impacto creciente en la caracterización de los estados de mar más energéticos en este ámbito.

En el caso del periodo de pico (Figura 71), los percentiles del modelo muestran también diferencias entre etapas, aunque con un patrón distinto al observado en  $H_s$ . Las etapas SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan valores relativamente similares a lo largo de la distribución, mientras que la transición a WANA-HARMONIE introduce una reducción clara de los percentiles de  $T_p$ ,

especialmente en la cola alta (P90–P99). Este comportamiento indica que la última etapa de modelización reduce la representación de estados de mar asociados a periodos largos, modificando de forma significativa la caracterización temporal de los episodios más energéticos.

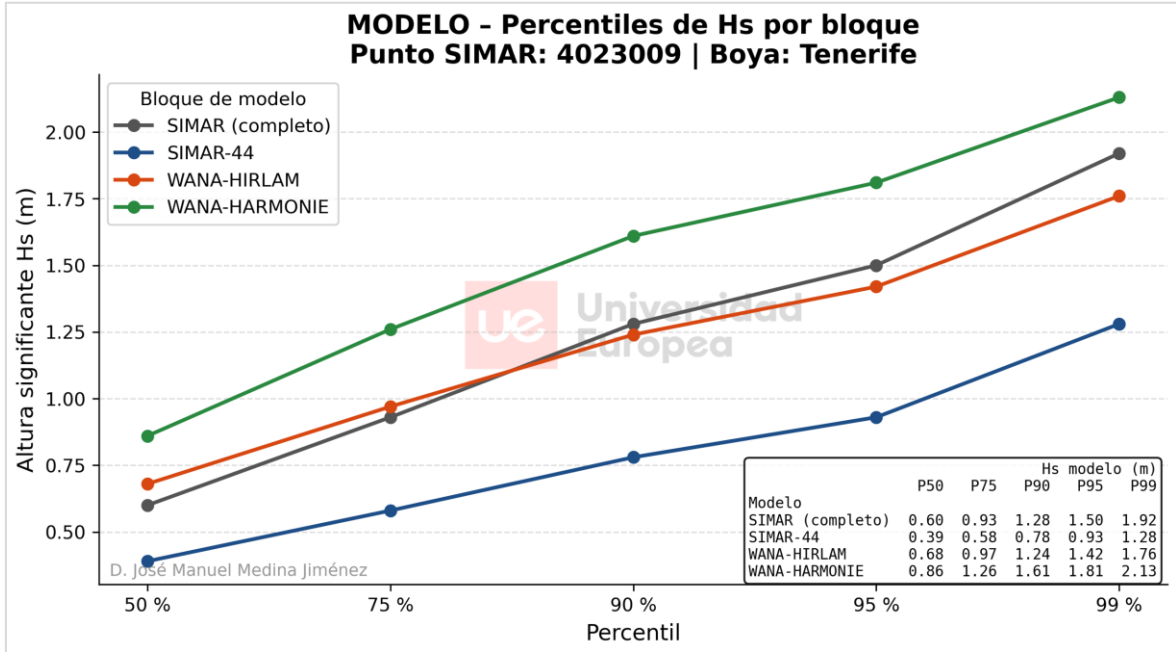


Figura 70.\_ Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. Fuente: Elaboración propia.

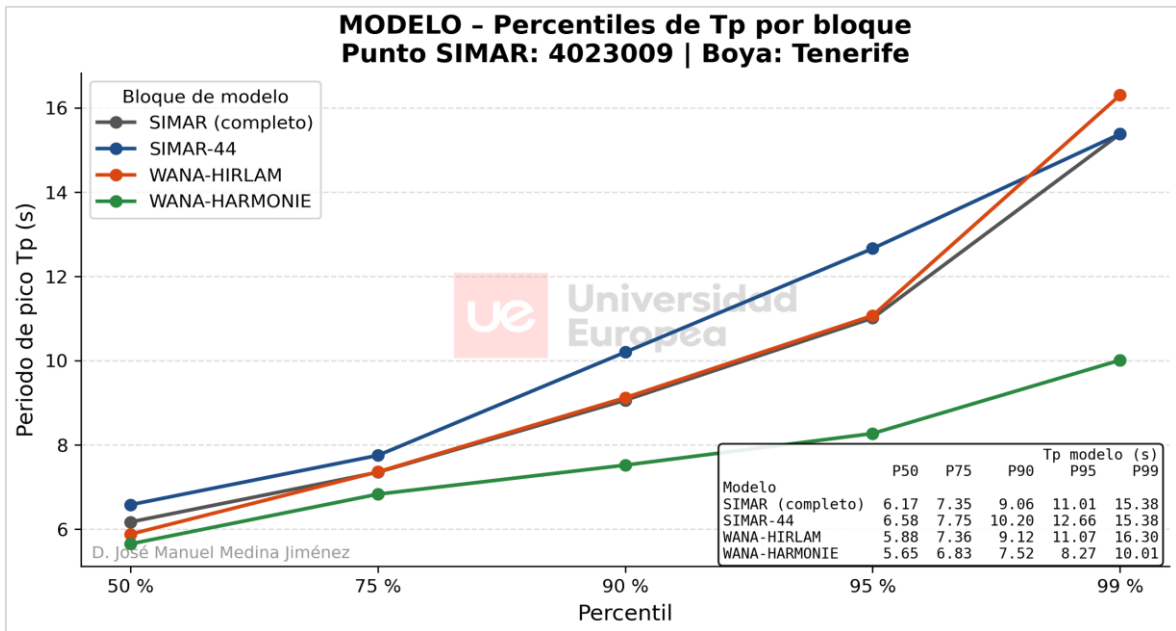


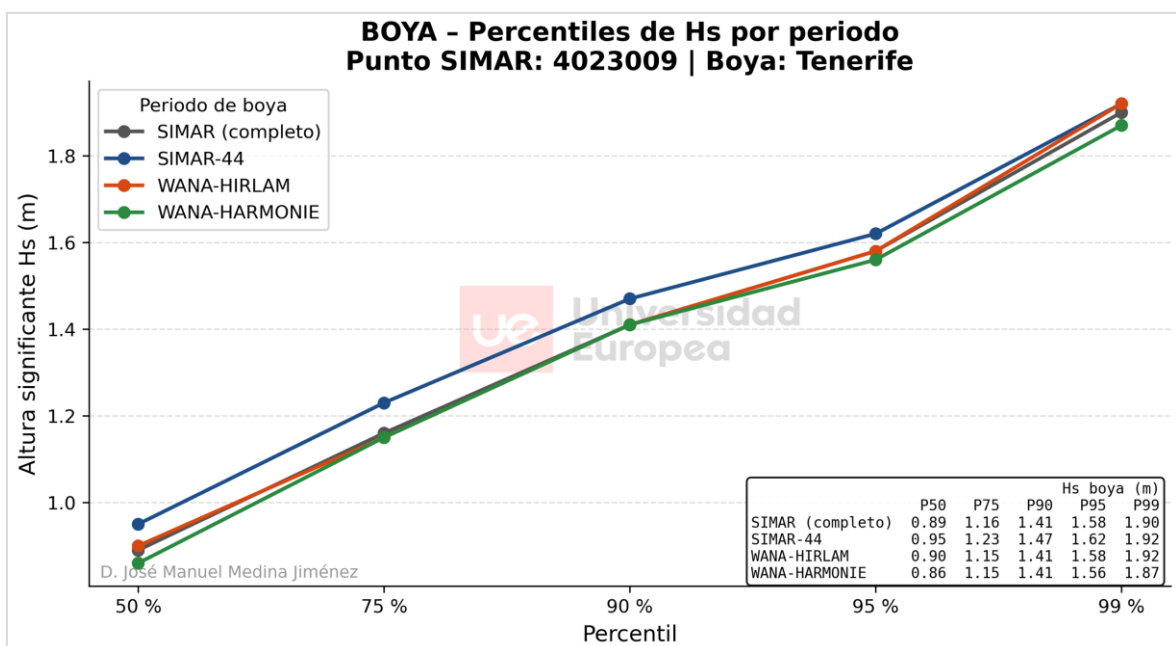
Figura 71.\_ Percentiles del periodo de pico del oleaje (Tp) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 3080042. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a los registros de Hs de la boya (Figura 72), los percentiles presentan un comportamiento mucho más estable entre periodos. Los valores de P50 oscilan entre aproximadamente 0,86 y 0,95 m, mientras que P99 se sitúa en un rango estrecho, entre 1,87 y 1,92 m, sin un desplazamiento progresivo asociado a las distintas etapas de modelización.

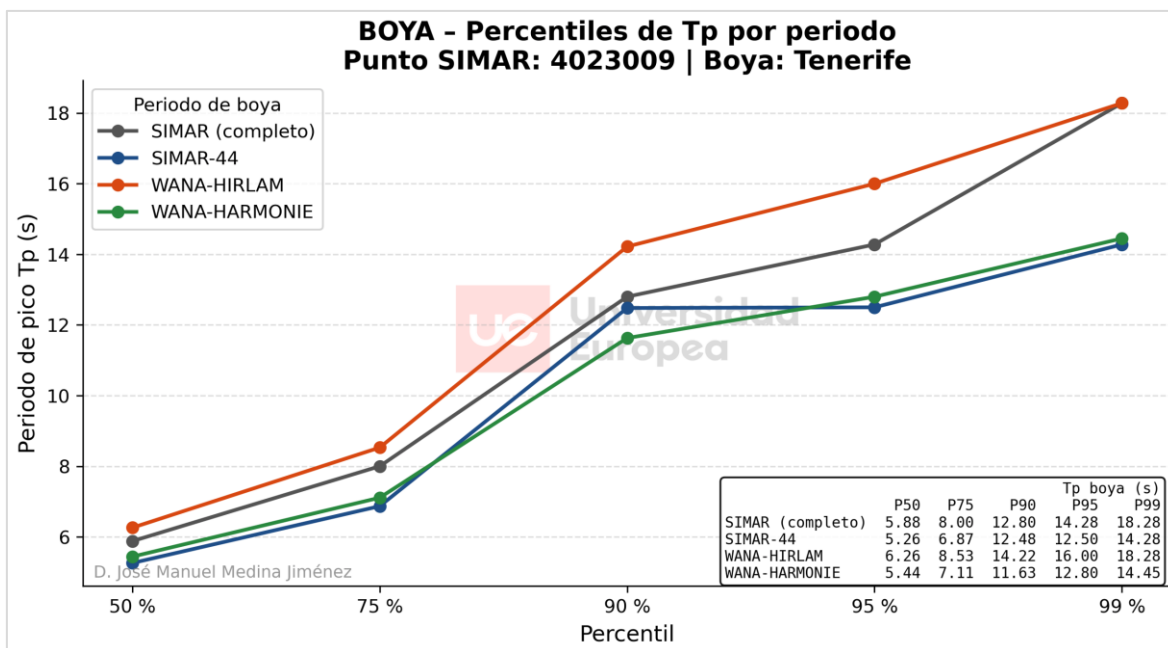
Las diferencias observadas entre periodos son moderadas y no muestran una jerarquía temporal clara, lo que es compatible con la variabilidad natural del oleaje y con el efecto de segmentar una misma serie instrumental en subperiodos.

Para Tp (Figura 73), la boya muestra una mayor dispersión relativa en los percentiles altos, con valores de P99 comprendidos entre 14,28 s y 16,00 s según el periodo considerado. No obstante, al igual que en Hs, estas diferencias no siguen un patrón progresivo ni monótonico.

Debe tenerse en cuenta que la etapa SIMAR-44 cuenta con una menor cobertura temporal, al iniciarse el registro direccional a mediados de 2003, lo que hace que los percentiles más altos puedan verse condicionados por la presencia o ausencia de un número limitado de temporales intensos en cada subperiodo.



**Figura 72.** Percentiles de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009. Fuente: Elaboración propia.



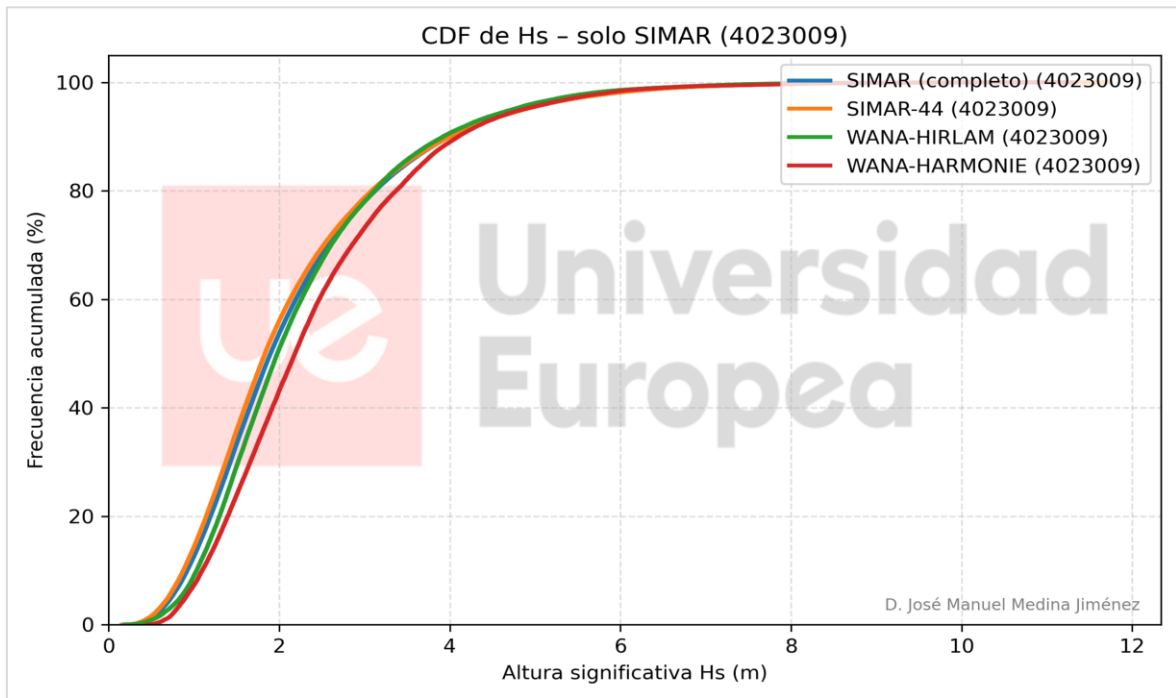
**Figura 73.** Percentiles del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife.  
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el análisis de percentiles pone de manifiesto un comportamiento claramente diferenciado entre modelo y registro instrumental. Mientras que en el modelo los percentiles de  $H_s$  y  $T_p$  muestran desplazamientos progresivos y coherentes entre etapas, especialmente acusados en la cola alta de la distribución y más evidentes en WANA-HARMONIE, la boya no presenta una señal temporal estructurada comparable. La estabilidad relativa de los percentiles instrumentales, unida a la falta de un comportamiento ordenado entre periodos, refuerza la interpretación de que las diferencias detectadas en las series SIMAR/WANA responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, sin que el registro instrumental evidencie un cambio estructural del régimen real de oleaje en el sur de Canarias durante el periodo analizado.

#### 6.2.2.5.3. Comparación de las funciones de distribución acumulada (CDF)

En la serie modelizada (Figura 74), las CDF de  $H_s$  muestran diferencias apreciables entre las distintas etapas de modelización. La curva correspondiente a SIMAR-44 se sitúa claramente a la izquierda del resto, lo que indica una mayor frecuencia relativa de estados de mar de menor altura significativa. La transición a WANA-HIRLAM supone un desplazamiento apreciable de la distribución hacia valores más altos de  $H_s$ , mientras que WANA-HARMONIE introduce un desplazamiento adicional, especialmente visible en el tramo bajo y medio de la distribución. Este comportamiento confirma que las actualizaciones del sistema de modelización afectan de forma consistente al

conjunto del régimen de oleaje, y no únicamente a los valores extremos, reforzando la falta de homogeneidad estadística entre etapas en este ámbito.



**Figura 74.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje (Hs) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009.

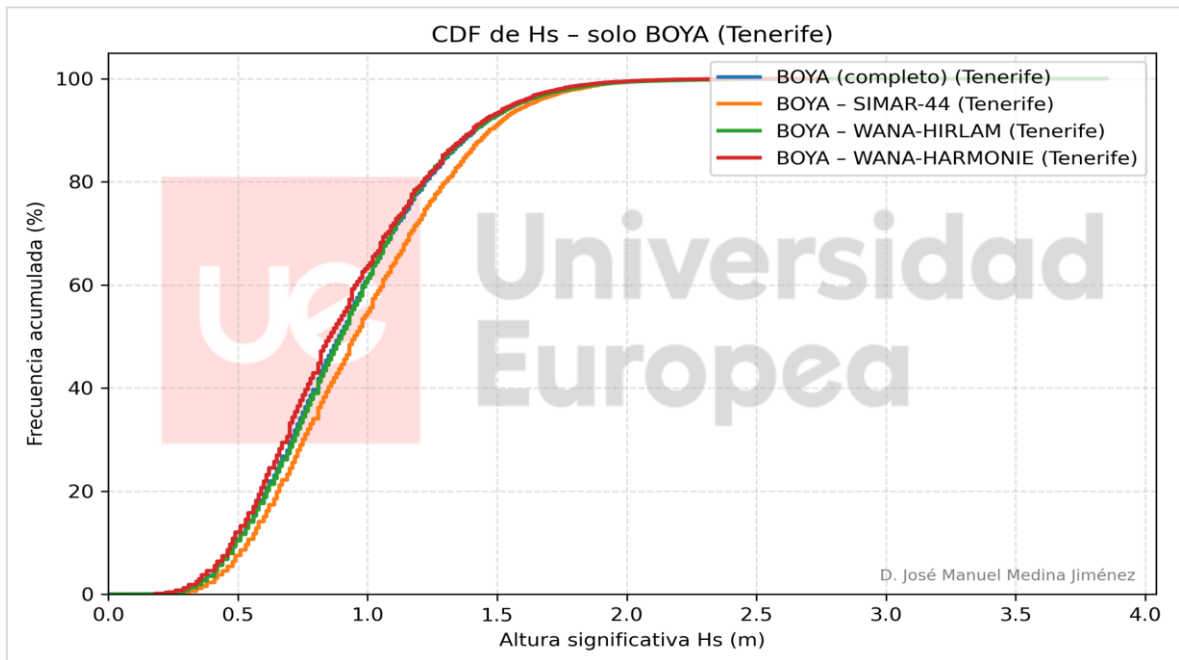
Fuente: Elaboración propia.

En el registro instrumental (Figura 75), por el contrario, las CDF de Hs asociadas a los distintos periodos muestran un alto grado de solapamiento a lo largo de prácticamente toda la distribución, si bien los registros del periodo SIMAR-44 apuntan a una Hs de mayor magnitud, posiblemente condicionado por el número limitado de registros existentes en dicha etapa.

Las pequeñas diferencias observadas entre curvas se concentran en rangos acotados y no presentan un ordenamiento temporal progresivo. Este comportamiento es coherente con un régimen medio estable del oleaje observado y sugiere que las variaciones detectadas responden a la variabilidad natural del sistema y a la segmentación temporal de la serie, sin evidenciar una señal clara de cambio estructural del clima marítimo.

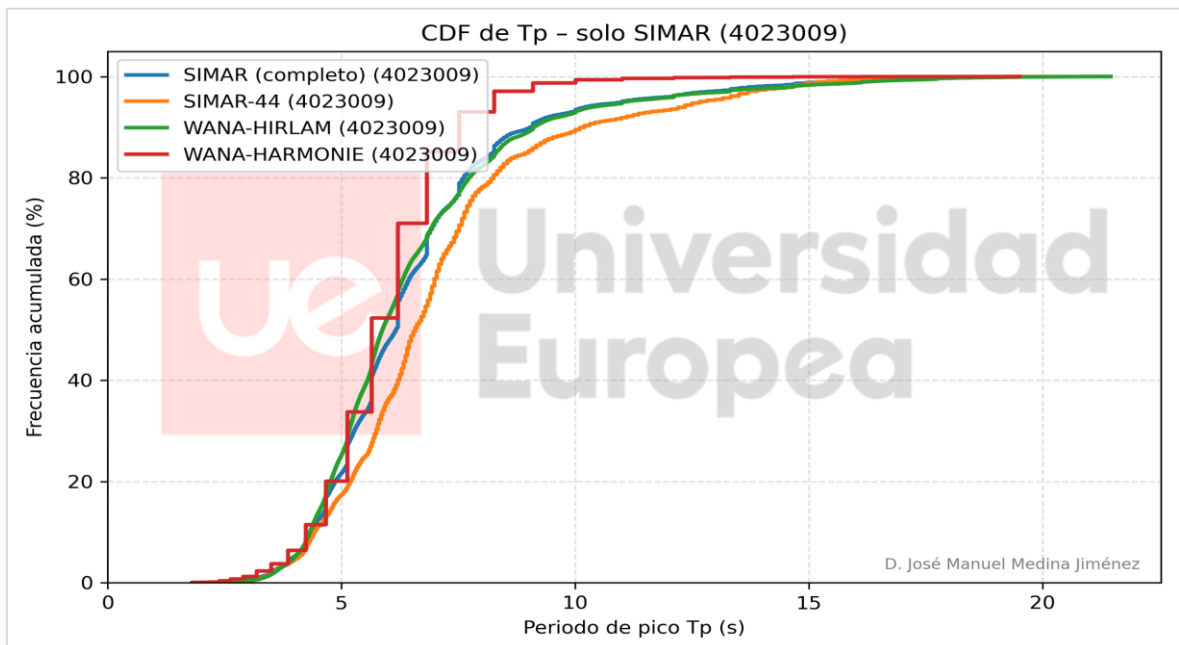
En lo que respecta a  $T_p$ , en el caso del modelo (Figura 76), las funciones de distribución acumulada del periodo de pico muestran diferencias apreciables entre las distintas etapas de modelización, más marcadas que las observadas en la altura de ola significativa. La etapa SIMAR-44 presenta una distribución ligeramente desplazada hacia valores de  $T_p$  más elevados en el rango medio de la

distribución, lo que indica una mayor frecuencia relativa de estados de mar caracterizados por periodos de pico moderadamente altos.



**Figura 75.** Función de distribución acumulada (CDF) de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 76.** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en el punto SIMAR 4023009.

Fuente: Elaboración propia.

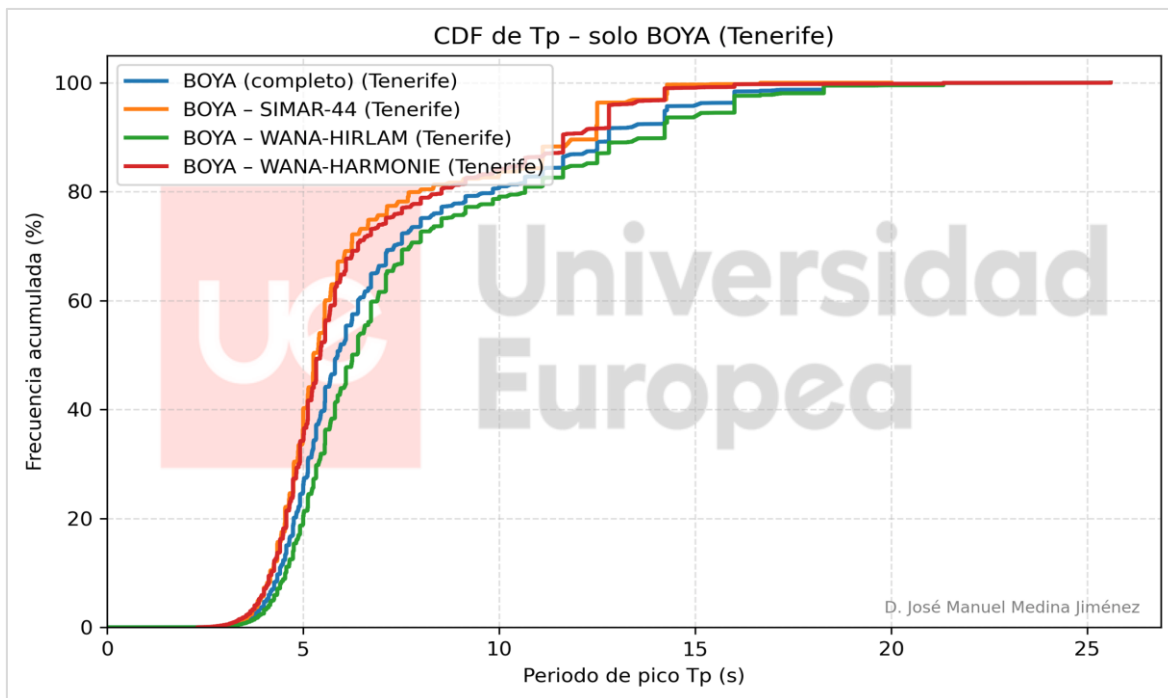
La etapa WANA-HIRLAM muestra un comportamiento muy próximo al conjunto SIMAR completo, sin desplazamientos significativos a lo largo del rango analizado, mientras que WANA-HARMONIE introduce una distribución más concentrada, con una acumulación más rápida en el tramo medio, reflejando una mayor representación relativa de periodos de pico algo más cortos.

En la parte alta de la distribución, las CDF de las distintas etapas tienden a converger, sin apreciarse diferencias ordenadas ni persistentes hacia periodos extremos más largos. Este comportamiento pone de manifiesto que las actualizaciones del sistema de modelización afectan principalmente a la forma de la distribución de  $T_p$  en el rango medio, más que a la caracterización de los valores extremos del periodo de pico.

En la boya de Tenerife (Figura77), las funciones de distribución acumulada del  $T_p$  muestran una mayor dispersión relativa entre periodos que la observada en Hs. No obstante, dicha dispersión no responde a un patrón temporal coherente ni progresivo. A lo largo del rango bajo e intermedio de  $T_p$  se aprecian cambios en la posición relativa de las curvas, particularmente entre los periodos SIMAR-44 y WANA-HIRLAM, mientras que en los valores más elevados las distribuciones tienden a aproximarse, sin que ninguna etapa mantenga una posición dominante de forma persistente.

Este comportamiento debe interpretarse teniendo en cuenta las características del registro instrumental y, en particular, las limitaciones asociadas a la cobertura temporal disponible. En el caso de la etapa SIMAR-44, el número de registros es sensiblemente menor, ya que el registro de oleaje direccional en la boya de Tenerife se inicia a mediados de 2003. Esta menor extensión temporal implica que la representación de los valores altos de  $T_p$  depende en mayor medida de la presencia o ausencia de un número reducido de temporales con periodos dominantes elevados, lo que incrementa la variabilidad aparente de la distribución en comparación con etapas posteriores más extensas.

En consecuencia, aunque la boya muestra diferencias apreciables en la distribución de  $T_p$  entre periodos, dichas diferencias se concentran principalmente en las magnitudes más elevadas y no presentan un ordenamiento global, persistente ni coherente a lo largo de toda la distribución. Junto con las limitaciones muestrales asociadas a la etapa SIMAR-44, esta circunstancia impide interpretar las variaciones observadas como una señal de cambio estructural del clima marítimo en este ámbito.



**Figura 77.** Función de distribución acumulada (CDF) del periodo de pico del oleaje ( $T_p$ ) por periodos de modelización, en la boya de Tenerife.

Fuente: Elaboración propia.

En este contexto, la información instrumental es compatible con un régimen de oleaje globalmente estable, en el que las diferencias detectadas responden a la variabilidad natural del oleaje y a la distinta cobertura temporal de los subperiodos analizados, sin evidenciar una evolución sistemática del clima marítimo durante el periodo de estudio.

En conjunto, el análisis de las CDF refuerza las conclusiones extraídas a partir de los estadísticos básicos y los percentiles. En el modelo, tanto  $H_s$  como  $T_p$  muestran diferencias persistentes entre etapas de modelización, más acusadas en la última actualización (WANA-HARMONIE) y especialmente relevantes en la representación de los estados de mar más energéticos. En cambio, el registro instrumental no muestra una evolución temporal estructurada comparable, manteniendo distribuciones ampliamente solapadas en  $H_s$  y una variabilidad en  $T_p$  sin direccionalidad clara.

Bajo el enfoque adoptado en este trabajo, la evidencia aportada por las CDF confirma que las diferencias observadas en el sur de Canarias (según el abanico de direcciones de oleaje seleccionado) entre las distintas etapas SIMAR/WANA responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, sin que los registros instrumentales indiquen un cambio estructural del clima marítimo en el periodo de estudio.

#### *6.2.2.5.4. Resumen comparativo del comportamiento estadístico del oleaje por periodos de modelización*

El análisis conjunto de los estadísticos básicos, los percentiles y las funciones de distribución acumulada permite sintetizar, para el abanico de direcciones de oleaje seleccionado, el comportamiento estadístico del oleaje en el sur de Canarias a lo largo de los distintos periodos del sistema SIMAR/WANA. Dicho análisis pone de manifiesto diferencias claras entre las series modelizadas y los registros instrumentales, así como la distinta respuesta de las variables analizadas frente a las actualizaciones del sistema de modelización.

En las series modelizadas, se identifican diferencias consistentes entre etapas, que afectan tanto a la altura significativa como al periodo de pico. En el caso de Hs, las distintas actualizaciones del sistema se traducen en modificaciones apreciables de la distribución, con un incremento progresivo del nivel medio y de los percentiles altos desde SIMAR-44 hasta WANA-HARMONIE, lo que evidencia una falta de homogeneidad estadística entre etapas en este ámbito. En Tp, los cambios entre etapas no se limitan a los valores extremos, sino que afectan a la forma de la distribución en rangos amplios, especialmente en el tramo medio, indicando una modificación en la caracterización temporal de los estados de mar representados por el modelo.

Por el contrario, en los registros instrumentales de la boya de Tenerife, el comportamiento estadístico de Hs muestra una mayor estabilidad global. La altura significativa del oleaje no presenta desplazamientos persistentes entre periodos, manteniendo valores medios y percentiles intermedios similares. En el caso del Tp, aunque se observan diferencias entre periodos, estas no afectan de forma uniforme a toda la distribución ni siguen un ordenamiento temporal coherente, manifestándose de manera localizada en distintos rangos de valores. Estas variaciones se ven además condicionadas por la distinta cobertura temporal de los subperiodos analizados, siendo especialmente relevante la menor extensión del periodo SIMAR-44 debido al inicio del registro direccional a mediados de 2003.

En conjunto, la comparación entre modelos y registros instrumentales indica que las diferencias detectadas en el sur de Canarias responden fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización SIMAR/WANA, mientras que la información instrumental no proporciona evidencias consistentes de una modificación estructural del clima marítimo durante el periodo de estudio.

### 6.2.3. Síntesis comparativa y tendencias generales

El análisis comparativo desarrollado en los distintos ámbitos geográficos permite extraer una serie de conclusiones transversales sobre el comportamiento estadístico del oleaje en España y sobre la coherencia temporal de las distintas etapas oficiales del sistema SIMAR/WANA. La aplicación de un criterio metodológico homogéneo en todos los sectores analizados (basado en estadísticos básicos, percentiles y funciones de distribución acumulada) facilita una lectura integrada de los resultados y una evaluación consistente de las posibles tendencias observadas.

De forma general, las series modelizadas presentan diferencias persistentes entre etapas de modelización, que afectan tanto a la altura significativa del oleaje como al periodo de pico, aunque con distinta intensidad según la variable y el ámbito geográfico. En el caso de Hs, estos desplazamientos se manifiestan de manera especialmente clara en los percentiles altos y en la cola de las distribuciones, lo que indica que las actualizaciones del sistema influyen de forma notable en la caracterización de los estados de mar más energéticos. En Tp, los cambios entre etapas se reflejan principalmente en la forma de la distribución y en el rango medio de valores, evidenciando modificaciones en la representación temporal del oleaje que no se limitan exclusivamente a los extremos.

Por el contrario, el análisis de los registros instrumentales de las boyas revela un comportamiento significativamente más estable. En todos los ámbitos estudiados, las series observadas no muestran desplazamientos persistentes ni un ordenamiento temporal coherente entre periodos que permita identificar una evolución estructural del clima marítimo durante el intervalo analizado. Las diferencias detectadas en las boyas se concentran, en general, en las magnitudes más elevadas o aparecen de forma localizada en determinados rangos de valores, sin mantener una direccionalidad temporal clara. Este comportamiento es compatible con la variabilidad natural del oleaje y con las limitaciones derivadas de la distinta cobertura temporal de algunos subperiodos, especialmente en aquellos casos en los que el registro direccional se inicia con posterioridad al comienzo de la etapa SIMAR-44.

Desde un punto de vista espacial, los resultados muestran que la respuesta estadística del oleaje frente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización no es uniforme. En los ámbitos de clara exposición atlántica, los desplazamientos en Hs resultan más evidentes y coherentes, mientras que en zonas condicionadas por forzamientos regionales, como el Mediterráneo, las diferencias entre etapas tienden a manifestarse de forma más moderada o localizada. No obstante,

en ningún caso los registros instrumentales aportan evidencias consistentes de un cambio estructural del clima marítimo que sea comparable, en magnitud o coherencia, a los desplazamientos observados en las series modelizadas.

Con la finalidad de sintetizar los resultados obtenidos en los distintos ámbitos geográficos analizados, la Tabla 3 presenta una comparación del comportamiento estadístico del oleaje en cada región, considerando las variables Hs y Tp tanto en las series modelizadas como en los registros instrumentales. Esta síntesis permite identificar los patrones comunes y las diferencias regionales asociadas a las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR/WANA.

En los sectores atlánticos de la península, las distintas etapas del sistema muestran, en términos generales, un incremento progresivo de la altura significativa del oleaje, mientras que las diferencias observadas en el periodo de pico resultan más moderadas.

En el ámbito mediterráneo, por el contrario, las configuraciones SIMAR-44 y WANA-HIRLAM presentan un comportamiento muy similar desde el punto de vista estadístico, siendo la transición a WANA-HARMONIE la que introduce las modificaciones más apreciables en la caracterización del oleaje.

**Tabla 3.\_** Comparación del comportamiento estadístico del oleaje entre modelos y registros instrumentales en las distintas regiones analizadas.

Región	Hs (modelo)	Tp (modelo)	Hs (boya)	Tp (boya)	Interpretación
<b>Atlántico norte peninsular</b>	↑ Moderado	↑ Leve	Estable	Variable	Las actualizaciones del modelo introducen un ligero incremento en Hs que no se observa con la misma intensidad en los registros instrumentales.
<b>Atlántico oeste peninsular</b>	↑ Progresivo	↑ Moderado	Estable	Estable	El incremento detectado entre configuraciones del modelo no presenta una correspondencia clara en los registros instrumentales.
<b>Sur peninsular</b>	↑ Progresivo	↑ Moderado	Estable	Estable	Las diferencias entre configuraciones del modelo no encuentran un reflejo claro en la evolución observada en los registros instrumentales.
<b>Este peninsular (Mediterráneo)</b>	↑ en HAR	↑ en HAR	Estable	Variable	La configuración más reciente introduce cambios apreciables en el régimen representado que no se reflejan de forma equivalente en los registros instrumentales.
<b>Norte de Canarias</b>	≈ Estable	↑ Moderado	Estable	Variable	Las modificaciones afectan principalmente al periodo de pico en el modelo.
<b>Sur de Canarias</b>	↑ fuerte	Cambios relevantes	Estable	Variable	Las actualizaciones del sistema introducen cambios apreciables en la representación del oleaje que no presentan una correspondencia clara en los registros instrumentales.

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: ↑ incremento entre etapas de modelización; ↓ disminución entre etapas de modelización; ≈ comportamiento similar o sin cambios apreciables entre etapas. HAR: configuración WANA-HARMONIE.

La interpretación se realiza considerando el abanico direccional de oleaje seleccionado en cada punto de estudio.

En el entorno insular canario se observa un comportamiento más diferenciado entre los sectores norte y sur del archipiélago. Mientras que en el norte las principales divergencias entre etapas se concentran en el periodo de pico, en el sur se identifica un incremento notable de la altura significativa del oleaje acompañado de una reducción del periodo de pico en la etapa más reciente.

Frente a estas variaciones en las series modelizadas, los registros instrumentales de las boyas muestran, en términos generales, un comportamiento más estable y sin una evolución temporal claramente definida entre los distintos periodos de modelización. En consecuencia, el conjunto de resultados sugiere que una parte significativa de las diferencias detectadas entre etapas responde fundamentalmente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, más que a cambios estructurales del clima marítimo en las regiones analizadas.

Con el objeto de facilitar la interpretación de los resultados anteriores, la Tabla 4 sintetiza los patrones regionales identificados en la evolución de las series modelizadas entre las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA, destacando las variables que presentan las principales divergencias y su significado en términos de caracterización del régimen medio de oleaje.

**Tabla 4.** Patrones regionales identificados en la evolución del régimen medio de oleaje entre las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA.

Región	Variable principal afectada	Patrón detectado entre versiones del modelo	Interpretación técnica
Atlántico peninsular	Hs	Incremento progresivo de Hs entre versiones	Tendencia general a valores de Hs superiores en configuraciones recientes, con diferencias entre etapas.
Mediterráneo	Hs y Tp	Cambios principalmente en WANA-HARMONIE	La última configuración del modelo introduce modificaciones apreciables en la caracterización del oleaje
Canarias norte	Tp	Diferencias concentradas en el periodo de pico	Las actualizaciones afectan principalmente a la representación temporal de los estados de mar
Canarias sur	Hs y Tp	↑Hs y ↓Tp en la configuración más reciente (WANA-HARMONIE)	La nueva configuración del modelo representa olas más altas pero con periodos más cortos

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: ↑ incremento entre etapas de modelización; ↓ disminución entre etapas de modelización.

En este contexto, la evidencia obtenida a partir del análisis del régimen medio y de la distribución estadística del oleaje pone de manifiesto que las diferencias entre etapas de modelización pueden tener implicaciones directas en la caracterización de los estados de mar más energéticos. Dado que estos estados extremos constituyen el principal condicionante en numerosos problemas de ingeniería marítima, resulta necesario analizar con mayor detalle el comportamiento del régimen

extremal del oleaje y evaluar en qué medida las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA influyen en la estimación de los valores asociados a periodos de retorno elevados.

### **6.3. Implicaciones de la no homogeneidad del régimen medio en el análisis del oleaje extremo**

El análisis desarrollado en el apartado 6.2 pone de manifiesto que las distintas etapas oficiales del sistema SIMAR/WANA no pueden considerarse estrictamente homogéneas desde el punto de vista estadístico, especialmente en lo que respecta al régimen medio del oleaje. Las diferencias detectadas entre etapas afectan tanto a  $H_s$  como a  $T_p$ , manifestándose de forma más acusada en los percentiles altos y en la forma de las distribuciones modelizadas.

Esta falta de homogeneidad tiene implicaciones directas en el análisis del oleaje extremo. En particular, los métodos de caracterización extremal, como los basados en técnicas POT (Peaks Over Threshold), asumen implícitamente que la serie analizada responde a un proceso estadísticamente estable a lo largo del tiempo. Cuando dicha condición no se cumple, la estimación de parámetros extremos puede verse condicionada por cambios introducidos por el propio sistema de modelización y no por una evolución real del clima marítimo.

En el caso de las series SIMAR/WANA, los desplazamientos observados en el régimen medio entre etapas implican que la probabilidad de excedencia de determinados umbrales no es directamente comparable si se analiza la serie completa de forma conjunta. Un mismo valor de altura de ola significativa puede corresponder a contextos estadísticos distintos según la etapa de modelización considerada, lo que introduce sesgos potenciales en la identificación y frecuencia de los eventos extremos si no se realiza una segmentación adecuada.

La información aportada por los registros instrumentales resulta clave para contextualizar este efecto. Tal y como se ha mostrado en los distintos ámbitos geográficos analizados, las boyas no evidencian cambios estructurales del clima marítimo comparables a los desplazamientos observados en las series modelizadas. Esta estabilidad relativa del régimen observado permite atribuir las diferencias detectadas en los modelos a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización, reforzando la necesidad de tratar cada etapa como un bloque estadístico diferenciado en los análisis extremos.

En consecuencia, el análisis del oleaje extremo debe abordarse considerando explícitamente la no homogeneidad entre etapas de modelización, evitando la mezcla directa de series pertenecientes

a sistemas con características estadísticas distintas. Este enfoque permite aislar el efecto del sistema de modelización, garantizar la coherencia interna de los análisis extremales y obtener estimaciones más robustas y físicamente interpretables desde el punto de vista de la ingeniería marítima.

Desde el punto de vista del diseño de infraestructuras marítimas, esta cuestión adquiere una especial relevancia, ya que los valores extremales de altura de ola y periodo de pico constituyen uno de los principales parámetros de entrada en el dimensionamiento de obras portuarias y costeras. Diferencias en la estimación del oleaje extremo derivadas de la utilización conjunta de series no homogéneas pueden traducirse en variaciones significativas en las solicitaciones de diseño, afectando potencialmente al dimensionamiento de los mantos que componen un dique en talud, a la estabilidad de estructuras verticales o a la estimación del run-up, entre otros.

Conviene señalar, no obstante, que el presente estudio se circunscribe al análisis del oleaje en aguas profundas y no aborda la transformación del oleaje hacia aguas someras ni la obtención directa de condiciones de diseño en costa. Aun así, las magnitudes extremales estimadas en aguas profundas constituyen habitualmente la condición de contorno para los modelos de propagación utilizados en estudios de clima marítimo aplicados al diseño de obras marítimas. En este contexto, diferencias en la estimación de  $H_s$  asociadas a periodos de retorno elevados pueden trasladarse posteriormente a los estados de mar utilizados como entrada en dichos modelos, lo que pone de manifiesto la importancia de interpretar adecuadamente las posibles discrepancias derivadas de la evolución del propio sistema de modelización.

Este planteamiento justifica el enfoque adoptado en los capítulos siguientes, en los que el régimen extremal del oleaje se analiza de forma segmentada por etapas del sistema SIMAR/WANA, permitiendo evaluar de manera consistente el impacto de las actualizaciones del modelo sobre la caracterización de los extremos y su relevancia para el diseño y la seguridad de las infraestructuras marítimas.

#### **6.4. Contraste estadístico modelo-boya**

Una vez caracterizado el comportamiento estadístico del oleaje en las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA y analizada su coherencia temporal en términos de régimen medio y de distribución, se aborda en este apartado el contraste estadístico entre las series modelizadas y los registros instrumentales de las boyas de Puertos del Estado.

El objetivo de este contraste no es la validación del modelo en el sentido clásico, ni la identificación de una fuente de datos como referencia absoluta frente a otra, sino la evaluación comparada del comportamiento estadístico de ambas series con el fin de identificar coherencias, discrepancias y posibles diferencias recurrentes en el comportamiento estadístico entre las series modelizadas y las instrumentales. Este enfoque permite analizar hasta qué punto las diferencias detectadas entre etapas de modelización encuentran reflejo, o no, en los registros instrumentales disponibles, aportando un marco interpretativo adicional a los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

En este contexto conviene distinguir dos aspectos conceptualmente diferentes. Por un lado, la coherencia entre las simulaciones y los registros instrumentales de boya, evaluada mediante comparaciones modelo-observación y, por otro, la coherencia interna entre las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA, analizada a partir de las estimaciones extremales obtenidas para cada etapa de modelización. Mientras que el primer aspecto permite valorar la capacidad de los modelos para reproducir el comportamiento observado del oleaje, el segundo constituye el objeto central del presente trabajo, orientado a evaluar la consistencia estadística de la base histórica SIMAR/WANA.

El contraste se realiza sobre las series completas de oleaje, sin restringirse exclusivamente a episodios extremos, de modo que se evalúa el comportamiento global de las magnitudes de oleaje en un sentido estadístico amplio. No obstante, se presta especial atención a los rangos de mayor interés ingenieril, en los que pequeñas diferencias pueden tener implicaciones relevantes en estudios posteriores de régimen extremal y de diseño marítimo.

En coherencia con el planteamiento general del trabajo, las boyas se consideran como una referencia instrumental independiente, representativa de la evolución temporal real del oleaje en cada ámbito geográfico, pero sujeta a limitaciones propias relacionadas con la cobertura temporal, el tamaño muestral y las condiciones locales de exposición. Estas limitaciones se tienen en cuenta explícitamente en la interpretación de los resultados, evitando extrapolaciones no justificadas.

El análisis se desarrolla de forma homogénea para todos los ámbitos geográficos considerados (litoral peninsular e islas Canarias), siguiendo una estructura común que permite la comparación consistente de los resultados y la identificación de patrones regionales. De este modo, el contraste estadístico modelo-boya se integra como un paso intermedio fundamental entre el análisis del régimen medio y el estudio específico del régimen extremal del oleaje, proporcionando una base sólida para la interpretación de los resultados que se presentan en los apartados siguientes.

El contraste estadístico se apoya en un conjunto reducido de indicadores cuantitativos habituales en la comparación modelo-boya (sesgo medio, RMSE, índice de dispersión y coeficiente de correlación), seleccionados de forma que cada uno aporte información complementaria sobre la coherencia temporal, el sesgo persistente y la magnitud y dispersión del error. La interpretación de estos indicadores se realiza siempre de forma conjunta y en términos relativos entre etapas de modelización, evitando lecturas aisladas de sus valores absolutos. En particular, un mayor coeficiente de correlación no se interpreta necesariamente como una mejor representación del régimen de oleaje desde el punto de vista ingenieril, sino como un indicador de la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal registrada por la boya, cuyo interés principal radica en contextualizar las diferencias detectadas en los análisis estadísticos previos y en su posible repercusión sobre el régimen extremal del oleaje.

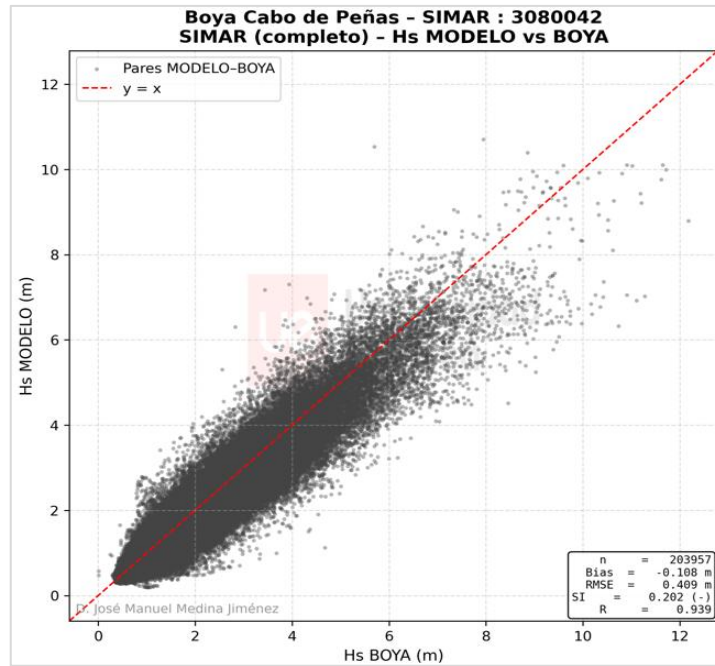
#### **6.4.1. Norte peninsular**

##### ***6.4.1.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs***

El contraste estadístico entre el punto SIMAR 3080042 y los registros instrumentales de la boya del Cabo de Peñas permite evaluar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en un entorno sin interacción con obstáculos, caracterizado por un régimen de oleaje energético y bien desarrollado.

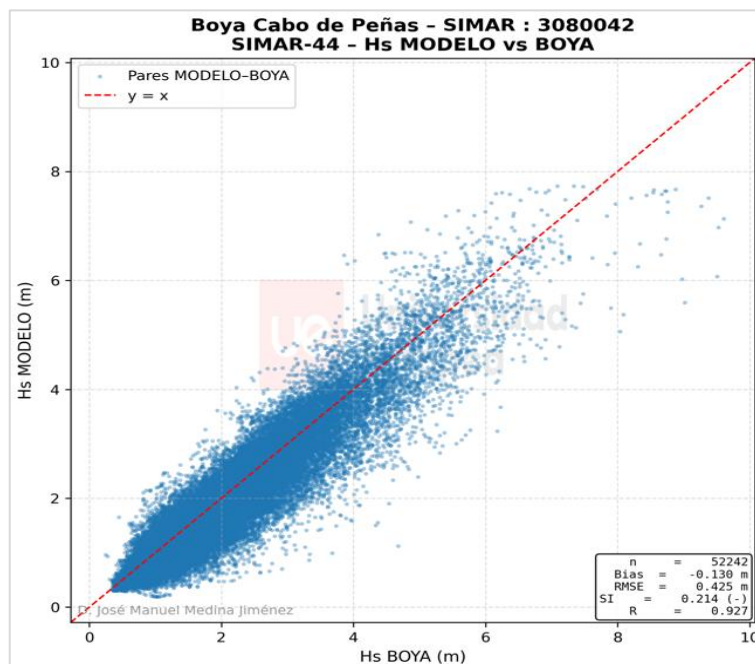
La comparación realizada sobre el conjunto completo de la serie SIMAR (Figura 78) muestra una elevada coherencia temporal con la boya, reflejada en un coeficiente de correlación alto. No obstante, este buen ajuste global debe interpretarse con cautela, ya que el uso de la serie completa integra configuraciones de modelización heterogéneas cuyos efectos pueden compensarse parcialmente. Por este motivo, el análisis por etapas resulta más representativo para interpretar el impacto de las sucesivas actualizaciones del sistema.

La etapa SIMAR-44 (Figura 79) presenta una correlación elevada con la boya, indicando una adecuada reproducción de la variabilidad temporal del oleaje. Sin embargo, el sesgo negativo y los valores relativamente mayores de RMSE y del índice de dispersión ponen de manifiesto una tendencia persistente a la infraestimación de la altura significativa, acompañada de una mayor dispersión en los estados de mar más energéticos.



**Figura 78.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

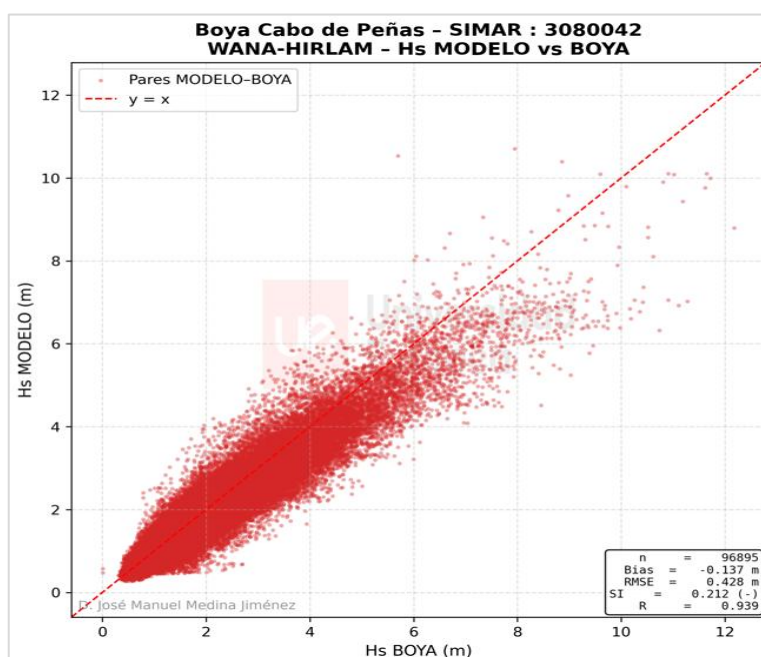
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 79.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

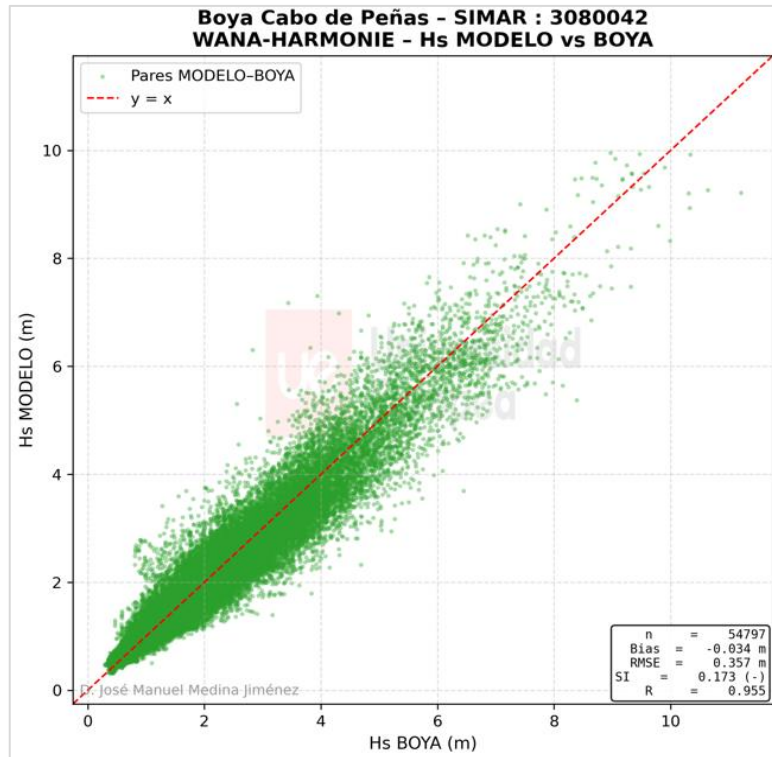
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 80) muestra una ligera mejora en la coherencia temporal respecto a SIMAR-44, aunque mantiene un comportamiento similar en términos de sesgo y dispersión. Esto sugiere que las actualizaciones introducidas en esta fase mejoran la sincronía temporal del oleaje, pero no modifican de forma sustancial la representación estadística de la distribución de la altura significativa del oleaje.



**Figura 80.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 81) presenta una mejora clara y consistente en el conjunto de indicadores considerados. El coeficiente de correlación alcanza los valores más elevados, el sesgo medio es prácticamente nulo y tanto el RMSE como el índice de dispersión se reducen de forma apreciable. Estos resultados indican una representación más ajustada del régimen medio de Hs y una menor dispersión relativa respecto a los registros instrumentales.



**Figura 81.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

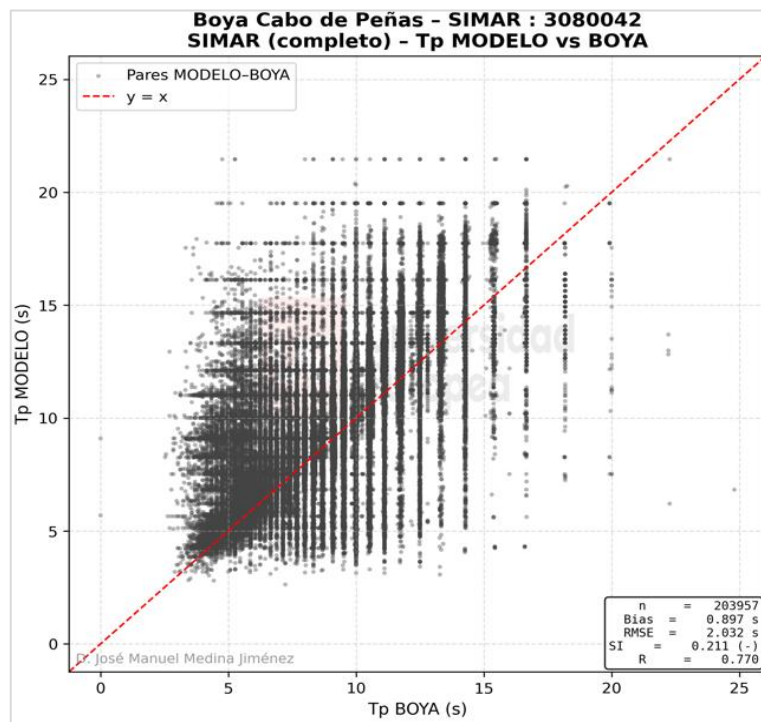
En conjunto, los resultados del contraste modelo-boya en el Norte peninsular ponen de manifiesto una evolución progresiva del comportamiento estadístico de las series modelizadas, con mejoras claras en las etapas más recientes del sistema. Estas diferencias, interpretadas de forma conjunta a partir de los distintos indicadores estadísticos, proporcionan un contexto fundamental para el análisis posterior del régimen extremo del oleaje, evitando interpretaciones basadas en métricas aisladas y reforzando la coherencia del enfoque metodológico adoptado.

#### **6.4.1.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$**

El contraste estadístico entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA del punto SIMAR 3080042 y los registros instrumentales de la boya del Cabo de Peñas para el periodo de pico ( $T_p$ ) permite evaluar la capacidad relativa de las distintas etapas de modelización para reproducir la escala temporal del oleaje dominante en el Norte peninsular. A diferencia de la altura significativa, el periodo de pico es una variable especialmente sensible a la formulación espectral del modelo y a la discretización direccional y frecuencial, lo que condiciona su interpretación desde el punto de vista estadístico.

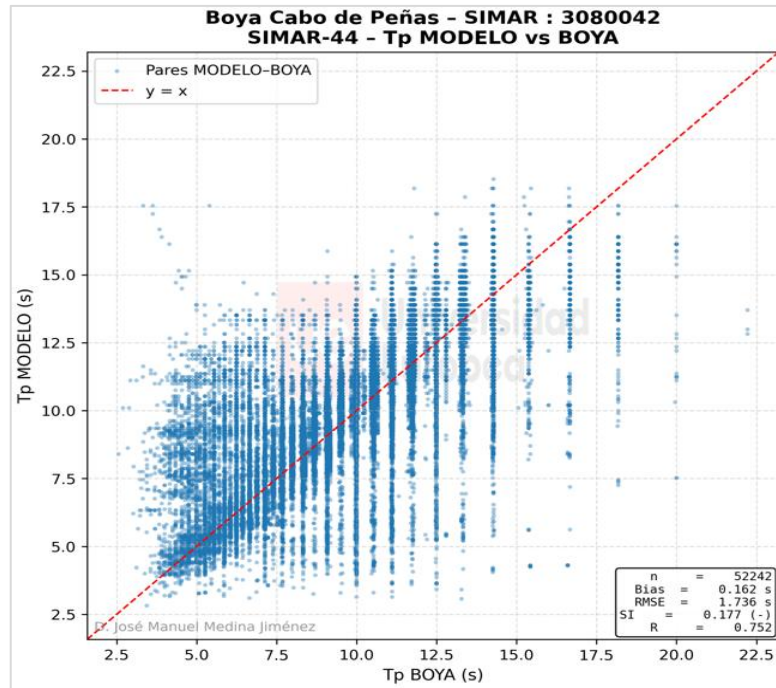
La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 82) muestra una coherencia temporal moderada entre modelo y boya, reflejada en un coeficiente de correlación claramente inferior al obtenido para la altura significativa. El sesgo positivo indica una tendencia persistente del modelo a sobreestimar el periodo de pico, mientras que los valores de RMSE y del índice de dispersión ponen de manifiesto una dispersión apreciable, especialmente en el rango de periodos medios y altos. Estos resultados deben interpretarse con cautela, ya que la integración conjunta de distintas etapas de modelización con formulaciones espectrales diferentes puede contribuir a una mayor dispersión en esta variable.

La etapa SIMAR-44 (Figura 83) presenta una correlación moderada con los registros instrumentales, junto con un sesgo positivo y valores relativamente elevados de RMSE y dispersión. Este comportamiento sugiere que, aunque el modelo reproduce de forma razonable la variabilidad temporal general del periodo de pico, existe una tendencia clara a asignar periodos dominantes más largos que los registrados por la boya.



**Figura 82.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

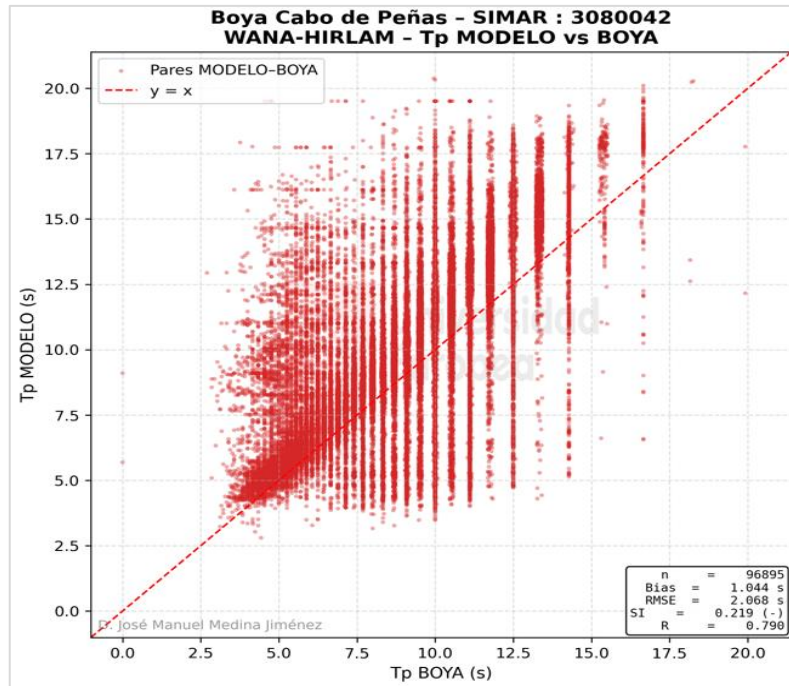


**Figura 83.\_** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

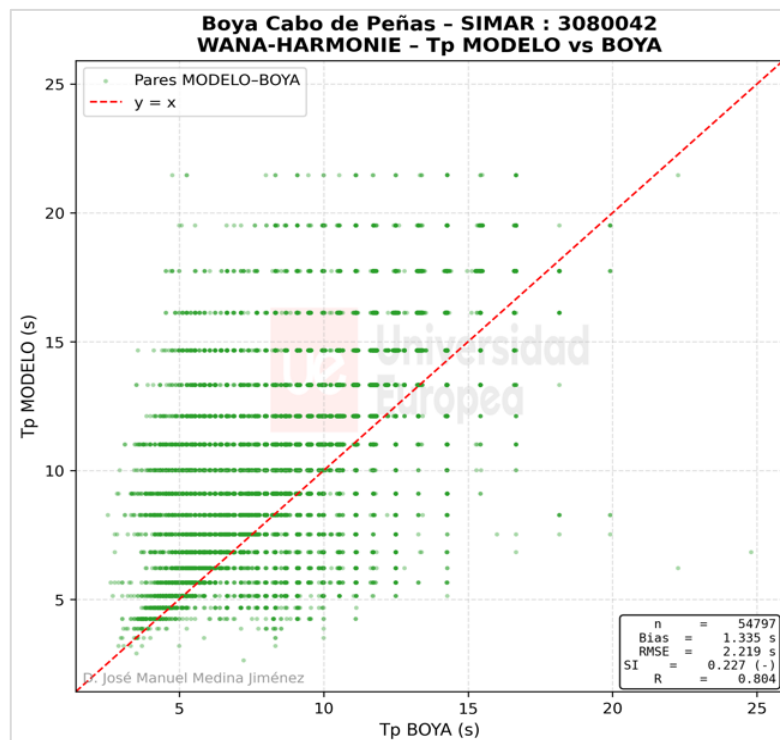
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 84) muestra un comportamiento similar, con una ligera mejora en la coherencia temporal respecto a SIMAR-44, pero manteniendo una sobreestimación persistente del periodo de pico y niveles de dispersión comparables. Al igual que en el caso de la altura significativa, las actualizaciones introducidas en esta fase parecen mejorar la sincronía temporal del oleaje sin traducirse en una modificación sustancial de la representación estadística del periodo dominante.

Por el contrario, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 85) presenta una mejora apreciable en el conjunto de indicadores considerados. El coeficiente de correlación aumenta de forma clara, indicando una mejor reproducción de la variabilidad temporal del periodo de pico, aunque se mantiene un sesgo positivo significativo y una dispersión todavía elevada. Estos resultados ponen de manifiesto que, si bien las formulaciones más recientes del sistema mejoran la coherencia temporal de  $T_p$ , la representación estadística de esta variable continúa siendo más incierta que la de la altura significativa.



**Figura 84.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 85.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3080042 y la boya del Cabo de Peñas (Norte peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el contraste estadístico modelo-boya para el periodo de pico en el Norte peninsular evidencia que  $T_p$  presenta una mayor dispersión y una menor coherencia temporal que la altura significativa del oleaje, independientemente de la etapa de modelización considerada. Las mejoras introducidas en las versiones más recientes del sistema SIMAR/WANA se reflejan en una mayor sincronía temporal, pero no eliminan completamente las diferencias persistentes en la magnitud del periodo dominante. Este comportamiento refuerza la conveniencia de interpretar los resultados asociados a  $T_p$  con prudencia en estudios de carácter estadístico y extremal, especialmente cuando se emplean de forma conjunta con la altura significativa en aplicaciones de ingeniería marítima.

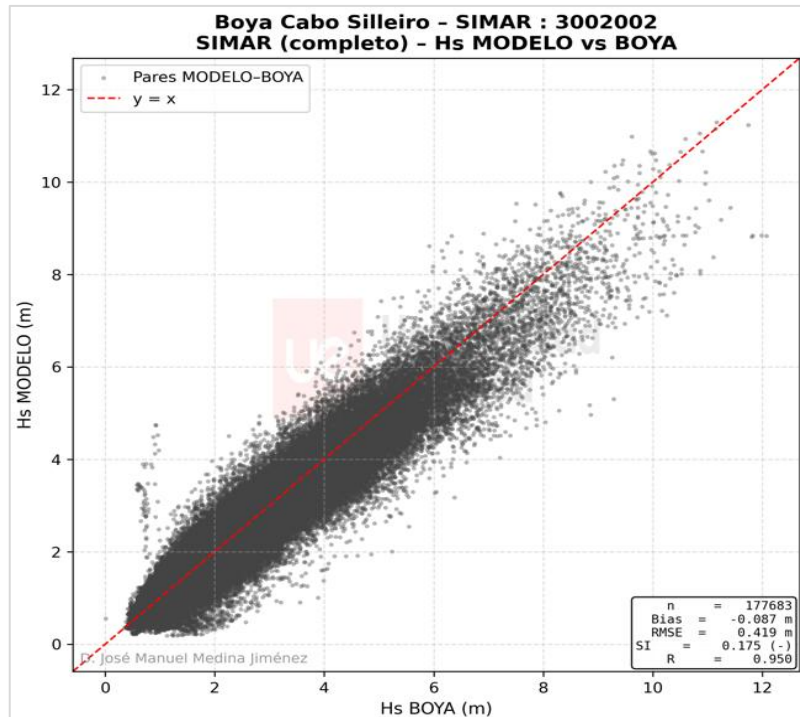
## **6.4.2. Oeste peninsular**

### **6.4.2.1. Contraste estadístico modelo-boya para $H_s$**

El contraste estadístico entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA del punto SIMAR 3002002 y los registros instrumentales de la boya del Cabo Silleiro permite analizar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en el Oeste peninsular, un ámbito expuesto al océano Atlántico caracterizado por un régimen de oleaje energético y con elevada persistencia de estados de mar desarrollados.

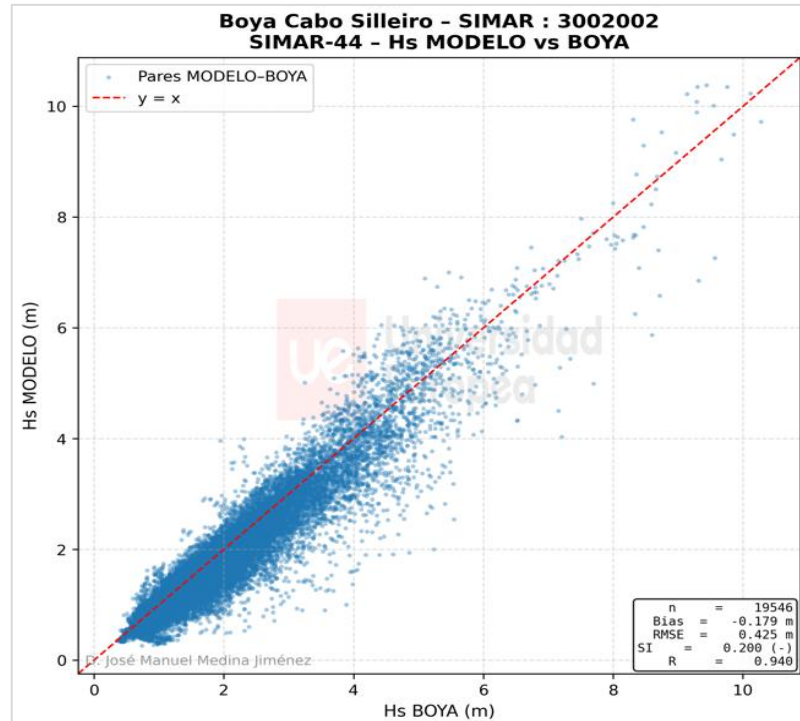
La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 86) muestra una coherencia temporal elevada entre modelo y boya, reflejada en un coeficiente de correlación alto. El sesgo negativo moderado indica una ligera tendencia persistente a la infraestimación de la altura significativa del oleaje, mientras que los valores de RMSE y del índice de dispersión son coherentes con los esperables en climas de oleaje energéticos, donde pequeñas discrepancias absolutas se traducen en errores relativos moderados. No obstante, al integrar distintas etapas de modelización, este buen ajuste global debe interpretarse como una referencia contextual y no como representativo de una configuración homogénea del sistema.

La etapa SIMAR-44 (Figura 87) presenta una correlación elevada con los registros instrumentales, lo que indica una adecuada reproducción de la variabilidad temporal del oleaje. Sin embargo, el sesgo negativo es más acusado que en otras etapas y se acompaña de valores relativamente mayores de RMSE y dispersión. Este comportamiento pone de manifiesto una tendencia persistente a infraestimar la altura significativa, especialmente en los estados de mar más energéticos, lo que sugiere una representación conservadora del régimen de oleaje en esta fase de modelización.



**Figura 86.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

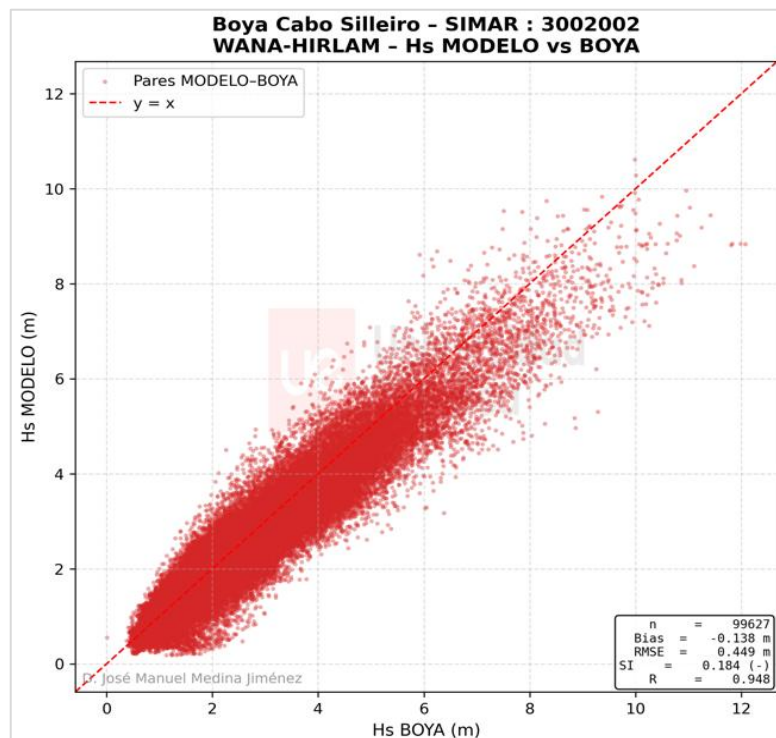


**Figura 87.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

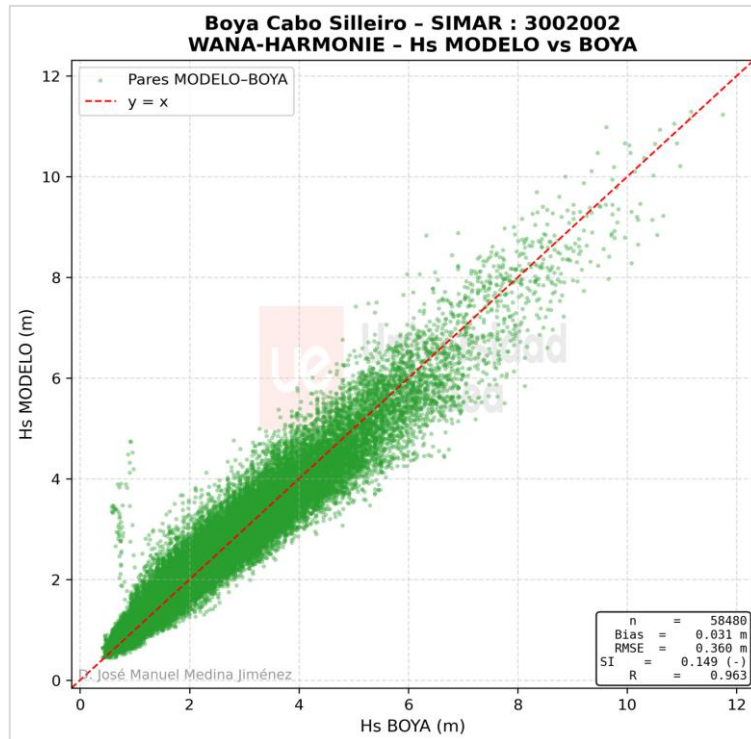
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 88) muestra una ligera mejora en la coherencia temporal respecto a SIMAR-44, manteniendo, no obstante, un sesgo negativo de magnitud similar y niveles de dispersión comparables. Este resultado indica que las actualizaciones introducidas en esta etapa mejoran la sincronía temporal del oleaje, pero no modifican de forma sustancial la representación estadística de la distribución de la altura significativa del oleaje en el Oeste peninsular.

Por el contrario, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 89) presenta una mejora clara y consistente en el conjunto de indicadores considerados. El coeficiente de correlación alcanza los valores más elevados, el sesgo medio se reduce de forma notable hasta valores prácticamente nulos y tanto el RMSE como el índice de dispersión disminuyen de manera apreciable. Estos resultados reflejan una representación más ajustada del régimen medio de la altura significativa y una menor dispersión relativa respecto a los registros instrumentales, especialmente en el rango medio y alto del oleaje.



**Figura 88.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 89.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

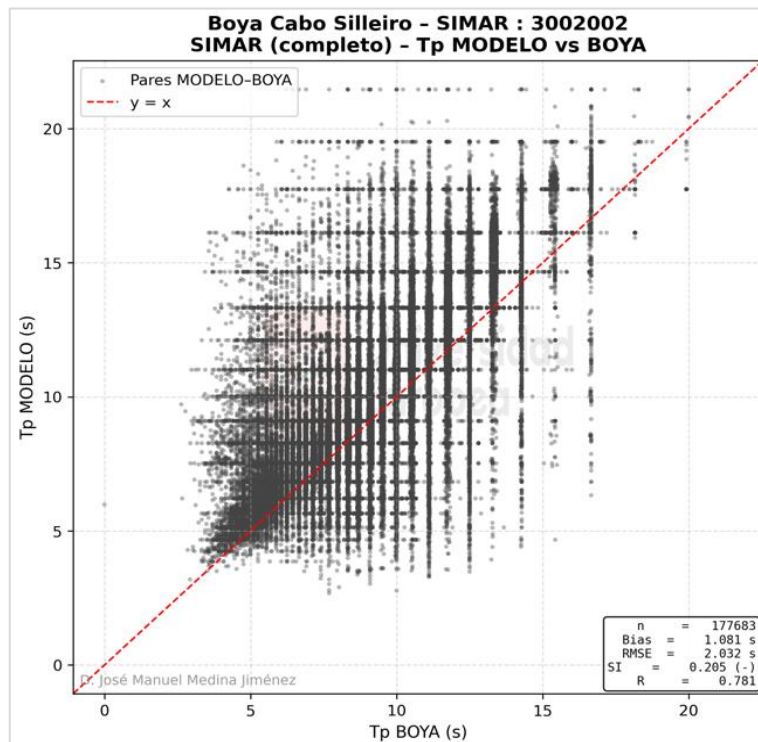
En conjunto, el contraste estadístico modelo–boya en el Oeste peninsular pone de manifiesto una evolución progresiva del comportamiento estadístico de las series modelizadas, con mejoras claras en las etapas más recientes del sistema. La interpretación conjunta de los distintos indicadores estadísticos evidencia que estas mejoras se traducen principalmente en una reducción del sesgo y de la dispersión, proporcionando una base más robusta para el análisis posterior del régimen extremal del oleaje en este ámbito atlántico abierto.

#### **6.4.2.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$**

El contraste estadístico entre las series del punto SIMAR 3002002 y los registros instrumentales de la boya del Cabo Silleiro para el periodo de pico ( $T_p$ ) permite analizar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en el Oeste peninsular desde el punto de vista de la escala temporal dominante del oleaje. Al igual que en el Norte peninsular, el periodo de pico muestra una mayor sensibilidad a la formulación espectral del modelo y a la discretización frecuencial, lo que se traduce en una mayor dispersión y en una menor coherencia temporal en comparación con la altura significativa del oleaje.

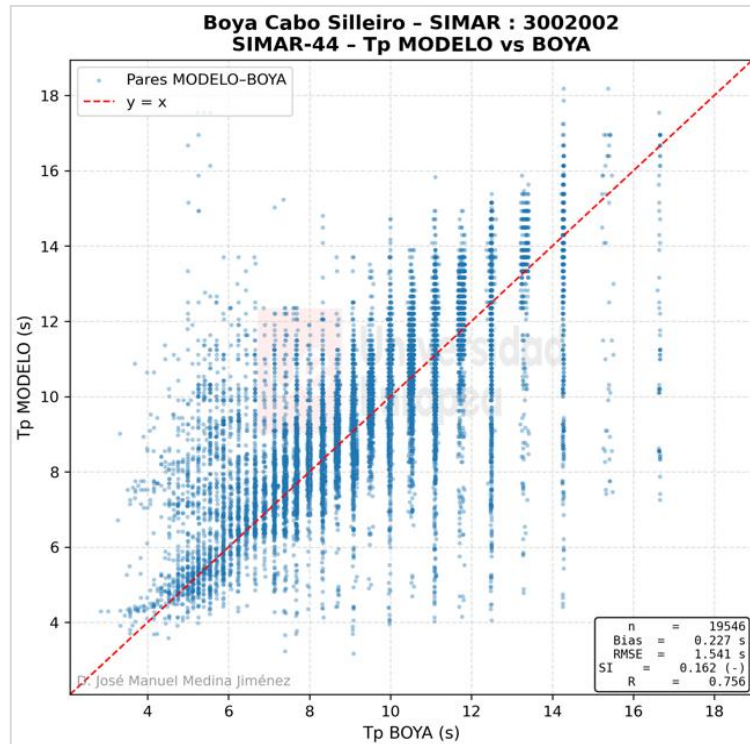
La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 90) muestra una coherencia temporal moderada entre modelo y boya, con valores del coeficiente de correlación sensiblemente inferiores a los obtenidos para la altura significativa. El sesgo positivo indica una tendencia persistente del modelo a asignar periodos de pico más largos que los registrados por la boya, mientras que los valores de RMSE y del índice de dispersión ponen de manifiesto una dispersión apreciable, especialmente en el rango de periodos medios y altos. Al integrar distintas etapas de modelización, este comportamiento debe interpretarse como una referencia global, condicionada por la heterogeneidad interna del sistema.

La etapa SIMAR-44 (Figura 91) presenta una correlación moderada con los registros instrumentales, junto con un sesgo positivo y niveles de dispersión elevados. Este comportamiento sugiere que, aunque el modelo reproduce de forma razonable la variabilidad temporal general del periodo de pico, existe una tendencia clara a asignar periodos dominantes más largos que los observados en la boya.



**Figura 90.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

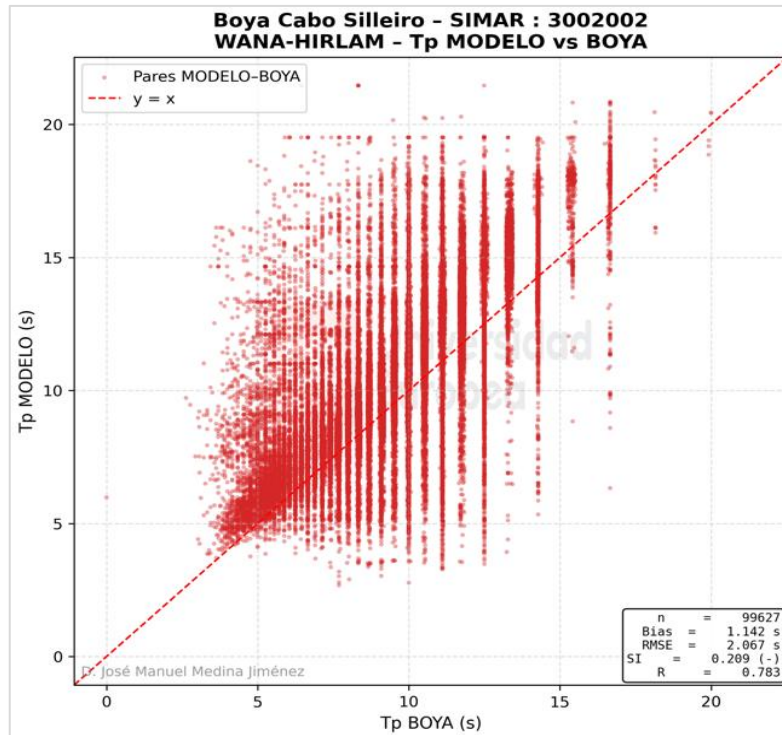


**Figura 91.** \_ Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

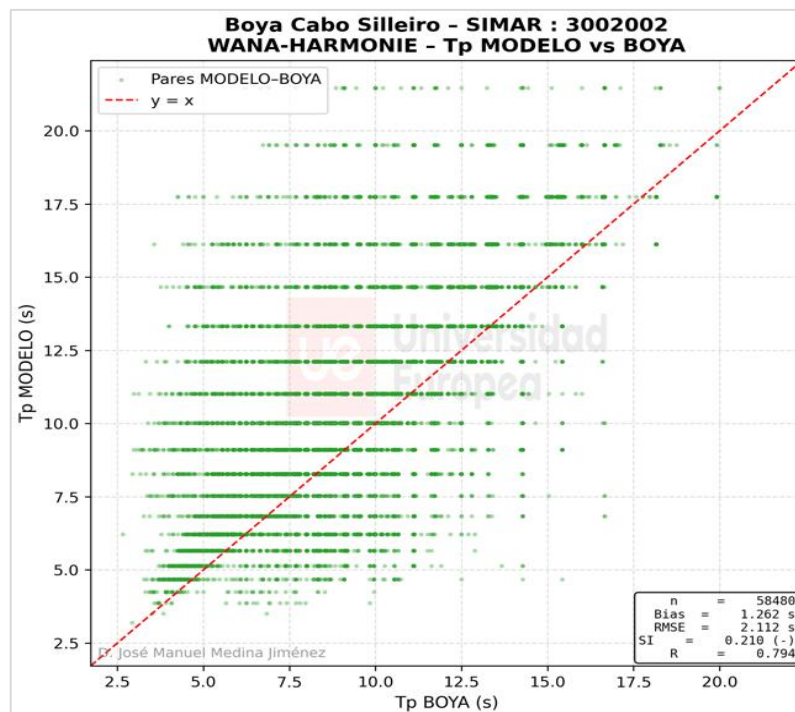
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 92) muestra un comportamiento muy similar al de SIMAR-44. Se observa una ligera mejora en la coherencia temporal, pero se mantiene una sobreestimación persistente del periodo de pico y valores de dispersión comparables. Al igual que en el análisis de la altura significativa, las actualizaciones introducidas en esta fase parecen mejorar la sincronía temporal del oleaje sin traducirse en una modificación sustancial de la representación estadística del periodo dominante.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 93) presenta una mejora apreciable en la coherencia temporal del periodo de pico, reflejada en un aumento del coeficiente de correlación respecto a las etapas anteriores. No obstante, el sesgo positivo continúa siendo significativo y la dispersión asociada a  $T_p$  sigue siendo elevada. Estos resultados indican que, aunque las versiones más recientes del sistema mejoran la reproducción de la variabilidad temporal del periodo dominante, la representación estadística de  $T_p$  continúa mostrando una mayor incertidumbre que la correspondiente a la altura significativa del oleaje.



**Figura 92.** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 93.** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 3002002 y la boya de Cabo Silleiro (Oeste peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el contraste estadístico modelo-boya para el periodo de pico en el Oeste peninsular pone de manifiesto que  $T_p$  presenta una menor coherencia temporal y una mayor dispersión que la altura significativa, independientemente de la etapa de modelización considerada, patrón consistente con el observado en el Norte peninsular. Las mejoras introducidas en las versiones más recientes del sistema SIMAR/WANA se reflejan principalmente en una mayor sincronía temporal, pero no eliminan las diferencias persistentes en la magnitud del periodo dominante. Este comportamiento refuerza la necesidad de interpretar los resultados asociados a  $T_p$  con cautela en estudios estadísticos y extremales, especialmente cuando se emplea como variable complementaria en aplicaciones de ingeniería marítima.

### **6.4.3. Sur peninsular**

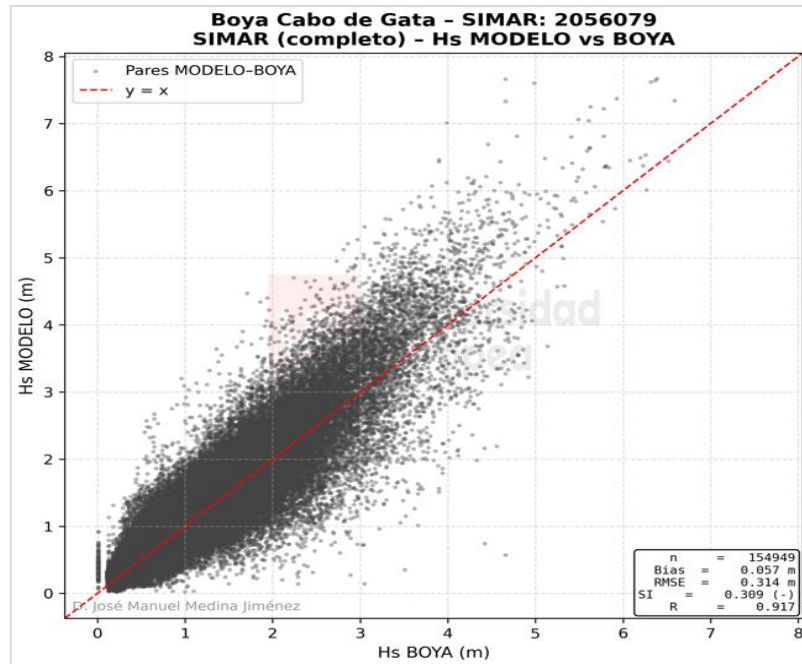
#### **6.4.3.1. Contraste estadístico modelo-boya para $H_s$**

El contraste estadístico entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA del punto SIMAR 2056079 y los registros instrumentales de la boya del Cabo de Gata permite analizar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en el Sur peninsular, un ámbito caracterizado por un régimen de oleaje de menor energía media y mayor variabilidad direccional, propio de la zona de transición entre el Atlántico y el Mediterráneo.

La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 94) muestra una coherencia temporal elevada entre modelo y boya, con un coeficiente de correlación alto. El sesgo medio es reducido y de signo positivo, lo que indica una ligera tendencia del modelo a sobreestimar la altura significativa del oleaje. No obstante, los valores de RMSE y del índice de dispersión son sensiblemente superiores, en términos relativos, a los observados en las regiones expuestas a oleajes del Atlántico. Este comportamiento es coherente con un régimen de oleaje menos energético, en el que discrepancias absolutas moderadas adquieren mayor peso relativo, y con la heterogeneidad interna de la serie completa, que integra distintas etapas de modelización.

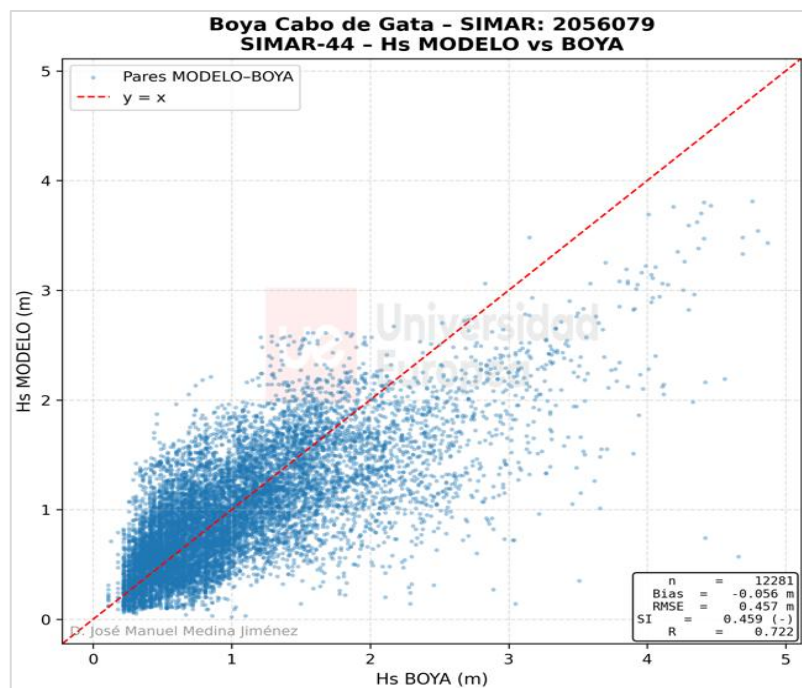
La etapa SIMAR-44 (Figura 95) presenta una correlación claramente inferior a la observada en el Norte y Oeste peninsular, junto con un incremento notable de la dispersión y del índice de dispersión. El sesgo medio es reducido, pero el patrón de dispersión pone de manifiesto una mayor dificultad del modelo para reproducir de forma consistente la variabilidad del oleaje registrada por la boya en este ámbito. Este comportamiento sugiere que, en la etapa más antigua del sistema, la representación estadística de la altura significativa del oleaje en el Sur peninsular resulta más

incierto, especialmente en un contexto dominado por estados de mar de menor energía y mayor complejidad direccional.



**Figura 94.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

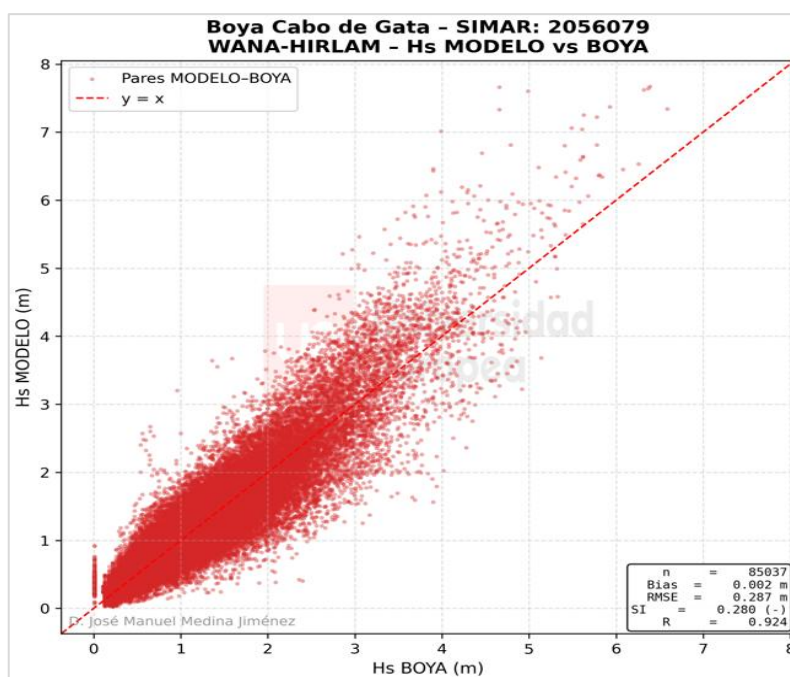


**Figura 95.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

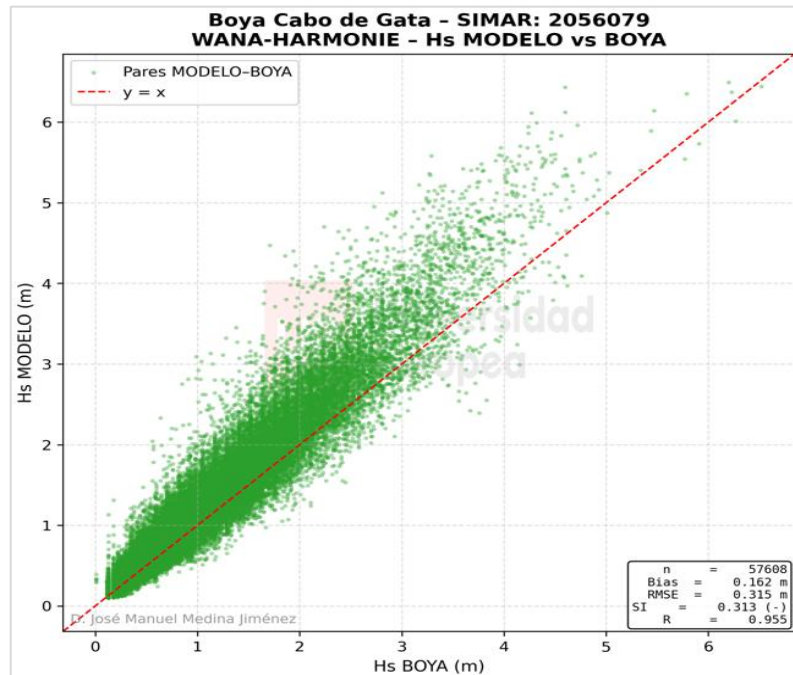
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 96) muestra una mejora apreciable respecto a SIMAR-44, reflejada principalmente en un aumento claro del coeficiente de correlación, lo que indica una mejor coherencia temporal entre modelo y boya. La dispersión se reduce de forma moderada, sin embargo, se observa una sobreestimación persistente de la altura significativa del oleaje respecto a los registros instrumentales, reflejada en un sesgo medio positivo. En conjunto, estos resultados indican que las actualizaciones introducidas en esta fase mejoran la sincronía temporal del oleaje en el Sur peninsular, pero no eliminan completamente las diferencias persistentes en la representación estadística de Hs en este ámbito de transición.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 97) presenta una mejora clara en la coherencia temporal entre modelo y boya, reflejada en el coeficiente de correlación más elevado de todas las configuraciones analizadas. No obstante, el sesgo medio es positivo y de magnitud apreciable en términos relativos, lo que indica una sobreestimación persistente de la altura significativa del oleaje en este ámbito. Asimismo, aunque el RMSE se mantiene en valores moderados en términos absolutos, el índice de dispersión continúa siendo elevado, coherente con un régimen de oleaje de baja energía media. En conjunto, estos resultados indican que WANA-HARMONIE mejora de forma significativa la sincronía temporal del oleaje en el Sur peninsular, pero no elimina completamente las diferencias persistentes en la representación estadística de la altura significativa frente a los registros instrumentales.



**Figura 96.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 97.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el contraste estadístico modelo-boya para la altura significativa del oleaje en el Sur peninsular pone de manifiesto un comportamiento diferenciado respecto a las regiones del norte y oeste peninsular, expuestas a oleajes del océano Atlántico. La mayor dispersión relativa y la menor coherencia temporal observadas en las etapas más antiguas reflejan la sensibilidad del modelo a un régimen de oleaje menos energético y con mayor complejidad direccional. Las mejoras introducidas en las versiones más recientes del sistema SIMAR/WANA se traducen principalmente en una mejor coherencia temporal y en una reducción parcial de la dispersión, si bien persisten diferencias apreciables en la representación estadística de la altura significativa.

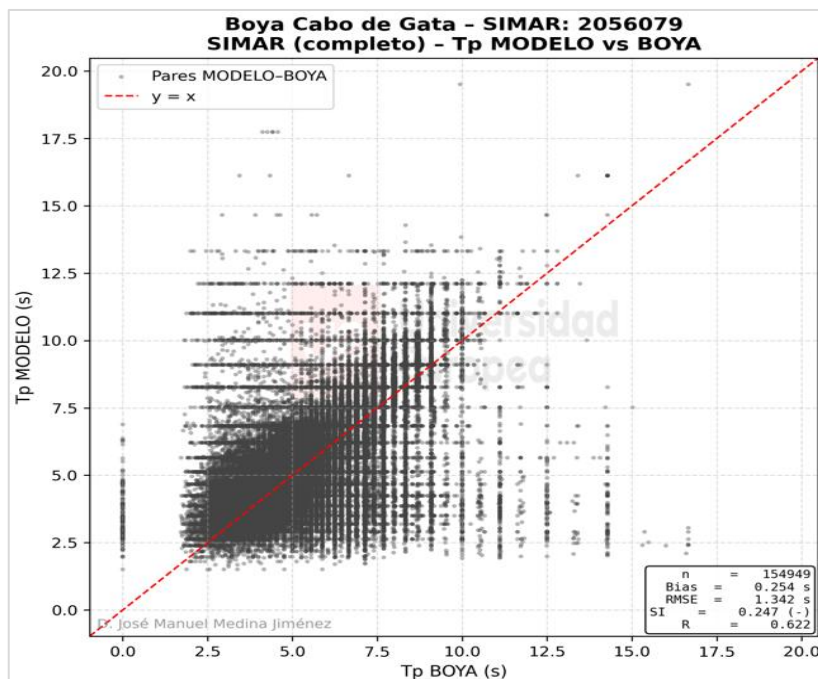
#### 6.4.3.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$

El contraste estadístico entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA del punto SIMAR 2056079 y los registros instrumentales de la boya del Cabo de Gata para el periodo de pico ( $T_p$ ) permite evaluar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en un ámbito de transición entre el régimen atlántico y el mediterráneo, caracterizado por menor energía media y elevada variabilidad direccional. En este contexto,  $T_p$  tiende a mostrar una mayor dispersión y

una menor coherencia temporal que la altura significativa, lo que condiciona la interpretación conjunta de los indicadores estadísticos.

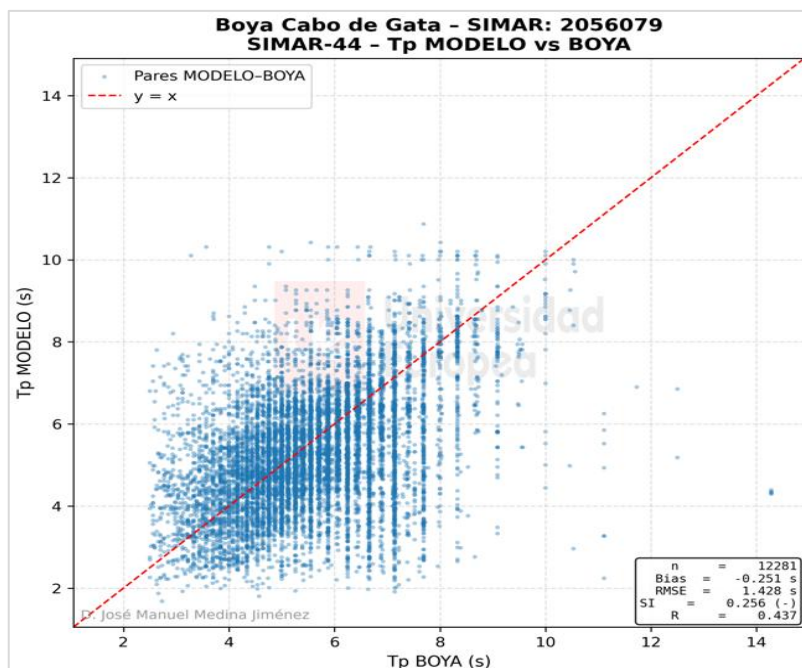
La comparación sobre la serie SIMAR completa (Figura 98) muestra una coherencia temporal moderada, con un coeficiente de correlación relativamente bajo. El sesgo medio es positivo, indicando una tendencia del modelo a asignar periodos de pico ligeramente superiores a los registrados por la boya. Sin embargo, los valores de RMSE y del índice de dispersión ponen de manifiesto una dispersión apreciable, coherente con la complejidad espectral del oleaje en este ámbito y con la heterogeneidad interna de la serie completa al integrar distintas etapas de modelización.

En la etapa SIMAR-44 (Figura 99) se observa una degradación notable de la coherencia temporal, con el coeficiente de correlación más bajo de las configuraciones analizadas. Aunque el sesgo medio es de magnitud reducida y de signo negativo, la dispersión se mantiene elevada, lo que indica que las discrepancias vienen dominadas por la variabilidad no reproducida del periodo de pico más que por un desplazamiento del nivel medio. Este comportamiento sugiere una limitada capacidad de esta etapa para reproducir de forma consistente la evolución temporal de  $T_p$  en un entorno direccionalmente complejo.



**Figura 98.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 99.** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

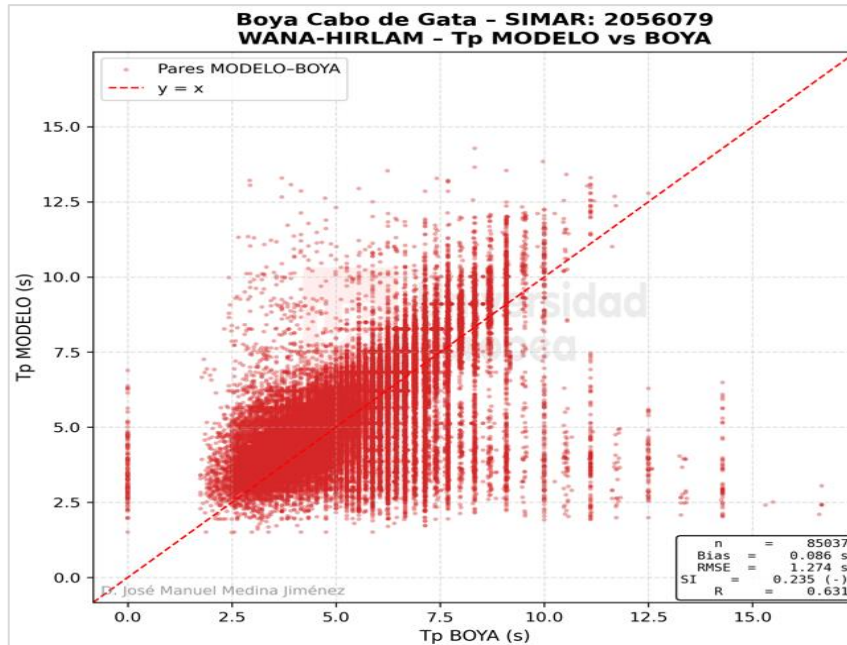
Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 100) presenta una mejora clara respecto a SIMAR-44. El coeficiente de correlación aumenta de forma apreciable y el sesgo pasa a valores positivos moderados, evidenciando una tendencia a sobreestimar Tp respecto a los registros instrumentales. El RMSE se reduce ligeramente y el índice de dispersión permanece en valores elevados, indicando que, aunque la sincronía temporal mejora, persiste una dispersión importante asociada a la representación del periodo dominante en este ámbito de transición.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 101) muestra una mejora adicional, con el coeficiente de correlación más alto de las etapas individuales. No obstante, el sesgo positivo se incrementa de forma clara y el RMSE aumenta respecto a WANA-HIRLAM, mientras que el índice de dispersión se mantiene en valores similares. Estos resultados indican que la actualización mejora la coherencia temporal de Tp, pero lo hace a costa de una sobreestimación más marcada del periodo dominante, manteniéndose una dispersión elevada frente a los registros instrumentales.

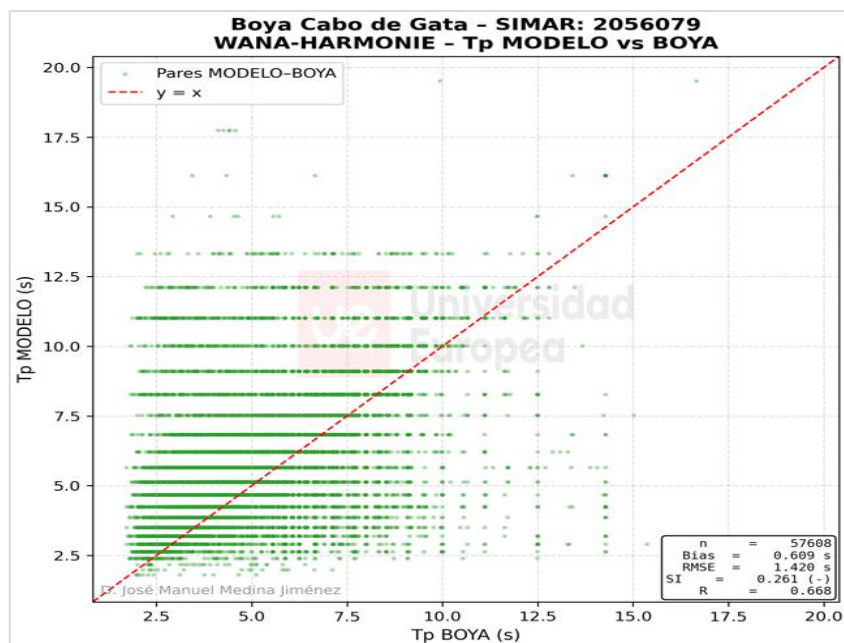
En conjunto, el contraste modelo-boya para Tp en el Sur peninsular pone de manifiesto que las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA tienden a mejorar la coherencia temporal del periodo de pico, pero no eliminan las discrepancias persistentes en su representación estadística, que se manifiestan como dispersión elevada y sesgos positivos en las etapas más recientes. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del oleaje en un ámbito de transición

Atlántico-Mediterráneo, donde la variabilidad direccional y la presencia de estados de mar de distinta procedencia incrementan la sensibilidad de  $T_p$  a la formulación espectral del modelo y a las diferencias de exposición local entre la boya y el punto de malla.



**Figura 100.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 101.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2056079 y la boya del Cabo de Gata (Sur peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4.4. Este peninsular

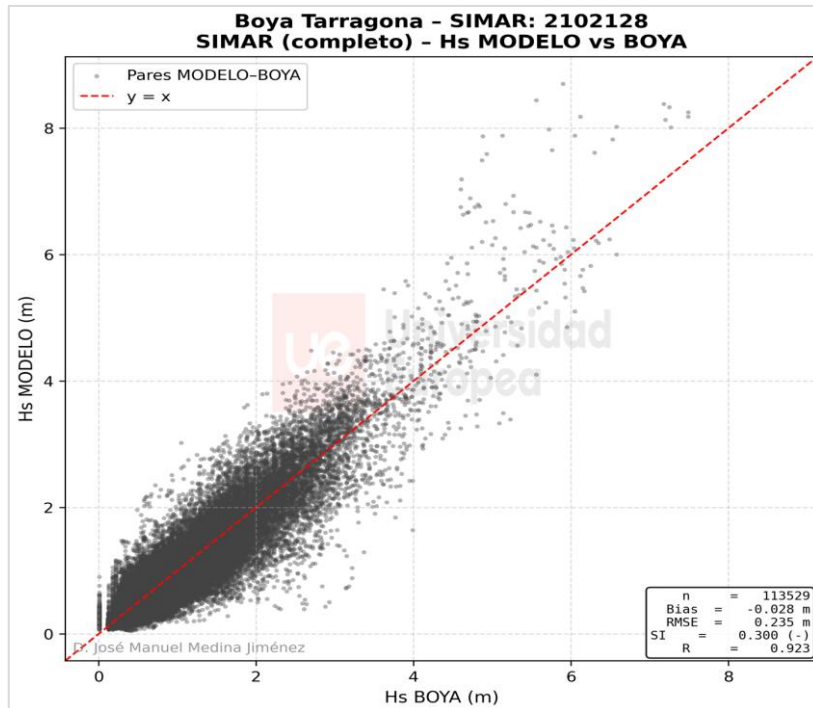
##### 6.4.4.1. *Contraste estadístico modelo-boya para Hs*

El contraste estadístico entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA del punto SIMAR 2102128 y los registros instrumentales de la boya de Tarragona, permite analizar el comportamiento relativo de las distintas etapas de modelización en el litoral oriental peninsular, un ámbito claramente mediterráneo caracterizado por un régimen de oleaje de baja a moderada energía media y una elevada dependencia de condiciones atmosféricas locales.

La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 102) muestra una coherencia temporal elevada entre modelo y boya, reflejada en un coeficiente de correlación alto. El sesgo medio es reducido y de signo ligeramente positivo, lo que indica una tendencia moderada del modelo a sobreestimar la altura significativa del oleaje. No obstante, los valores de RMSE y del índice de dispersión son apreciables en términos relativos, coherentes con un régimen de oleaje de menor energía media, en el que pequeñas discrepancias absolutas adquieren mayor peso relativo. Al igual que en otros ámbitos, la integración conjunta de distintas etapas de modelización en la serie completa introduce una heterogeneidad interna que debe tenerse en cuenta en la interpretación global de estos resultados.

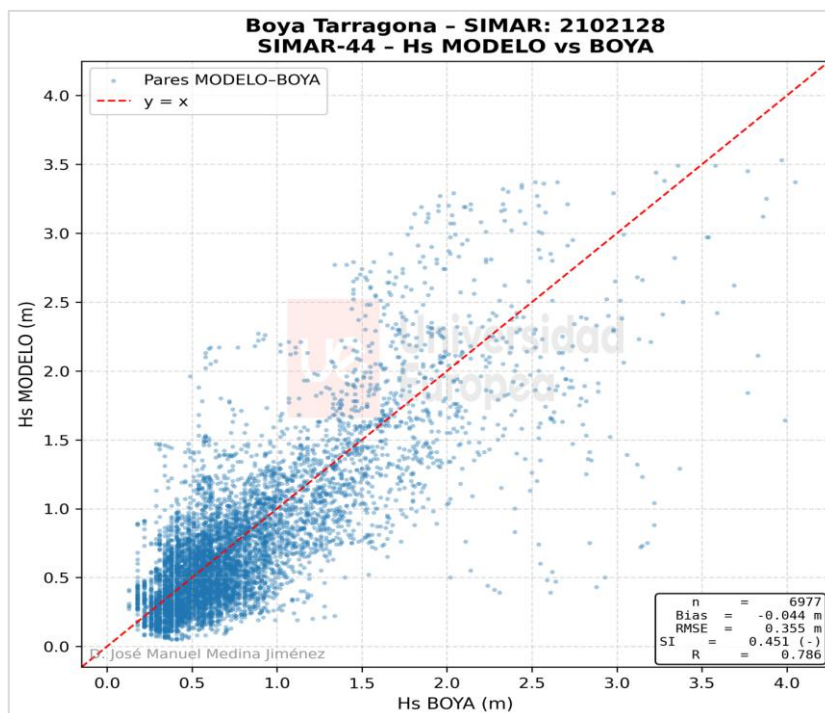
La etapa SIMAR-44 (Figura 103) presenta una coherencia temporal claramente inferior a la observada en las versiones más recientes del sistema. El coeficiente de correlación disminuye de forma apreciable y la dispersión aumenta, reflejando una mayor dificultad del modelo para reproducir de manera consistente la variabilidad del oleaje registrada por la boya. Aunque el sesgo medio es reducido, el patrón de dispersión pone de manifiesto una representación estadística más incierta de la altura significativa, especialmente en un entorno mediterráneo caracterizado por estados de mar de baja energía media y una direccionalidad del oleaje menos persistente y más dependiente de las condiciones regionales y locales, propios del Mediterráneo.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 104) muestra una mejora clara respecto a SIMAR-44. El coeficiente de correlación aumenta de forma significativa y la dispersión se reduce, indicando una mejor coherencia temporal entre modelo y registros instrumentales. El sesgo medio se mantiene en valores moderados, lo que sugiere que las actualizaciones introducidas en esta fase mejoran la representación dinámica del oleaje sin eliminar completamente las diferencias persistentes en la distribución de la altura significativa.



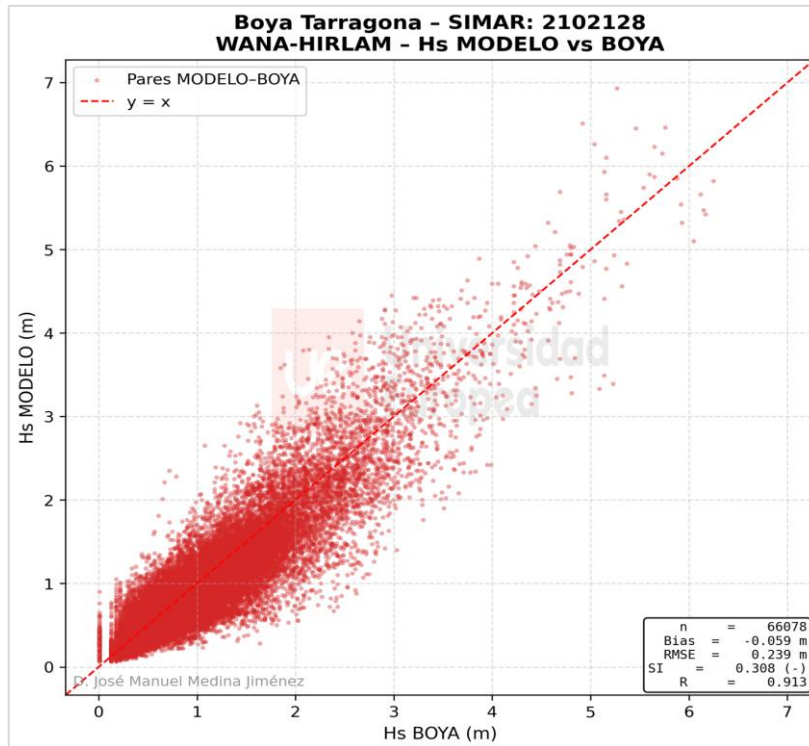
**Figura 102.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 103.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

Fuente: Elaboración propia.



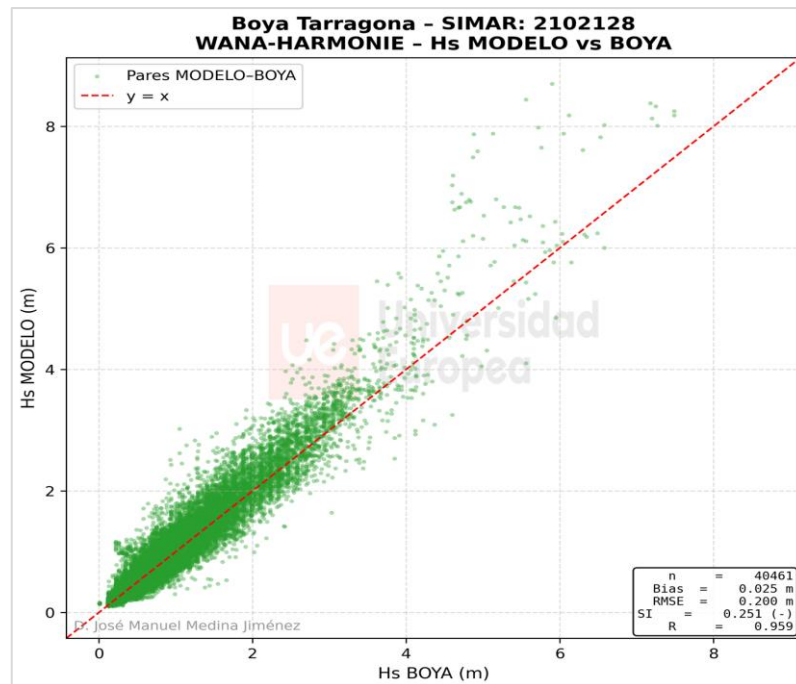
**Figura 104.** \_ Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 105) presenta el comportamiento más consistente entre las configuraciones analizadas en el ámbito del Este peninsular. El coeficiente de correlación alcanza los valores más elevados, indicando una mejora muy significativa en la coherencia temporal entre modelo y boya, mientras que el sesgo medio se reduce hasta valores prácticamente nulos. El RMSE y el índice de dispersión disminuyen de forma moderada respecto a WANA-HIRLAM, reflejando una reducción progresiva de la dispersión. En conjunto, estos resultados indican una mejora clara, pero incremental, en la representación estadística de la altura significativa del oleaje frente a los registros instrumentales, coherente con las limitaciones propias de un entorno mediterráneo de energía media limitada y direccionalidad menos persistente.

En conjunto, el contraste estadístico modelo-boya para la altura significativa del oleaje en el Este peninsular pone de manifiesto una evolución progresiva del comportamiento estadístico de las series modelizadas, con mejoras claras en las etapas más recientes del sistema SIMAR/WANA. La reducción del sesgo y de la dispersión, junto con el aumento de la coherencia temporal, proporciona una base más sólida para la interpretación del régimen medio del oleaje en este ámbito mediterráneo y constituye un elemento clave de cara al análisis posterior del régimen extremal,

que deberá interpretarse considerando las particularidades propias de un entorno de baja energía media y elevada variabilidad direccional.



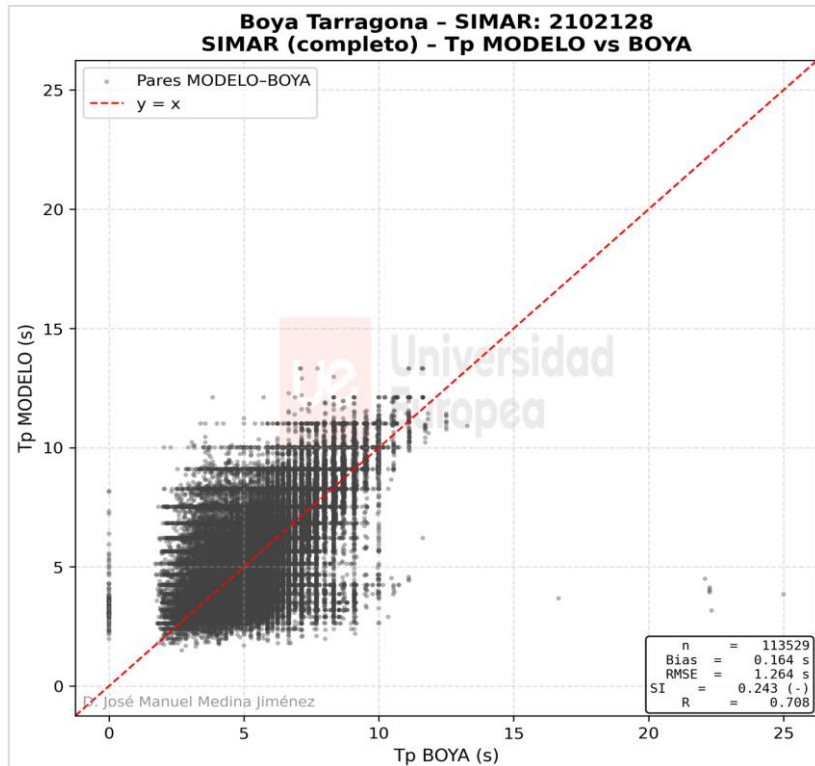
**Figura 105.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4.4.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$

El contraste estadístico entre las series modelizadas del punto SIMAR 2102128 y los registros instrumentales para el periodo de pico ( $T_p$ ) en el Este peninsular pone de manifiesto un comportamiento sensiblemente más complejo que el observado para la altura significativa del oleaje. En todas las etapas del sistema SIMAR/WANA se aprecia una mayor dispersión relativa, así como una reducción general de la coherencia temporal, lo que refleja la mayor dificultad inherente a la representación del periodo dominante del oleaje en el entorno del Mediterráneo.

El análisis del SIMAR completo (Figura 106) muestra una correlación moderada entre modelo y boya, acompañada de un sesgo positivo y valores elevados de RMSE e índice de dispersión. El patrón de puntos evidencia una amplia dispersión vertical, especialmente para valores intermedios y bajos de  $T_p$  registrados por la boya, lo que indica que el modelo tiende a asignar periodos dominantes algo más largos que los instrumentales en una parte significativa de los estados de mar. Este comportamiento sugiere que la integración conjunta de distintas etapas de modelización introduce una heterogeneidad adicional en la representación estadística del periodo de pico.

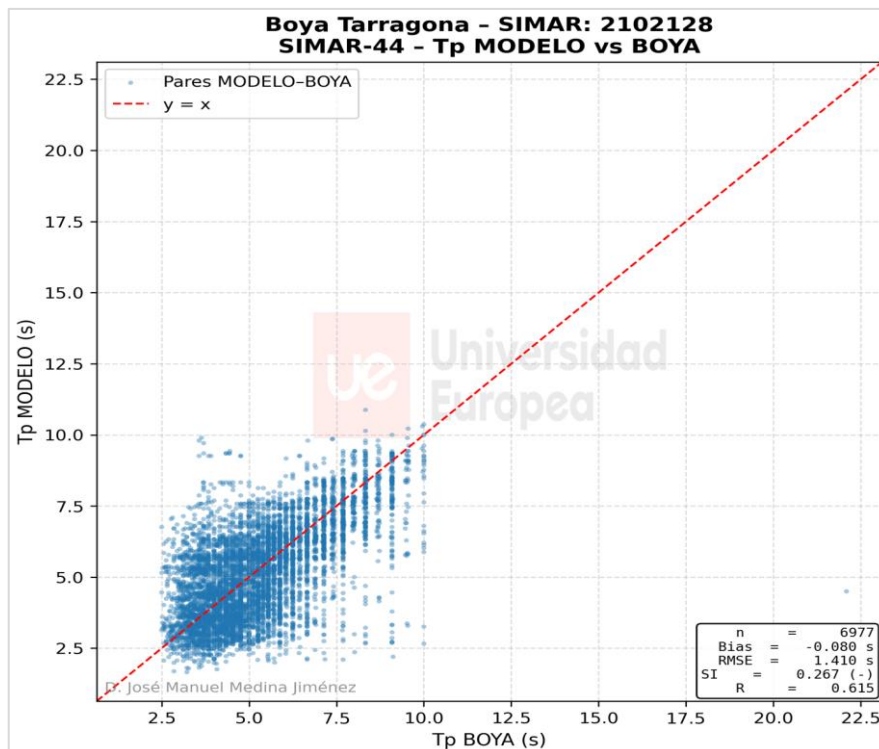


**Figura 106.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

Fuente: Elaboración propia.

La etapa SIMAR-44 (Figura 107) presenta los peores resultados del conjunto analizado. El coeficiente de correlación se reduce de forma notable, mientras que el sesgo negativo y los elevados valores de RMSE y dispersión ponen de manifiesto una limitada capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal del periodo de pico registrada por la boya. Este comportamiento es coherente con la menor resolución espacial y con las limitaciones propias de las primeras etapas del sistema en un entorno dominado por oleajes de baja energía y una elevada influencia de condiciones locales.

En la etapa WANA-HIRLAM (Figura 108) se observa una mejora moderada respecto a SIMAR-44. El coeficiente de correlación aumenta y el sesgo se aproxima a valores cercanos a cero, aunque la dispersión sigue siendo elevada y el RMSE apenas se reduce de forma apreciable. El patrón de dispersión continúa mostrando una notable extensión vertical, lo que indica que, si bien se mejora la coherencia temporal general, persisten dificultades para reproducir de manera consistente el periodo dominante del oleaje, especialmente en situaciones de mar poco desarrollado o con direccionalidad variable.

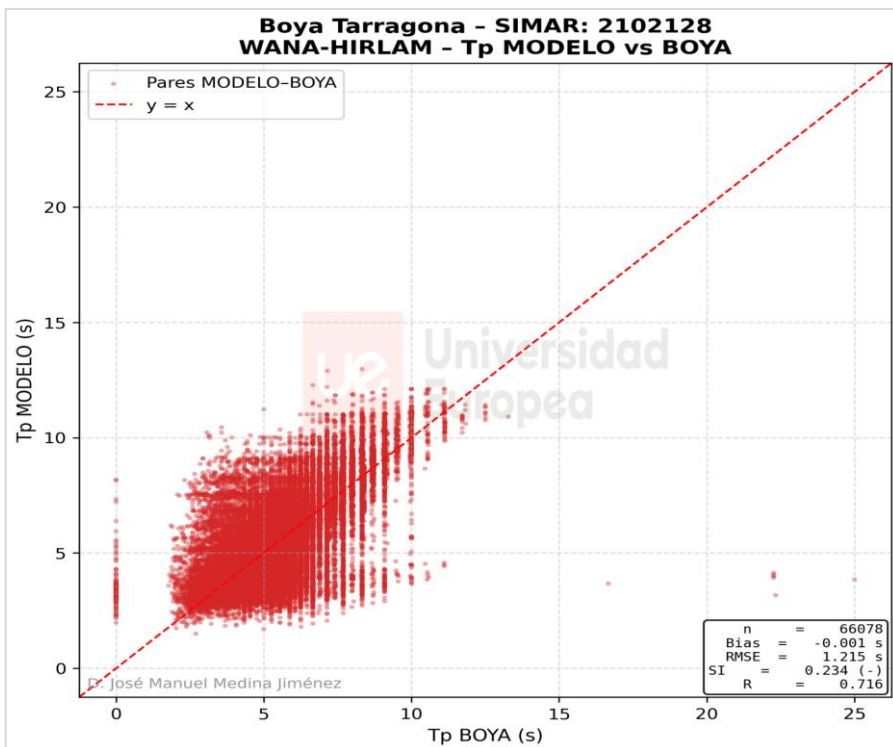


**Figura 107.\_** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).

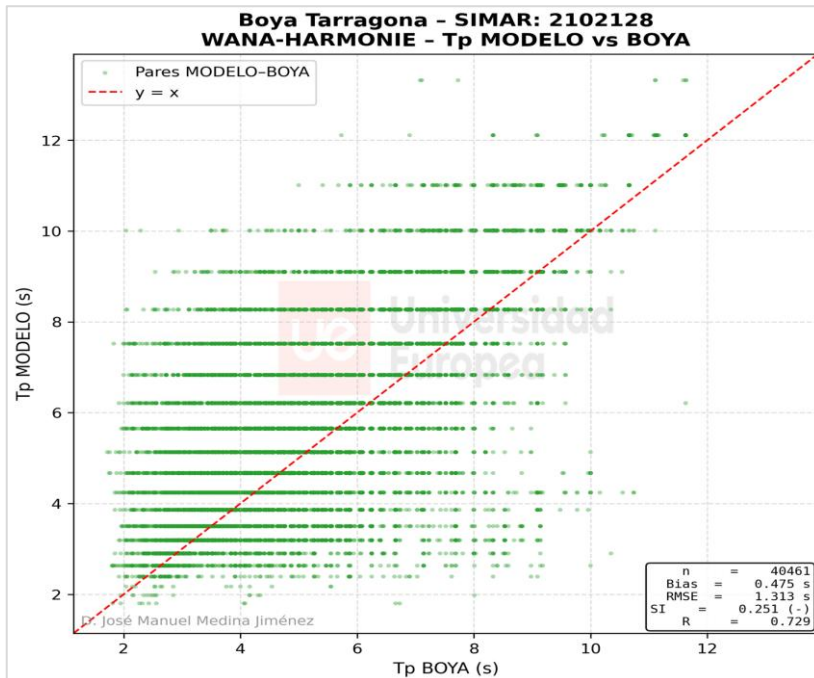
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 109) presenta el comportamiento más consistente entre las configuraciones analizadas para  $T_p$  en el Este peninsular. El coeficiente de correlación alcanza los valores más elevados del conjunto, y tanto el sesgo como el RMSE y el índice de dispersión muestran una reducción progresiva respecto a las etapas anteriores. No obstante, estas mejoras deben interpretarse como progresivas y de alcance limitado, ya que la dispersión sigue siendo significativa y pone de manifiesto las limitaciones estructurales del modelo para capturar con precisión el periodo de pico en un entorno mediterráneo, donde los estados de mar están frecuentemente condicionados por la generación local del oleaje y por una direccionalidad menos persistente.

En conjunto, los resultados del contraste modelo-boya para  $T_p$  en el Este peninsular indican que, a diferencia de la altura significativa, el periodo de pico presenta una menor robustez estadística y una mayor sensibilidad a la etapa de modelización. Las mejoras introducidas en las versiones más recientes del sistema SIMAR/WANA permiten una representación más coherente del comportamiento temporal de  $T_p$ , pero no eliminan completamente las discrepancias con los registros instrumentales.



**Figura 108.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).  
Fuente: Elaboración propia.



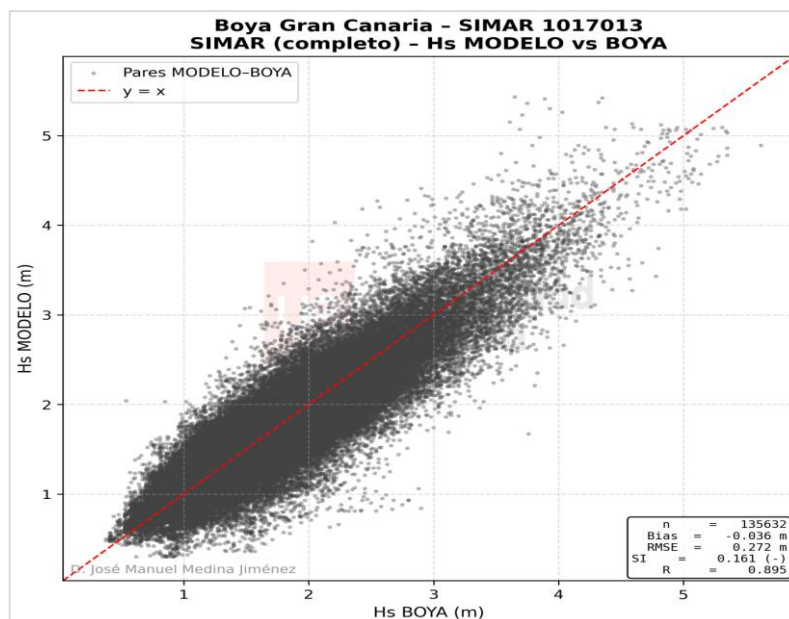
**Figura 109.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 2102128 y la boya de Tarragona (Este peninsular).  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.4.5. Norte de Canarias

### 6.4.5.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs

El contraste estadístico modelo-boya para la altura significativa del oleaje en el Norte de Canarias pone de manifiesto un comportamiento globalmente coherente entre las series numéricas y los registros instrumentales, aunque con particularidades asociadas al carácter insular del ámbito y a la exposición directa al oleaje de origen atlántico.

La comparación realizada sobre la serie SIMAR completa (Figura 110) muestra una correlación elevada entre modelo y boya, acompañada de un sesgo medio reducido y negativo, lo que indica una ligera tendencia a la subestimación de la altura significativa por parte del modelo. Los valores de RMSE y del índice de dispersión se sitúan en rangos moderados, reflejando una dispersión razonable en relación con la variabilidad natural del oleaje en este sector, caracterizado por estados de mar relativamente energéticos y persistentes.



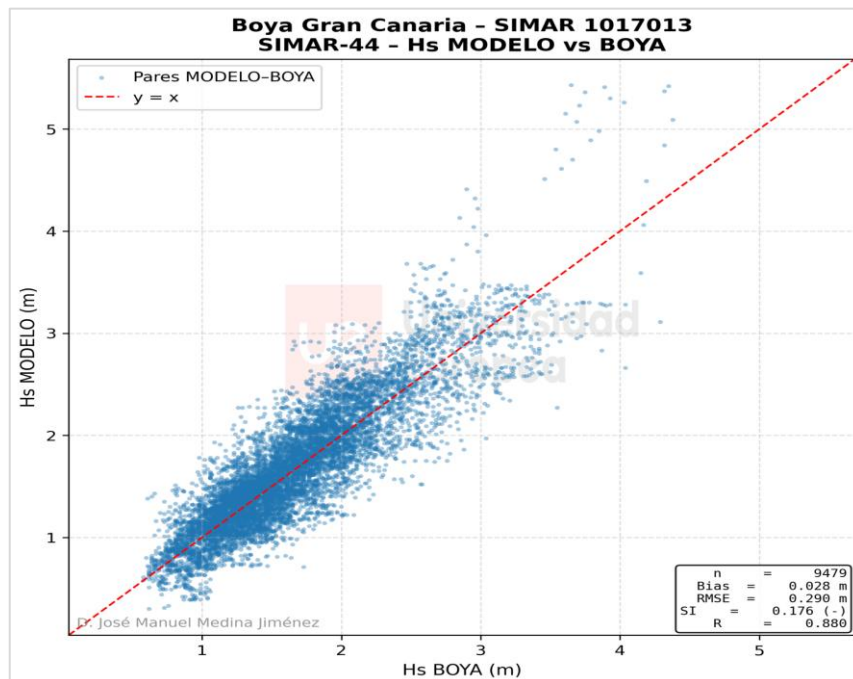
**Figura 110.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la etapa SIMAR-44 (Figura 111), se observa una ligera degradación del ajuste respecto a la serie completa, con una reducción del coeficiente de correlación y un incremento moderado de la dispersión. Aunque el sesgo medio permanece cercano a cero, el patrón de dispersión evidencia una mayor dificultad para reproducir de forma consistente la variabilidad de la altura significativa, especialmente a medida que aumentan las magnitudes del oleaje. Este

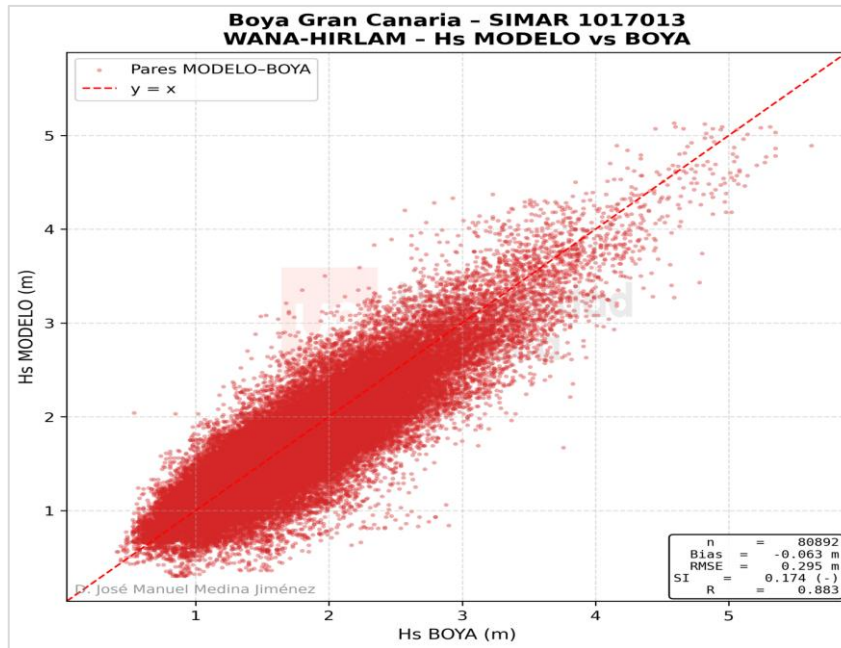
comportamiento es coherente con las limitaciones propias de las configuraciones más antiguas del sistema en un entorno oceánico abierto y energéticamente activo.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 112) muestra un comportamiento globalmente similar al de SIMAR-44 en el Norte de Canarias. El coeficiente de correlación presenta valores elevados y comparables a los de la etapa anterior, mientras que el sesgo medio se mantiene ligeramente negativo, indicando una leve tendencia a la infraestimación de la altura significativa del oleaje. Los valores de RMSE y del índice de dispersión no evidencian una reducción significativa respecto a SIMAR-44, lo que sugiere que, aunque la coherencia temporal es adecuada, las mejoras introducidas en esta fase no se traducen en una disminución sustancial de la dispersión del error. En conjunto, esta etapa ofrece una representación estable del régimen medio del oleaje, pero sin mejoras claras en la capacidad de reproducir los estados de mar más energéticos.



**Figura 111.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

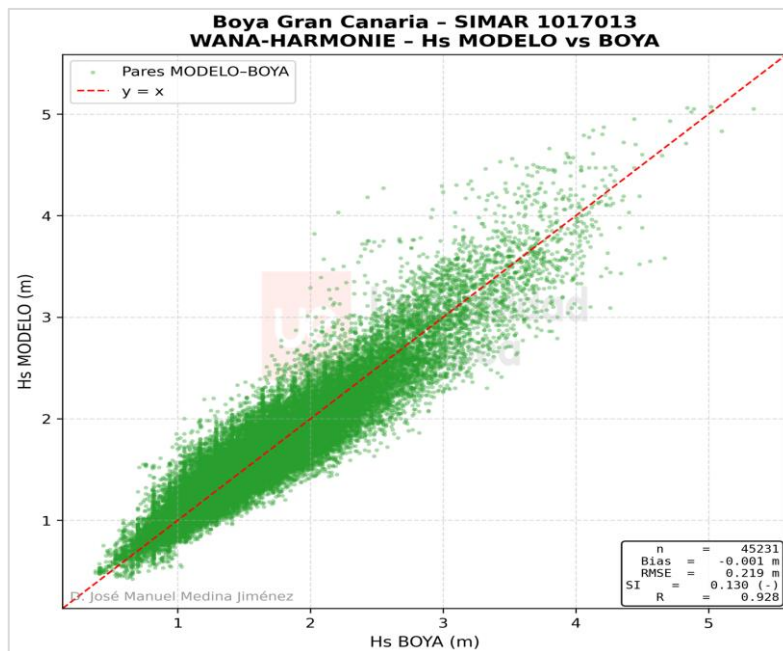


**Figura 112.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 113) presenta el comportamiento más consistente de todas las configuraciones analizadas en este ámbito. El coeficiente de correlación alcanza los valores más elevados, el sesgo medio se reduce hasta valores prácticamente nulos y tanto el RMSE como el índice de dispersión disminuyen de forma clara respecto a las etapas anteriores. Este conjunto de resultados indica una mejor representación estadística de la distribución de la altura significativa del oleaje y una menor dispersión relativa frente a los registros instrumentales, incluso en un entorno caracterizado por una elevada energía media y una exposición directa al oleaje atlántico.

En conjunto, el contraste estadístico modelo–boya para la altura significativa del oleaje en el Norte de Canarias evidencia una evolución progresiva del desempeño del sistema SIMAR/WANA, con mejoras graduales en la coherencia temporal y en la estabilidad estadística de las series modelizadas. Estas mejoras, si bien no eliminan por completo las diferencias puntuales entre modelo y boya, proporcionan una base más robusta para la interpretación posterior del régimen extremal del oleaje en este ámbito insular.



**Figura 113.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

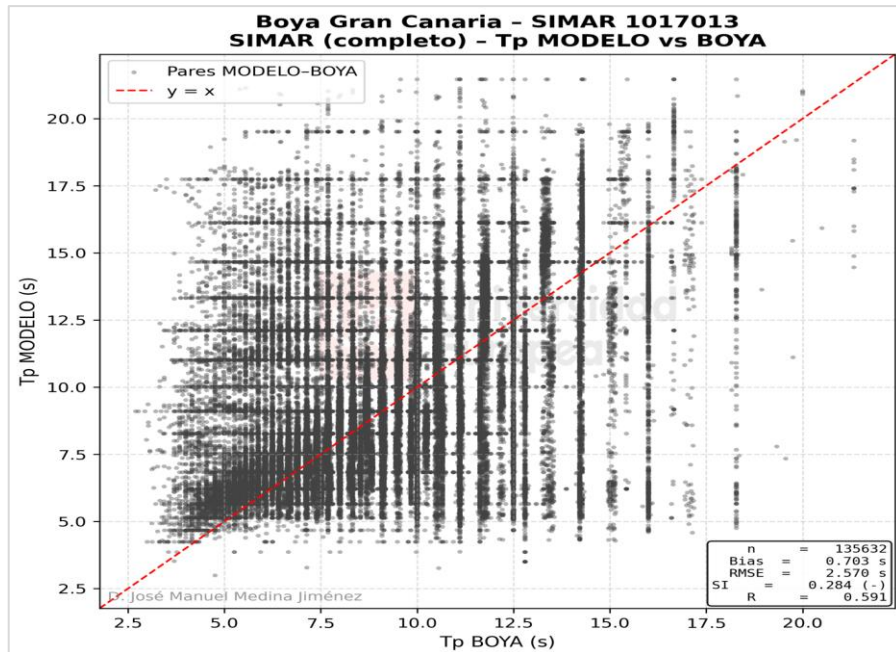
#### 6.4.5.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$

El contraste estadístico modelo–boya para el periodo de pico ( $T_p$ ) en el Norte de Canarias pone de manifiesto un comportamiento notablemente distinto al observado para la altura significativa del oleaje, con un menor grado de coherencia temporal y una mayor dispersión relativa en todas las etapas del sistema SIMAR/WANA analizadas.

En el caso de la serie SIMAR completa (Figura 114), el coeficiente de correlación alcanza valores moderados, claramente inferiores a los obtenidos para Hs en este mismo ámbito. El sesgo medio es positivo y el RMSE presenta valores elevados, lo que indica una tendencia general del modelo a asignar periodos de pico más largos que los registrados por la boya, junto con una dispersión significativa en la correspondencia punto a punto. Este patrón refleja una capacidad limitada del modelo para reproducir la variabilidad temporal instantánea del periodo de pico en un entorno insular complejo, incluso cuando se consideran series largas y continuas.

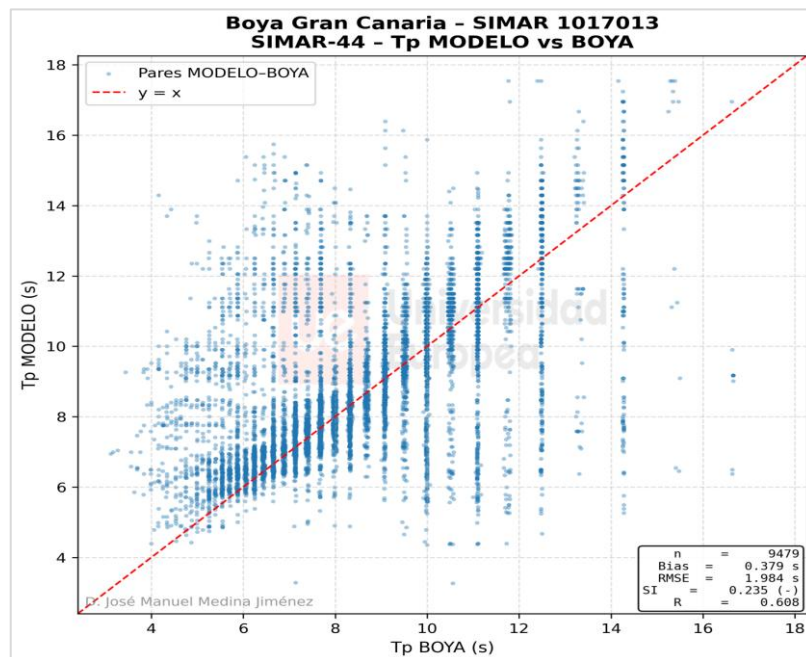
La etapa SIMAR-44 (Figura 115) muestra un comportamiento similar, aunque con una ligera reducción del sesgo medio respecto al conjunto completo. No obstante, el coeficiente de correlación se mantiene bajo y el índice de dispersión permanece elevado, evidenciando una relación débil entre modelo y registros instrumentales. La nube de puntos presenta una estructura claramente dispersa, con una tendencia sistemática a la sobreestimación del periodo de pico para

valores intermedios y altos de  $T_p$  registrados por la boya. Estos resultados sugieren que, en la configuración más antigua del sistema, la representación del periodo de pico resulta especialmente incierta en el Norte de Canarias.



**Figura 114.\_** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

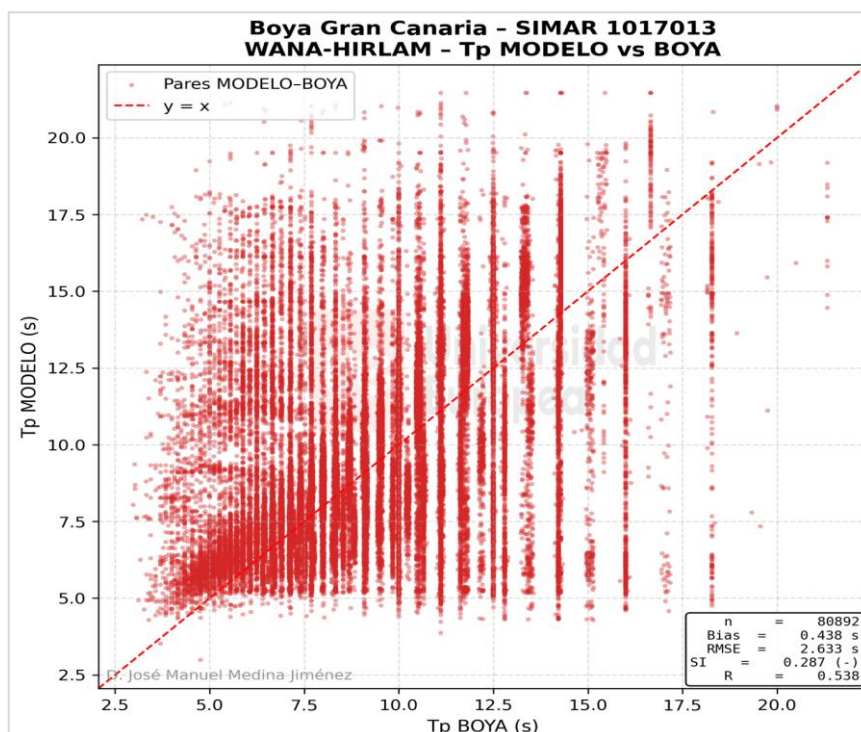


**Figura 115.\_** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

Con la introducción de la etapa WANA-HIRLAM (Figura 116) no se observa una mejora clara en el contraste estadístico modelo-boya del periodo de pico respecto a la etapa SIMAR-44. El coeficiente de correlación se mantiene en valores moderados, sin evidenciar un incremento significativo, mientras que el RMSE y el índice de dispersión permanecen elevados, reflejando una relación punto a punto altamente dispersa entre el modelo y los registros instrumentales. El sesgo medio positivo, de magnitud apreciable, pone de manifiesto una tendencia persistente del modelo a asignar periodos de pico más largos que los medidos por la boya. La estructura del diagrama de dispersión, caracterizada por una clara cuantización de los valores modelizados y una elevada dispersión para  $T_p$  intermedios y altos, indica que las actualizaciones introducidas en esta fase no se traducen en una mejora de la representación estadística del periodo de pico en el Norte de Canarias.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 117) presenta un comportamiento diferenciado respecto a las configuraciones anteriores. El coeficiente de correlación aumenta de forma apreciable, lo que indica una mayor coherencia en la variabilidad temporal relativa del periodo de pico entre modelo y registros instrumentales. Sin embargo, esta mejora en la correlación no se acompaña de una reducción del error, ya que el sesgo medio positivo se incrementa y el RMSE mantiene valores elevados, junto con un índice de dispersión significativo.



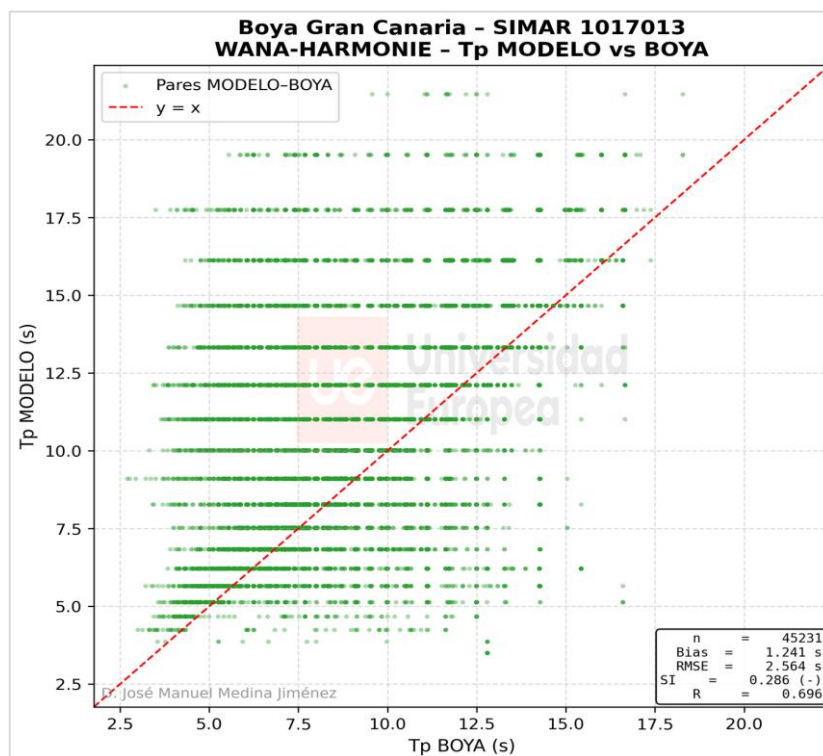
**Figura 116.\_** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, los resultados ponen de manifiesto que la mayor correlación observada en esta etapa no implica una representación más ajustada del valor absoluto del periodo de pico, sino que coexiste con una tendencia marcada a sobreestimar  $T_p$  y con una estructura de dispersión caracterizada por la cuantización de los valores modelizados. Desde un punto de vista estadístico, WANA-HARMONIE mejora la consistencia temporal relativa de  $T_p$ , pero no resuelve las discrepancias en magnitud observadas en el contraste modelo–boya en el Norte de Canarias.

En conjunto, el contraste estadístico modelo–boya para el periodo de pico en el Norte de Canarias pone de manifiesto que, a diferencia de lo observado para la altura significativa del oleaje, las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR/WANA no conducen a una mejora clara y sostenida en la representación estadística de  $T_p$ . Las discrepancias persistentes entre modelo y registros instrumentales, junto con la elevada dispersión relativa observada en todas las etapas de modelización, limitan la interpretación directa de esta variable desde un punto de vista ingenieril.

Estos resultados refuerzan la necesidad de abordar el análisis del régimen extremal con especial cautela cuando el periodo de pico desempeña un papel relevante, así como de priorizar la coherencia temporal y la consistencia metodológica en la selección de series y etapas de modelización.



**Figura 117.**\_ Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 1017013 y la boya de Gran Canaria (Norte de Canarias).

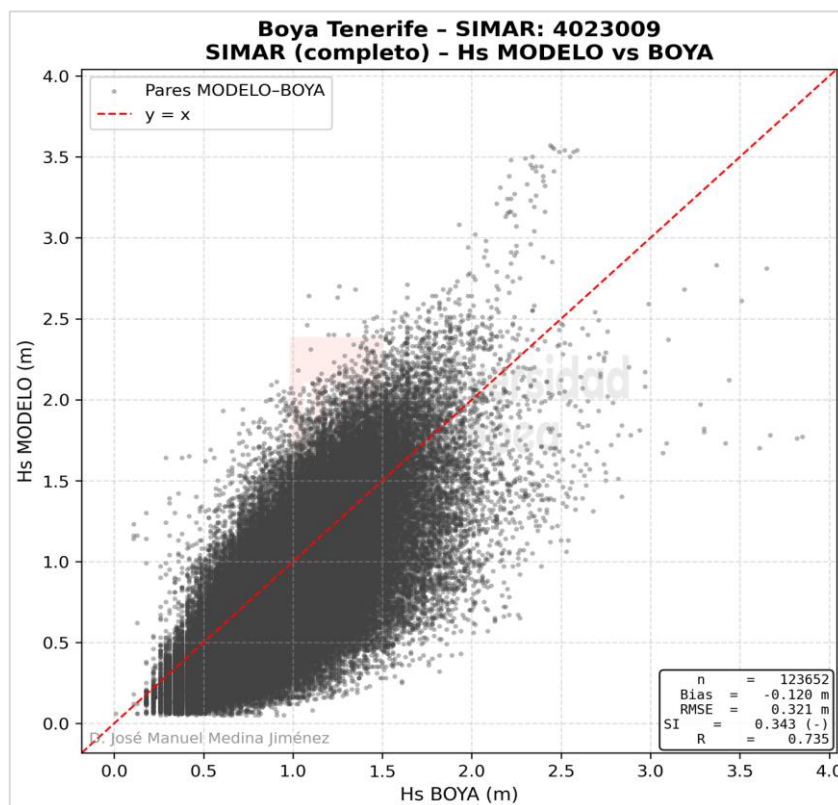
Fuente: Elaboración propia.

## 6.4.6. Sur de Canarias

### 6.4.6.1. Contraste estadístico modelo-boya para Hs

El contraste estadístico modelo-boya para la altura significativa del oleaje en el Sur de Canarias (Boya Tenerife – SIMAR 4023009) muestra diferencias claras entre etapas de modelización, tanto en términos de coherencia temporal como de sesgo y dispersión.

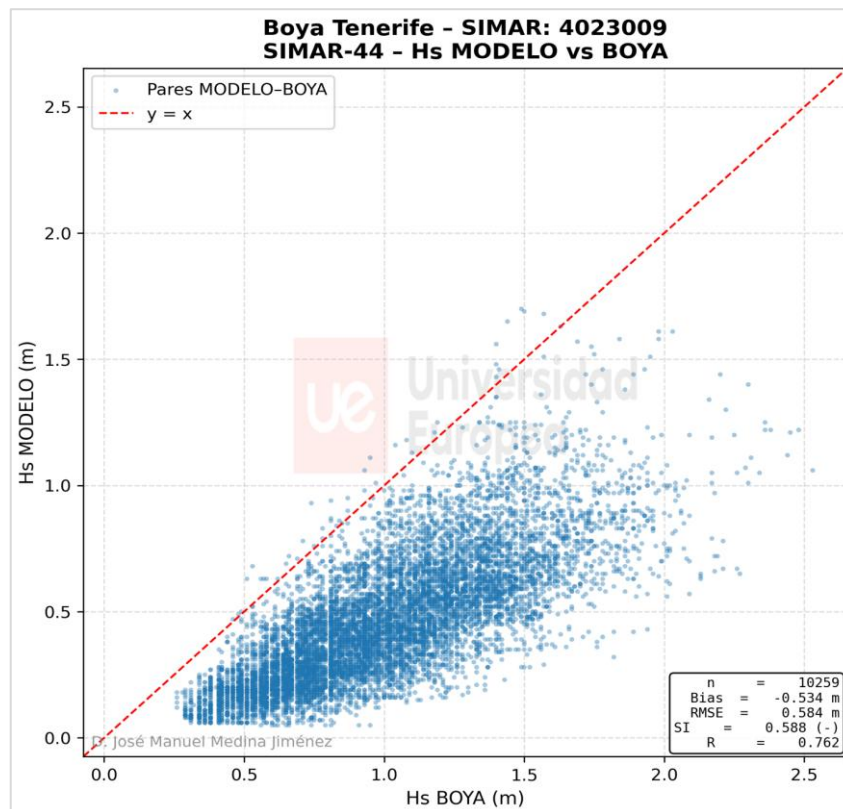
En primer lugar, la serie SIMAR completo (Figura 118) presenta una correlación moderada, con un sesgo medio negativo y valores de RMSE e índice de dispersión relativamente elevados. Este resultado es coherente con el hecho de que la integración conjunta de etapas con comportamientos estadísticos no idénticos tiende a incrementar la dispersión global del ajuste y a dificultar la lectura conjunta de los indicadores.



**Figura 118.**\_ Contraste estadístico pareado de Hs entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

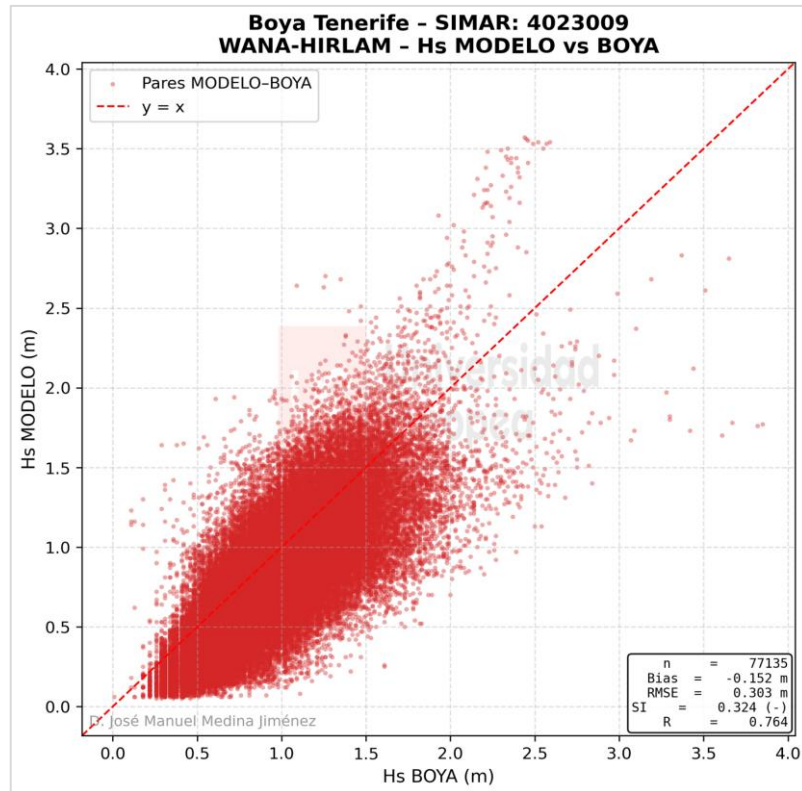
La etapa SIMAR-44 (Figura 119) muestra un ajuste claramente menos favorable. A pesar de mantener una correlación del mismo orden que la serie completa, el incremento de la dispersión y la presencia de un sesgo negativo más acusado evidencian una tendencia persistente a infraestimar la altura significativa del oleaje. Este patrón refleja una capacidad limitada del modelo para reproducir de forma consistente los valores registrados por la boya en esta fase inicial del sistema.



**Figura 119.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa SIMAR-44 del punto del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

Con la introducción de WANA-HIRLAM (Figura 120) se aprecia una mejora en la representación estadística de la altura significativa. El sesgo medio se reduce de forma notable y la dispersión disminuye respecto a SIMAR-44, lo que se traduce en un ajuste más equilibrado en magnitud. No obstante, la coherencia temporal global no experimenta un incremento sustancial, situándose en valores comparables a los de la etapa anterior.

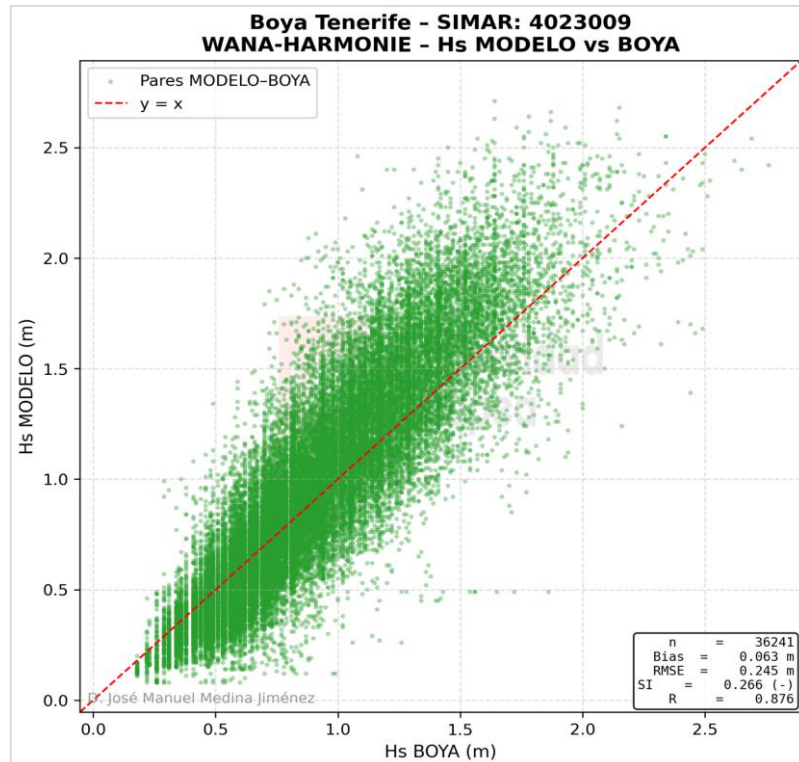


**Figura 120.\_** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 121) presenta el comportamiento más consistente de todas las configuraciones analizadas en este ámbito. El coeficiente de correlación aumenta de forma clara, mientras que la dispersión relativa se reduce y el sesgo medio se mantiene en valores reducidos. Este conjunto de resultados indica una mejora simultánea tanto en la coherencia temporal como en la representación estadística de la altura significativa del oleaje frente a los registros instrumentales.

En conjunto, los resultados muestran una evolución progresiva en la capacidad del sistema SIMAR/WANA para reproducir la altura significativa del oleaje en el Sur de Canarias, con mejoras más evidentes en las configuraciones más recientes. Este comportamiento refuerza la idoneidad de las últimas etapas de modelización como base para el análisis posterior del régimen extremal.



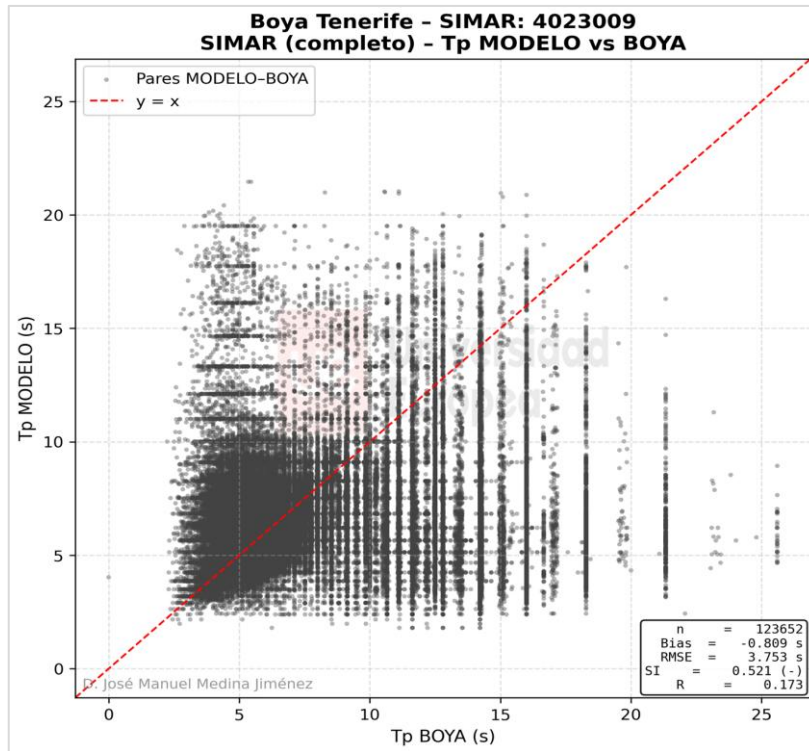
**Figura 121.** Contraste estadístico pareado de Hs entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4.6.2. Contraste estadístico modelo-boya para $T_p$

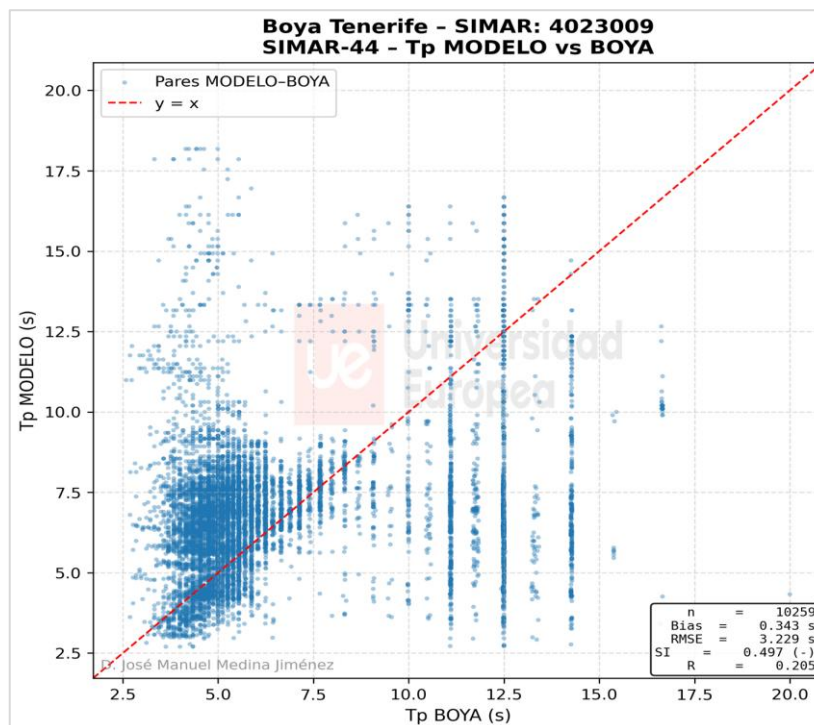
El contraste estadístico modelo-boya del periodo de pico en el Sur de Canarias muestra, para el conjunto completo de la serie SIMAR (Figura 122), una correspondencia limitada entre los valores modelizados y los registros instrumentales. El coeficiente de correlación se mantiene bajo, acompañado de un RMSE elevado y de un índice de dispersión alto, lo que refleja una relación punto a punto débil y una elevada dispersión de los valores de  $T_p$ , especialmente para periodos intermedios y altos. El sesgo medio es negativo, indicando una tendencia del modelo a subestimar el periodo de pico respecto a la boya.

En la etapa SIMAR-44 (Figura 123) se aprecia una ligera mejora relativa en la coherencia temporal, con un incremento moderado del coeficiente de correlación respecto a la serie completa. No obstante, el RMSE y el índice de dispersión permanecen elevados, y el sesgo sigue siendo negativo y de magnitud apreciable. La nube de puntos continúa mostrando una marcada cuantización de los valores modelizados y una dispersión significativa, lo que pone de manifiesto la dificultad del modelo para reproducir de forma consistente la variabilidad temporal del periodo de pico en este entorno.



**Figura 122.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la serie SIMAR completa del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

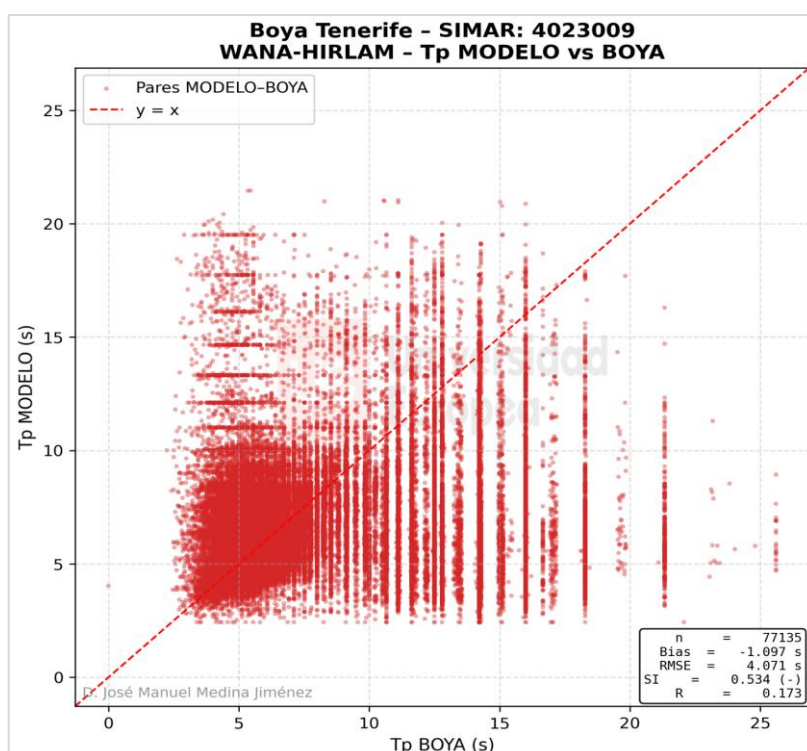
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 123.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa SIMAR-44 del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

La transición a la etapa WANA-HIRLAM (Figura 124) no se traduce en una mejora clara del contraste estadístico. El coeficiente de correlación permanece en valores bajos, mientras que el RMSE y el índice de dispersión aumentan, evidenciando un empeoramiento en la correspondencia entre modelo y boya. El sesgo negativo se acentúa, lo que indica una mayor tendencia a infraestimar los periodos de pico, particularmente en los rangos más elevados. La estructura del diagrama de dispersión refuerza esta lectura, con una amplia dispersión vertical y una escasa alineación con la recta identidad.

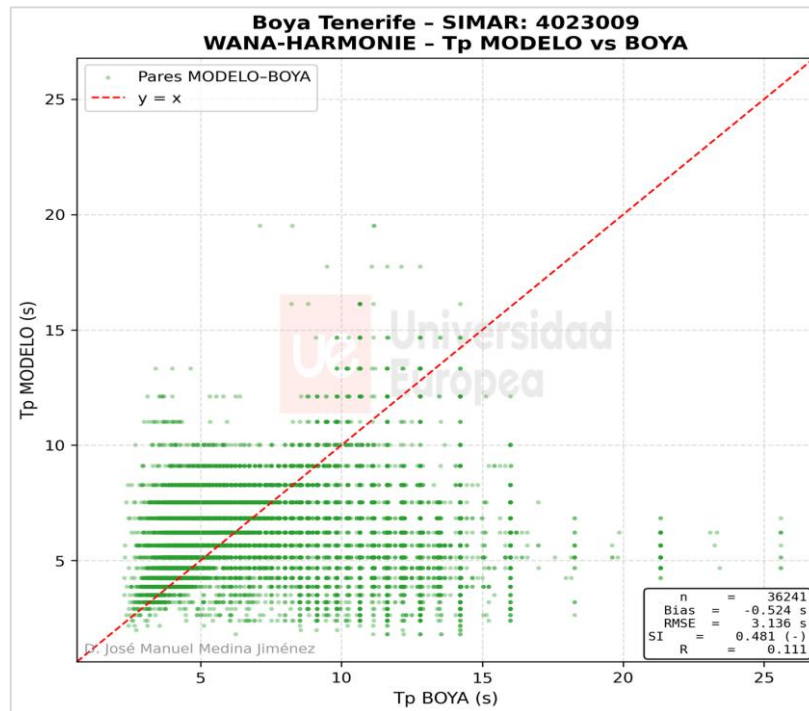


**Figura 124.** Contraste estadístico pareado de  $T_p$  entre la etapa WANA-HIRLAM del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 125) presenta un comportamiento claramente desfavorable en el contraste modelo-boya del periodo de pico. El coeficiente de correlación desciende a valores muy reducidos, lo que indica una capacidad muy limitada del modelo para reproducir la variabilidad temporal de  $T_p$ . Aunque el RMSE y el índice de dispersión no alcanzan los máximos del conjunto (que se observan en WANA-HIRLAM y, en el caso del índice de dispersión, también en la serie completa), se mantienen en valores elevados, reflejando una relación punto a punto muy dispersa. El sesgo medio continúa siendo negativo y, aun reduciéndose respecto a WANA-HIRLAM, sigue siendo apreciable, indicando una tendencia persistente a infraestimar  $T_p$ . En

conjunto, esta etapa no aporta una mejora en la representación estadística del periodo de pico en el Sur de Canarias.



**Figura 125.\_** Contraste estadístico pareado de Tp entre la etapa WANA-HARMONIE del punto SIMAR 4023009 y la boya de Tenerife (Sur de Canarias).

Fuente: Elaboración propia.

De forma global, los resultados ponen de manifiesto que, en este ámbito, las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no conducen a una mejora progresiva ni sostenida en la representación estadística del periodo de pico. La elevada dispersión relativa y la baja coherencia temporal observadas en todas las configuraciones, junto con la persistencia de sesgos, mayoritariamente de signo negativo en las etapas más recientes, limitan el uso directo de Tp desde un punto de vista ingenieril. Estos resultados refuerzan la conveniencia de interpretar esta variable con cautela en los análisis posteriores y de priorizar enfoques metodológicamente consistentes cuando el periodo de pico desempeña un papel relevante.

#### 6.4.7. Síntesis del contraste estadístico

El contraste estadístico modelo boya desarrollado para los distintos ámbitos geográficos permite extraer conclusiones generales que complementan los análisis previos de coherencia temporal entre etapas del sistema SIMAR/WANA y, al mismo tiempo, aportan un marco interpretativo para el análisis del régimen extremal.

Los resultados muestran de forma consistente que la interpretación debe basarse en la lectura conjunta del sesgo medio, el RMSE, el índice de dispersión y el coeficiente de correlación, evitando conclusiones apoyadas en un único indicador. En particular, un aumento del coeficiente de correlación debe entenderse principalmente como una mayor capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal relativa registrada por la boya, sin que ello implique necesariamente una mejora equivalente en la representación del nivel medio o de la distribución completa de la variable analizada, aspecto que adquiere especial relevancia en el periodo de pico.

Para la altura significativa del oleaje, el contraste muestra un patrón robusto a escala regional. En los tramos peninsulares más expuestos al oleaje atlántico en sentido amplio, Norte y Oeste, se obtiene en general una coherencia temporal alta y una dispersión moderada, con sesgos que tienden a ser pequeños y, en las etapas más antiguas, a menudo ligeramente negativos. En estos ámbitos se aprecia además una evolución favorable hacia las etapas más recientes, con reducciones del sesgo y de la dispersión y un incremento de la coherencia temporal, lo que es compatible con una representación más estable del régimen medio y de la distribución de Hs.

En los sectores peninsulares de menor energía media, Sur y Este, el contraste mantiene correlaciones razonables, pero la dispersión relativa adquiere mayor peso, de modo que discrepancias absolutas moderadas se traducen en índices de dispersión más altos. En estos casos la lectura ingenieril debe centrarse más en la consistencia de los resultados entre etapas que en el valor puntual del ajuste, dado que el propio régimen de oleaje hace que el error relativo aumente con facilidad.

En Canarias, la altura significativa reproduce un comportamiento dual, ya que en el Norte se observan patrones comparables a los ámbitos peninsulares más energéticos y con mejoras más claras en las etapas recientes, mientras que en el Sur la mejora entre etapas también es apreciable para Hs pero con un rango de alturas más contenido y con una mayor sensibilidad del contraste a pequeñas variaciones de sesgo y dispersión.

En lo que respecta al periodo de pico, el comportamiento global es menos estable que para la altura significativa. En la Península, tanto en el Norte como en el Oeste, las distintas etapas muestran en general correlaciones moderadas y una tendencia frecuente a sesgos positivos, junto con una dispersión apreciable que se acentúa en los rangos de periodos medios y altos.

En el Sur peninsular y en el Este peninsular se mantiene de forma consistente una menor coherencia temporal y una dispersión elevada, de manera que las mejoras que puedan observarse entre etapas deben interpretarse con prudencia, ya que pueden corresponder a avances en la sincronía temporal sin que ello se traduzca en una mejora equivalente en el valor absoluto del periodo dominante.

En Canarias, el contraste estadístico para el periodo de pico pone de manifiesto limitaciones más acusadas que las observadas en la altura significativa del oleaje, si bien con diferencias entre el Norte y el Sur del archipiélago. En el Norte de Canarias se identifican mejoras parciales en la coherencia temporal de  $T_p$  en las etapas más recientes, aunque estas no se traducen en una representación más ajustada de su magnitud y coexisten con sesgos apreciables y dispersión elevada. En el Sur de Canarias, por el contrario, la coherencia temporal es baja en todas las etapas y la dispersión se mantiene muy elevada, sin evidenciar una evolución favorable con las sucesivas actualizaciones del sistema. En consecuencia, no puede afirmarse una mejora progresiva y sostenida de  $T_p$  en el ámbito insular.

## **6.5. Análisis del régimen extremal del oleaje: comparativa entre etapas de modelización y registros instrumentales.**

### **6.5.1. Consideraciones generales para la interpretación del régimen extremal**

El análisis del régimen extremal del oleaje presentado en este capítulo se ha desarrollado conforme a la metodología descrita en el apartado 5 del presente documento, aplicando de manera coherente y homogénea el enfoque POT-GPD en todos los ámbitos geográficos considerados. No obstante, la interpretación de los periodos de retorno obtenidos requiere tener en cuenta una serie de consideraciones metodológicas y estadísticas que condicionan el alcance y la comparabilidad de los resultados.

En primer lugar, las distintas etapas de modelización que componen el sistema SIMAR/WANA han sido analizadas de forma independiente en el análisis extremal. Esta decisión se fundamenta en la no homogeneidad estadística previamente identificada entre etapas, asociada a cambios en la formulación de los modelos, en los forzamientos atmosféricos y en la resolución espacial y temporal del sistema. En consecuencia, los periodos de retorno obtenidos para cada etapa no deben interpretarse como estimaciones equivalentes de una misma población estadística, sino como descripciones extremales coherentes con la estructura interna de cada periodo de modelización.

Por el contrario, en el caso de los registros instrumentales, el análisis extremal se ha realizado utilizando la totalidad de la serie temporal disponible para cada boya, sin segmentación por periodos de modelización. Este criterio responde a la necesidad de maximizar la robustez estadística del ajuste POT-GPD, incrementando el número de excedencias disponibles y mejorando la estabilidad de las estimaciones, especialmente para periodos de retorno elevados. De este modo, las boyas proporcionan una referencia instrumental única y estable que permite contextualizar el orden de magnitud del régimen extremal, sin pretender establecer una correspondencia directa con ninguna etapa concreta del sistema SIMAR/WANA.

Esta asimetría metodológica entre modelos y registros instrumentales es deliberada y coherente con los objetivos del trabajo. Mientras que las series SIMAR se segmentan para evaluar el efecto de las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización sobre la caracterización del régimen extremal, las boyas se emplean como una referencia instrumental independiente, orientada a aportar un marco comparativo global y no a validar de forma directa los valores extremos estimados por los modelos.

Asimismo, debe tenerse en cuenta que la estimación de periodos de retorno elevados mediante el enfoque POT-GPD está condicionada de forma directa por la longitud del registro y por el número de picos independientes disponibles tras el proceso de declustering. En este sentido, los intervalos de confianza asociados a los periodos de retorno tienden a ampliarse significativamente a medida que aumenta el periodo de retorno considerado, especialmente en series con cobertura temporal limitada, como es habitual en los registros instrumentales. Por tanto, cuando los periodos de retorno considerados son muy superiores a la longitud temporal del registro analizado, las estimaciones resultantes dependen de forma creciente de la extrapolación estadística y presentan una incertidumbre elevada, incluso cuando el ajuste global es satisfactorio.

En este contexto, las magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados deben interpretarse fundamentalmente como indicadores comparativos del comportamiento extremal de las distintas series y etapas de modelización, y no como estimaciones deterministas de valores extremos esperables. Este criterio es especialmente relevante en los registros instrumentales y en aquellas etapas de modelización con un número limitado de excedencias, donde la robustez de los periodos de retorno decrece sensiblemente a medida que aumenta el periodo de retorno considerado.

Bajo este marco interpretativo, el análisis del régimen extremal del oleaje permite identificar de forma robusta el impacto de las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA sobre la caracterización

de los eventos más energéticos, así como valorar el grado de coherencia temporal de dichas estimaciones en relación con los registros instrumentales disponibles.

### 6.5.2. Norte peninsular

El régimen extremal del oleaje en el norte peninsular se ha caracterizado mediante el análisis POT-GPD a partir del punto SIMAR 3080042 y del registro instrumental de la boya de Cabo de Peñas. El análisis se ha realizado de forma independiente para cada una de las etapas de modelización del sistema SIMAR/WANA, así como para la serie SIMAR considerada en su periodo completo, mientras que el registro instrumental se ha analizado utilizando la totalidad de su periodo de servicio disponible, de acuerdo con los criterios metodológicos establecidos en el subapartado anterior.

La función extremal obtenida a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Peñas (Figura 126) presenta un comportamiento coherente, con un parámetro de forma negativo que indica colas finitas en la distribución de los eventos más energéticos. Para periodos de retorno de referencia del orden de varias décadas, como el retorno de 68 años, los niveles estimados de altura significativa del oleaje se sitúan en un rango elevado y bien definido, coherente con el régimen energético característico del litoral cantábrico.

A medida que se consideran periodos de retorno mayores, la amplitud de los intervalos de confianza aumenta de forma significativa, reflejando la creciente incertidumbre asociada a la extrapolación estadística y al tamaño efectivo de la muestra disponible. En consecuencia, los resultados correspondientes a retornos largos deben interpretarse desde una perspectiva fundamentalmente comparativa, evitando una lectura literal de las magnitudes estimadas.

Las distintas etapas de modelización del sistema SIMAR/WANA presentan comportamientos extremales comparables en su estructura general, aunque con diferencias apreciables en la pendiente de la función y en las magnitudes asociadas a los distintos periodos de retorno, si bien se identifican diferencias persistentes en la magnitud de los periodos de retorno, incluso para los de referencia del orden de varias décadas.

La etapa SIMAR-44 (Figura 127) muestra un régimen extremal más contenido, con  $H_s$  para  $T = 68$  años sensiblemente inferiores a los obtenidos con las etapas posteriores. La pendiente moderada de la función extremal y la relativa estrechez de los intervalos de confianza indican una buena coherencia interna del ajuste, asociada a la mayor longitud temporal de la serie.

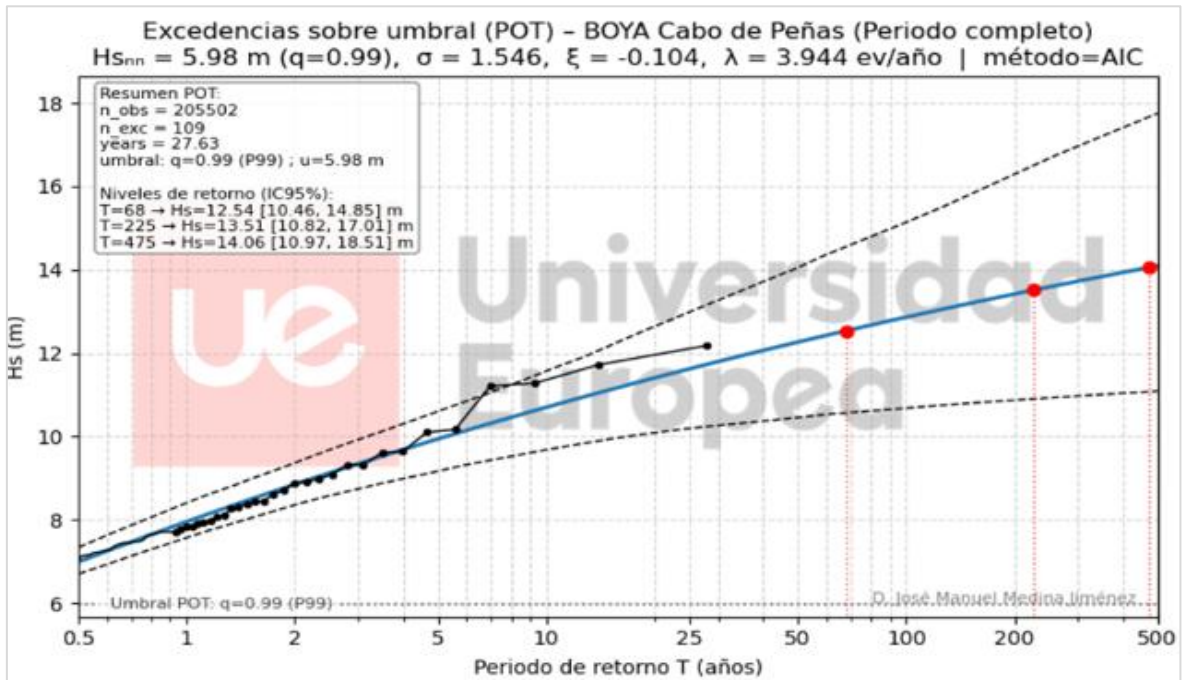


Figura 126.\_ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Peñas.

Fuente: Elaboración propia.

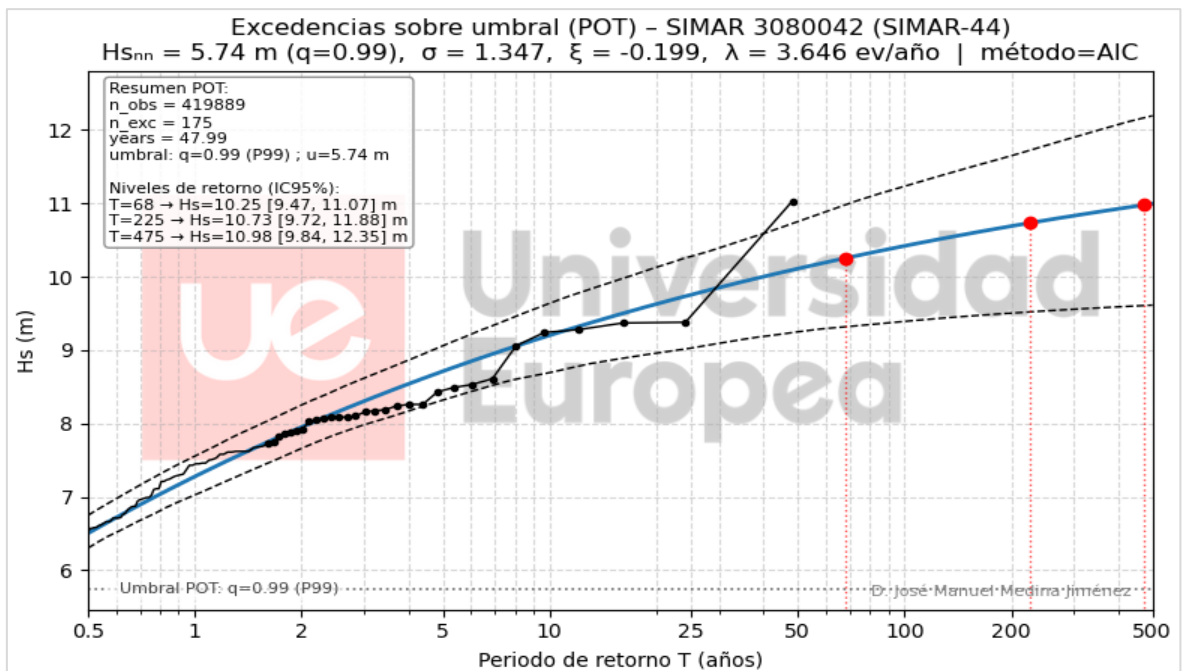
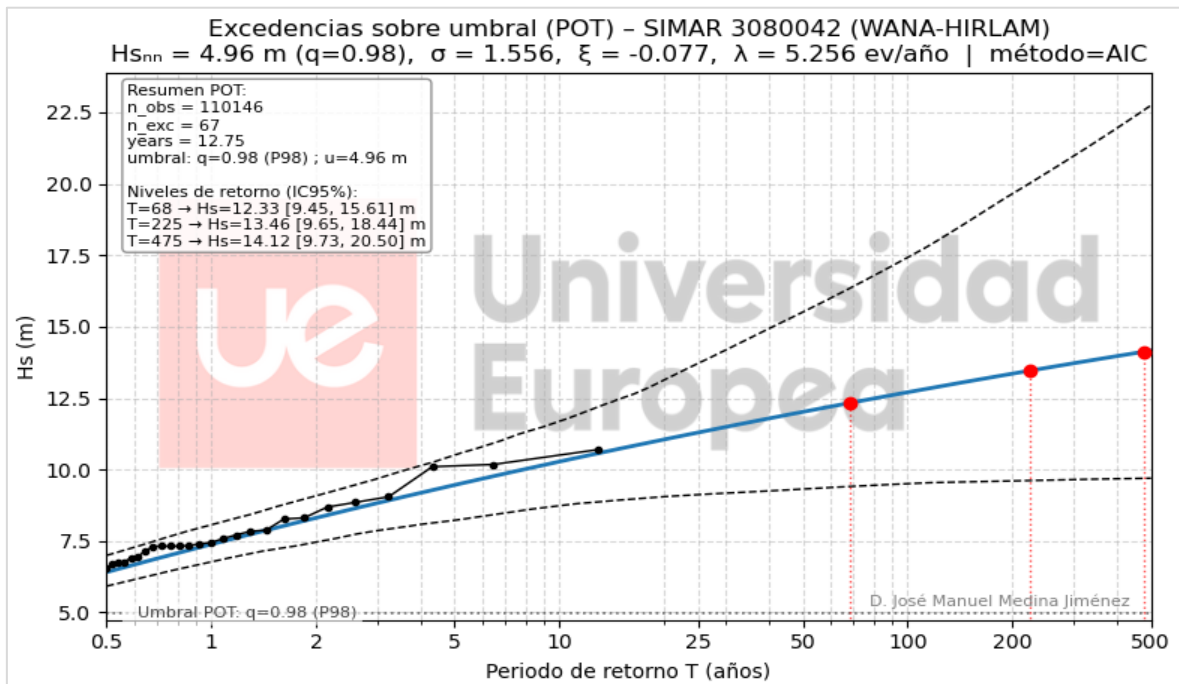


Figura 127.\_ Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 128) presenta  $H_s$  más elevados para el periodo de referencia de 68 años, situándose en un rango próximo al obtenido a partir del registro instrumental. No obstante, estos valores están asociados a intervalos de confianza muy amplios, reflejo de la limitada longitud temporal de la serie y del reducido número de excedencias independientes disponibles. Este comportamiento pone de manifiesto una elevada sensibilidad de la estimación extremal a la extrapolación estadística, lo que aconseja interpretar los resultados de esta etapa con especial cautela.



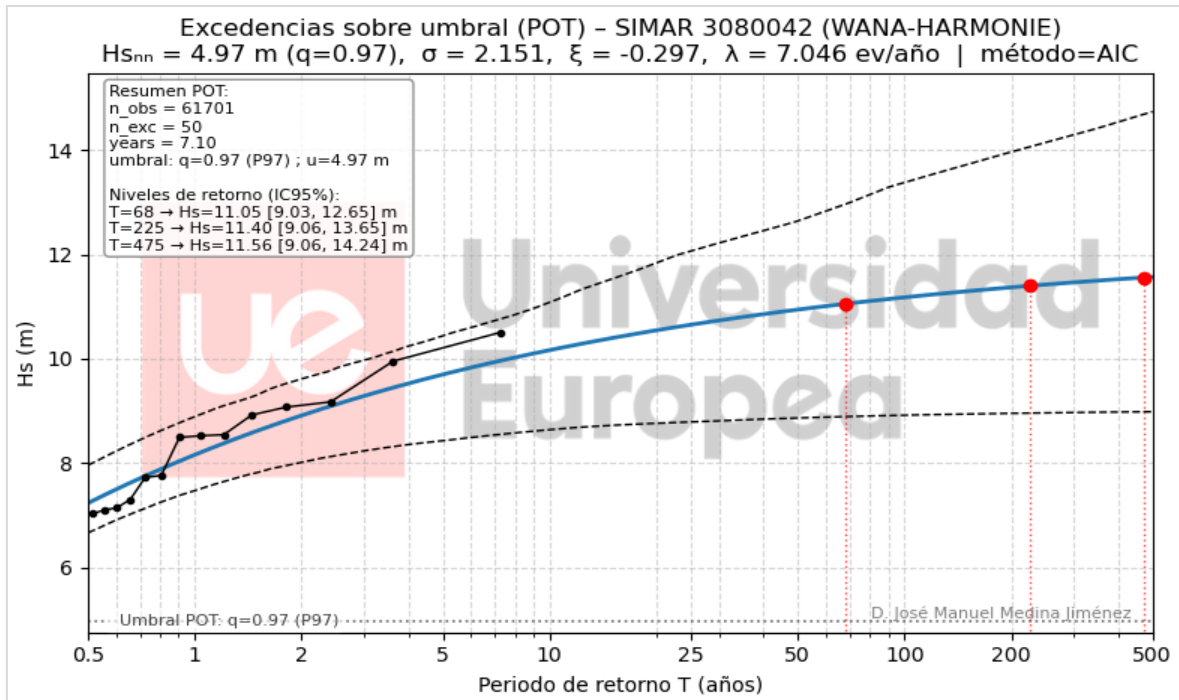
**Figura 128.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 129) muestra una  $H_s$  intermedia para  $T = 68$  años, junto con una pendiente algo más acusada de la función extremal. Aunque los valores estimados se sitúan en un rango comparable al de las otras etapas, la amplitud de los intervalos de confianza y la sensibilidad de la extrapolación hacia periodos de retorno mayores evidencian una incertidumbre apreciable en la caracterización de los eventos más extremos.

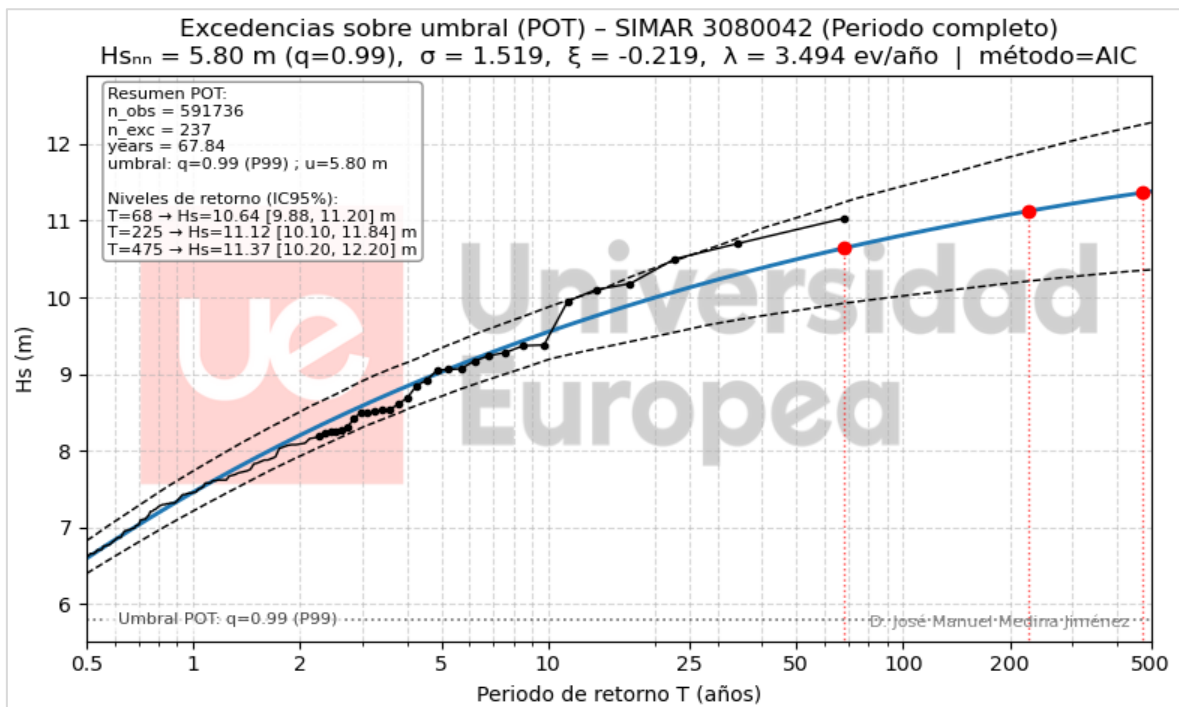
El análisis correspondiente a la serie SIMAR considerada en su periodo completo (Figura 130) proporciona una función extremal de carácter intermedio, resultado de la integración conjunta de etapas con propiedades estadísticas distintas. Si bien esta aproximación se beneficia de un mayor tamaño muestral y ofrece una visión global del régimen extremal modelizado, los resultados

confirman que el análisis conjunto de distintas etapas de modelización puede suavizar diferencias relevantes entre periodos, especialmente en la cola de la distribución.



**Figura 129.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 130.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3080042 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados del norte peninsular confirman que, aun existiendo un régimen extremal globalmente coherente, las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no son directamente intercambiables desde el punto de vista del análisis extremal. Las diferencias observadas parecen asociarse a cambios persistentes en el sistema de modelización, más que a una evolución progresiva del clima marítimo.

En este contexto, el análisis extremal realizado pone de manifiesto la utilidad de abordar la caracterización del régimen extremal de forma diferenciada para cada etapa de modelización, utilizando la serie SIMAR considerada en su conjunto como una referencia adicional que permite contextualizar los resultados obtenidos. Esta aproximación facilita una interpretación prudente y coherente de los periodos de retorno estimados, teniendo en cuenta las limitaciones inherentes a la consideración conjunta de etapas con propiedades estadísticas distintas.

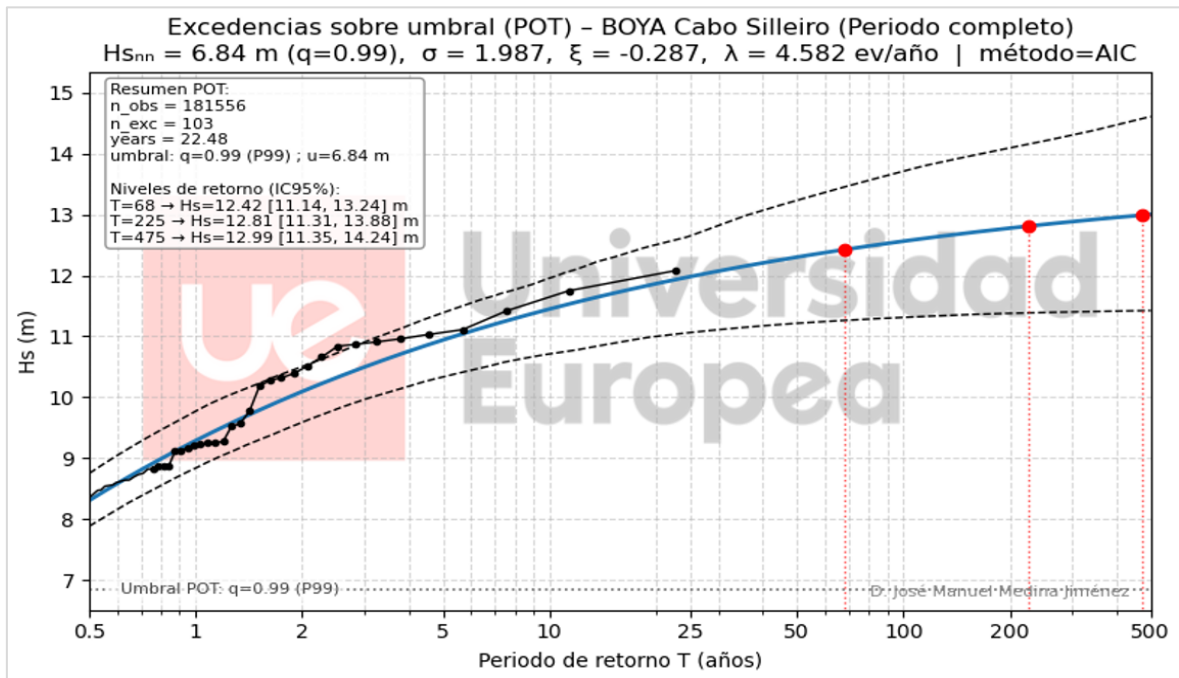
### 6.5.3. Oeste peninsular

El régimen extremal del oleaje en el oeste peninsular se ha caracterizado mediante el análisis POT–GPD a partir del punto SIMAR 3002002 y del registro instrumental de la boya de Cabo Silleiro. De acuerdo con los criterios metodológicos establecidos en el apartado 6.5.1, el análisis se ha realizado de forma independiente para cada una de las etapas de modelización del sistema SIMAR/WANA, así como para la serie SIMAR considerada en su conjunto, mientras que el registro instrumental se ha analizado empleando la totalidad de su periodo de servicio disponible.

La función extremal obtenida a partir del registro instrumental de la boya de Cabo Silleiro (Figura 131) presenta un comportamiento coherente, con un parámetro de forma negativo que indica colas finitas en la distribución de los eventos más energéticos. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, los valores estimados de altura significativa del oleaje se sitúan en un rango elevado y bien definido, coherente con el carácter energético del litoral atlántico occidental. Como en otros ámbitos, la amplitud de los intervalos de confianza aumenta progresivamente para retornos mayores, reflejando la incertidumbre asociada a la extrapolación estadística y aconsejando una interpretación prudente de dichos valores.

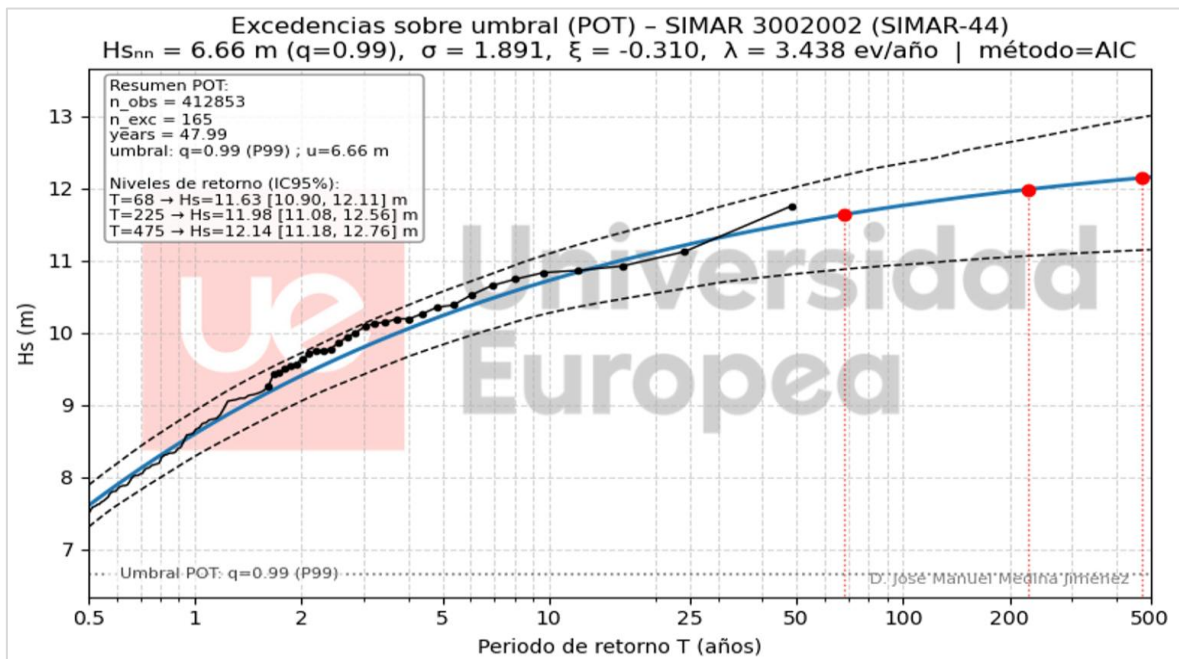
En cuanto a las series modelizadas, la etapa SIMAR-44 (Figura 132) muestra un régimen extremal relativamente contenido y estable. Para el periodo de retorno de 68 años, la magnitudes de oleaje estimadas se sitúan por debajo de los obtenidos a partir del registro instrumental, con intervalos de confianza moderados y una pendiente de la función extremal consistente con la longitud

temporal de la serie. Este comportamiento pone de manifiesto una buena coherencia interna del ajuste y una caracterización de los extremos menos sensible a la extrapolación estadística.



**Figura 131.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo Silleiro.

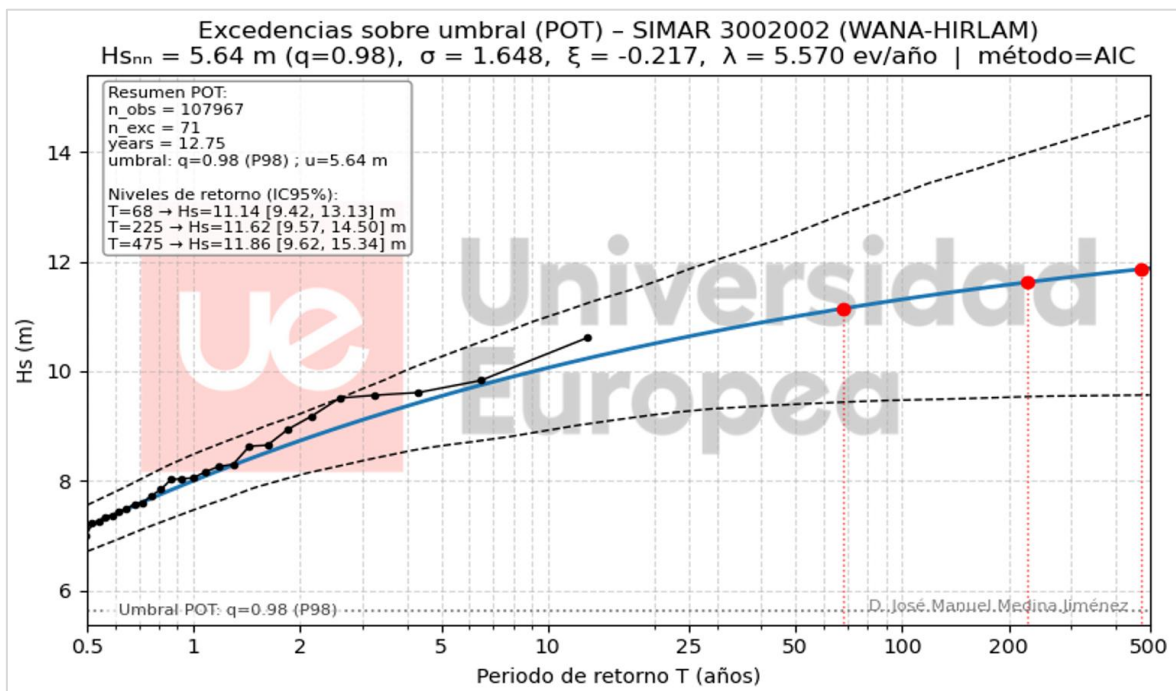
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 132.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 133) presenta magnitud de  $H_s$  para el periodo de referencia de 68 años ligeramente inferior al obtenido con SIMAR-44. No obstante, estos resultados se asocian a intervalos de confianza sensiblemente más amplios, coherentes con la menor longitud temporal de la serie y con el número más reducido de excedencias independientes disponibles. Este comportamiento pone de manifiesto una mayor sensibilidad de la estimación extremal a la extrapolación estadística, lo que aconseja interpretar los resultados correspondientes a esta etapa con cuidado.



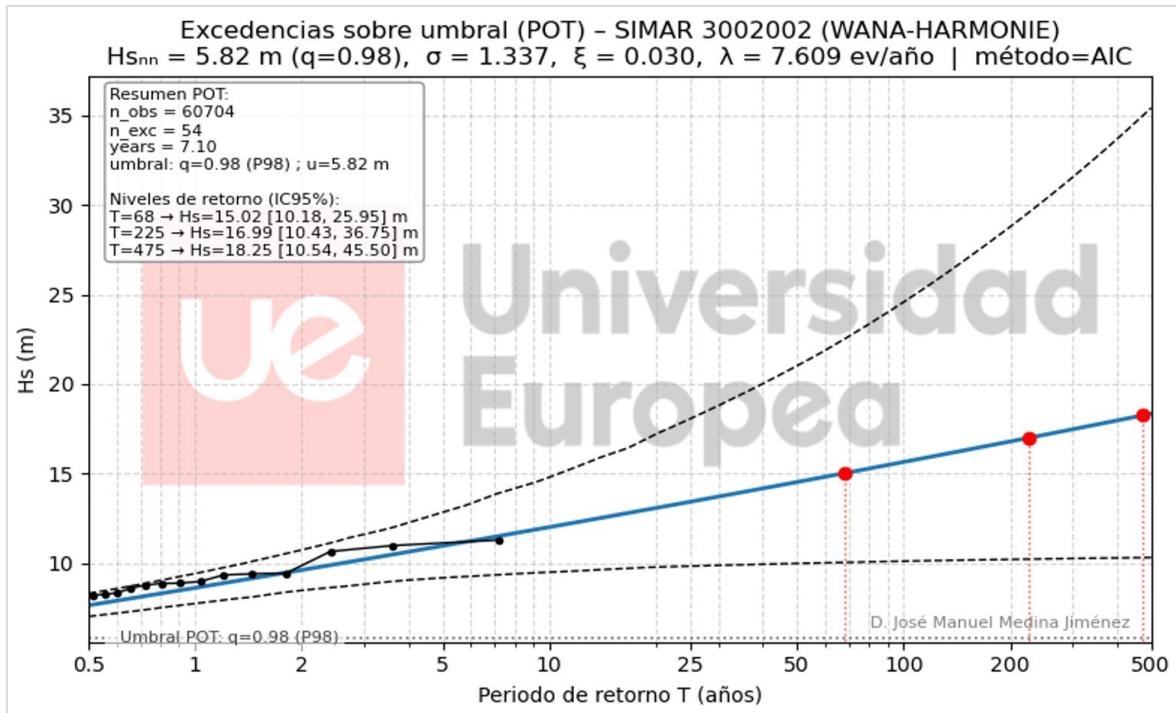
**Figura 133.\_** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 134) presenta un comportamiento claramente diferenciado respecto a las etapas anteriores. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, los niveles estimados de altura significativa del oleaje son muy superiores a los obtenidos con SIMAR-44, WANA-HIRLAM y con la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 135), así como a los derivados del registro instrumental.

Este incremento se acompaña de intervalos de confianza extremadamente amplios y de una forma de la función extremal muy sensible a la extrapolación estadística, coherente con la escasa longitud temporal de la serie y con el reducido número de excedencias independientes disponibles. En consecuencia, las estimaciones extremales obtenidas para esta etapa deben interpretarse con

especial cautela, incluso para periodos de retorno moderados, y su utilidad cuantitativa queda limitada a un análisis estrictamente comparativo dentro del presente estudio.

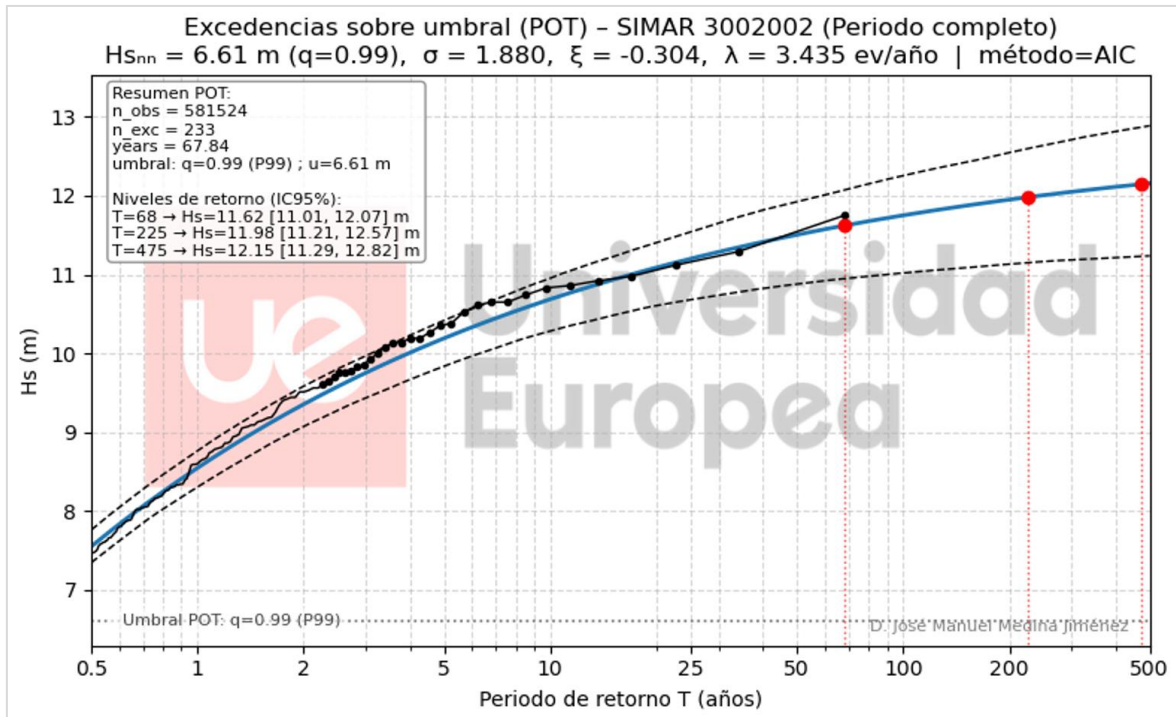


**Figura 134.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis correspondiente a la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 135) proporciona una función extremal de carácter intermedio, coherente con la predominancia de las etapas de mayor longitud temporal dentro de la serie agregada. Esta aproximación se beneficia de un mayor tamaño muestral y permite obtener una visión global del régimen extremal modelizado en el oeste peninsular, con periodos de retorno y pendientes comparables a los obtenidos en las etapas más largas del sistema.

No obstante, los resultados ponen de manifiesto que la consideración conjunta de distintas etapas de modelización tiende a ocultar la respuesta específica del régimen extremal asociada a cada actualización del sistema, especialmente en la cola de la distribución. Este comportamiento evidencia la sensibilidad de la caracterización extremal del oleaje a los cambios en el sistema de modelización, lo que debe considerarse en la interpretación de los periodos de retorno estimados.



**Figura 135.** Función extrema de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 3002002 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

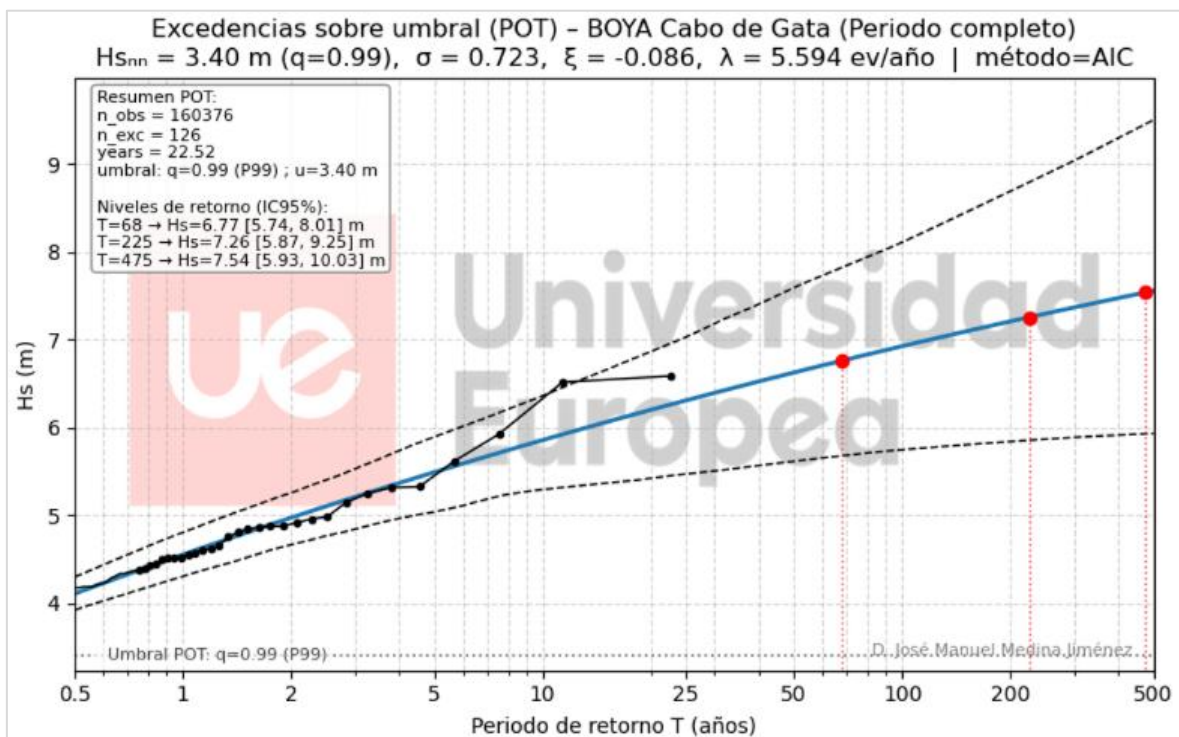
En conjunto, los resultados del oeste peninsular confirman que, aun existiendo un régimen extremal globalmente coherente en cuanto a su comportamiento general y orden de magnitud, las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no son directamente intercambiables desde el punto de vista del análisis extremal. Las funciones extremales obtenidas presentan una forma físicamente plausible y una evolución monótona de los periodos de retorno, coherente con el carácter energético del litoral atlántico, si bien muestran diferencias apreciables en la cuantificación de dichos niveles entre etapas.

Las discrepancias observadas parecen asociarse a cambios persistentes en el sistema de modelización, más que a una evolución progresiva del clima marítimo. En este contexto, el análisis extremal desarrollado pone de manifiesto la utilidad de abordar la caracterización del régimen extremal de forma diferenciada para cada etapa de modelización, permitiendo identificar la sensibilidad de los periodos de retorno estimados a las sucesivas actualizaciones del sistema. La serie SIMAR considerada en su conjunto se emplea, por tanto, como una referencia adicional que facilita la contextualización de los resultados, siempre desde una interpretación prudente y coherente con las limitaciones inherentes a la consideración conjunta de etapas con propiedades estadísticas distintas.

#### 6.5.4. Sur peninsular

El régimen extremal del oleaje en el sur peninsular se ha caracterizado mediante el análisis POT-GPD a partir del punto SIMAR 2056079 y del registro instrumental de la boya de Cabo de Gata. El análisis se ha realizado de forma independiente para cada una de las etapas de modelización del sistema SIMAR/WANA, así como para la serie SIMAR considerada en su conjunto, mientras que el registro instrumental se ha analizado empleando la totalidad de su periodo de servicio disponible.

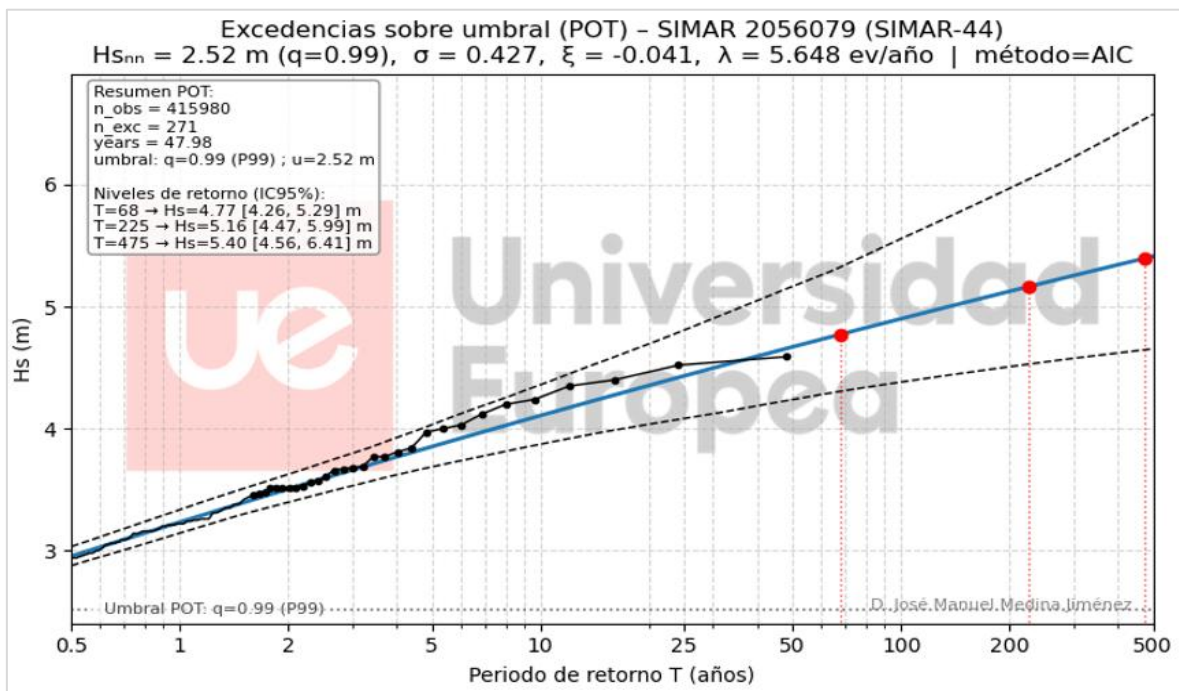
La función extremal obtenida (Figura 136) a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Gata presenta un régimen extremal claramente menos energético que el observado en las regiones expuestas a oleajes del océano Atlántico. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, los valores estimados de altura significativa del oleaje se sitúan en un rango coherente con el carácter semiabrigado del litoral mediterráneo. La amplitud de los intervalos de confianza aumenta progresivamente para periodos de retorno mayores, no alcanzando los niveles de incertidumbre observados en los dos primeros casos analizados, lo que refleja un comportamiento extremal relativamente estable.



**Figura 136.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Cabo de Gata.

Fuente: Elaboración propia.

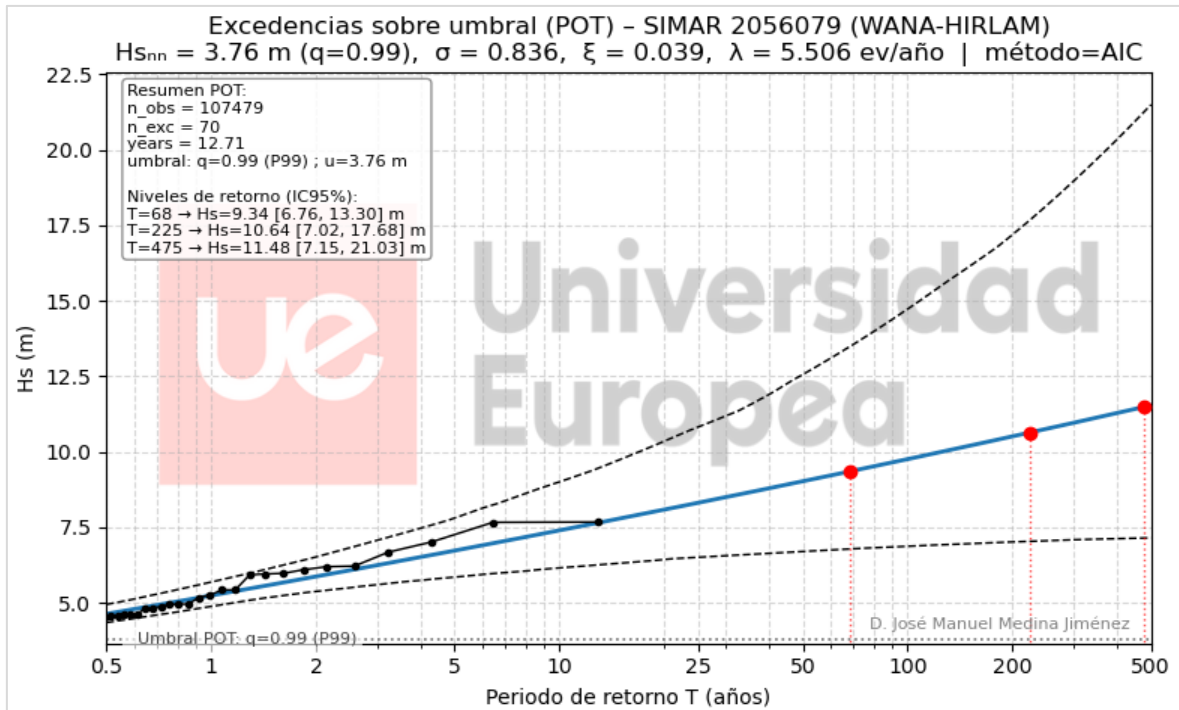
En cuanto a las series modelizadas, la etapa SIMAR-44 (Figura 137) muestra un régimen extremal contenido y coherente con el registro instrumental. Para el periodo de retorno de 68 años, los niveles estimados se sitúan por debajo de los obtenidos a partir de la boya, con intervalos de confianza moderados y una forma de la función extremal consistente con la longitud temporal de la serie. Este comportamiento indica una caracterización de los extremos estable y poco sensible a la extrapolación estadística, aunque con una tendencia a infraestimar las magnitudes extremas respecto al registro instrumental.



**Figura 137.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 138) presenta un comportamiento marcadamente diferenciado. Para el periodo de retorno de 68 años, la  $H_s$  es muy superior a la obtenida en el periodo SIMAR-44, así como con la boya. Este incremento se acompaña de intervalos de confianza muy amplios y de una pendiente más acusada de la función extremal, coherente con la menor longitud temporal de la serie y con el reducido número de excedencias independientes disponibles. Este patrón pone de manifiesto una elevada sensibilidad de la estimación extremal a la extrapolación estadística, lo que limita la robustez de los valores obtenidos incluso para periodos de retorno moderados.



**Figura 138.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

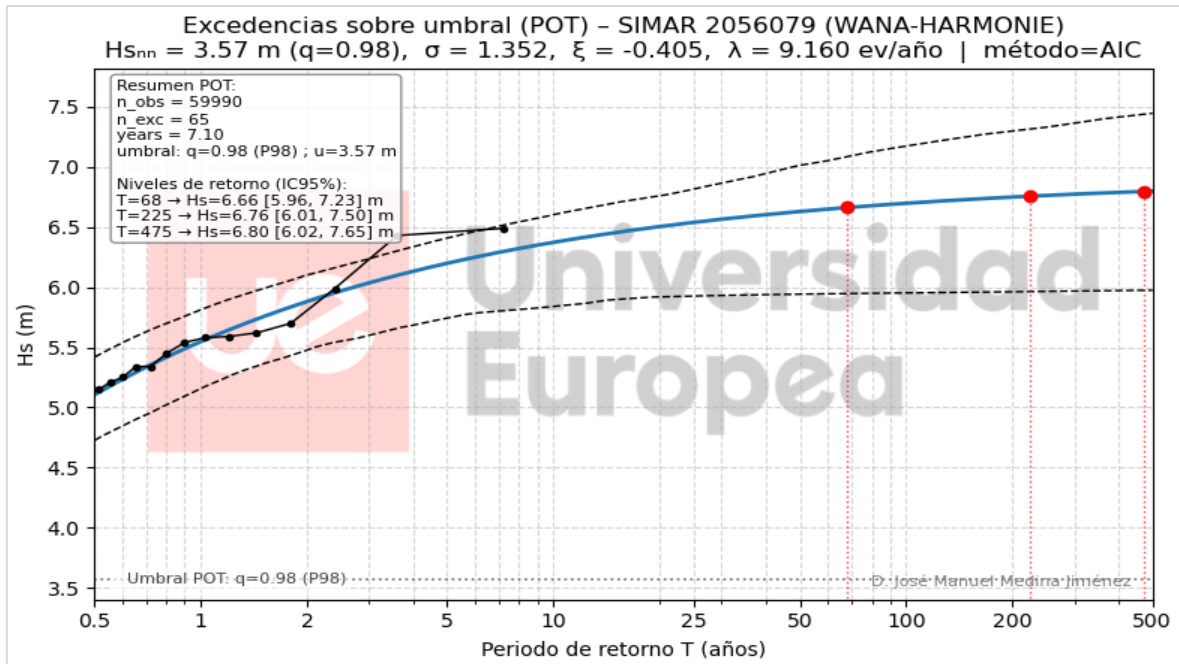
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 139) muestra un régimen extremal claramente diferenciado respecto a WANA-HIRLAM. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, el nivel estimado de altura significativa del oleaje se sitúa muy próximo al obtenido a partir del registro instrumental, y claramente por encima del valor estimado con SIMAR-44. Asimismo, la función extremal presenta una evolución más suave y con intervalos de confianza más contenidos que los obtenidos para WANA-HIRLAM, lo que sugiere una menor sensibilidad de la estimación a la extrapolación estadística dentro del rango de retornos considerado.

Sin embargo, la corta longitud temporal de la serie introduce una incertidumbre apreciable al extender la extrapolación hacia periodos de retorno mayores, por lo que estos resultados deben interpretarse con prudencia y con una finalidad fundamentalmente comparativa en el marco del presente estudio.

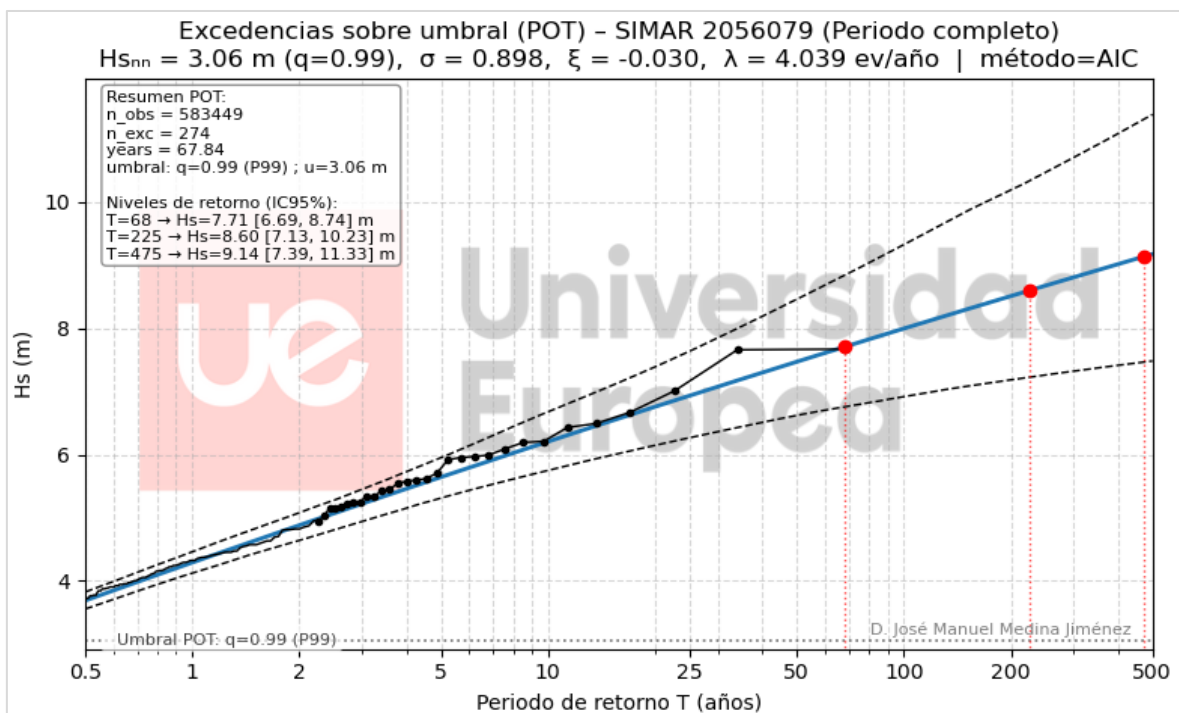
El análisis correspondiente a la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 140) proporciona una función extremal de carácter global, beneficiada por un mayor tamaño muestral, que permite disponer de una visión integrada del régimen extremal modelizado en el sur peninsular. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, la magnitud del oleaje significativo se sitúa claramente

por encima de los obtenidos con SIMAR-44 y en un rango ligeramente superior al derivado del registro instrumental, con un valor central ligeramente superior.



**Figura 139.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 140.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2056079 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, los resultados ponen de manifiesto que la consideración conjunta de etapas de modelización con propiedades estadísticas distintas puede reducir la visibilidad de comportamientos diferenciados asociados a actualizaciones concretas del sistema, especialmente en la cola de la distribución. En consecuencia, el análisis por etapas aporta información adicional para interpretar la sensibilidad del régimen extremal estimado a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización.

En conjunto, los resultados correspondientes al sur peninsular muestran un régimen extremal consistente en términos de orden de magnitud y comportamiento general, claramente diferenciado del característico de los ámbitos atlánticos. Sin embargo, el análisis pone de manifiesto que las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no son directamente intercambiables desde el punto de vista de la estimación extremal.

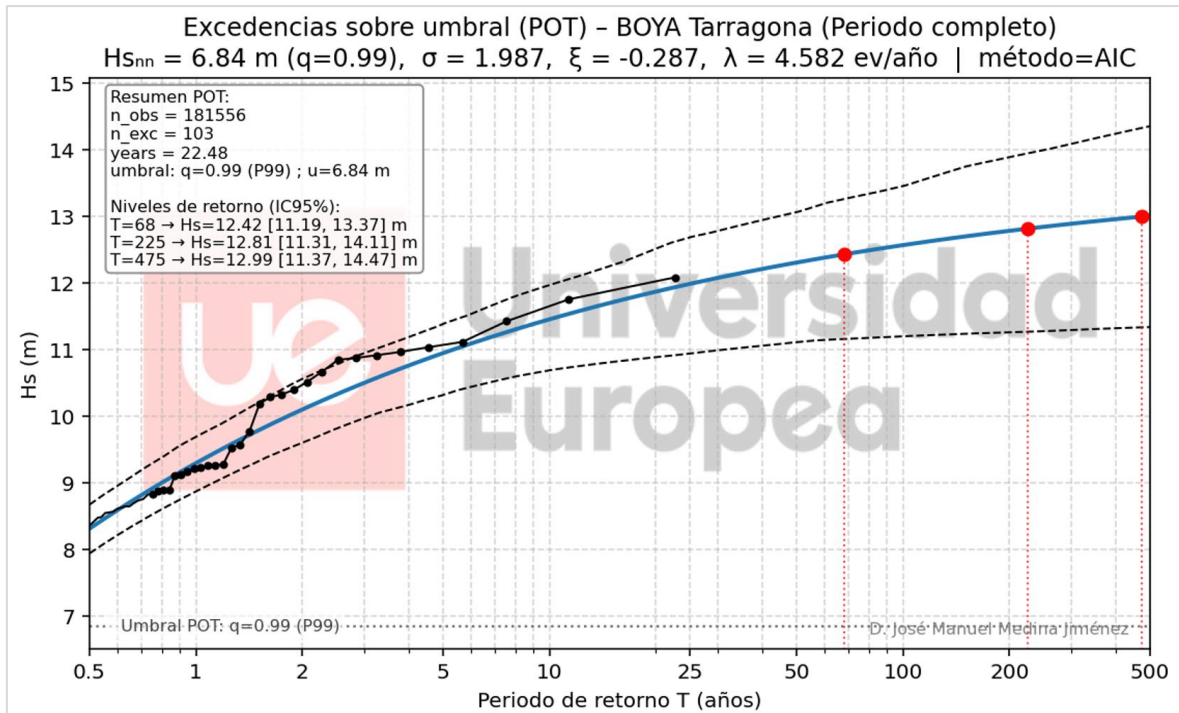
Las diferencias identificadas parecen estar vinculadas principalmente a cambios persistentes en el sistema de modelización y en sus configuraciones sucesivas, más que a una evolución progresiva del clima marítimo en la región. En este contexto, el análisis extremal segmentado por etapas permite evaluar la sensibilidad de las estimaciones extremas a dichas actualizaciones, mientras que la serie SIMAR considerada en su conjunto puede emplearse como una referencia adicional de carácter global, útil para contextualizar los resultados, siempre desde una interpretación prudente y coherente con las limitaciones inherentes a la consideración conjunta de etapas con propiedades estadísticas distintas.

#### **6.5.5. Este peninsular**

La función extremal obtenida a partir del registro instrumental de la boya de Tarragona (Figura 141) proporciona una referencia independiente del régimen extremal del oleaje en el este peninsular. Para el periodo de retorno de 68 años, los niveles de altura significativa estimados se sitúan en valores elevados en comparación con los ámbitos mediterráneos más meridionales, con una evolución suave de la función extremal y unos intervalos de confianza que, aun incrementándose para retornos mayores, permanecen relativamente acotados en el rango de retornos de interés ingenieril.

En lo que respecta a las series modelizadas, la etapa SIMAR-44 (Figura 142) presenta una caracterización del régimen extremal claramente más contenida que la obtenida a partir del registro instrumental. Para el periodo de retorno de 68 años, los niveles estimados son

sensiblemente inferiores a los de la boya, con intervalos de confianza moderados y una evolución progresiva de la función extremal. Este comportamiento es coherente con la naturaleza más conservadora de esta etapa en términos de magnitud y con la longitud temporal de la serie.

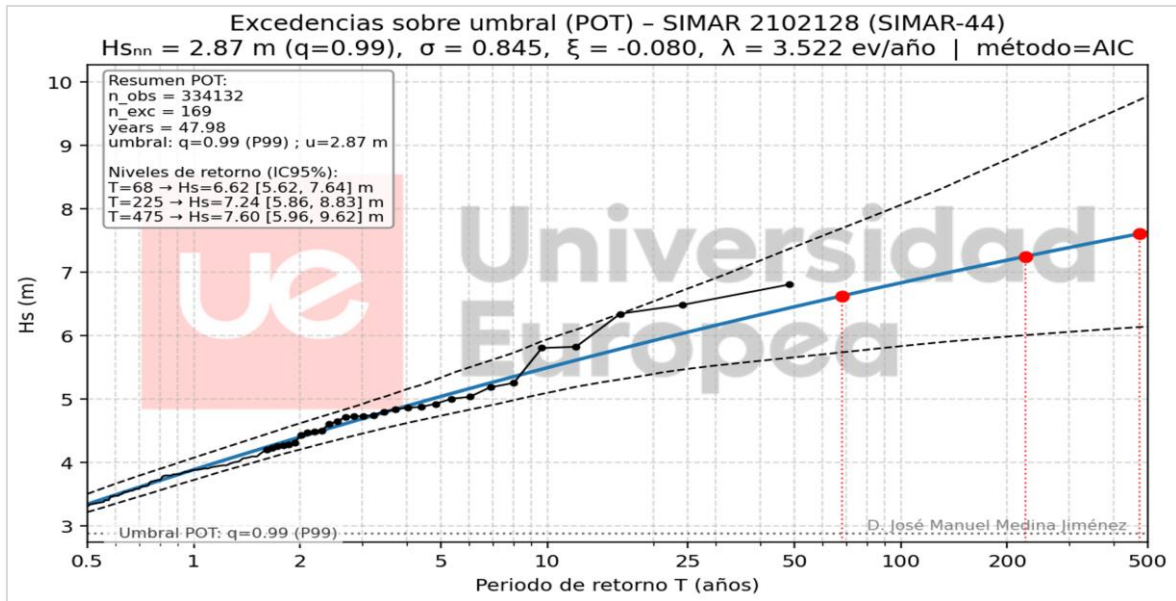


**Figura 141.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Tarragona.

Fuente: Elaboración propia.

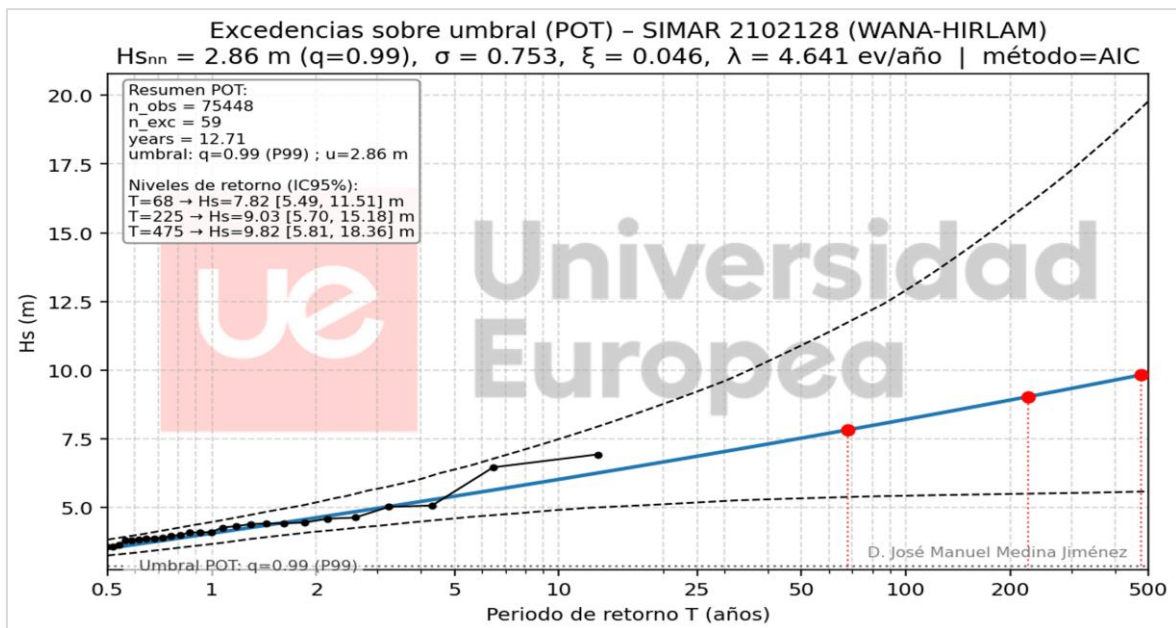
La etapa WANA-HIRLAM (Figura 143) muestra un incremento relevante de las alturas significativas extremales respecto a SIMAR-44. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, los valores estimados de  $H_s$  son superiores a los obtenidos con SIMAR-44, aunque continúan situándose claramente por debajo de los derivados del registro de la boya.

Este aumento relativo de las magnitudes extremales viene acompañado de intervalos de confianza notablemente más amplios, coherentes con la menor duración temporal de la serie y con el reducido número de excedencias independientes disponibles. En consecuencia, los resultados ponen de manifiesto una mayor sensibilidad de la estimación extremal a la extrapolación estadística, lo que aconseja interpretar las magnitudes de  $H_s$  obtenidas con esta etapa desde una perspectiva comparativa y con la cautela inherente a su limitado soporte muestral.



**Figura 142.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

Fuente: Elaboración propia.

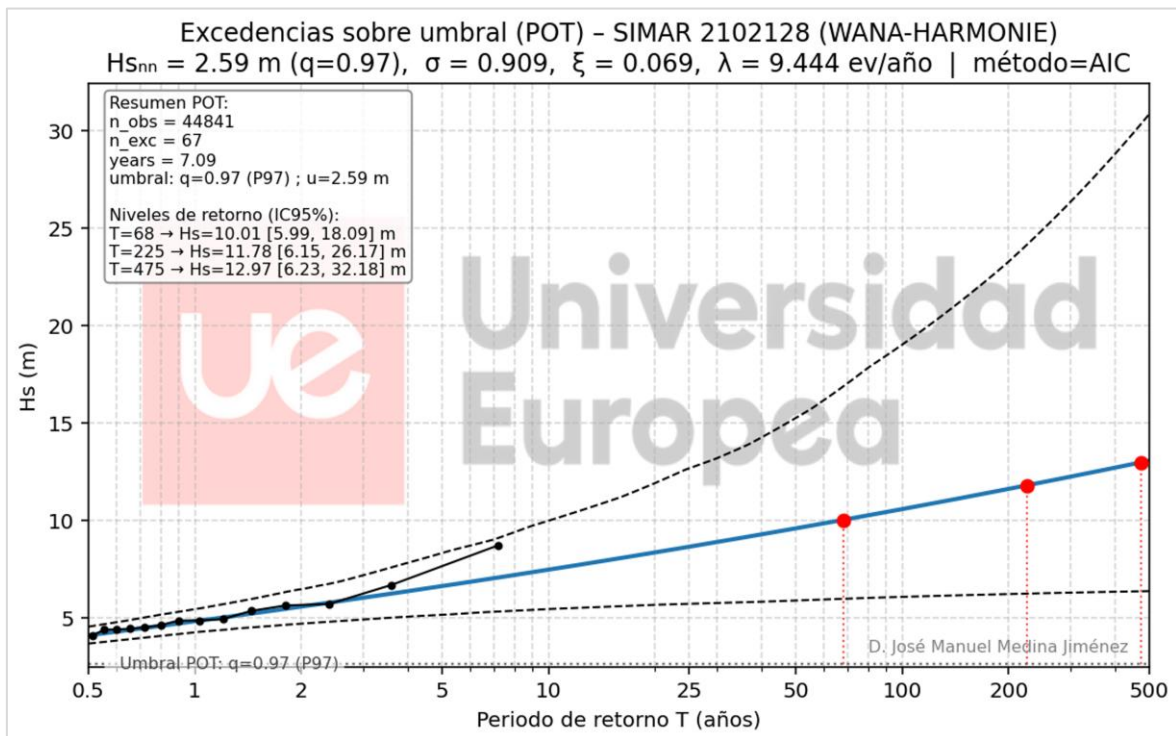


**Figura 143.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 144) muestra un comportamiento diferenciado respecto a las etapas anteriores. Para el periodo de retorno de referencia de 68 años, el nivel estimado de altura significativa del oleaje es claramente superior al obtenido con SIMAR-44 y también superior al de WANA-HIRLAM.

El rasgo más relevante de esta etapa es la amplia dispersión asociada a la estimación, que se traduce en intervalos de confianza muy abiertos ya en el periodo de retorno de 68 años y que se amplían de forma marcada al considerar periodos mayores. En consecuencia, la interpretación de las Hs obtenidas con WANA-HARMONIE debe realizarse con cautela y con una finalidad principalmente comparativa dentro del marco del presente estudio.



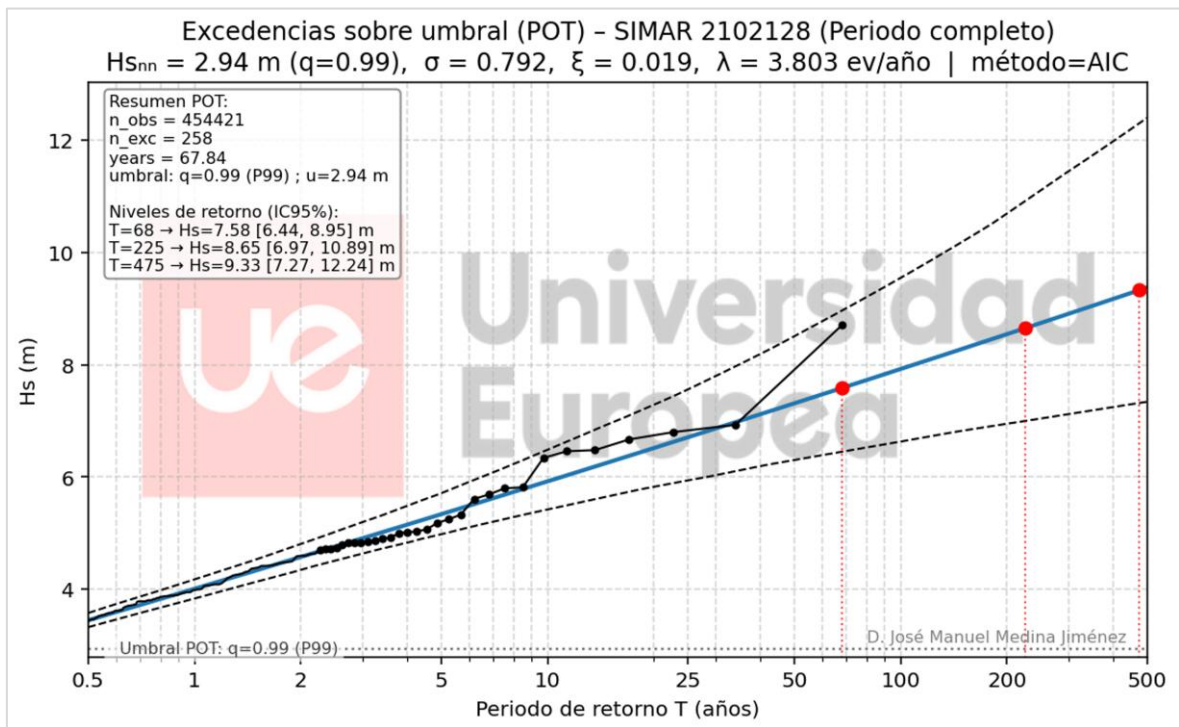
**Figura 144.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.

La función extremal obtenida a partir de la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 145) presenta un comportamiento regular y progresivo, con una evolución suave de las Hs a medida que aumenta el periodo de retorno. El valor del parámetro de forma, muy próximo a cero, es indicativo de una cola ni especialmente pesada ni claramente limitada, lo que se traduce en una extrapolación moderada y sin crecimientos abruptos de la altura significativa estimada.

Para el periodo de retorno de 68 años, los valores obtenidos se sitúan claramente por encima de los estimados con SIMAR-44 y claramente inferiores a los derivados del registro instrumental, coherentemente con su carácter integrador de distintas etapas de modelización. Los intervalos de confianza, aunque crecientes a mayor periodo de retorno, se mantienen razonablemente acotados en comparación con los observados en las etapas más recientes consideradas de forma aislada.

El mayor tamaño muestral asociado a la consideración conjunta de toda la serie permite obtener una función extremal más estable desde el punto de vista estadístico. No obstante, esta estabilidad viene acompañada de una suavización de las diferencias observadas entre las distintas etapas de modelización, especialmente en la cola de la distribución, lo que debe tenerse en cuenta en la interpretación de las magnitudes de  $H_s$  obtenidas para cada periodo de retorno asociado.



**Figura 145.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 2102128 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados correspondientes al este peninsular ponen de manifiesto que el régimen extremal del oleaje mantiene un comportamiento globalmente consistente en cuanto al orden de magnitud de las alturas significantes extremas, si bien se identifican diferencias persistentes entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA. Estas diferencias parecen estar asociadas principalmente a cambios introducidos en el sistema de modelización, más que a una evolución progresiva del clima marítimo.

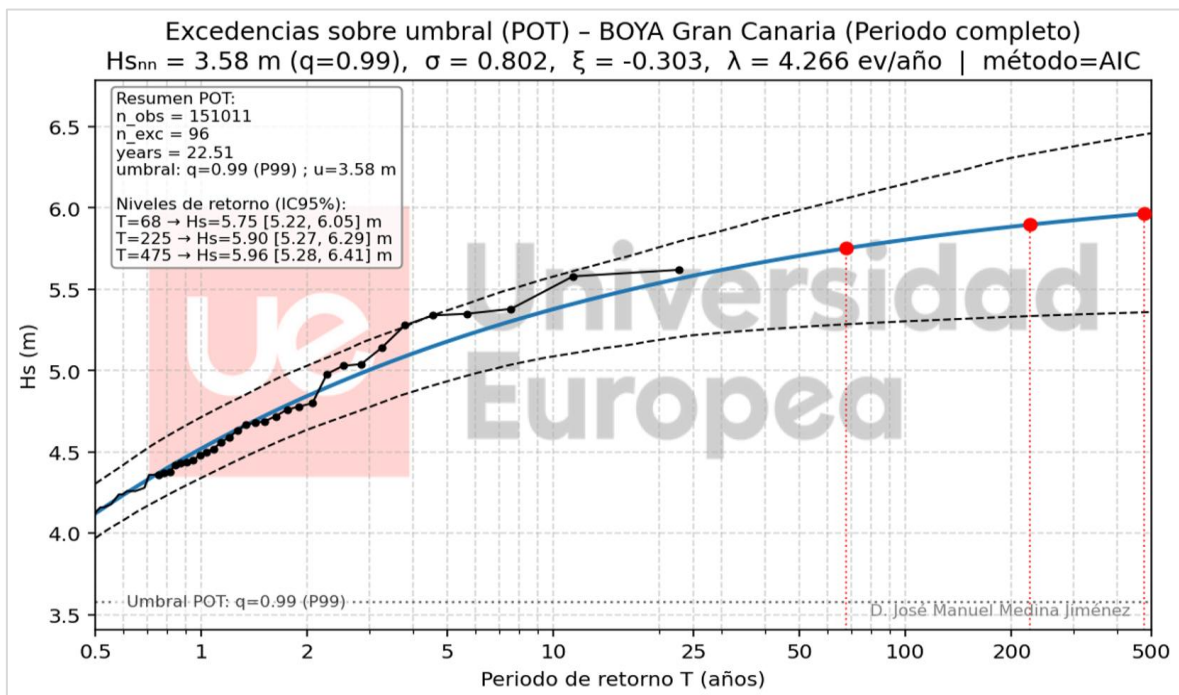
En este contexto, el análisis extremal abordado de forma diferenciada por etapas permite evaluar la sensibilidad de las magnitudes de  $H_s$  asociadas a distintos periodos de retorno frente a las sucesivas actualizaciones del sistema, utilizando la serie SIMAR considerada en su conjunto como una referencia adicional para contextualizar los resultados, siempre desde una interpretación

prudente y coherente con las limitaciones inherentes a la consideración conjunta de etapas con características estadísticas distintas.

## 5.6. Norte de Canarias

El análisis del régimen extremal del oleaje en el norte de Canarias se ha realizado a partir del registro instrumental de la boya de Gran Canaria y de las series numéricas correspondientes al punto SIMAR 1017013, considerando de forma diferenciada las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA (SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE), así como la serie SIMAR considerada en su conjunto.

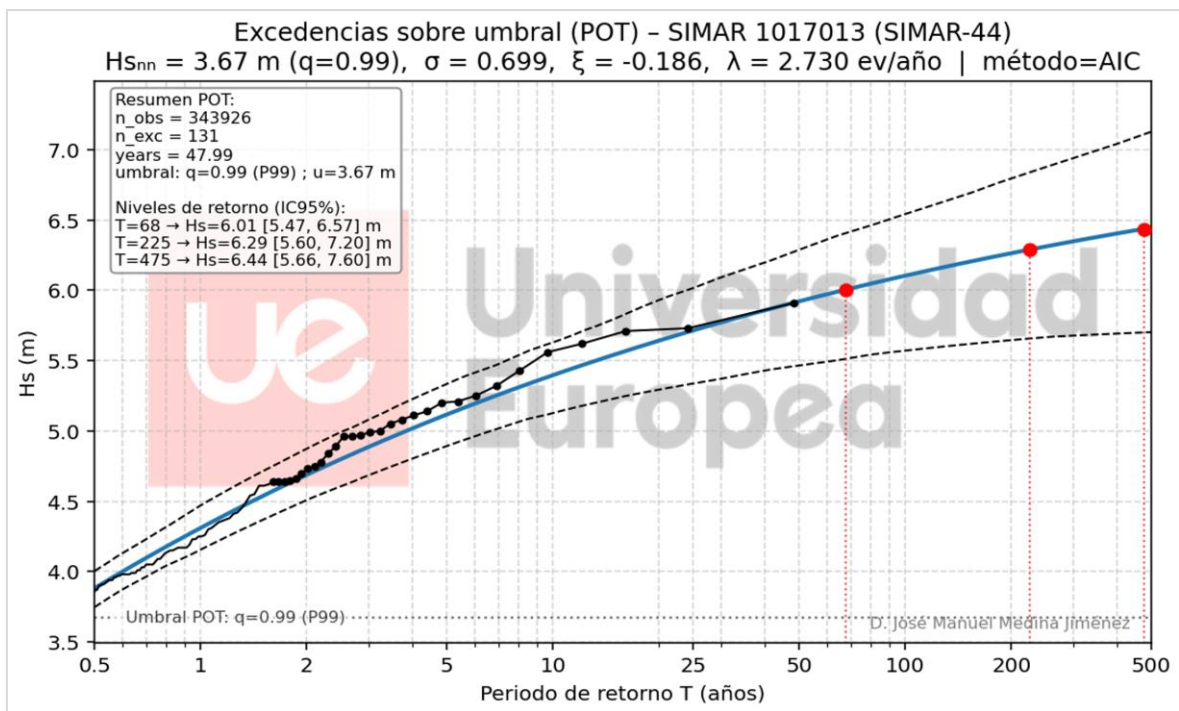
La función extremal obtenida a partir del registro instrumental de la boya de Gran Canaria (Figura 146) muestra un comportamiento estable y bien definido, caracterizado por un parámetro de forma negativo, indicativo de colas finitas en la distribución de los eventos más energéticos. Las magnitudes de  $H_s$  asociadas a periodos de retorno de referencia, como  $T = 68$  años, se sitúan en valores moderados en comparación con los ámbitos atlánticos peninsulares. Los intervalos de confianza permanecen acotados en el rango de periodos de retorno considerados, lo que proporciona una referencia instrumental sólida para contextualizar los resultados obtenidos con las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA.



**Figura 146.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Gran Canaria.

Fuente: Elaboración propia.

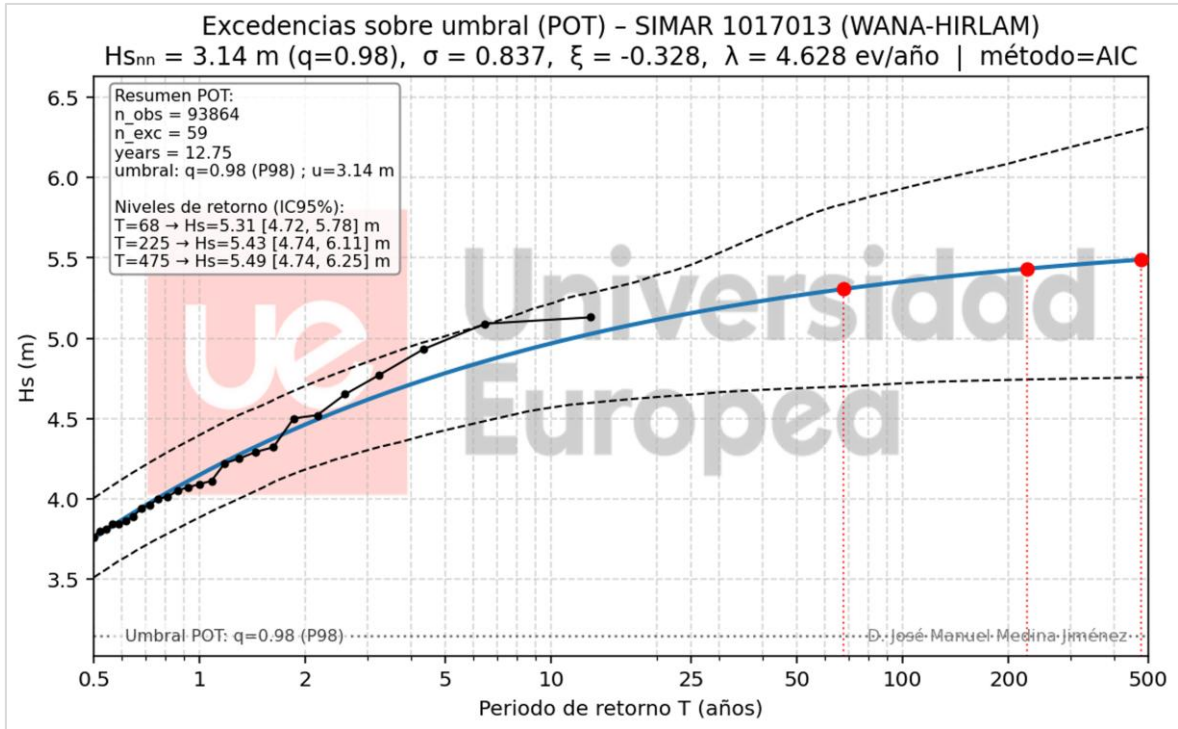
La etapa SIMAR-44 (Figura 147) presenta una función extremal coherente con el comportamiento observado en la boya, aunque con magnitudes de  $H_s$  ligeramente superiores para los periodos de retorno de referencia. La forma general de la curva es estable y los intervalos de confianza se mantienen relativamente contenidos, en consonancia con la amplia cobertura temporal de la serie. Este comportamiento sugiere una representación consistente del régimen extremal en términos de orden de magnitud, si bien con una ligera tendencia a estimar oleajes significantes extremos algo más elevados que los derivados del registro instrumental



**Figura 147.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

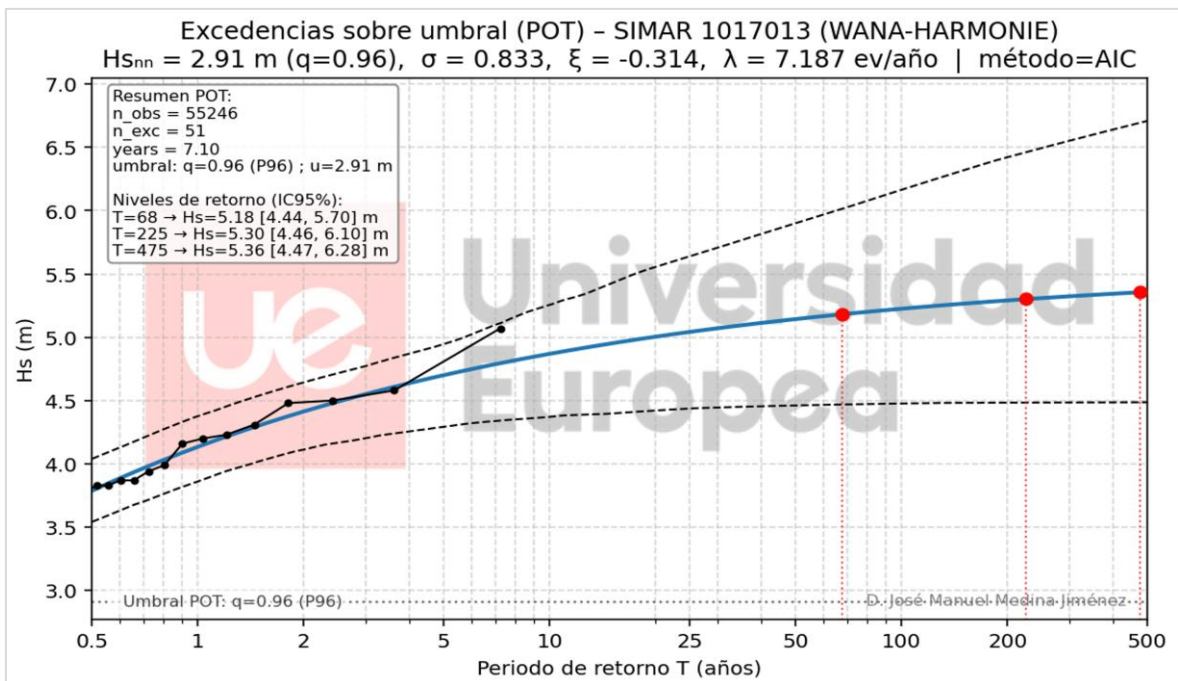
Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 148) muestra una reducción apreciable de las magnitudes de  $H_s$  asociadas a los periodos de retorno de referencia respecto a SIMAR-44. Para  $T = 68$  años, las alturas significantes extremas estimadas se sitúan por debajo tanto de las obtenidas con SIMAR-44 como de las derivadas del registro instrumental. Este comportamiento viene acompañado de intervalos de confianza más amplios, coherentes con la menor extensión temporal de la serie y con el número reducido de excedencias independientes disponibles. En consecuencia, los resultados de esta etapa ponen de manifiesto una mayor sensibilidad de la estimación extremal a la extrapolación estadística, lo que aconseja interpretar sus resultados desde una perspectiva fundamentalmente comparativa.



**Figura 148.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

Fuente: Elaboración propia.

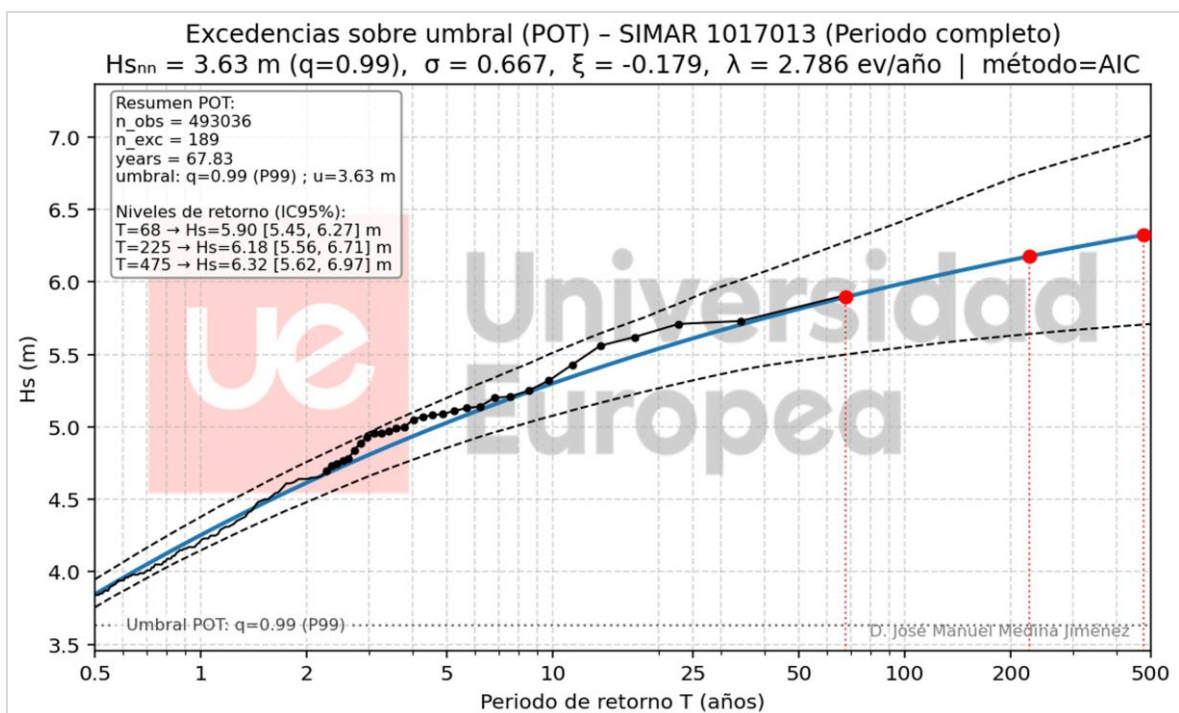


**Figura 149.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HARMONIE (Figura 149) mantiene valores de  $H_s$  para los periodos de retorno de referencia del mismo orden de magnitud que los obtenidos con WANA-HIRLAM, si bien con una ligera reducción adicional de las magnitudes extremas estimadas. Los intervalos de confianza continúan siendo amplios, reflejando de nuevo la limitada cobertura temporal de la serie. Este comportamiento refuerza la idea de que, en el ámbito del norte de Canarias (para el abanico de direcciones analizado), las etapas más recientes del sistema no muestran una mejora clara y sostenida en la caracterización del régimen extremal en términos de magnitud, sino que aportan resultados más sensibles a las hipótesis de extrapolación.

El análisis de la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 150) proporciona una función extremal intermedia entre las distintas etapas individuales. Las magnitudes de  $H_s$  asociadas a los periodos de retorno de referencia se sitúan en un rango próximo al de la boya y al de SIMAR-44, beneficiándose de un mayor tamaño muestral. No obstante, la consideración conjunta de etapas con características estadísticas distintas tiende a suavizar diferencias relevantes observadas entre etapas individuales, especialmente en la cola de la distribución, lo que debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados.



**Figura 150.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 1017013 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados del norte de Canarias indican que el régimen extremal del oleaje presenta un comportamiento relativamente estable en términos de orden de magnitud de las alturas significantes extremas, con diferencias persistentes entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA. Estas diferencias parecen asociarse principalmente a cambios introducidos en el sistema de modelización, más que a una evolución progresiva del clima marítimo.

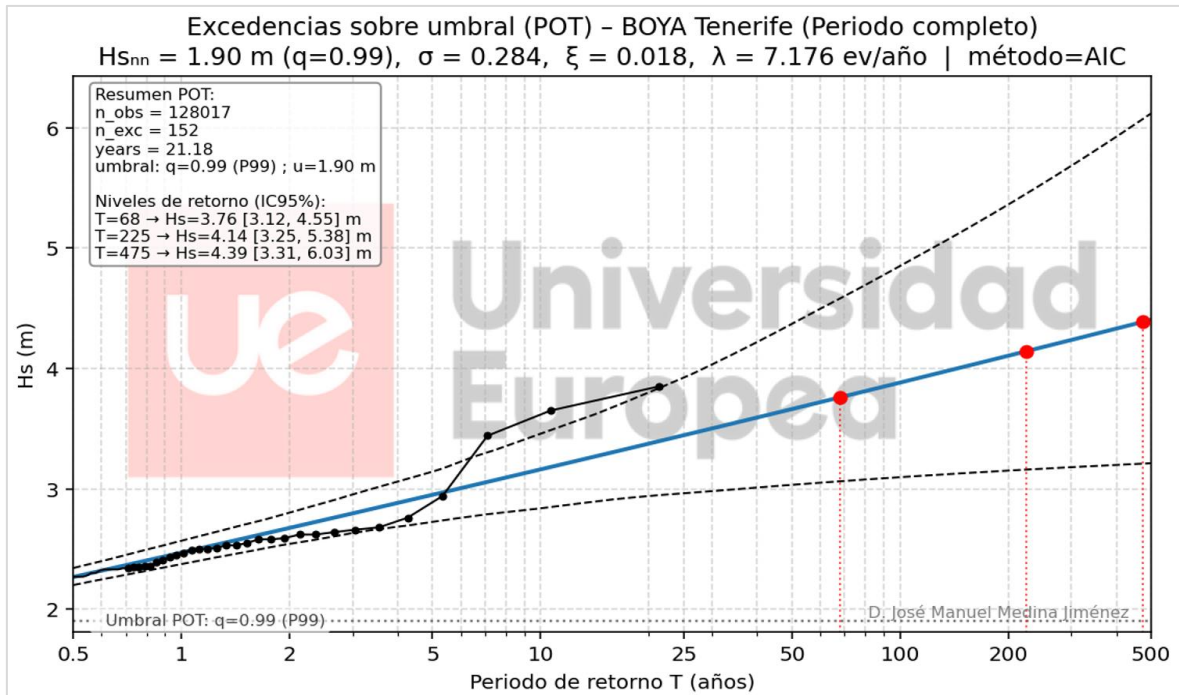
El análisis extremal abordado de forma diferenciada por etapas permite identificar la sensibilidad de las magnitudes de Hs asociadas a distintos periodos de retorno frente a las sucesivas actualizaciones del sistema, utilizando la serie SIMAR considerada en su conjunto como una referencia adicional para contextualizar los resultados, siempre desde una interpretación prudente y coherente con las limitaciones inherentes a la consideración conjunta de etapas con características estadísticas distintas.

#### **6.5.7. Sur de Canarias**

El análisis extremal del oleaje en el ámbito del sur de Canarias pone de manifiesto un régimen claramente condicionado por la protección orográfica del archipiélago frente a los temporales dominantes del Atlántico Norte, lo que se traduce en magnitudes de Hs sensiblemente inferiores a las observadas en el norte insular y, en general, en el entorno atlántico peninsular.

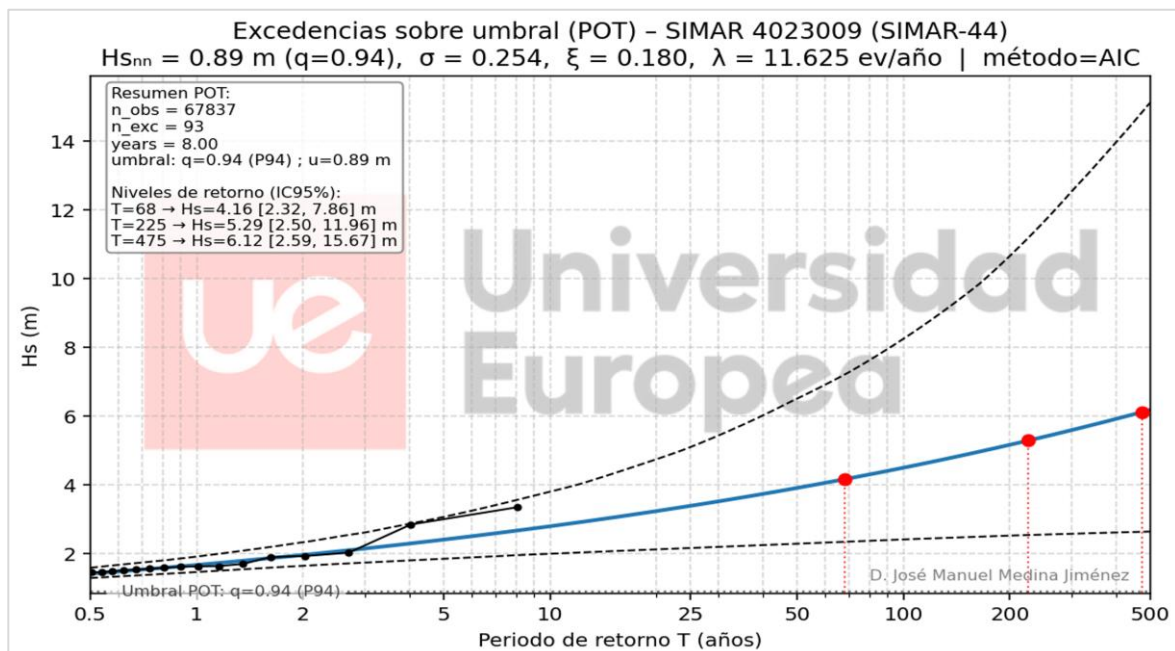
El registro instrumental de la boya de Tenerife (Figura 151) muestra una evolución de la función extremal suave y progresiva, con magnitudes de Hs moderadas incluso para periodos de retorno elevados. La forma de la curva y la amplitud contenida de los intervalos de confianza reflejan un comportamiento estadístico estable, coherente con la limitada exposición del sur de las islas a situaciones de oleaje de gran magnitud.

En lo que respecta a la etapa SIMAR-44 (Figura 152), los resultados reproducen adecuadamente el orden de magnitud del oleaje extremal de la boya, si bien presentan una tendencia a estimar valores ligeramente superiores a los derivados del registro instrumental para periodos de retorno elevados. Esta diferencia es consistente con la menor resolución espacial característica de esta etapa.



**Figura 151.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD a partir del registro instrumental de la boya de Tenerife.

Fuente: Elaboración propia.

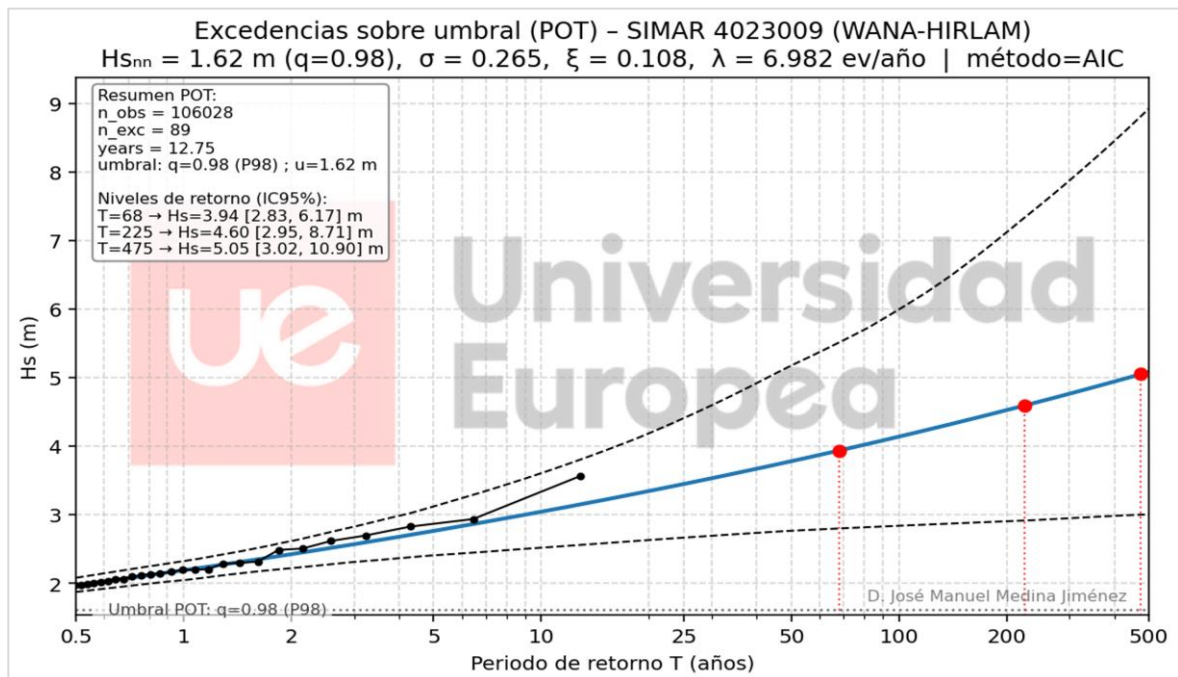


**Figura 152.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa SIMAR-44.

Fuente: Elaboración propia.

La etapa WANA-HIRLAM (Figura 153) presenta un comportamiento diferenciado respecto a SIMAR-44, no tanto por un aumento de la magnitud estimada del oleaje significativo, sino por una mayor dispersión de la estimación extremal. Para el periodo de referencia de 68 años, las magnitudes de  $H_s$  resultan comparables, e incluso ligeramente inferiores, a las obtenidas con SIMAR-44 y se sitúan por debajo de las derivadas del registro instrumental.

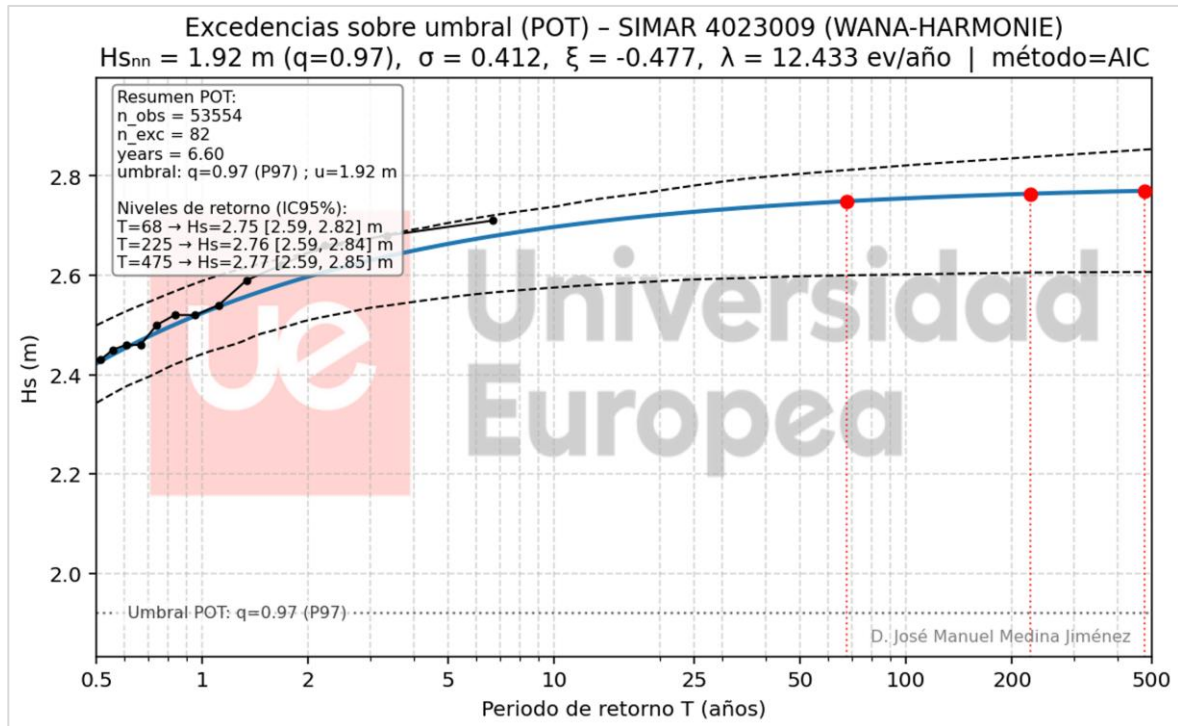
No obstante, esta etapa muestra intervalos de confianza sensiblemente más amplios, especialmente en la extrapolación hacia retornos elevados, lo que pone de manifiesto una mayor sensibilidad del ajuste extremal. Este comportamiento es coherente con la menor extensión temporal de la serie y con el número más reducido de excedencias disponibles, por lo que los resultados de WANA-HIRLAM deben interpretarse con cautela y circunscribirse a un análisis comparativo dentro del conjunto de etapas consideradas.



**Figura 153.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa WANA-HIRLAM.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE (Figura 154) presenta un comportamiento claramente diferenciado respecto a las etapas anteriores. Las magnitudes de  $H_s$  estimadas para periodos de retorno elevados resultan, en general, inferiores a las obtenidas tanto con SIMAR-44 como con WANA-HIRLAM, y se sitúan de forma sistemática por debajo de las derivadas del registro instrumental.

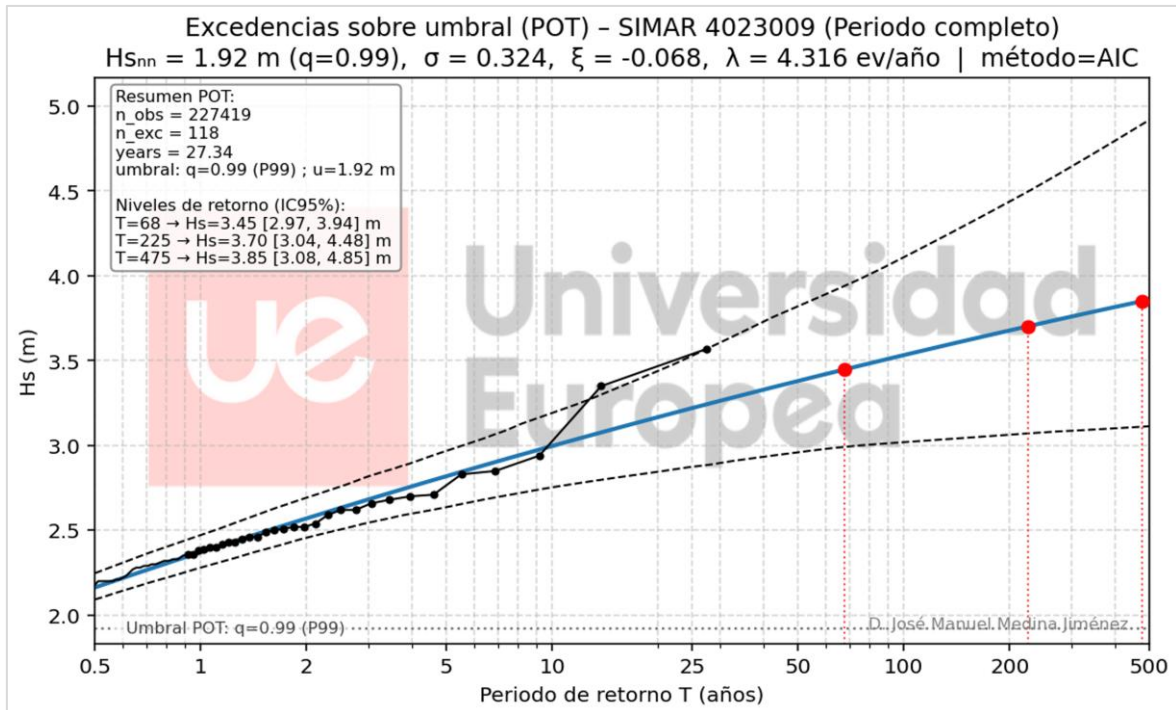


**Figura 154.** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 correspondiente a la etapa WANA-HARMONIE.

Fuente: Elaboración propia.

La función extremal asociada a esta etapa muestra un crecimiento más moderado de la magnitud de  $H_s$  con el incremento del periodo de retorno, coherente con una caracterización de los extremos dominada por oleajes de menor energía. No obstante, los intervalos de confianza se amplían de manera apreciable hacia mayores periodos, lo que refleja una elevada sensibilidad de la extrapolación estadística, vinculada a la limitada extensión temporal de la serie y al número reducido de excedencias disponibles. En consecuencia, la interpretación cuantitativa de estos resultados debe restringirse al análisis comparativo y realizarse con cautela fuera del rango mejor respaldado por los datos.

Finalmente, el análisis de la serie SIMAR considerada en su conjunto (Figura 155) proporciona una función extremal de carácter intermedio, que permite ofrecer una visión global del comportamiento del oleaje en el sur de Canarias. Esta aproximación se beneficia de un mayor tamaño muestral y resulta útil como marco de referencia para contextualizar los resultados obtenidos en cada una de las etapas de modelización analizadas de forma individual.



**Figura 155.\_** Función extremal de la altura significativa de oleaje obtenida mediante análisis POT-GPD para el punto SIMAR 4023009 considerando el periodo completo de la serie.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, la consideración conjunta de etapas con características estadísticas distintas tiende a atenuar diferencias relevantes en la magnitud de la altura significativa del oleaje, especialmente en la cola de la distribución. En consecuencia, los resultados derivados del periodo completo deben interpretarse como una referencia complementaria, y no como un sustituto del análisis extremal segmentado por etapas, que resulta más adecuado para identificar la sensibilidad de las estimaciones extremales a los cambios introducidos en el sistema de modelización.

En conjunto, los resultados indican que el régimen extremal del oleaje en el sur de Canarias presenta magnitudes sensiblemente más moderadas que las observadas en otros ámbitos del estudio, en coherencia con las características oceanográficas propias de esta región. Asimismo, las diferencias identificadas entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA se asocian principalmente a los cambios introducidos en el sistema de modelización, más que a variaciones atribuibles al propio clima marítimo.

En este contexto, el análisis extremal abordado de forma diferenciada por etapas resulta especialmente relevante para identificar la sensibilidad de las magnitudes de la altura significativa del oleaje estimadas frente a las sucesivas actualizaciones del sistema, permitiendo una interpretación técnica consistente y alineada con las limitaciones propias de cada serie analizada.

### 6.5.8. Síntesis del análisis extremal

El análisis POT-GPD aplicado de forma homogénea en todos los ámbitos considerados permite extraer conclusiones consistentes tanto sobre el contraste espacial del régimen extremal de Hs en el litoral español como sobre la sensibilidad de las magnitudes asociadas a distintos periodos de retorno frente a las configuraciones del sistema SIMAR/WANA, especialmente cuando la longitud temporal de las series es limitada.

En primer lugar, el estudio confirma un gradiente regional claro en el orden de magnitud del oleaje extremal. Los ámbitos atlánticos peninsulares, tanto el norte como el oeste, concentran las mayores magnitudes para los periodos de retorno analizados, en coherencia con su exposición a temporales del Atlántico Norte. El Mediterráneo presenta un régimen extremal más moderado en términos generales, con diferencias internas apreciables, donde el sur peninsular muestra los valores más contenidos del conjunto mediterráneo, mientras que el este peninsular, representado por Tarragona, alcanza magnitudes extremas relativamente más elevadas dentro de ese marco.

En Canarias se observa un contraste norte-sur bien definido. El norte insular presenta un régimen extremal intermedio, inferior al del Atlántico peninsular, pero con episodios energéticos relevantes asociados al swell del Atlántico Norte, mientras que el sur insular refleja la protección orográfica del archipiélago frente al oleaje del Atlántico Norte, con magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados claramente inferiores y un crecimiento más gradual.

En segundo lugar, en línea con lo identificado en el análisis de homogeneidad, los resultados confirman que las etapas SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE no pueden considerarse estadísticamente equivalentes desde el punto de vista del análisis extremal. De forma recurrente, SIMAR-44 ofrece curvas más estables y con intervalos de confianza más contenidos, lo que es coherente con su mayor extensión temporal, aunque en varios ámbitos tiende a estimar magnitudes extremas más contenidas que otras etapas y, en determinados casos, inferiores a las derivadas del registro instrumental.

Por el contrario, WANA-HIRLAM y, especialmente, WANA-HARMONIE muestran con frecuencia una mayor dispersión y sensibilidad de las estimaciones a la extrapolación estadística, derivada del menor soporte muestral tras el proceso de declustering. Esta circunstancia se traduce en intervalos de confianza muy amplios incluso para periodos de retornos de interés en ingeniería marítima, lo

que limita el uso directo de las magnitudes estimadas como valores de diseño sin un tratamiento explícito de la incertidumbre.

El comportamiento no es uniforme en todas las regiones y esa falta de uniformidad constituye en sí misma un resultado relevante. En el oeste peninsular aparece un caso particularmente singular en WANA-HARMONIE, con magnitudes sensiblemente superiores y una incertidumbre elevada. En el sur peninsular, WANA-HIRLAM incrementa de forma notable los valores extremos y la pendiente de la función, mientras que WANA-HARMONIE se aproxima más a la referencia instrumental para el retorno de referencia. En el este peninsular se observa un incremento progresivo de magnitudes desde SIMAR-44 hacia HIRLAM y HARMONIE, acompañado de una pérdida de robustez en las etapas más recientes, reflejada en bandas de incertidumbre más abiertas. En el norte de Canarias, las etapas recientes tienden a reducir las magnitudes extremas frente a SIMAR-44 y frente a la referencia instrumental, al tiempo que aumenta la incertidumbre asociada a la extrapolación.

En conjunto, estas respuestas dispares apuntan a que las diferencias se explican mejor por cambios estructurales del sistema de modelización, incluyendo resolución, forzamientos, parametrizaciones y condiciones de contorno, que por una evolución climática gradual y coherente del oleaje extremo.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren varias consideraciones relevantes. La mezcla directa de etapas para la estimación extremal, sin un análisis previo de su coherencia, puede enmascarar diferencias significativas en la cola de la distribución, precisamente donde se condiciona el dimensionamiento. Asimismo, resulta aconsejable priorizar periodos de retorno compatibles con el soporte temporal de las series, dado que la incertidumbre crece de forma no lineal con  $T$ , siendo este efecto especialmente crítico en etapas de corta duración. En ámbitos donde HIRLAM o HARMONIE presentan pendientes muy sensibles o bandas de confianza amplias, el valor central de la función extremal pierde significado si no se interpreta conjuntamente con su rango plausible y con su coherencia relativa respecto a SIMAR-44 y al registro instrumental.

En síntesis, el análisis extremal pone de manifiesto que las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA pueden modificar de forma apreciable la caracterización de los eventos más energéticos y que ese impacto no responde a una tendencia única en todo el territorio. Por ello, la aproximación más sólida para extraer conclusiones operativas consiste en comparar los resultados por etapas de modelización, utilizar la serie completa como referencia contextual y apoyarse en el registro instrumental para contextualizar órdenes de magnitud, manteniendo una interpretación prudente cuando la extrapolación se apoya en un número limitado de excedencias independientes.

## 6.6. Patrones generales del comportamiento del oleaje a lo largo del litoral español

El análisis conjunto de los resultados obtenidos en los estadísticos básicos del oleaje, el contraste estadístico entre series y el estudio del régimen extremal permite identificar una serie de patrones generales en el comportamiento del oleaje a lo largo del litoral español, tanto desde el punto de vista espacial como en relación con las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización SIMAR/WANA. La lectura integrada de estos resultados aporta una visión coherente del clima marítimo, más allá del análisis aislado de cada región o metodología.

**Tabla 5.\_** Síntesis regional de los patrones del régimen de oleaje y del comportamiento del sistema SIMAR/WANA en el litoral español.

Zona	Energía	Coherencia modelo-boya	Sensibilidad Extremal	Interpretación técnica	Riesgo Principal
<b>Norte Peninsular (Zona I)</b>	<b>Muy alta.</b> Exposición directa y sostenida a temporales del Atlántico Norte.	<b>Alta.</b> Buena coherencia general entre configuraciones del sistema y registros instrumentales. SIMAR-44 reproduce razonablemente el régimen medio, aunque con ligera tendencia a infraestimar la cola alta de la distribución.	<b>Moderada a alta.</b> Las estimaciones extremales muestran diferencias apreciables entre configuraciones, destacando valores superiores en WANA-HIRLAM para retornos altos.	El sistema de modelización captura razonablemente el clima marítimo regional, aunque con tendencia conservadora en eventos extremos.	<b>Moderado.</b> Ligera tendencia a infraestimar los extremos, especialmente en SIMAR-44 y en la cola alta de la distribución.
<b>Oeste Peninsular (Zona II)</b>	<b>Muy alta.</b> Estados de mar energéticos y recurrentes asociados al Atlántico Norte.	<b>Moderada.</b> Se observa evidencia de discontinuidad estadística entre configuraciones del sistema, con divergencias relevantes entre etapas históricas y recientes.	<b>Alta.</b> Las estimaciones del régimen extremal muestran dependencia significativa de la configuración del modelo, especialmente en Hs.	La estimación del régimen extremal muestra una fuerte dependencia de la configuración del modelo, con incrementos significativos en configuraciones recientes.	<b>Alto.</b> Incertidumbre relevante en la estimación de extremos, especialmente en configuraciones recientes, por la divergencia entre etapas y la menor longitud de algunas series extremales.
<b>Sur Peninsular (Zona III)</b>	<b>Moderada.</b> Régimen de oleaje condicionado por generación local del viento y fetch limitado del Mediterráneo meridional.	<b>Baja a moderada.</b> Menor estabilidad entre configuraciones del sistema. En los casos analizados, SIMAR-44 tiende a valores inferiores respecto al registro instrumental, mientras que las configuraciones posteriores introducen cambios apreciables en la distribución.	<b>Alta.</b> WANA-HIRLAM introduce incrementos significativos en los percentiles altos respecto a SIMAR-44 y WANA-HARMONIE.	El régimen de oleaje, dominado por generación local, presenta mayor sensibilidad a modificaciones del modelo.	<b>Alto.</b> Amplia incertidumbre en la estimación de extremos en configuraciones recientes dentro de un régimen de energía media y elevada variabilidad relativa.
<b>Este Peninsular (Zona IV)</b>	<b>Moderada a moderadamente alta.</b> Influencia de temporales de levante y marcada variabilidad direccional.	<b>Moderada.</b> Existe una transición estadística entre configuraciones. SIMAR-44 y WANA-HIRLAM muestran comportamientos relativamente próximos, mientras que WANA-HARMONIE introduce un desplazamiento hacia valores superiores, especialmente en percentiles altos.	<b>Alta.</b> WANA-HARMONIE desplaza hacia valores superiores los percentiles altos de la distribución respecto a configuraciones anteriores.	Las actualizaciones del modelo introducen desplazamientos apreciables en percentiles altos (P90-P99).	<b>Alto.</b> Riesgo de inconsistencia en la estimación de extremos si se combinan directamente configuraciones distintas sin análisis previo de coherencia.
<b>Norte de Canarias (Zona V)</b>	<b>Intermedia a alta.</b> Dominio de swell del Atlántico Norte.	<b>Moderada a alta.</b> Coherencia razonable entre configuraciones del modelo y registro instrumental. Las diferencias en Hs son contenidas, aunque Tp muestra mayor dispersión y cierta sensibilidad entre etapas.	<b>Moderada.</b> Los percentiles extremos de Hs muestran estabilidad relativa entre configuraciones, sin divergencias tan marcadas como en otras regiones más sensibles.	El régimen dominado por swell atlántico se reproduce de forma aceptable por el sistema de modelización.	<b>Moderado.</b> Incertidumbre regional asociada a la limitada disponibilidad de registros instrumentales y a discrepancias en la caracterización espectral, especialmente en Tp.
<b>Sur de Canarias (Zona VI)</b>	<b>Baja a moderada.</b> Régimen parcialmente protegido frente al swell dominante del Atlántico Norte por efecto de abrigo insular	<b>Limitada.</b> Coherencia reducida entre resultados modelizados y registro instrumental. Los modelos no representan adecuadamente determinados episodios de largo periodo observados en boya, especialmente en Tp.	<b>Alta.</b> Las configuraciones recientes modifican notablemente la estimación de percentiles altos, reflejando una elevada sensibilidad del régimen extremal a la configuración del modelo.	El régimen parcialmente protegido por abrigo insular presenta dificultades de representación en los modelos. La comparación con registros instrumentales indica que determinados episodios de swell de largo periodo observados en boya no quedan adecuadamente reflejados en las series modelizadas.	<b>Muy alto.</b> Elevada incertidumbre en la estimación regional de extremos y riesgo de infrarrepresentación de episodios de swell de largo periodo si el análisis se apoya exclusivamente en las series modelizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Desde una perspectiva espacial, el litoral español presenta un gradiente claro y robusto en términos de energía del oleaje, que se manifiesta de forma consistente tanto en las variables medias como en el comportamiento extremal. Los ámbitos atlánticos peninsulares, particularmente el norte y el oeste, concentran los mayores valores de altura significativa, con una mayor frecuencia de estados de mar energéticos y una cola extremal más desarrollada. Este comportamiento es coherente con la exposición directa a los temporales del Atlántico Norte y se refleja de manera estable en los registros instrumentales y en las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA, pese a las diferencias cuantitativas entre ellas.

En contraste, el litoral mediterráneo presenta un régimen de oleaje más moderado en términos generales, con menores alturas significativas medias y extremas. No obstante, el análisis pone de manifiesto diferencias internas relevantes dentro de este ámbito. El sur peninsular se caracteriza por un régimen claramente más contenido, con funciones extremas suaves y una menor dispersión estadística, mientras que el este peninsular muestra valores extremos relativamente más elevados dentro del contexto mediterráneo, asociados a episodios de levante y a una mayor variabilidad direccional. Estas diferencias quedan reflejadas tanto en los estadísticos básicos como en la caracterización extremal, lo que confirma que el Mediterráneo no puede tratarse como un bloque homogéneo desde el punto de vista del oleaje.

El archipiélago canario constituye un ámbito singular dentro del conjunto del litoral español. El contraste norte-sur identificado en los resultados es especialmente acusado y coherente desde el punto de vista físico. El norte de las islas presenta un régimen intermedio, con oleajes significativos asociados a la llegada de energía del Atlántico Norte, aunque atenuados respecto al litoral peninsular. Por el contrario, el sur de Canarias muestra de forma consistente un régimen claramente más moderado, dominado por la protección orográfica del archipiélago frente a los temporales dominantes. Este patrón se reproduce tanto en los valores medios como en el comportamiento extremal, y queda bien capturado por los registros instrumentales, lo que refuerza la solidez de esta interpretación.

Más allá del contraste espacial, el análisis integrado evidencia que las sucesivas etapas del sistema SIMAR/WANA introducen diferencias apreciables en la caracterización del oleaje, tanto en términos de altura significativa como de periodo asociado. En los estadísticos básicos se observa que las actualizaciones del sistema pueden modificar de forma perceptible las medias, las desviaciones y los percentiles altos, mientras que el contraste estadístico confirma la no homogeneidad entre etapas en numerosos casos. Estas diferencias no siguen un patrón único ni uniforme en todo el

litoral, lo que sugiere que no responden a una evolución climática progresiva, sino a cambios estructurales en el propio sistema de modelización.

El análisis del régimen extremal refuerza esta conclusión. La etapa SIMAR-44, caracterizada por una mayor longitud temporal, ofrece en general estimaciones más estables y con menor dispersión, aunque en algunos ámbitos tiende a proporcionar magnitudes extremales más contenidas. Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE, pese a incorporar mejoras en resolución y forzamientos, presentan con frecuencia una mayor sensibilidad a la extrapolación estadística, asociada al reducido soporte muestral tras el proceso de declustering. Esta sensibilidad se traduce en intervalos de confianza amplios y en respuestas extremales dispares según la región, lo que limita el uso directo de estas estimaciones sin una evaluación crítica de la incertidumbre asociada.

La comparación entre modelos y registros instrumentales pone de manifiesto que las boyas desempeñan un papel clave como referencia independiente para contextualizar órdenes de magnitud, tanto en términos medios como extremales. Sin embargo, los resultados también confirman que no puede establecerse una correspondencia directa y automática entre una etapa concreta del sistema SIMAR/WANA y los registros instrumentales, ya que las diferencias observadas dependen del ámbito geográfico, del periodo analizado y del rango de oleaje considerado. Esta constatación refuerza la necesidad de una interpretación integrada y prudente de los resultados, especialmente cuando se emplean con fines de diseño o evaluación del riesgo.

En conjunto, los patrones identificados a lo largo del litoral español evidencian que el comportamiento del oleaje está controlado por una combinación de factores de gran escala, asociados a la exposición oceánica y a la configuración regional, y por factores metodológicos ligados a la evolución del sistema de modelización. La integración de los análisis de Hs y Tp, junto con el contraste estadístico y el estudio del régimen extremal, permite concluir que las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA pueden modificar de manera apreciable la caracterización del oleaje, sin que ello implique necesariamente un cambio real en el clima marítimo.

Desde una perspectiva aplicada, estos resultados subrayan la importancia de adaptar el análisis del oleaje al contexto regional, de evitar la mezcla indiscriminada de etapas de modelización en estudios extremales y de considerar de forma explícita la incertidumbre asociada a las estimaciones, especialmente en series de corta duración. Este enfoque integrado proporciona una base sólida para la interpretación técnica del oleaje a lo largo del litoral español y constituye un

marco coherente para futuras aplicaciones en ingeniería marítima, gestión costera y evaluación del riesgo.

### **6.7. Caso de estudio: comportamiento del oleaje en el entorno insular canario**

El análisis del régimen de oleaje en el entorno insular canario se aborda en este apartado como un caso de estudio específico, con el objetivo de profundizar en las particularidades regionales que condicionan tanto la caracterización estadística del oleaje como la interpretación de los resultados derivados de los modelos numéricos del sistema SIMAR/WANA.

La elección de Canarias como ámbito de análisis diferenciado responde a la combinación de varios factores de relevancia ingenieril y metodológica. Por un lado, el archipiélago presenta una configuración geográfica y orográfica singular, que modula de forma significativa la propagación del oleaje desde aguas abiertas hasta las zonas costeras. Por otro, esta singularidad convierte al entorno canario en un banco de prueba especialmente exigente para evaluar la coherencia y la robustez de las distintas etapas de modelización, así como la adecuación de los registros instrumentales disponibles como referencia.

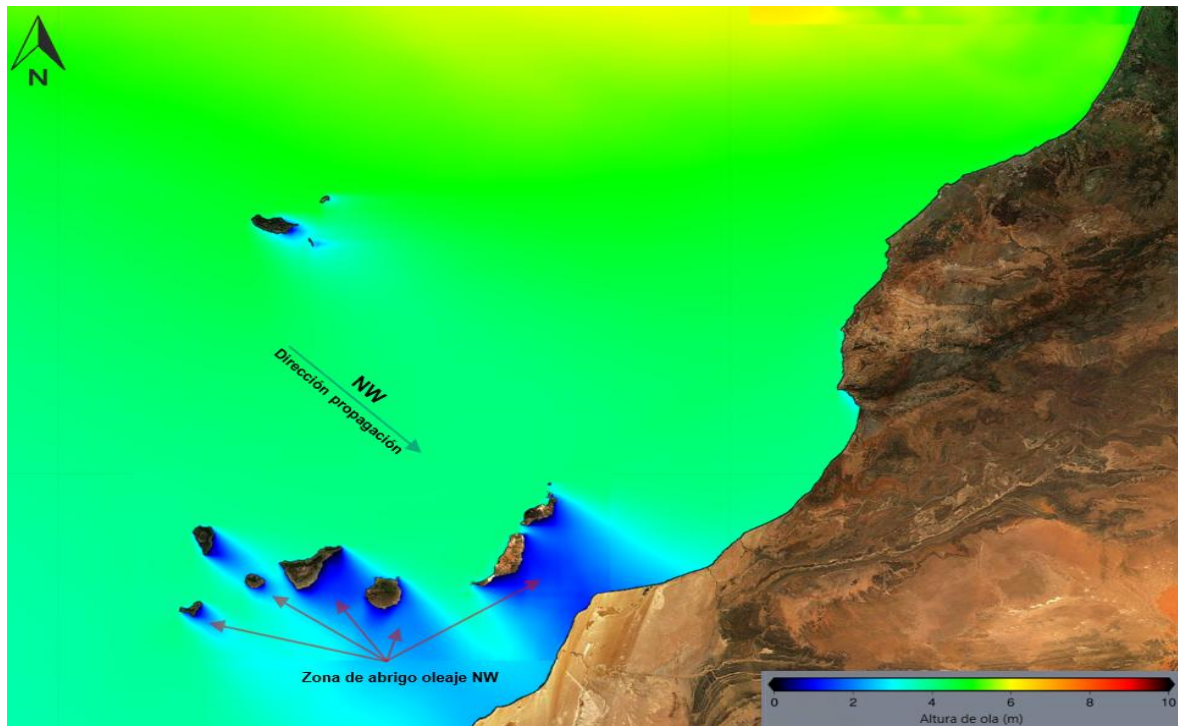
En este contexto, el análisis desarrollado en los apartados anteriores pone de manifiesto que los patrones identificados a escala peninsular no son directamente extrapolables al ámbito insular canario. Por ello, resulta necesario un tratamiento específico que permita interpretar de forma adecuada las diferencias observadas entre el norte y el sur de las islas, así como la respuesta diferenciada de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA en un entorno caracterizado por una elevada complejidad oceanográfica y geomorfológica.

#### **6.7.1. Singularidad del entorno canario**

El entorno insular canario presenta una singularidad oceanográfica y geomorfológica que condiciona de manera determinante el comportamiento del oleaje y su caracterización estadística. A diferencia del litoral peninsular, donde la exposición al oleaje dominante puede considerarse relativamente continua a escala regional, el archipiélago canario actúa como un sistema fragmentado de islas de elevada topografía, capaz de modificar sustancialmente los campos de oleaje incidentes.

Desde el punto de vista de la generación y propagación del oleaje, Canarias se encuentra expuesta de forma preferente a los temporales del Atlántico Norte, asociados a borrascas profundas en latitudes medias y altas. Estos temporales generan mar de fondo de largo periodo y elevada energía

que inciden principalmente sobre las fachadas septentrionales del archipiélago. Sin embargo, la llegada de estos estados de mar a las distintas costas insulares está fuertemente condicionada por la orientación de cada isla, su relieve orográfico y la interacción entre islas próximas, dando lugar a patrones complejos de sombra, refracción y difracción del oleaje que generan contrastes espaciales muy acusados en escalas relativamente reducidas.



**Figura 156.** \_ Sombra orográfica del archipiélago canario sobre el oleaje incidente del Atlántico Norte. La figura ilustra marcado efecto de abrigo y sombra orográfica inducido por el archipiélago canario sobre el oleaje de componente NW del Atlántico Norte, fenómeno clave para interpretar tanto las diferencias espaciales observadas en las magnitudes de  $H_s$  como las discrepancias entre etapas de modelización y registros instrumentales en el entorno insular.

Fuente: Elaboración propia a partir del visor Portus-Puertos del Estado.

No obstante, el clima marítimo canario no puede interpretarse únicamente en términos de esta exposición dominante. De forma más esporádica, se registran episodios de oleaje procedente de sectores meridionales, asociados a sistemas de generación en el Atlántico Sur y caracterizados generalmente por frentes de oleaje de largo periodo y menor frecuencia de ocurrencia. Aunque estos eventos no controlan el régimen medio del oleaje, pueden incidir de manera preferente sobre determinados tramos del litoral sur y oriental de las islas.

Este tipo de situaciones resulta particularmente significativo en el contexto de la modelización numérica. Los modelos del sistema SIMAR/WANA, concebidos para proporcionar una cobertura homogénea a escala regional y nacional, están principalmente forzados y calibrados para reproducir el clima marítimo dominante del hemisferio norte. En consecuencia, la representación de oleajes

de procedencia meridional y de baja frecuencia puede quedar limitada o infrarepresentada, especialmente en ámbitos insulares protegidos frente a los temporales dominantes. Este aspecto debe tenerse en cuenta al interpretar discrepancias puntuales entre registros instrumentales y resultados modelizados en determinadas localizaciones del archipiélago.

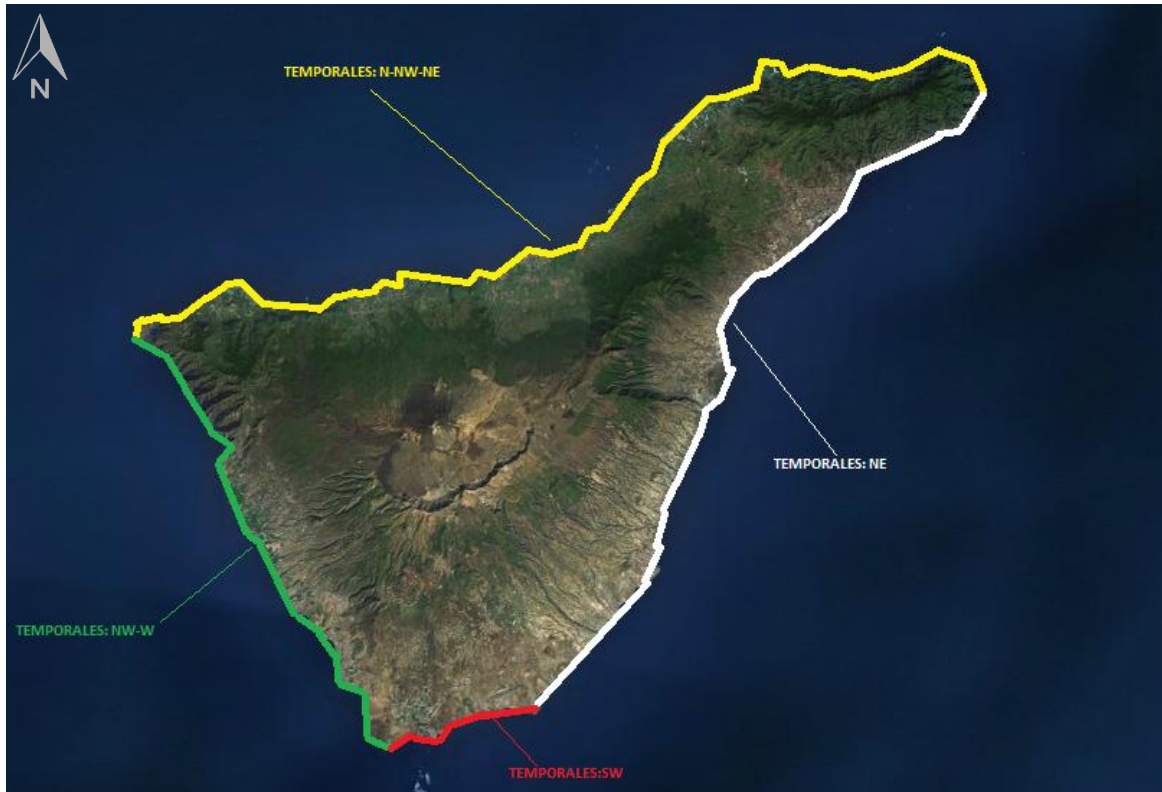


Figura 157.\_ Influencia de la orografía insular de Tenerife en la exposición del litoral a los temporales del Atlántico Norte y Sur.

Fuente: Elaboración propia.

La asimetría norte-sur del régimen de oleaje en Canarias no afecta únicamente a la magnitud media del oleaje, sino también a la estructura de su variabilidad y a la frecuencia de ocurrencia de estados de mar severos. En consecuencia, el régimen extremal del oleaje no puede considerarse homogéneo ni a escala regional ni, en muchos casos, dentro de una misma isla, lo que introduce una complejidad adicional en su caracterización estadística y en la interpretación de los resultados derivados de modelos numéricos de ámbito amplio.

Desde el punto de vista de la modelización y del análisis estadístico, esta singularidad plantea retos específicos. La adecuada representación de los procesos de transformación del oleaje en el entorno canario depende de forma crítica de la resolución espacial, del dominio de cálculo y de la correcta definición de las condiciones de contorno en aguas profundas. Pequeñas variaciones en estos

elementos pueden traducirse en diferencias apreciables en la estimación de la altura significativa del oleaje, especialmente en el rango de los eventos más energéticos.

A ello se suma la limitada disponibilidad y distribución espacial de registros instrumentales en Canarias en comparación con el ámbito peninsular, lo que refuerza la necesidad de utilizar las boyas como una referencia instrumental para contextualizar órdenes de magnitud, más que como un patrón absoluto frente al cual evaluar de forma directa cada etapa de modelización. Esta circunstancia obliga a adoptar un enfoque interpretativo prudente, especialmente cuando se analizan magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados.

En conjunto, la singularidad del entorno canario convierte a este ámbito en un caso de estudio particularmente relevante para analizar la sensibilidad del régimen de oleaje, tanto medio como extremal, a las sucesivas actualizaciones del sistema SIMAR/WANA. Al mismo tiempo, pone de manifiesto la necesidad de adoptar criterios de análisis e interpretación específicos, ajustados a la complejidad geomorfológica y oceanográfica del archipiélago y a las limitaciones inherentes tanto de los modelos numéricos como de los registros instrumentales disponibles.

### **6.7.2. Resultados estadísticos y extremales en Canarias**

El análisis desarrollado para Canarias integra, de forma coherente con el resto del trabajo, tres planos de lectura complementarios. Por un lado, la caracterización estadística básica de  $H_s$  y  $T_p$ , basada en medias, desviaciones típicas, percentiles y funciones de distribución acumulada, permite evaluar la estabilidad del régimen medio y la estructura de la parte alta de las distribuciones. Por otro, el contraste estadístico modelo-boya cuantifica la coherencia temporal y la magnitud de los desajustes entre series numéricas y registros instrumentales. Finalmente, el análisis extremal POT-GPD aporta una lectura específica sobre el comportamiento de la cola alta en términos de magnitudes de  $H_s$  asociadas a periodos de retorno de interés en ingeniería marítima, en particular para el retorno de referencia empleado en el estudio.

#### **6.7.2.1. Norte de Canarias**

En el norte de Canarias, la comparación entre la boya de Gran Canaria y el punto SIMAR 1017013 pone de manifiesto, en primer término, una notable estabilidad del régimen medio observado. La boya mantiene medias de  $H_s$  muy estables entre etapas, con desviaciones típicas similares y sin una señal temporal persistente. En  $T_p$ , la serie instrumental presenta mayor variabilidad entre periodos, especialmente en la parte alta de la distribución, aunque sin un patrón ordenado ni progresivo, lo

que es coherente con la propia sensibilidad del periodo de pico a la ocurrencia puntual de temporales de oleaje largo y con la menor cobertura de la etapa SIMAR-44 por inicio del registro direccional en 2003.

Frente a esta estabilidad del registro instrumental, las series modelizadas muestran una respuesta diferenciada. En Hs, las diferencias entre etapas son moderadas y se concentran en percentiles altos, donde SIMAR-44 tiende a situarse por encima de WANA-HIRLAM, mientras que WANA-HARMONIE adopta un comportamiento intermedio en el tramo alto. Respecto al Tp, el modelo muestra cambios más estructurados, con un incremento progresivo hacia etapas recientes, particularmente marcado en WANA-HARMONIE, sin que exista una señal equivalente en el registro instrumental.

En conjunto, este contraste apoya la interpretación de que las diferencias entre etapas en el norte insular responden principalmente a las actualizaciones del sistema de modelización, y no a una evolución estructural del clima marítimo observado.

El contraste estadístico modelo-boya para Hs en el norte de Canarias refuerza dicha lectura. La serie completa ofrece correlaciones elevadas y un sesgo medio reducido y ligeramente negativo, evidenciando una tendencia leve a la infraestimación. Entre etapas, SIMAR-44 y WANA-HIRLAM muestran comportamientos similares, sin una reducción clara de la dispersión, mientras que WANA-HARMONIE presenta el ajuste más consistente, con mejoras simultáneas en correlación, sesgo y dispersión. Esta evolución sugiere que las configuraciones más recientes representan mejor la variabilidad temporal relativa de Hs en un entorno oceánico abierto y energéticamente activo.

Para Tp, sin embargo, el desempeño es claramente menos robusto. En todas las etapas se mantiene una dispersión elevada y la correspondencia punto a punto es limitada. Aunque WANA-HARMONIE mejora la coherencia temporal relativa, dicha mejora coexiste con sesgos apreciables y errores elevados, lo que limita el uso directo de Tp en lecturas ingenieriles basadas en magnitudes absolutas.

La lectura extremal del norte de Canarias mantiene coherencia con los resultados estadísticos previos. La boya de Gran Canaria proporciona una referencia instrumental estable, con colas finitas y magnitudes de Hs para el retorno de referencia en un rango moderado respecto a los sectores atlánticos peninsulares. La etapa SIMAR-44 reproduce adecuadamente el orden de magnitud, con una ligera tendencia a valores superiores de Hs para periodos de retorno de referencia y bandas de incertidumbre relativamente contenidas. En cambio, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE tienden

a reducir las magnitudes de Hs asociadas al periodo de referencia respecto a SIMAR-44 y también respecto a la boya, mostrando además bandas de incertidumbre más amplias, coherentes con su menor duración. La serie SIMAR considerada en su conjunto ofrece una función extremal intermedia, útil como marco global, aunque con la consecuencia esperable de suavizar parte de las diferencias entre etapas en la zona alta de la distribución.

### **6.7.2.2. Sur de Canarias**

En el sur de Canarias, la comparación entre la boya de Tenerife Sur y el punto SIMAR 4023009 muestra un comportamiento distinto, coherente con la protección orográfica y el apantallamiento insular. La boya presenta un régimen de Hs estable entre etapas, con cambios moderados en percentiles y sin desplazamientos persistentes. En lo que respecta al Tp, la variabilidad es mayor en percentiles altos, pero sin direccionalidad temporal clara, circunstancia que de nuevo se ve condicionada por la menor cobertura del subperiodo SIMAR-44 por inicio del registro direccional en 2003.

En contraste, las series modelizadas evidencian cambios claros entre etapas que afectan no solo a los extremos, sino al conjunto de la distribución. La Hs del modelo aumenta de manera marcada desde SIMAR-44 hacia WANA-HIRLAM y, de forma adicional, hacia WANA-HARMONIE, con incrementos visibles en medias, dispersión y percentiles altos. Esta respuesta es consistente con un cambio estructurado introducido por las sucesivas configuraciones del sistema. Respecto al Tp, las diferencias entre etapas también son relevantes.

El contraste estadístico modelo-boya para Hs en el sur insular muestra, de forma coherente, diferencias importantes entre etapas. SIMAR-44 es la configuración con peor comportamiento relativo, con mayor dispersión y sesgo negativo más acusado, mientras que WANA-HIRLAM reduce el sesgo y mejora el equilibrio en magnitud, aunque sin un incremento significativo en coherencia temporal. WANA-HARMONIE presenta el desempeño más consistente, con aumento de correlación y reducción de dispersión, situándose como la etapa con mejor correspondencia estadística frente al registro instrumental para Hs. Para Tp, sin embargo, el contraste es desfavorable en todas las etapas. La coherencia temporal es baja, la dispersión se mantiene elevada y el sesgo tiende a ser negativo, sin que las actualizaciones del sistema se traduzcan en una mejora progresiva y sostenida. Esta limitación debe considerarse en la interpretación de resultados cuando Tp sea un parámetro relevante para aplicaciones ingenieriles.

En términos extremales, el sur de Canarias confirma un régimen moderado, con una función extremal suave y bandas de incertidumbre contenidas en el rango de los periodos de retorno de interés. SIMAR-44 reproduce el orden de magnitud, con ligera tendencia a valores superiores a los instrumentales para periodos altos. WANA-HIRLAM se diferencia principalmente por una mayor dispersión y por magnitudes comparables o ligeramente inferiores a SIMAR-44 para los periodos de referencia, manteniéndose por encima de la boya y mostrando bandas más amplias. WANA-HARMONIE ofrece magnitudes inferiores a las etapas anteriores y por debajo del registro instrumental, con crecimiento más moderado de Hs al aumentar el periodo de retorno y una incertidumbre que se amplía hacia retornos mayores. La serie completa vuelve a situarse como referencia global intermedia, útil para contextualizar el conjunto, pero con la consecuencia de atenuar diferencias relevantes entre etapas en la parte alta.

### **6.7.2.3. Análisis global**

De forma integrada, los resultados obtenidos para Canarias confirman dos ideas clave que definen el carácter del archipiélago como caso de estudio específico dentro del conjunto del litoral español.

En primer lugar, se evidencia una diferenciación espacial norte-sur muy marcada, tanto en magnitud como en el carácter del régimen de oleaje. Esta asimetría responde de forma directa a la exposición desigual a los temporales del Atlántico Norte y a la protección orográfica insular, y se manifiesta de manera consistente en los estadísticos básicos, en el contraste modelo-boya y en la caracterización del régimen extremal.

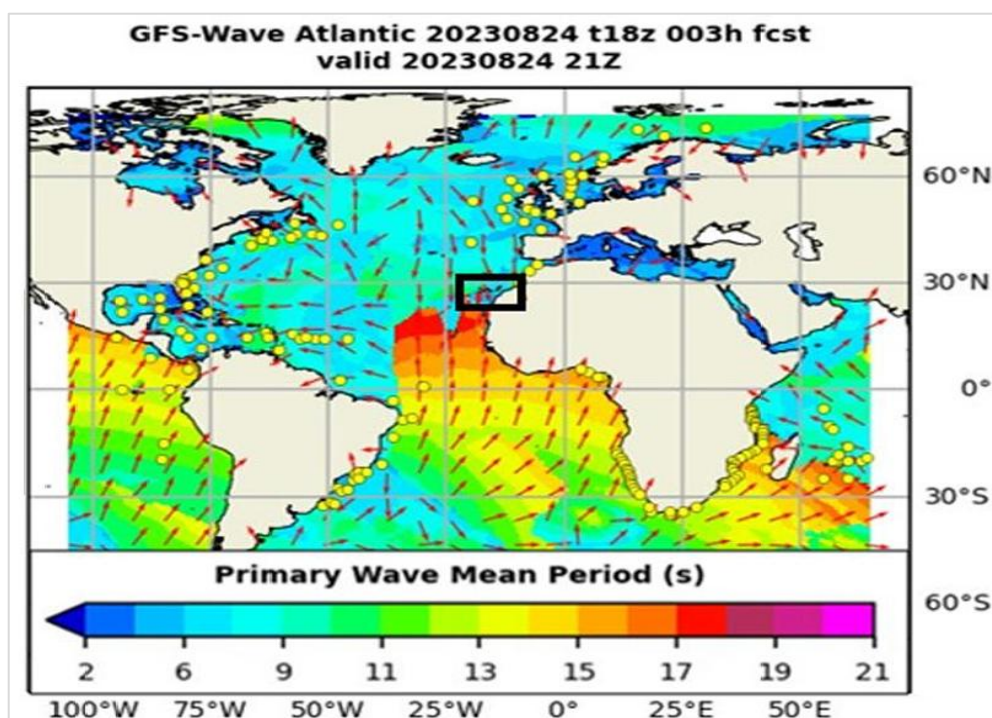
En segundo lugar, aun bajo una señal instrumental globalmente estable, las series modelizadas muestran respuestas diferenciadas entre etapas del sistema SIMAR/WANA que no son uniformes. Estas diferencias afectan de manera apreciable a la caracterización estadística de Hs y Tp y a la estimación extremal de Hs, poniendo de manifiesto la sensibilidad del régimen modelizado a las sucesivas actualizaciones del sistema, especialmente en un entorno insular complejo como el canario.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que Canarias constituye un ámbito especialmente sensible a los cambios introducidos por las sucesivas configuraciones del sistema de modelización, lo que refuerza su idoneidad como caso de estudio para analizar la coherencia temporal de los registros de oleaje y la robustez de su uso en aplicaciones de ingeniería marítima.

### 6.7.3. Influencia del límite del dominio de modelización

La posición del archipiélago canario en el Atlántico nororiental, próxima al límite meridional del dominio de modelización empleado en el sistema SIMAR/WANA (Figura 10), introduce condicionantes específicos en la representación numérica del oleaje que no están presentes en el ámbito peninsular. Esta circunstancia resulta especialmente relevante para la caracterización de estados de mar asociados a oleajes de largo recorrido, tanto en términos estadísticos como extremales, y debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio.

El sistema SIMAR/WANA se apoya en dominios de cálculo diseñados para ofrecer una cobertura homogénea a escala regional y nacional, con especial énfasis en los temporales dominantes del Atlántico Norte. En este marco, la representación del oleaje incidente en Canarias se ve condicionada por la cercanía del borde del dominio en latitudes bajas, lo que limita la adecuada generación y propagación de frentes de oleaje procedentes de regiones alejadas del hemisferio sur o de trayectorias transoceánicas de muy largo recorrido.



**Figura 158.** Salidas del visor del modelo Wavewatch III (Forecasting para el para el día 24 de agosto de 2023, concretamente para las horas 18:00 y 21:00 (hora Zulu). La situación de las Islas Canarias ha sido marcada con un rectángulo negro. Se observa la llegada de oleaje al Archipiélago Canario, desde el hemisferio sur, con periodos de pico entorno a los 18 s.

Fuente: Elaboración propia a partir de las salidas del visor del WW3: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>

Desde un punto de vista físico-numérico, la proximidad al límite del dominio implica que determinadas combinaciones de dirección y periodo quedan insuficientemente desarrolladas en el modelo, ya sea por una generación incompleta del oleaje en aguas profundas o por una representación simplificada de las condiciones de contorno. Este efecto no se manifiesta de forma uniforme en todas las variables ni en todas las zonas del archipiélago, sino que interactúa con la compleja orografía insular, la disposición relativa entre islas y la orientación local del litoral, amplificando las diferencias espaciales entre sectores expuestos y sectores protegidos.

Los resultados obtenidos en los apartados previos refuerzan esta interpretación. En Canarias, y de forma más acusada que en el ámbito peninsular, las diferencias entre etapas de modelización se manifiestan no solo en la magnitud de la altura significativa del oleaje, sino también en la representación del periodo de pico y en la dispersión asociada a ambas variables. En particular, la menor robustez estadística observada en algunas etapas recientes del sistema, junto con la elevada sensibilidad de las estimaciones extremas a la extrapolación, es coherente con un contexto en el que el dominio de cálculo no siempre permite capturar adecuadamente los estados de mar más energéticos o de mayor desarrollo temporal que pueden afectar al archipiélago.

Este condicionante resulta especialmente relevante en el sur de Canarias, donde la protección orográfica frente a los temporales dominantes del Atlántico Norte reduce la frecuencia de oleajes energéticos, pero no excluye la llegada ocasional de episodios asociados a trayectorias menos frecuentes o a forzamientos alejados del dominio principal de generación del modelo. En estos casos, pequeñas diferencias en la definición del dominio, en las condiciones de contorno o en la resolución espacial pueden traducirse en variaciones apreciables en la caracterización estadística y extremal del oleaje, incluso cuando el régimen medio observado por las boyas permanece globalmente estable.

La literatura existente sobre el clima marítimo en Canarias ha puesto de manifiesto esta singularidad, destacando que la representación del oleaje en el archipiélago requiere una interpretación específica y cautelosa cuando se emplean modelos regionales de gran escala, especialmente para aplicaciones relacionadas con oleaje extremo y diseño marítimo (González et al.; Pérez et al.). En este sentido, los resultados del presente estudio son consistentes con dichas aportaciones y aportan evidencia empírica adicional basada en el contraste entre etapas oficiales de modelización y registros instrumentales.

En conjunto, la influencia del límite del dominio de modelización constituye un factor estructural que condiciona la caracterización del oleaje en Canarias y que ayuda a explicar parte de la heterogeneidad observada entre etapas del sistema SIMAR/WANA. Este aspecto no invalida el uso de estas bases de datos en el ámbito insular, pero sí refuerza la necesidad de interpretar los resultados dentro de un marco técnico adecuado, considerando explícitamente las limitaciones asociadas al dominio de cálculo y evitando extrapolaciones directas desde otros ámbitos geográficos con condiciones de contorno más favorables.

#### **6.7.4. Implicaciones para el análisis del oleaje extremo en Canarias**

Los resultados obtenidos en el caso de estudio canario ponen de manifiesto que el análisis del oleaje extremo en entornos insulares de elevada complejidad requiere un enfoque específico, distinto del que puede adoptarse de forma directa en ámbitos peninsulares más homogéneos. La combinación de una orografía muy marcada, una exposición direccional altamente condicionada y la limitada disponibilidad de registros instrumentales introduce condicionantes adicionales que afectan de manera directa a la interpretación de los resultados derivados de modelos numéricos de ámbito regional o nacional.

En primer lugar, el análisis realizado confirma que las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no son intercambiables para la caracterización del oleaje extremo en Canarias. Las diferencias observadas entre SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE no responden a una evolución progresiva del clima marítimo, sino a cambios estructurales en el propio sistema de modelización. Este comportamiento se manifiesta tanto en la caracterización estadística como en el ajuste extremal, y resulta especialmente acusado en las etapas más recientes, cuya menor duración limita el soporte estadístico disponible para la extrapolación hacia periodos de retorno elevados.

En este contexto, los resultados de este trabajo indican que la práctica más robusta no consiste en seleccionar de forma directa la estimación más desfavorable obtenida entre etapas, ni en adoptar una única función extremal derivada de la serie SIMAR considerada en su conjunto. Por el contrario, el análisis segmentado por etapas permite identificar el rango de magnitudes extremales que proporciona el sistema en función de la configuración de modelización, revelando así una incertidumbre estructural asociada al propio modelo. Esta dispersión entre etapas constituye una información de gran valor desde el punto de vista ingenieril, ya que permite cuantificar la sensibilidad del resultado extremo al sistema de modelización y evita ocultar dicha incertidumbre tras un único valor aparentemente preciso.

En la práctica, cuando no se dispone de registros instrumentales próximos, situación habitual en Canarias, los resultados sugieren que la etapa SIMAR-44 debe considerarse como referencia principal para la estimación de magnitudes extremas asociadas a periodos de retorno del orden de décadas, debido a su mayor cobertura temporal y a la mayor estabilidad de sus ajustes extremos. Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE, por su parte, no deben utilizarse de forma directa para definir valores de proyecto para retornos elevados, pero sí resultan útiles para evaluar el grado de variabilidad introducido por las sucesivas actualizaciones del sistema y, por tanto, para acotar la incertidumbre asociada al diseño.

Asimismo, el estudio pone de manifiesto que, en el entorno insular canario, la interpretación del oleaje extremo no puede desligarse de consideraciones direccionales y geomorfológicas. La fuerte diferenciación norte-sur, la existencia de sombras orográficas y la posible incidencia de estados de mar poco frecuentes procedentes de sectores no dominantes hacen que la extrapolación estadística sea especialmente sensible a la definición del dominio de modelización y a la selección del abanico direccional analizado. En este sentido, el uso de registros instrumentales adquiere una relevancia estratégica, no tanto como patrón absoluto de comparación, sino como referencia fundamental para validar órdenes de magnitud y detectar posibles inconsistencias físicas en los resultados modelizados.

Por último, aunque el análisis extremal desarrollado en este trabajo se ha centrado en la altura significativa del oleaje, los resultados obtenidos para el periodo de pico ponen de relieve que, en Canarias, una caracterización basada únicamente en  $H_s$  puede resultar insuficiente para determinadas aplicaciones ingenieriles. La elevada dispersión, los sesgos persistentes y la limitada coherencia estadística de  $T_p$  en varias etapas del sistema indican que, incluso cuando la magnitud de  $H_s$  parece razonablemente caracterizada, la incertidumbre asociada al periodo puede condicionar de forma relevante la interpretación física de los estados de mar extremos. Esta circunstancia refuerza la necesidad de integrar la lectura estadística y extremal dentro de un marco de coherencia física más amplio, especialmente en estudios orientados a la definición de condiciones de diseño.

En conjunto, el caso de Canarias evidencia que el análisis del oleaje extremo en entornos insulares complejos no debe abordarse como una simple extrapolación estadística, sino como un ejercicio integrado de interpretación técnica, en el que la segmentación por etapas, el apoyo en registros

instrumentales y la consideración explícita de la incertidumbre asociada al sistema de modelización resultan elementos clave para una aplicación rigurosa en ingeniería marítima.

## 7. RESULTADOS GLOBALES Y DISCUSIÓN

---

El capítulo anterior ha permitido caracterizar de forma detallada el comportamiento del oleaje a lo largo del litoral español mediante el análisis de estadísticos básicos, el contraste estadístico entre series modelizadas y registros instrumentales, y la evaluación del régimen extremal a partir del enfoque POT-GPD. Dichos análisis han puesto de manifiesto diferencias persistentes entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA, así como una respuesta espacial claramente diferenciada del oleaje en función del ámbito geográfico considerado.

El presente capítulo tiene como objetivo integrar y discutir de manera conjunta estos resultados, desplazando el foco desde la descripción analítica hacia una interpretación global con orientación aplicada. En particular, se aborda la comparación entre modelos numéricos y registros instrumentales no como un ejercicio de validación clásica, sino como una herramienta para evaluar la coherencia estadística, el orden de magnitud y las limitaciones inherentes al uso de series modelizadas en el análisis del oleaje extremo.

La comparación modelo-boya constituye, en este contexto, la base sobre la que se apoya la discusión posterior del régimen extremal. Los registros instrumentales proporcionan una referencia independiente y físicamente contrastada, mientras que las series SIMAR/WANA aportan continuidad espacial y temporal, a costa de incorporar cambios estructurales asociados a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización. La coexistencia de ambas fuentes de información, con características y limitaciones distintas, obliga a interpretar los resultados extremos desde una perspectiva crítica, especialmente cuando se persigue su aplicación en el ámbito de la ingeniería marítima.

A partir de este marco, el capítulo se estructura en cuatro bloques complementarios. En primer lugar, se realiza una comparación general modelo-boya que permite establecer criterios de coherencia global y sentar las bases para la interpretación de los extremos. A continuación, se analiza la respuesta regional de las alturas de ola extrema, identificando patrones comunes y diferencias significativas entre los distintos sectores del litoral español. Posteriormente, se evalúa el impacto que tiene la elección de una u otra etapa del sistema SIMAR/WANA en la estimación de alturas de ola de proyecto, aspecto clave desde el punto de vista del dimensionamiento de obras marítimas. Finalmente, se formulan recomendaciones prácticas para el uso e interpretación de los datos SIMAR/WANA en proyectos de ingeniería, integrando las lecciones extraídas a lo largo del estudio.

En conjunto, este capítulo actúa como nexo entre el análisis técnico desarrollado y las conclusiones finales del trabajo, permitiendo traducir los resultados obtenidos en criterios interpretativos y recomendaciones con relevancia directa para la práctica profesional y para la evaluación crítica de bases de datos oficiales de oleaje.

### **7.1. Marco interpretativo de la incertidumbre en el análisis extremal**

La interpretación de los resultados obtenidos en el presente capítulo requiere considerar de forma explícita las principales fuentes de incertidumbre que intervienen en la estimación del régimen extremal del oleaje. En el contexto de este trabajo pueden distinguirse dos componentes fundamentales asociadas al propio proceso de análisis. Por un lado, la incertidumbre de carácter estadístico vinculada a la longitud y al contenido de las series disponibles. Por otro, la incertidumbre estructural derivada de las diferencias existentes entre las configuraciones del sistema de modelización empleadas para la reconstrucción del clima marítimo.

La incertidumbre estadística está relacionada con la naturaleza limitada de las series temporales utilizadas para el ajuste de distribuciones extremales. En el enfoque basado en excedencias sobre umbral, la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados depende del número de excedencias independientes disponibles y de la estabilidad de los parámetros del ajuste. Cuando la longitud de las series es reducida o el número de eventos extremos es limitado, la extrapolación hacia periodos de retorno elevados introduce necesariamente un aumento del rango de incertidumbre, que se refleja en la amplitud de los intervalos de confianza obtenidos para las magnitudes estimadas.

De forma complementaria, la incertidumbre estructural se origina en las diferencias existentes entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA analizadas en este trabajo. Estas configuraciones se apoyan en esquemas de modelización que presentan variaciones en aspectos relevantes como el forzamiento atmosférico utilizado, la resolución espacial del dominio, la extensión del área de cálculo o determinadas parametrizaciones físicas del modelo de oleaje. En consecuencia, los resultados obtenidos a partir de cada etapa no constituyen realizaciones equivalentes de una misma serie temporal, sino representaciones del clima marítimo condicionadas por la estructura específica del sistema de modelización empleado.

Este tipo de discontinuidades asociadas a cambios en la configuración de los modelos no es exclusivo de la base de datos SIMAR. Problemas similares han sido documentados en bases de datos climáticas generadas mediante modelización y en conjuntos de reanálisis ampliamente utilizados

en oceanografía y climatología, donde las sucesivas actualizaciones de los sistemas de modelización pueden introducir cambios estructurales en las series temporales que no responden necesariamente a variaciones físicas del sistema climático (Von Storch y Zwiers, 1999; Katz, 2013).

La coexistencia de ambas fuentes de incertidumbre implica que las diferencias observadas entre configuraciones no deben interpretarse únicamente como fluctuaciones estadísticas asociadas al proceso de ajuste extremal. En muchos casos reflejan también la sensibilidad del resultado a las características del modelo utilizado para reconstruir el clima marítimo. Por este motivo, el análisis desarrollado en los apartados siguientes distingue de forma explícita entre ambas dimensiones de incertidumbre, empleando los intervalos de confianza del ajuste extremal como indicador de la variabilidad estadística y la comparación entre etapas del sistema como referencia para evaluar la incertidumbre estructural asociada a la modelización.

Este marco interpretativo permite contextualizar los resultados presentados en el capítulo, evitando reiterar en cada ámbito geográfico la explicación de estos conceptos y facilitando que la discusión se centre en el comportamiento relativo de las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA y en las particularidades del régimen de oleaje en cada región analizada.

## **7.2. Comparación general modelo-boya como base del análisis de oleaje extremo**

La comparación entre las series modelizadas del sistema SIMAR/WANA y los registros instrumentales de la red de boyas constituye el punto de partida imprescindible para la interpretación del régimen de oleaje extremo desarrollada en este trabajo. Este contraste no se plantea como un ejercicio de validación predictiva clásica, sino como una herramienta para evaluar la coherencia estadística, el orden de magnitud y las limitaciones estructurales de las distintas etapas de modelización cuando se emplean como base para la estimación de condiciones extremas de diseño.

Desde este enfoque, los resultados ponen de manifiesto que la relación modelo-boya debe interpretarse de forma diferenciada según la variable considerada. En el caso de la altura significativa del oleaje,  $H_s$ , el contraste estadístico muestra, en términos generales, una coherencia razonable tanto en la variabilidad temporal como en el orden de magnitud, especialmente en los ámbitos de clara exposición atlántica. Las correlaciones obtenidas son en su mayoría elevadas o moderadas y los sesgos medios se mantienen acotados, lo que indica que las series modelizadas reproducen adecuadamente la estructura general del régimen observado.

No obstante, el análisis revela que esta coherencia global no implica intercambiabilidad entre etapas del sistema SIMAR/WANA. Incluso para  $H_s$ , se identifican diferencias persistentes entre configuraciones, que se manifiestan en el sesgo, en la dispersión y, de forma particularmente relevante, en la representación de los estados de mar más energéticos. En algunos ámbitos, las etapas más recientes mejoran la coherencia temporal relativa frente a los registros instrumentales, pero dicha mejora no es uniforme ni se traduce siempre en una reducción de la incertidumbre asociada a las magnitudes extremas. Este comportamiento evidencia que el desempeño del modelo en el régimen medio no es un indicador suficiente de su idoneidad para caracterizar el régimen extremo.

El contraste modelo-boya del periodo de pico,  $T_p$ , pone de manifiesto limitaciones aún más acusadas. En todos los ámbitos analizados se observa una coherencia temporal sensiblemente inferior a la obtenida para  $H_s$ , acompañada de una dispersión elevada y de sesgos persistentes cuyo signo y magnitud dependen tanto de la región como de la etapa de modelización. Incluso en aquellas configuraciones donde se detecta un incremento del coeficiente de correlación, este no se acompaña de una mejora equivalente en la representación de los valores absolutos de  $T_p$ , lo que limita su uso directo en aplicaciones ingenieriles basadas en valores extremos. Este resultado refuerza la necesidad de interpretar con cautela el periodo de pico modelizado, especialmente cuando se emplea de forma conjunta con  $H_s$  en el análisis del oleaje extremo.

Desde el punto de vista del diseño marítimo, la comparación general modelo-boya conduce a una conclusión fundamental. La fiabilidad de las magnitudes extremas estimadas no depende únicamente de la calidad del ajuste medio del modelo, sino de la estabilidad interna de la serie, de su coherencia estadística a lo largo del tiempo y de su capacidad para reproducir de forma consistente la parte alta de la distribución. Una buena correspondencia en el régimen medio puede coexistir con diferencias significativas en la cola de la distribución, particularmente cuando la longitud temporal de la serie es reducida.

Los registros instrumentales, a pesar de su limitada cobertura espacial y de las restricciones asociadas a su longitud temporal, proporcionan una referencia física esencial para contextualizar los órdenes de magnitud del oleaje extremo. Su estabilidad estadística y la ausencia de desplazamientos temporales persistentes permiten utilizarlos como marco de comparación para interpretar críticamente las diferencias detectadas entre etapas del sistema SIMAR/WANA. Sin embargo, el análisis desarrollado demuestra que tampoco deben considerarse como un patrón

absoluto, especialmente cuando se extrapolan hacia periodos de retorno muy superiores a la duración del registro disponible.

En conjunto, la comparación general modelo-boya establece el marco conceptual sobre el que se apoya el resto del análisis del oleaje extremo. Los modelos numéricos aportan continuidad temporal y cobertura espacial, pero introducen cambios estructurales entre etapas que condicionan la estimación de los eventos más energéticos. Las boyas aportan una referencia física robusta, pero con limitaciones inherentes de representatividad espacial y de soporte temporal. La interpretación del oleaje extremo exige, por tanto, una lectura conjunta y crítica de ambas fuentes, evitando aproximaciones simplificadas.

Bajo este marco, resulta imprescindible analizar de forma explícita cómo se materializan estas diferencias modelo-boya en cada uno de los ámbitos geográficos considerados. Solo a través de una comparación regional detallada es posible identificar patrones coherentes, singularidades locales y respuestas específicas del sistema SIMAR/WANA frente a los distintos regímenes de oleaje. Este análisis regional constituye el objeto del apartado siguiente, donde se comparan de forma sistemática las alturas de ola extrema estimadas por modelos y boyas en cada región de estudio.

### **7.3. Comparación regional de las magnitudes extremas de Hs estimadas por modelos y registros instrumentales**

El presente apartado compara las alturas significantes de oleaje extremo obtenidas a partir de los registros instrumentales y de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA, diferenciando por ámbitos geográficos. El análisis se apoya en los resultados del ajuste POT-GPD y se centra en la comparación de las magnitudes asociadas a periodos de retorno de interés en ingeniería marítima, con especial atención al retorno de referencia considerado en el estudio.

Esta lectura regional permite identificar patrones espaciales consistentes, evaluar la coherencia entre modelos y boyas, así como analizar la sensibilidad de las magnitudes extremas frente a las sucesivas actualizaciones del sistema de modelización. La comparación se realiza desde una perspectiva crítica, teniendo en cuenta las particularidades físicas de cada ámbito y el marco de incertidumbre definido en el apartado 7.1. La interpretación de los resultados presentados a continuación se apoya en dicho marco conceptual, que permite contextualizar las diferencias

observadas entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA y valorar su impacto en la estimación del oleaje extremal.

### **7.3.1. Norte peninsular**

En el norte peninsular, caracterizado por una exposición directa y persistente a los temporales del Atlántico Norte, la comparación entre modelos y boyas muestra un régimen extremal de elevada energía y estadísticamente bien definido. Las funciones extremales derivadas de los registros instrumentales presentan colas estables y magnitudes elevadas de Hs para los periodos de retorno analizados, constituyendo una referencia sólida para la evaluación de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA.

La etapa SIMAR-44 reproduce de forma razonable el orden de magnitud del oleaje extremo observado, con una ligera tendencia a valores algo inferiores a la referencia instrumental. Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE introducen variaciones apreciables, tanto en la magnitud estimada como en la pendiente de las curvas extremales, acompañadas de un aumento de la incertidumbre para retornos elevados.

No obstante, a diferencia de otros ámbitos del estudio, estas diferencias se mantienen dentro de un marco físicamente coherente con el régimen extremal observado, lo que permite utilizar las distintas etapas como escenarios alternativos, siempre anclados en la referencia instrumental proporcionada por la boya.

En conjunto, los resultados indican que, en este ámbito, las diferencias entre etapas del sistema responden principalmente a cambios en la configuración del modelo, manteniéndose una coherencia general con el régimen extremal observado. La boya actúa como un anclaje fundamental para contextualizar las magnitudes estimadas y evaluar su plausibilidad física.

### **7.3.2. Oeste peninsular**

El oeste peninsular presenta un régimen extremal dominado por temporales del Atlántico Norte, caracterizado por estados de mar energéticos y recurrentes, con alturas significantes extremas elevadas para los periodos de retorno más usuales en ingeniería marítima. Los registros instrumentales, representados por la boya de Cabo Silleiro, muestran funciones extremales bien definidas, con colas estables y pendientes moderadas, lo que proporciona una referencia física robusta para la evaluación de los resultados modelizados.

La etapa SIMAR-44 reproduce de forma consistente el orden de magnitud del oleaje extremo observado, con valores de  $H_s$  ligeramente inferiores a los de la boya para los periodos de retorno elevados, pero manteniéndose dentro de intervalos de confianza razonables. La mayor extensión temporal de esta etapa se traduce en bandas de incertidumbre relativamente contenidas, lo que refuerza su estabilidad estadística y su utilidad como referencia comparativa en el análisis regional.

Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE introducen un comportamiento diferenciado. En ambos casos se observa un incremento de la pendiente de la función extremal y un ensanchamiento significativo de las bandas de confianza a medida que aumenta el periodo de retorno. Este efecto es especialmente acusado en WANA-HARMONIE, donde la extrapolación hacia retornos elevados conduce a intervalos de incertidumbre muy amplios, reflejo directo del menor soporte muestral efectivo y de la elevada sensibilidad del ajuste POT-GPD en la cola de la distribución.

A pesar de que los valores centrales estimados por las etapas más recientes pueden situarse en rangos comparables o incluso superiores a los de SIMAR-44, la pérdida de robustez estadística limita su uso directo como valores de diseño sin un análisis explícito de la incertidumbre asociada. En este contexto, la comparación con la boya resulta fundamental para evaluar la plausibilidad física de las estimaciones extremales y evitar interpretaciones basadas exclusivamente en el valor central de la función ajustada.

En conjunto, los resultados del oeste peninsular confirman que las diferencias observadas entre etapas del sistema SIMAR/WANA responden principalmente a cambios en la configuración del modelo y en el soporte temporal disponible, más que a variaciones del régimen extremal real. Este comportamiento pone de manifiesto la necesidad de interpretar las estimaciones extremales de forma integrada, considerando simultáneamente el orden de magnitud, la pendiente de la función y la amplitud de los intervalos de confianza, especialmente cuando se trabaja con etapas de modelización recientes y series de duración limitada.

### **7.3.3. Sur peninsular**

En el sur peninsular, el régimen extremal del oleaje se caracteriza por magnitudes claramente más moderadas que las observadas en los ámbitos atlánticos del norte y del oeste, en coherencia con el carácter semiabrigado del Mediterráneo meridional. El registro instrumental de la boya de Cabo de Gata muestra una función extremal suave, con un crecimiento progresivo de la altura significativa del oleaje y colas acotadas, proporcionando una referencia robusta para el análisis comparativo.

La etapa SIMAR-44 reproduce de forma estable la forma general del régimen extremal, aunque tiende a infraestimar de manera sistemática las alturas extremas respecto a la boya. Para el periodo de retorno de referencia, las magnitudes de Hs obtenidas con esta etapa se sitúan claramente por debajo de las instrumentales, lo que indica una representación conservadora en términos de estabilidad estadística, pero no en términos de magnitud extrema.

La etapa WANA-HIRLAM introduce un cambio radical en la caracterización del régimen extremal. Las alturas significantes asociadas a periodos de retorno del orden de décadas resultan muy superiores a las observadas en el registro instrumental, acompañadas además de intervalos de confianza extremadamente amplios y de una pendiente muy acusada de la función extremal. Este comportamiento evidencia una elevada sensibilidad a la extrapolación estadística, derivada de la menor longitud temporal de la serie, lo que limita severamente la utilidad ingenieril de estos valores como alturas de proyecto en el sur peninsular.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE muestra un comportamiento más coherente con la referencia instrumental. Para el periodo de retorno de referencia, las magnitudes de Hs se sitúan muy próximas a las estimadas a partir de la boya, con una evolución de la función extremal más suave y una incertidumbre sensiblemente menor que la observada en WANA-HIRLAM. No obstante, la corta duración de la serie sigue traducándose en intervalos de confianza apreciables para retornos elevados, lo que aconseja una interpretación prudente fuera del rango mejor respaldado por los datos.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que, en ámbitos de menor energía media como el sur peninsular, pequeñas diferencias absolutas entre etapas de modelización pueden traducirse en discrepancias relativas muy significativas en la estimación de las alturas extremas. En este contexto, la interpretación ingenieril debe priorizar la coherencia del orden de magnitud y la consistencia física con el registro instrumental, evitando el uso directo de valores extremales obtenidos a partir de series cortas y altamente sensibles a la extrapolación.

#### **7.3.4. Este peninsular (Mediterráneo)**

El Mediterráneo oriental presenta un régimen extremal claramente diferenciado del Atlántico, caracterizado por alturas significantes extremas menores, pendientes de las funciones extremales más suaves y colas bien acotadas. Esta singularidad responde al carácter regional de los temporales que afectan a este ámbito y a la ausencia de forzamientos oceánicos de gran escala plenamente desarrollados como los del Atlántico Norte.

La boya de Tarragona proporciona una referencia instrumental robusta del régimen extremal, con una función POT-GPD bien definida, colas finitas (parámetro de forma negativo) y bandas de incertidumbre relativamente contenidas incluso para periodos de retorno elevados. Las magnitudes extremas obtenidas a partir del registro instrumental se sitúan de forma consistente por encima de las estimadas por SIMAR-44, lo que pone de manifiesto una infraestimación sistemática del oleaje extremo por parte de esta etapa del sistema en este ámbito.

La comparación entre etapas del sistema SIMAR/WANA muestra un incremento progresivo de las magnitudes extremas de Hs desde SIMAR-44 hacia WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE. No obstante, este incremento no se acompaña de una mejora equivalente en la robustez estadística de las estimaciones. Mientras que SIMAR-44 ofrece valores claramente inferiores a la referencia instrumental, presenta una función extremal estable y bandas de incertidumbre relativamente acotadas. Por el contrario, WANA-HIRLAM y, especialmente, WANA-HARMONIE, tienden a aproximarse a las magnitudes extremas observadas en la boya, pero lo hacen a costa de una pérdida significativa de estabilidad estadística, reflejada en parámetros de forma próximos o superiores a cero y en intervalos de confianza muy amplios para periodos de retorno elevados.

En consecuencia, en el Mediterráneo oriental se identifica un compromiso claro entre magnitud y robustez estadística. Las etapas más recientes del sistema tienden a estimar oleajes extremos más elevados y próximos a la referencia instrumental, pero con una incertidumbre asociada que limita su uso directo para el dimensionamiento sin un tratamiento explícito del riesgo. En este contexto, la lectura ingenieril debe priorizar la coherencia física y estadística del conjunto de resultados, interpretando las diferencias entre etapas como una medida de la incertidumbre asociada al análisis extremal, más que como una evidencia de una mejora progresiva del sistema o de una evolución real del régimen de oleaje.

### **7.3.5. Norte de Canarias**

En el norte de Canarias, el régimen extremal del oleaje se sitúa en un rango intermedio entre los ámbitos atlánticos peninsulares y las zonas más protegidas del archipiélago. La boya de Gran Canaria proporciona una referencia instrumental robusta, caracterizada por colas finitas bien definidas y magnitudes de altura significativa del oleaje moderadas para los periodos de retorno analizados, lo que permite contextualizar de forma fiable los resultados obtenidos a partir de las series modelizadas.

La etapa SIMAR-44 reproduce de manera coherente el orden de magnitud del oleaje extremo observado, mostrando una ligera tendencia a estimar alturas extremas algo superiores a las derivadas del registro instrumental, especialmente para los periodos de retorno de referencia empleados en el estudio. La función extremal asociada a esta etapa presenta una pendiente moderada y bandas de incertidumbre relativamente contenidas, coherentes con la mayor extensión temporal de la serie y con un parámetro de forma que conduce a colas finitas estables.

Por el contrario, las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE tienden a proporcionar estimaciones de Hs extremas inferiores a las obtenidas con SIMAR-44 y, en general, también a las derivadas de la boya para los retornos del orden de varias décadas. Este comportamiento va acompañado de un ensanchamiento apreciable de las bandas de confianza, particularmente acusado en WANA-HARMONIE, reflejando no solo la menor longitud temporal de estas series, sino también cambios en la caracterización estadística de la cola asociados a la selección del umbral POT y al valor del parámetro de forma. En consecuencia, las estimaciones extremales de estas etapas resultan más sensibles a la extrapolación estadística y deben interpretarse con cautela fuera del rango mejor respaldado por los datos.

En conjunto, los resultados indican que, en el norte de Canarias, las diferencias entre etapas del sistema responden principalmente a cambios en la configuración del modelo y en la capacidad estadística de las series para sostener la extrapolación extremal, más que a variaciones atribuibles al clima marítimo real. En este contexto, la boya de Gran Canaria actúa como un anclaje esencial para evaluar la plausibilidad física de las magnitudes extremas estimadas y para interpretar de forma prudente los resultados modelizados en aplicaciones de ingeniería marítima, aunque limitada a diversas direcciones de oleaje del cuarto cuadrante, como consecuencia de la barrera que genera la isla de Tenerife.

### **7.3.6. Sur de Canarias**

El sur de Canarias presenta el régimen extremal del oleaje más moderado de todos los ámbitos analizados, como consecuencia directa de la protección orográfica de las islas y del apantallamiento generado frente a los temporales dominantes del Atlántico Norte. La boya de Tenerife Sur confirma este comportamiento mediante funciones extremales suaves, con valores contenidos de Hs incluso para periodos de retorno elevados y con una pendiente claramente inferior a la observada en los ámbitos atlánticos peninsulares.

La etapa SIMAR-44 reproduce de forma razonable el orden de magnitud del oleaje extremo observado, aunque muestra una ligera tendencia a estimar alturas significantes de oleaje algo superiores a las registradas instrumentalmente. WANA-HIRLAM introduce una mayor dispersión en la estimación extremal, con bandas de incertidumbre amplias y una mayor sensibilidad a la extrapolación estadística. Por su parte, WANA-HARMONIE ofrece magnitudes extremas más reducidas y un crecimiento más moderado de  $H_s$  con el aumento del periodo de retorno, si bien acompañado de una incertidumbre todavía significativa, coherente con la menor duración de la serie tras el proceso de declustering.

Más allá de las diferencias entre etapas, en el sur de Canarias resulta especialmente relevante considerar la influencia del límite del dominio de modelización. Las boyas insulares registran de forma recurrente episodios de oleaje de largo y muy largo periodo, asociados a swell remoto generado por temporales del hemisferio sur. Estos estados de mar, caracterizados por alturas significantes generalmente bajas (habitualmente inferiores a 1,5 m) y periodos de pico superiores a 20 s, forman parte del clima marítimo real que afecta al archipiélago, especialmente en las costas meridionales.

Sin embargo, este tipo de oleaje no queda adecuadamente representado en las series SIMAR/WANA debido a la proximidad del límite meridional del dominio de cálculo al archipiélago canario, que impide reproducir trayectorias oceánicas suficientemente largas como para capturar la generación y propagación de swell remoto desde latitudes australes. Como consecuencia, aunque el impacto de esta limitación es reducido en la estimación de las alturas significantes extremas, sí contribuye de manera apreciable a los desajustes observados en el periodo de pico y en la estructura espectral del oleaje entre modelos y registros instrumentales.

En ausencia de registros instrumentales locales, situación frecuente en el archipiélago, estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de interpretar las estimaciones extremas del modelo con cautela. En particular, se desaconseja el uso directo de una única curva extremal derivada de la serie completa sin un análisis previo por etapas, recomendándose en su lugar la comparación entre configuraciones del sistema como marco para acotar rangos plausibles de diseño y evaluar explícitamente la incertidumbre asociada. La boya, cuando existe, adquiere así un papel esencial no solo como referencia de magnitudes extremas, sino también como indicador de procesos físicos no plenamente representados por la modelización regional.

### 7.3.7. Síntesis regional

El análisis comparativo de las alturas de ola extrema entre modelos y registros instrumentales a lo largo del litoral español pone de manifiesto una marcada diferenciación regional del régimen extremal del oleaje, tanto en términos de magnitud como en la respuesta de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA. Esta diferenciación responde de forma coherente a la exposición dominante al oleaje, a la escala de los sistemas meteorológicos que lo generan y a las particularidades geomorfológicas de cada ámbito, condicionando de manera directa tanto la robustez de las estimaciones extremales como su interpretación desde un punto de vista ingenieril.

En los ámbitos atlánticos peninsulares del norte y del oeste, caracterizados por una exposición directa y persistente a los temporales del Atlántico Norte, los registros instrumentales definen regímenes extremales bien estructurados y energéticos, con colas estables y magnitudes elevadas de Hs para los periodos de retorno de interés. En estos sectores, SIMAR-44 reproduce de forma consistente el orden de magnitud del oleaje extremo observado, beneficiándose de su mayor extensión temporal y de una estabilidad estadística elevada. Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE introducen variaciones apreciables en la pendiente de las funciones extremales y un aumento significativo de la incertidumbre para retornos elevados, especialmente acusado en el oeste peninsular, donde la extrapolación estadística se vuelve particularmente sensible. No obstante, en conjunto, las estimaciones se mantienen dentro de un marco físicamente coherente con el régimen observado, siempre que se interpreten ancladas a la referencia instrumental.

En el sur peninsular, el régimen extremal presenta magnitudes claramente más moderadas, coherentes con el carácter semiabrigado del Mediterráneo meridional. En este ámbito, las diferencias entre etapas adquieren un peso relativo mayor. SIMAR-44 ofrece una representación estable pero conservadora en términos de magnitud extrema, mientras que WANA-HIRLAM introduce incrementos muy acusados de Hs extrema y una elevada sensibilidad a la extrapolación, con intervalos de confianza excesivamente amplios que limitan su utilidad directa para el diseño. WANA-HARMONIE, por su parte, proporciona estimaciones más próximas a la referencia instrumental para los retornos de referencia, aunque con una incertidumbre todavía apreciable. Estos resultados evidencian que, en regímenes de menor energía media, pequeñas diferencias absolutas pueden traducirse en discrepancias relativas significativas, reforzando la necesidad de una lectura prudente y contextualizada.

En el Mediterráneo oriental, el régimen extremal del oleaje presenta un comportamiento claramente diferenciado del Atlántico, no tanto por una reducción de las magnitudes extremas, sino por la menor frecuencia de los eventos severos y por la naturaleza episódica de los temporales que los generan. La boya de Tarragona evidencia que, bajo determinadas configuraciones atmosféricas, pueden alcanzarse alturas significantes extremas del mismo orden de magnitud que en los ámbitos atlánticos, con valores de  $H_s$  superiores a 12 m para periodos de retorno del orden de décadas.

La comparación con las series modelizadas pone de manifiesto que la etapa SIMAR-44 infraestima de forma apreciable las magnitudes extremas observadas en el registro instrumental, situando las alturas de  $H_s$  extremal claramente por debajo de las obtenidas a partir de la boya. Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE incrementan las magnitudes estimadas y se aproximan al orden de magnitud instrumental. Sin embargo, este acercamiento se produce a costa de una pérdida notable de robustez estadística, reflejada en bandas de incertidumbre amplias y en una elevada sensibilidad de la extrapolación extremal.

En consecuencia, en el Mediterráneo oriental se identifica un compromiso especialmente acusado entre magnitud extrema y estabilidad estadística. Mientras que las etapas más recientes del sistema tienden a reproducir mejor las alturas extremas observadas, la limitada longitud temporal de las series restringe la fiabilidad de las estimaciones para periodos de retorno elevados. Esta circunstancia obliga a interpretar los resultados extremales de forma integrada, priorizando la coherencia física con el registro instrumental y considerando explícitamente la incertidumbre asociada, en lugar de basar decisiones ingenieriles en valores puntuales de  $H_s$  extremal.

En el entorno canario, la diferenciación espacial norte-sur resulta determinante. El norte de Canarias presenta un régimen extremal intermedio entre el Atlántico peninsular y las zonas más protegidas del archipiélago, con SIMAR-44 reproduciendo de forma coherente el orden de magnitud observado y las etapas más recientes tendiendo a estimar alturas extremas inferiores, acompañadas de una mayor incertidumbre.

En el sur de Canarias, el régimen extremal es el más moderado del conjunto, fuertemente condicionado por la protección orográfica y el apantallamiento insular. En este ámbito, además, la incapacidad de los modelos regionales para reproducir swell remoto del hemisferio sur, debido a la extensión limitada del dominio de cálculo, contribuye a desajustes en la representación del periodo de pico y de la estructura espectral del oleaje, aunque con un impacto limitado sobre las alturas

significantes de oleaje extremal. La proximidad al límite del dominio de modelización y la complejidad direccional del oleaje introducen una sensibilidad adicional en la estimación de los extremos, reforzando el papel de la boya como referencia esencial.

De forma global, los resultados confirman que las diferencias observadas entre SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE no siguen una tendencia uniforme ni espacialmente consistente, y que su impacto sobre las alturas de ola extrema depende de manera crítica del ámbito geográfico, del soporte temporal disponible y de la sensibilidad de la extrapolación estadística. Esta evidencia justifica abordar, en el siguiente apartado, un análisis específico del efecto que tiene la elección de cada etapa del sistema en la definición de las alturas de ola de proyecto, desde una perspectiva explícitamente orientada a la práctica de la ingeniería marítima.

Con el objeto de facilitar la comparación global de los resultados obtenidos en las distintas regiones analizadas, la Tabla 6 presenta una síntesis de las alturas significantes extremas estimadas mediante el ajuste POT-GPD para diferentes periodos de retorno. Se incluyen tanto los valores derivados de los registros instrumentales de boya como los obtenidos a partir de las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA.

**Tabla 6.\_** Comparación regional de las alturas significantes (Hs) extremales obtenidas mediante análisis POT-GPD para diferentes configuraciones del sistema SIMAR/WANA y registros de boya.

Región	Serie	Años de registro	Número de registros analizados	Hs (Tr = 68 años) (IC 95%) [m]	Hs (Tr = 225 años) (IC 95%) [m]	Hs (Tr = 475 años) (IC 95%) [m]
Norte peninsular	Boya	1998-2025	205.502	12,54 (10,46-14,85)	13,51 (10,82-17,01)	14,06 (10,97-18,51)
	SIMAR completo	1958-2025	591.736	10,64 (9,88-11,20)	11,12 (10,10-11,84)	11,37 (10,20-12,20)
	SIMAR-44	1958-2005	419.889	10,25 (9,47-11,07)	10,73 (9,72-11,88)	10,98 (9,84-12,35)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	110.146	12,33 (9,45-15,61)	13,46 (9,65-18,44)	14,12 (9,73-20,50)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	61.701	11,05 (9,03-12,65)	11,40 (9,06-13,65)	11,56 (9,06-14,24)
Oeste peninsular	Boya	2003-2025	181.556	12,42 (11,14-13,24)	12,81 (11,31-13,88)	12,99 (11,35-14,24)
	SIMAR completo	1958-2025	581.524	11,62 (11,01-12,07)	11,98 (11,21-12,57)	12,15 (11,29-12,82)
	SIMAR-44	1958-2005	412.853	11,63 (10,90-12,11)	11,98 (11,08-12,56)	12,14 (11,18-12,76)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	107.967	11,14 (9,42-13,13)	11,62 (9,57-14,50)	11,86 (9,62-15,34)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	60.704	15,02 (10,18-25,95)	16,99 (10,43-36,75)	18,25 (10,54-45,50)
Sur peninsular	Boya	2004-2005	160.376	6,77 (5,74-8,01)	7,26 (5,87-9,25)	7,54 (5,93-10,03)
	SIMAR completo	1958-2025	583.449	7,71 (6,69-8,74)	8,60 (7,13-10,23)	9,14 (7,39-11,33)
	SIMAR-44	1958-2005	415.980	4,77 (4,26-5,29)	5,16 (4,47-5,99)	5,4 (4,56-6,41)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	107.479	9,34 (6,76-13,30)	10,64 (7,02-17,68)	11,48 (7,15-21,03)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	59.990	6,66 (5,96-7,23)	6,76 (6,01-7,50)	6,80 (6,02-7,65)
Este peninsular	Boya	2004-2025	181.556	12,42 (11,19-13,37)	12,81 (11,31-14,11)	12,99 (11,37-14,47)
	SIMAR completo	1958-2025	454.421	7,58 (6,44-8,95)	8,65 (6,97-10,89)	9,33 (7,27-12,24)
	SIMAR-44	1958-2005	334.132	6,62 (5,62-7,64)	7,24 (5,86-8,83)	7,6 (5,96-9,62)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	75.448	7,82 (5,49-11,51)	9,03 (5,70-15,18)	9,82 (5,81-18,36)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	44.841	10,01 (5,99-18,09)	11,78 (6,15-26,17)	12,97 (6,23-32,18)
Norte de Canarias	Boya	1997-2025	151.011	5,75 (5,22-6,5)	5,90 (5,27-6,29)	5,96 (5,28-6,41)
	SIMAR completo	1958-2025	493.036	5,90 (5,45-6,27)	6,18 (5,56-6,71)	6,32 (5,62-6,97)
	SIMAR-44	1958-2005	343.926	6,01 (5,47-6,57)	6,29 (5,60-7,20)	6,44 (5,66-7,60)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	93.864	5,31 (4,72-5,78)	5,43 (5,74-6,11)	5,49 (4,74-6,25)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	55.246	5,18 (4,44-5,70)	5,30 (4,46-6,10)	5,36 (4,47-6,28)
Sur de Canarias	Boya	1998-2025	128.017	3,76 (3,12-4,55)	4,14 (3,25-5,38)	4,39 (3,31-6,03)
	SIMAR completo	1958-2025	227.419	3,45 (2,97-3,94)	3,70 (3,04-4,48)	3,85 (3,08-4,85)
	SIMAR-44	1958-2005	67.837	4,16 (2,32-7,86)	5,29 (2,50-11,96)	6,12 (2,59-15,67)
	WANA-HIRLAM	2006-2018	106.028	3,94 (2,83-6,17)	4,60 (2,95-8,71)	5,05 (3,02-10,90)
	WANA-HARMONIE	2018-2025	53.554	2,75 (2,59-2,82)	2,76 (2,59-2,84)	2,77 (2,59-2,85)

Fuente: Elaboración propia.

#### **7.4. Influencia de la configuración del sistema SIMAR/WANA en la estimación del oleaje extremal**

El análisis desarrollado en el apartado 7.2 ha puesto de manifiesto que las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no proporcionan estimaciones equivalentes del régimen extremal del oleaje, y que dichas diferencias varían de forma significativa según el ámbito geográfico considerado. No obstante, el análisis regional comparativo, aun siendo fundamental para entender el comportamiento del sistema, no responde de forma directa a conocer cómo afecta la elección de una u otra etapa del sistema a la altura de ola de proyecto finalmente adoptada.

El presente apartado aborda esta cuestión desde una perspectiva aplicada, trasladando los resultados del análisis estadístico y extremal a un contexto de diseño. El objetivo no es comparar modelos en términos de ajuste o coherencia climática, sino evaluar el impacto práctico que tiene la elección de SIMAR-44, WANA-HIRLAM o WANA-HARMONIE en la definición de alturas de ola de proyecto, entendidas como magnitudes de referencia para el dimensionamiento y verificación de actuaciones costeras y portuarias.

Dado que algunas de las etapas más recientes del sistema presentan una longitud temporal limitada y una elevada sensibilidad en la extrapolación estadística, el análisis se centra en un periodo de retorno representativo y compatible con el soporte muestral disponible, evitando extrapolaciones excesivas que puedan inducir a una falsa sensación de precisión. En este marco, las diferencias entre etapas se interpretan no como errores puntuales, sino como una expresión explícita de la incertidumbre asociada al uso de series modelizadas no homogéneas.

Este enfoque permite analizar, con criterios estrictamente ingenieriles, hasta qué punto la altura de ola de proyecto depende de la etapa del sistema empleada, cuáles son las configuraciones que conducen a estimaciones más estables y cuáles introducen una mayor dispersión, sentando así las bases para la formulación de recomendaciones operativas en el apartado siguiente.

##### **7.4.1. Concepto de altura de ola de proyecto en el contexto del estudio**

En el ámbito de la ingeniería marítima, la altura de ola de proyecto se define como el valor representativo de la altura significativa del oleaje extremo que se adopta para el dimensionamiento, verificación o evaluación de la seguridad de una actuación costera o portuaria. Este valor no debe interpretarse como una magnitud exacta, sino como una estimación ingenieril robusta, coherente

con el régimen climático real y compatible con el nivel de incertidumbre inherente al análisis estadístico de eventos extremos.

En este trabajo, la definición de la altura de ola de proyecto adquiere una relevancia particular, ya que el sistema SIMAR/WANA no constituye una única serie homogénea, sino una sucesión de etapas de modelización (SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE) con configuraciones numéricas, resoluciones y longitudes temporales diferentes. Como se ha puesto de manifiesto en el capítulo anterior, estas diferencias se traducen en estimaciones extremas no equivalentes, incluso cuando se analizan puntos geográficos coincidentes y se aplica una metodología estadística común (POT-GPD).

Desde esta perspectiva, la altura de ola de proyecto no puede identificarse de forma automática con el valor extremo obtenido a partir de una única serie modelizada ni, menos aún, con el valor central de un ajuste estadístico aislado. Por el contrario, debe entenderse como el resultado de un proceso de interpretación integrada, en el que intervienen de forma conjunta:

- El orden de magnitud de las alturas extremas estimadas.
- La estabilidad estadística del ajuste.
- La amplitud de los intervalos de confianza asociados.
- La coherencia física con los registros instrumentales disponibles.

En el contexto del presente estudio, esta aproximación resulta especialmente necesaria debido a que algunas etapas del sistema, en particular WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE, presentan una longitud temporal limitada tras el proceso de declustering, lo que restringe la fiabilidad de las extrapolaciones hacia periodos de retorno elevados. En consecuencia, la adopción de periodos de retorno moderados, como  $T = 68$  años, permite analizar el efecto de las distintas etapas del sistema sobre la altura de ola de proyecto dentro de un rango en el que todas las series aportan información estadísticamente significativa, evitando extrapolaciones excesivas no suficientemente respaldadas por los datos.

Así, en este capítulo se analiza cómo la elección de una u otra etapa del sistema SIMAR/WANA influye directamente en la altura de ola de proyecto adoptada, poniendo de relieve que dicha elección no es neutra desde el punto de vista ingenieril. Las diferencias observadas entre etapas no deben interpretarse como simples discrepancias numéricas, sino como una manifestación explícita de la incertidumbre asociada al proceso de modelización y al soporte temporal disponible,

incertidumbre que debe ser reconocida y gestionada de forma consciente en aplicaciones de diseño.

Este planteamiento constituye la base para los subapartados siguientes, en los que se cuantifica el efecto práctico de utilizar SIMAR-44, WANA-HIRLAM o WANA-HARMONIE en la definición de alturas de ola de proyecto y se discuten las implicaciones directas de estas diferencias en el dimensionamiento de actuaciones reales de ingeniería marítima.

#### **7.4.2. Impacto de la longitud de las series en la altura de proyecto**

La definición de la altura de ola de proyecto mediante análisis extremal está condicionada de forma directa por la longitud de las series temporales utilizadas y por el número de excedencias independientes que sustentan la extrapolación estadística. En el contexto del sistema SIMAR/WANA, esta cuestión adquiere una relevancia particular debido a la coexistencia de etapas de modelización con duraciones muy diferentes y, por tanto, con capacidades desiguales para soportar estimaciones robustas de eventos raros.

Desde un punto de vista teórico, la estimación de alturas de ola asociadas a periodos de retorno elevados requiere disponer de un soporte muestral suficiente en la cola de la distribución. En la práctica, cuando se trabaja con series de duración limitada, la extrapolación hacia retornos largos se vuelve altamente sensible tanto a la selección del umbral en el enfoque POT como a la estimación del parámetro de forma de la distribución GPD. Esta sensibilidad se manifiesta en pendientes extremas muy acusadas y en bandas de incertidumbre que crecen rápidamente con el periodo de retorno, reduciendo la fiabilidad de los valores centrales obtenidos.

En este estudio, la etapa SIMAR-44 dispone de una extensión temporal significativamente mayor que las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE. Esta mayor duración se traduce en un número más elevado de excedencias independientes tras el proceso de declustering, lo que permite definir funciones extremas más estables y con intervalos de confianza relativamente contenidos incluso para periodos de retorno del orden de varias décadas. Por el contrario, las etapas más recientes, aun incorporando mejoras en la configuración del sistema de modelización, presentan series más cortas, lo que limita de forma inherente la robustez estadística de la extrapolación extremal.

Esta limitación resulta especialmente crítica cuando se consideran periodos de retorno largos, del orden de 100 años o superiores. En estos casos, las estimaciones obtenidas a partir de WANA-HIRLAM y, especialmente, de WANA-HARMONIE, pueden estar dominadas por unos pocos

eventos extremos y por la forma asumida de la cola de la distribución, más que por una señal estadística sólidamente respaldada por los datos. Como consecuencia, diferencias aparentemente relevantes en la altura de ola de proyecto entre etapas pueden reflejar, en gran medida, el efecto de la escasez muestral y no una variación real del régimen extremo del oleaje.

Por este motivo, en el presente trabajo se adopta como referencia un periodo de retorno de 68 años, coherente con la longitud máxima de las series disponibles y con el criterio de evitar extrapolaciones excesivas más allá del soporte temporal de los datos. Este retorno permite comparar de forma homogénea las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA y los registros instrumentales, manteniendo un equilibrio razonable entre relevancia ingenieril y estabilidad estadística de las estimaciones.

En consecuencia, la longitud de las series no solo condiciona la amplitud de los intervalos de confianza asociados a la altura de ola de proyecto, sino que debe entenderse como un factor estructural en la interpretación de los resultados. Las diferencias observadas entre etapas de modelización no pueden evaluarse únicamente en términos de valor central de  $H_s$ , sino que deben analizarse juntamente con la robustez estadística de la estimación y con el rango de incertidumbre asociado. Este planteamiento resulta esencial para evitar una falsa sensación de precisión en la definición de condiciones de diseño cuando se trabaja con series de duración limitada.

Este marco metodológico sienta las bases para la comparación directa de las alturas de ola de proyecto obtenidas a partir de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA, que se desarrolla en el apartado siguiente.

#### **7.4.3. Comparación de alturas de ola de proyecto por etapa de modelización**

La comparación de las alturas de ola de proyecto obtenidas a partir de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA pone de manifiesto que la elección de la configuración de modelización constituye un factor determinante en el resultado final del análisis extremal, incluso cuando se mantiene constante el periodo de retorno considerado.

Tomando como referencia el periodo de retorno de 68 años, adoptado en este trabajo por coherencia con la longitud de las series disponibles, se observa que las alturas de ola significantes de proyecto asociadas a cada etapa presentan diferencias apreciables tanto en su valor central como en la amplitud de la incertidumbre asociada.

La etapa SIMAR-44 proporciona, de forma generalizada, alturas de ola de proyecto caracterizadas por una elevada estabilidad estadística. La mayor extensión temporal de la serie se traduce en funciones extremales con pendientes moderadas y bandas de confianza relativamente contenidas, lo que confiere a las estimaciones una robustez elevada desde el punto de vista estadístico. No obstante, en determinados ámbitos (especialmente en el Mediterráneo y en sectores semiabrigados) esta etapa tiende a infraestimar las magnitudes extremas respecto a los registros instrumentales, lo que limita su representatividad física en contextos donde los eventos severos son menos frecuentes pero potencialmente intensos.

Las etapas WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE introducen, en general, alturas de ola de proyecto diferentes a las obtenidas con SIMAR-44, con un comportamiento que no es uniforme entre regiones. En numerosos ámbitos, estas etapas conducen a incrementos de la altura significativa asociada al periodo de retorno de referencia, aproximándose en algunos casos al orden de magnitud definido por las boyas. Sin embargo, este acercamiento se produce acompañado de un ensanchamiento notable de los intervalos de confianza, reflejo directo de la menor longitud temporal de las series y del reducido número de excedencias independientes disponibles tras el proceso de declustering.

Como consecuencia, para un mismo periodo de retorno, las alturas de ola de proyecto derivadas de WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE presentan una mayor sensibilidad a la extrapolación estadística, de modo que pequeñas variaciones en los parámetros ajustados pueden traducirse en diferencias relevantes en la Hs de proyecto. Esta característica resulta especialmente acusada en ámbitos de menor energía media, donde la escasez de eventos extremos amplifica la incertidumbre asociada a la estimación.

La comparación entre etapas evidencia, por tanto, que no existe una única altura de ola de proyecto independiente de la configuración del sistema SIMAR/WANA empleada. Por el contrario, la Hs de proyecto debe entenderse como un rango condicionado por la etapa de modelización, su soporte temporal y la coherencia física con los registros instrumentales disponibles. En este contexto, la utilización de una única curva extremal sin considerar explícitamente la etapa de origen puede inducir a decisiones de diseño poco fundamentadas, ya sea por infraestimación o por sobredimensionamiento.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que la práctica más sólida consiste en comparar de forma sistemática las alturas de ola de proyecto obtenidas con las distintas etapas,

identificando tanto el rango de valores centrales como la dispersión asociada. Esta dispersión no debe interpretarse como ruido estadístico, sino como una medida explícita de la incertidumbre inherente al proceso de estimación extremal, especialmente cuando se trabaja con series de duración limitada.

Este análisis comparativo proporciona así el marco necesario para evaluar el impacto real de la elección de la etapa SIMAR/WANA en el dimensionamiento de actuaciones costeras, cuestión que se aborda de forma explícita mediante un ejemplo aplicado en el apartado siguiente.

#### **7.4.4. Ejemplo aplicado: influencia de la etapa SIMAR/WANA en el dimensionamiento de una actuación costera**

Con el fin de ilustrar de forma operativa las implicaciones que tiene la elección de la etapa del sistema SIMAR/WANA en el análisis extremal del oleaje y, por extensión, en el dimensionamiento de actuaciones costeras, se plantea a continuación un ejemplo aplicado en el ámbito del sur de Canarias. El objetivo de este ejercicio no es establecer un procedimiento normativo para la selección de la altura de ola de proyecto, sino mostrar cómo distintas configuraciones del sistema conducen a estimaciones significativamente diferentes, incluso al considerar un mismo periodo de retorno de referencia.

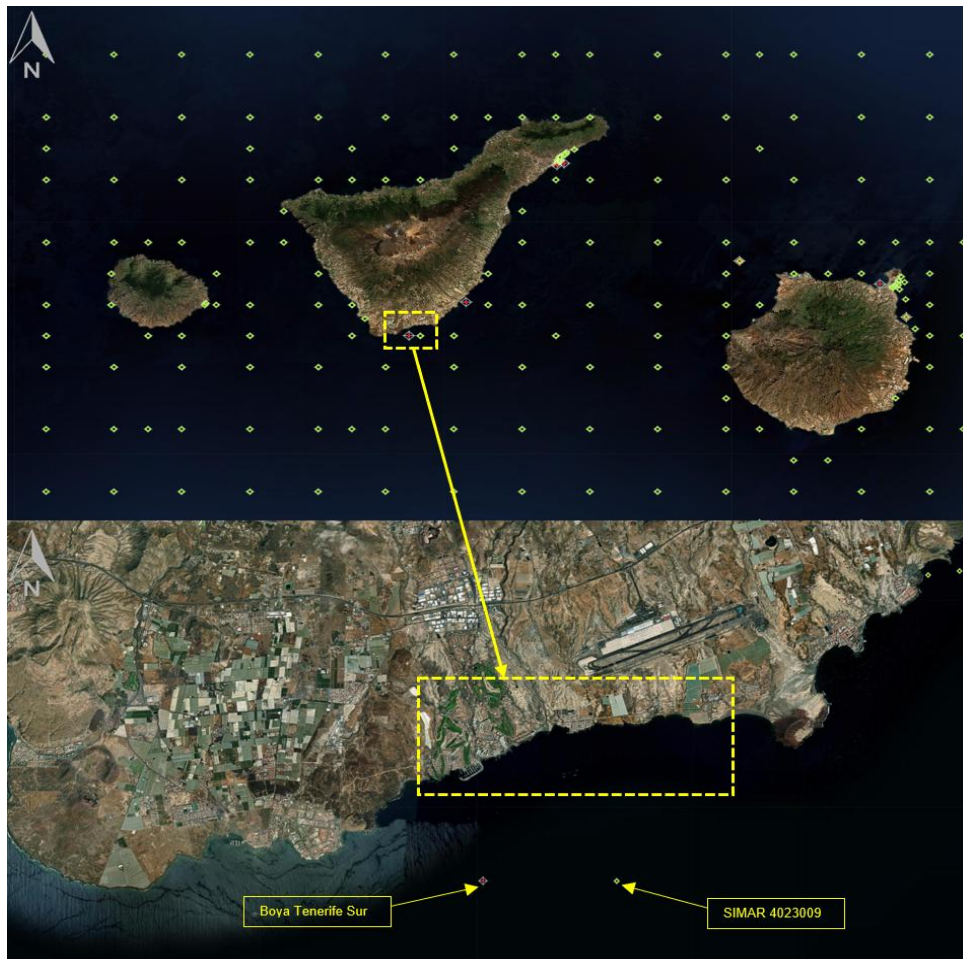
Conviene señalar que las alturas significantes analizadas en este ejemplo corresponden a condiciones de oleaje en aguas profundas, derivadas de registros instrumentales y de puntos del sistema SIMAR/WANA en mar abierto. En consecuencia, los valores de  $H_s$  obtenidos no constituyen directamente la altura de ola de diseño en la zona de actuación, sino un parámetro de partida para su posterior propagación, transformación y adaptación a las condiciones locales de la costa.

En este ejemplo se analizan exclusivamente las diferencias asociadas a la caracterización del oleaje extremo mediante las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA y el registro instrumental disponible. No se consideran otros factores que, en un proyecto real, podrían incrementar las solicitudes de diseño, tales como la combinación con niveles extremos de marea, residuos meteorológicos, efectos de sobreelevación por tormenta u otros procesos de interacción oleaje-nivel del mar.

##### **7.4.4.1. Localización**

Se considera, a modo de ejemplo, una actuación de regeneración de playa situada al sur de la isla de Tenerife (Figura 159), en un entorno caracterizado por un régimen de oleaje moderado y

parcialmente protegido frente a los temporales dominantes del Atlántico Norte. Este tipo de actuaciones resulta especialmente sensible a la estimación del oleaje extremo, ya que variaciones relativamente pequeñas en la altura significativa del oleaje pueden traducirse, una vez propagada desde aguas profundas hasta el área de estudio, en diferencias relevantes en el volumen de aporte, la estabilidad del perfil regenerado y la frecuencia de las labores de mantenimiento.



**Figura 159.** Localización geográfica seleccionada para la elaboración del ejemplo. La situación de la boya de Tenerife sur y el punto SIMAR 4023009 frente a la franja litoral seleccionada, permite utilizar sus datos para el análisis del clima marítimo del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Dada la proximidad de la zona de actuación tanto a la boya de Tenerife Sur como al punto SIMAR 4023009, se emplean en este ejemplo los resultados obtenidos a partir del análisis extremal POT-GPD de ambos registros, así como de las distintas etapas de modelización asociadas a dicho punto SIMAR. Esta circunstancia permite comparar de forma directa la respuesta del registro instrumental y de las diferentes configuraciones del sistema SIMAR/WANA bajo un mismo marco espacial y un mismo periodo de retorno de referencia.

#### 7.4.4.2. Periodo de retorno de diseño

El análisis precedente ha puesto de manifiesto la existencia de diferencias relevantes entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA en la estimación del régimen extremal. Esta variabilidad introduce una componente de incertidumbre estructural que no puede abordarse únicamente desde el ajuste estadístico, sino que debe integrarse en un marco normativo que articule la gestión del riesgo en proyecto. En este contexto, la ROM 1.0-09 no debe entenderse como un simple procedimiento para asignar un periodo de retorno, sino como el instrumento que vincula la caracterización probabilística del oleaje con el nivel de seguridad exigible en función de la repercusión económica, social y ambiental de la actuación.

El periodo de retorno ( $T_r$ ) de la ocurrencia de fallo por la excedencia de una determinada altura de ola es el tiempo medio que debe transcurrir entre dos temporales de igual intensidad. Para su determinación, nos basaremos en la obtención de la vida útil mínima de la obra, así como en la máxima probabilidad de fallo según las recomendaciones establecidas en la ROM 1.0-09 “Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos)”.

##### 7.4.4.2.1. Índice de Repercusión Económica (IRE)

Este índice valora cuantitativamente las repercusiones económicas, por reconstrucción de la obra ( $C_{RD}$ ), y por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella ( $C_{RI}$ ), previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma. El IRE se puede calcular por la siguiente relación de costes:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_o}$$

Donde  $C_o$  es un parámetro económico de adimensionalización.

En función del valor del Índice de Repercusión Económica IRE, las obras marítimas se clasificarán en tres tipos correspondientes a tres subintervalos  $R_i$ .  $i=1,2,3$ .

- R1, obras con repercusión económica baja:  $IRE \leq 5$ .
- R2, obras con repercusión económica media:  $5 \leq IRE \leq 20$ .
- R3, obras con repercusión económica alta:  $IRE \geq 20$ .

De esta forma, de la ROM 1.0-09, se puede extraer de la figura 2.2.33, los diferentes Índices de Repercusión Económica (IRE) y vidas útiles mínimas ( $V_m$ ) recomendados para obras de abrigo y defensa. En el caso que nos concierne, el objeto de actuación se encuentra dentro de las obras de “*regeneración y actuaciones de playas*”, luego:

- **IRE:**  $r_1$  (Bajo)
- **Vida Útil Mínima:** 15 años

#### 7.4.4.2.2. Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA)

Este índice estima cualitativamente el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de:

- **ISA<sub>1</sub>:** Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas, tomando los valores: Remoto (0), Bajo (3), Alto (10), Catastrófico (20).
- **ISA<sub>2</sub>:** Subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico artístico: Remoto (0), Bajo (2), Medio (4), Alto (8), Muy Alto (15).
- **ISA<sub>3</sub>:** Subíndice de alarma social: Bajo (0), Medio (5), Alto (10), Máxima (15).

El ISA se define por el sumatorio de los tres subíndices:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$$

En función del valor del índice de Repercusión ISA, se clasificará la obra en cuatro tipos, correspondientes a cuatro subintervalos  $S_i=1,2,3,4$ .

- $S_1$ , obras sin repercusión social y ambiental significativa:  $ISA \leq 5$ .
- $S_2$ , obras con repercusión social y ambiental baja:  $5 \leq ISA \leq 20$ .
- $S_3$ , obras con repercusión social y ambiental alta:  $20 \leq ISA \leq 30$ .
- $S_4$ , obras con repercusión social y ambiental muy alta:  $ISA \geq 30$ .

De esta forma, de la figura 2.2.34 de la ROM 1.0-09, se puede extraer los diferentes Índices de repercusión Social y Ambiental (ISA) recomendados para obras de abrigo y defensa. En el caso que nos concierne, la actuación se encuentra dentro de las obras de “*regeneración y actuaciones de playas*”, luego:

- **ISA:**  $S_1$  (No significativo)
- **Máxima Probabilidad Conjunta de Fallo ( $P_{fELU}$ ):** 0.2

#### 7.4.4.2.3. Periodo de retorno

Mediante el criterio de Riesgo de “Leon Borgman”, que relaciona el periodo de retorno ( $T_r$ ), probabilidad de fallo ( $P_f$ ) y vida útil de la obra ( $V_{min}$ ), determinamos el oleaje  $H_s$  extremal.

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - P_f)^{\frac{1}{V_{min}}}}$$

Siendo:

- $V_{min}$  = la vida útil de la obra
- $P_f$  = la probabilidad de fallo

Atendiendo a las recomendaciones establecidas por la ROM, la vida útil mínima será de 15 años y la máxima probabilidad de fallo no podrá exceder el valor de  $p=0,20$ .

El periodo de retorno será:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - 0,2)^{\frac{1}{15}}} = \mathbf{68 \text{ años}}$$

#### 7.4.4.3. Comparativa selección altura de ola significativa en aguas profundas

Una vez definido y justificado previamente el periodo de retorno de diseño, se adopta  $T = 68$  años como referencia para el análisis comparativo entre las distintas etapas de modelización del punto SIMAR 4023009 y el registro instrumental de la boya de Tenerife Sur. Sobre esta base, se analizan a continuación las magnitudes de la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) obtenidas a partir de las funciones de distribución extremal correspondientes a dicho periodo de retorno.

La elección de este valor permite realizar la comparación en un rango de extrapolación compatible con la extensión temporal de las series analizadas tras el proceso de declustering. De este modo, se evita introducir incertidumbres adicionales asociadas a periodos de retorno más elevados, que no estarían suficientemente respaldados por los datos disponibles en algunas de las etapas de modelización, garantizando una interpretación más consistente de las diferencias observadas entre modelos y frente al registro instrumental.

Los resultados obtenidos (para más información véase ficha nº6 adjunta al anexo) para el caso en estudio ponen de manifiesto diferencias claras entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA cuando se analizan las alturas significantes de oleaje extremal asociadas a un mismo periodo de retorno. La Tabla 7 recoge de forma comparativa los valores de Hs correspondientes a T = 68 años obtenidos a partir de la boya de Tenerife Sur y de las distintas etapas de modelización del punto SIMAR 4023009, incluyendo no solo los valores centrales, sino también los intervalos de confianza y su desviación respecto a la referencia instrumental.

**Tabla 7.\_** Comparación de alturas significantes extremas (Hs) para T = 68 años en el sur de Canarias: referencia instrumental y etapas del sistema SIMAR/WANA

Serie / Etapa	Hs T=68 (m)	IC inferior (m)	IC superior (m)	$\Delta$ vs Boya (m)	$\Delta$ vs Boya IC inferior (m)	$\Delta$ vs Boya IC superior (m)	Observaciones
Boya Tenerife Sur (1998-2025)	3,76	3,12	4,55	0	0	0	Referencia instrumental
SIMAR-44 (1958-2005)	4,16	2,32	7,86	0,40	-0,80	3,31	Valor central alto, incertidumbre elevada
WANA-HIRLAM (2006-2018)	3,94	2,83	6,17	0,18	-0,29	1,62	Próximo a boya, dispersión apreciable
WANA-HARMONIE (2018-actualidad)	2,75	2,59	2,82	-1,01	-0,53	-1,73	Valor bajo, IC estrecho
SIMAR completo (1958-actualidad)	3,45	2,97	3,94	-0,31	-0,15	-0,61	Promedio al mezclar etapas

Fuente: Elaboración propia.

La boya de Tenerife Sur define un marco instrumental caracterizado por alturas significantes extremas moderadas, con un valor central de Hs = 3,76 m para el periodo de retorno considerado y un intervalo de confianza comprendido entre 3,12 m y 4,55 m. Este resultado constituye la referencia física fundamental frente a la cual se evalúan las estimaciones modelizadas, tanto en términos de magnitud central como de dispersión asociada.

La etapa SIMAR-44 proporciona un valor central de Hs = 4,16 m, ligeramente superior al de la boya (+0,40 m), situándose dentro del mismo orden de magnitud. No obstante, el análisis de los intervalos de confianza revela una incertidumbre muy elevada, con un límite inferior claramente por debajo del instrumental (-0,80 m) y, especialmente, un límite superior que excede ampliamente al de la boya (+3,31 m). Este comportamiento indica que, aun contando con una mayor extensión temporal, la extrapolación extremal basada en SIMAR-44 en este ámbito presenta una dispersión considerable, asociada a la sensibilidad del ajuste en la cola de la distribución.

La etapa WANA-HIRLAM ofrece un valor central de Hs = 3,94 m, muy próximo al instrumental (+0,18 m), lo que podría interpretarse inicialmente como una buena concordancia en términos de magnitud. Sin embargo, sus intervalos de confianza muestran una dispersión apreciable, con un límite inferior ligeramente inferior al de la boya (-0,29 m) y un límite superior significativamente

más elevado (+1,62 m). Este resultado pone de manifiesto que la aparente proximidad del valor central no implica necesariamente una mayor robustez estadística, y subraya la necesidad de considerar explícitamente la incertidumbre asociada cuando se trabaja con series de duración limitada.

Por su parte, la etapa WANA-HARMONIE proporciona valores extremos sensiblemente inferiores a los instrumentales, con un valor central de  $H_s = 2,75$  m (-1,01 m respecto a la boya). A diferencia de las etapas anteriores, esta estimación se acompaña de intervalos de confianza estrechos, tanto en su límite inferior (-0,53 m) como, de forma más acusada, en el superior (-1,73 m). Si bien esta aparente estabilidad estadística podría resultar atractiva desde un punto de vista numérico, la comparación directa con la referencia instrumental evidencia un sesgo negativo, lo que aconseja una interpretación especialmente cautelosa de estos resultados en términos de diseño.

El ajuste realizado a partir de la serie SIMAR completa, obtenida mediante la combinación de etapas, conduce a un valor central intermedio ( $H_s = 3,45$  m; -0,31 m respecto a la boya) y a intervalos de confianza moderados, ligeramente inferiores a los instrumentales tanto en el límite inferior (-0,15 m) como en el superior (-0,61 m). Este comportamiento ilustra que la mezcla de etapas no elimina la incertidumbre inherente al análisis extremal, sino que tiende a suavizar las diferencias entre configuraciones, sin garantizar una mayor coherencia física con el registro instrumental.

En conjunto, la comparación realizada pone de manifiesto que, incluso para un mismo periodo de retorno y una misma localización, la altura significativa de proyecto en aguas profundas puede variar de forma sustancial en función de la etapa del sistema SIMAR/WANA empleada, no solo en términos de valor central, sino también, y de forma especialmente relevante, en el rango de incertidumbre asociado.

Desde una perspectiva ingenieril, estas diferencias adquieren especial relevancia al constituir la altura significativa en aguas profundas la condición de contorno a partir de la cual se desarrollan posteriormente los estudios de propagación y dimensionamiento de la actuación. Aunque la respuesta final en el emplazamiento depende de procesos de transformación del oleaje como la refracción, el shoaling o la rotura, divergencias del orden de un metro en  $H_s$  en aguas profundas representan variaciones significativas en el estado de mar de referencia del proyecto. En consecuencia, la elección de la etapa del sistema de modelización utilizada para estimar el régimen

extremal puede condicionar de forma apreciable las condiciones de cálculo adoptadas y, por tanto, el nivel de seguridad y robustez del diseño resultante.

#### **7.4.4.4. Conclusiones del ejemplo**

El ejemplo desarrollado en este ámbito para el sur de Canarias pone de manifiesto que, incluso para una misma localización y un mismo periodo de retorno de diseño, la estimación de la altura significativa del oleaje en aguas profundas puede variar de forma sustancial en función de la etapa del sistema SIMAR/WANA empleada. Estas diferencias no afectan únicamente al valor central de  $H_s$ , sino también, y de forma especialmente relevante, al rango de incertidumbre asociado a la estimación extremal.

Debe subrayarse que las magnitudes analizadas corresponden a condiciones de oleaje en aguas profundas y no constituyen directamente la altura de ola de diseño en la zona de actuación. Dichos valores deben entenderse como un condicionante de partida, que requiere posteriormente su propagación y transformación hacia la costa mediante modelos de propagación adecuados antes de ser empleados en el dimensionamiento de la actuación.

El ejercicio confirma que el análisis extremal no debe interpretarse como un procedimiento mecánico orientado a la obtención de un único valor correcto, sino como una herramienta destinada a evaluar la sensibilidad del diseño frente a distintas configuraciones del sistema de modelización y frente a las limitaciones estadísticas inherentes a las series disponibles.

Estas consideraciones sirven de base para analizar, en el subapartado siguiente, las implicaciones prácticas de esta sensibilidad en el proceso de dimensionamiento.

#### **7.3.5. Implicaciones prácticas para el dimensionamiento**

El análisis desarrollado en este capítulo pone de manifiesto que la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a un periodo de retorno de diseño no es un resultado único ni invariante, sino que depende de forma sensible de la etapa del sistema SIMAR/WANA empleada y de la longitud temporal de la serie utilizada en el ajuste extremal. Esta circunstancia tiene implicaciones directas en el dimensionamiento de actuaciones de ingeniería marítima, especialmente cuando el oleaje extremo constituye uno de los condicionantes dominantes del diseño.

En primer lugar, se debe aclarar que las magnitudes de Hs obtenidas mediante análisis extremal en aguas profundas no constituyen directamente la altura de ola de diseño en la zona de actuación. Se trata de condiciones de contorno en aguas profundas que deben ser posteriormente propagadas y transformadas hacia la costa mediante modelos adecuados, incorporando los efectos de la batimetría, la orientación del litoral, la refracción, la disipación y, en su caso, la interacción con estructuras existentes. No obstante, la elección de estas condiciones de partida condiciona de forma decisiva los resultados finales del proceso de dimensionamiento.

Desde un punto de vista práctico, los resultados muestran que distintas etapas del sistema SIMAR/WANA pueden conducir, para un mismo periodo de retorno, a valores centrales de Hs sensiblemente diferentes y, sobre todo, a rangos de incertidumbre muy dispares. En este contexto, la dispersión entre etapas no debe interpretarse como una anomalía a corregir, sino como una información relevante sobre la sensibilidad del problema y sobre las limitaciones estadísticas inherentes a las series disponibles.

Cuando existe registro instrumental, la boya debe considerarse la referencia física principal para contextualizar los órdenes de magnitud del oleaje extremo en aguas profundas. La comparación entre modelos y boya permite evaluar la plausibilidad física de las estimaciones extremales y detectar posibles sesgos asociados a determinadas etapas del sistema. En estos casos, la dispersión observada entre las distintas configuraciones del modelo puede utilizarse de forma explícita como una medida de la incertidumbre asociada a las condiciones de diseño.

En ausencia de registros instrumentales locales, situación relativamente frecuente en determinados ámbitos del litoral español y especialmente en entornos insulares, la interpretación debe ser necesariamente más prudente. El análisis por etapas adquiere entonces un papel central, ya que permite acotar un rango plausible de magnitudes extremas en lugar de apoyarse en un único valor derivado de la serie completa. Este enfoque evita ocultar la incertidumbre inherente al análisis extremal y proporciona al proyectista una base más transparente para la toma de decisiones en la fase de definición de las condiciones de partida del diseño.

Estas implicaciones prácticas sirven de base para formular, en el apartado siguiente, recomendaciones generales para el uso e interpretación de los datos SIMAR/WANA en proyectos de ingeniería marítima.

### **7.5.Recomendaciones para el uso e interpretación de los datos SIMAR/WANA en proyectos de ingeniería marítima**

Los resultados obtenidos en el presente trabajo ponen de manifiesto que las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no constituyen una serie homogénea en el tiempo, y que las diferencias introducidas por las sucesivas actualizaciones del modelo afectan de manera apreciable tanto a la caracterización estadística básica como, especialmente, al régimen extremal del oleaje en aguas profundas. Esta circunstancia implica que la utilización directa e indiscriminada de las series completas puede inducir interpretaciones erróneas si no se tiene en cuenta la estructura interna del sistema de modelización.

Si bien el objetivo principal del estudio ha sido analizar la homogeneidad entre etapas y cuantificar su impacto en la estimación de magnitudes extremas, los resultados alcanzados no constituyen únicamente una constatación estadística, sino que se traducen en implicaciones operativas de aplicación inmediata en el ejercicio profesional, donde el proyectista debe seleccionar valores concretos del oleaje extremal, justificar su procedencia y garantizar su coherencia física y estadística. La mera constatación de la existencia de diferencias entre etapas no resulta suficiente si no se acompaña de criterios que orienten su utilización en el marco de un proyecto real.

Por ello, se propone a continuación un conjunto de recomendaciones destinadas a facilitar la interpretación técnica de los datos SIMAR/WANA en estudios de clima marítimo aplicados a la ingeniería marítima y costera. Estas recomendaciones no pretenden establecer un procedimiento normativo cerrado, sino proporcionar un marco metodológico estructurado que permita gestionar de forma explícita la heterogeneidad detectada entre etapas, integrar adecuadamente la información instrumental disponible y transformar la incertidumbre asociada al análisis extremal en criterios de decisión técnicamente fundamentados.

#### **7.5.1. Consideraciones generales sobre homogeneidad entre etapas**

El análisis desarrollado a lo largo del presente trabajo ha demostrado que las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA se sustentan en configuraciones diferenciadas en forzamiento atmosférico, dominio espacial, resolución y parametrizaciones físicas. Estas diferencias no responden a simples actualizaciones, sino a cambios sustanciales en la estructura del sistema de modelización, con repercusiones directas en la caracterización estadística del oleaje y, de forma particularmente sensible, en la cola de la distribución.

En este contexto, la integración de todas las etapas en una única serie continua no puede considerarse metodológicamente indiferente. La concatenación de registros generados bajo configuraciones distintas puede introducir discontinuidades que no reflejan una evolución real del clima marítimo, sino variaciones inherentes al propio modelo. Esta cuestión adquiere especial relevancia en la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados, donde pequeñas diferencias en la representación de los estados de mar más energéticos se amplifican en la extrapolación extremal.

La heterogeneidad entre etapas no implica que una configuración sea necesariamente superior a otra, sino que cada una debe interpretarse dentro de su marco temporal y técnico específico. Desde la perspectiva del proyectista, ello exige identificar y documentar expresamente la etapa empleada en cualquier análisis extremal, evitando asumir que las actualizaciones sucesivas constituyen mejoras lineales en términos de representatividad del régimen extremo.

En consecuencia, antes de estimar alturas significantes del oleaje asociadas a periodos de retorno de interés ingenieril, resulta recomendable evaluar la coherencia interna de la serie utilizada y considerar, cuando existan indicios de divergencia entre configuraciones del sistema, la conveniencia de realizar el análisis de forma segmentada por etapas. Este enfoque permite mejorar la interpretación de los resultados y, en particular, identificar en qué medida las diferencias observadas pueden estar asociadas a la estructura del sistema de modelización. De este modo, parte de la incertidumbre implícita en las estimaciones extremales puede hacerse explícita dentro del proceso de evaluación técnica.

### **7.5.2. Marco de decisión para la selección del oleaje extremal**

La constatación de diferencias estructurales entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA exige establecer un marco de decisión explícito para la selección del oleaje extremal en estudios aplicados a la ingeniería marítima. La estimación de la altura significativa asociada a un determinado periodo de retorno no puede considerarse independiente del origen y configuración de los datos empleados, sino que depende de la etapa de modelización, la longitud de la serie y la disponibilidad de contraste instrumental.

Cuando existe registro instrumental en aguas profundas físicamente representativo del emplazamiento considerado, la primera verificación debe centrarse en la continuidad del mismo, evaluando la disponibilidad de datos válidos, la posible existencia de vacíos prolongados y la

coherencia temporal de los eventos energéticos registrados. Solo tras esta depuración puede considerarse la boya como referencia física prioritaria para contextualizar el orden de magnitud del oleaje extremo en el punto objeto de análisis. En este marco, las series modelizadas no sustituyen al registro instrumental, sino que lo complementan, ampliando el horizonte temporal y permitiendo evaluar la estabilidad de la función extremal bajo distintas configuraciones del modelo.

En ausencia de registro instrumental representativo, el análisis segmentado por etapas constituye una herramienta especialmente útil para evaluar la sensibilidad de las estimaciones extremales a la configuración del sistema de modelización y para identificar el rango de incertidumbre estructural asociado. Las distintas configuraciones no son directamente intercambiables, ni desde el punto de vista estadístico ni desde una perspectiva ingenieril.

El análisis de sensibilidad consiste en evaluar cómo varía la estimación del oleaje extremo cuando se utilizan distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA. Esta comparación permite cuantificar la incertidumbre estructural asociada al modelo y contextualizar la selección del valor de diseño

Etapas con mayor extensión temporal tienden a proporcionar funciones extremales más estables, mientras que configuraciones más recientes pueden mostrar mejor coherencia con determinados contrastes físicos, aunque con mayor incertidumbre asociada a la menor longitud de la serie. Esta dualidad obliga a interpretar conjuntamente la magnitud estimada del oleaje, la forma de la función extremal y la amplitud de los intervalos de confianza.

La variabilidad estructural observada no debe interpretarse como un error a corregir mediante la elección mecánica del valor más elevado o de la etapa más reciente, sino como una manifestación explícita de la incertidumbre estructural inherente al proceso de modelización. El uso directo de una única curva extremal derivada de la concatenación completa de etapas puede generar una falsa sensación de precisión y ocultar discontinuidades asociadas a cambios en la configuración del sistema.

Cuando una etapa concreta muestra coherencia estadística y física con el registro instrumental disponible en el emplazamiento considerado, especialmente en lo relativo al comportamiento de la cola de la distribución y a la estabilidad del ajuste extremal, puede adoptarse como etapa preferente para la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno de interés ingenieril. Esta elección debe interpretarse como una validación contextualizada para el emplazamiento y el

periodo analizado, sin que ello implique que dicha configuración pueda considerarse universalmente representativa o aplicable en otros contextos sin verificación previa.

En el presente trabajo se denomina *etapa preferente* a aquella configuración del sistema que, para un emplazamiento concreto, presenta mayor coherencia estadística y física en la caracterización del régimen extremal, considerando conjuntamente la estabilidad del ajuste extremal, la forma de la cola de la distribución y, cuando es posible, su coherencia con registros instrumentales disponibles.

En ausencia de contraste instrumental directo en el emplazamiento considerado, la selección de una etapa concreta no debe basarse exclusivamente en su antigüedad ni en su modernidad, sino en una evaluación combinada de su estabilidad estadística y su coherencia estructural. Las etapas con mayor extensión temporal tienden a proporcionar ajustes extremales más robustos desde el punto de vista estadístico, al disponer de un mayor número de excedencias independientes y menor incertidumbre asociada a la extrapolación hacia periodos de retorno elevados. Por el contrario, las configuraciones más recientes pueden incorporar mejoras en el forzamiento atmosférico, en la resolución espacial o en determinadas parametrizaciones físicas, lo que potencialmente permite una representación más detallada de ciertos estados de mar, aunque con un soporte temporal generalmente más limitado.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que la repercusión de estas diferencias no es homogénea ni lineal. En algunos ámbitos geográficos se aprecia una mayor coherencia temporal entre etapas recientes y registros instrumentales, mientras que en otros no se observa una mejora clara en la caracterización del régimen extremal. En el entorno insular canario, por ejemplo, las limitaciones asociadas al dominio de modelización condicionan la representación de determinados estados de mar, especialmente en lo relativo a oleajes de largo periodo. Asimismo, en el caso del periodo de pico no se identifica una mejora entre etapas, y en la estimación de  $H_s$  extrema las diferencias detectadas no presentan siempre el mismo sentido ni la misma magnitud. En consecuencia, el análisis desarrollado no permite afirmar la existencia de una mejora lineal y generalizada entre configuraciones sucesivas, sino que pone de manifiesto un comportamiento heterogéneo y dependiente del contexto regional.

La influencia del ámbito geográfico resulta determinante en esta interpretación. Regímenes más persistentes y energéticos, como los asociados al Atlántico norte, pueden responder de manera diferente a las actualizaciones del modelo que regímenes más episódicos y direccionalmente

complejos, como los del Mediterráneo. Del mismo modo, en entornos insulares expuestos a swell remoto, la configuración espacial del dominio adquiere un papel relevante. Por ello, la eventual superioridad de una etapa concreta no puede considerarse universal, sino necesariamente contextualizada.

En este contexto, puede considerarse adecuada una etapa concreta del modelo cuando los resultados obtenidos a partir de ella muestran un comportamiento estable y coherente desde el punto de vista estadístico, es decir, cuando la estimación de los valores extremos no presenta oscilaciones excesivas ni resultados físicamente inconsistentes con el contexto marítimo del emplazamiento. En particular, resulta relevante que la parte alta de la distribución, aquella que recoge los temporales más intensos, no muestre irregularidades o cambios bruscos que comprometan la fiabilidad de la extrapolación hacia periodos de retorno elevados.

No obstante, incluso cuando una etapa presenta este comportamiento adecuado, sus resultados no deben analizarse de forma aislada. La comparación con los obtenidos a partir de otras configuraciones disponibles permite evaluar en qué medida la estimación del oleaje extremo depende de la estructura del modelo empleado. El objetivo de esta comparación no es seleccionar de forma mecánica la configuración más favorable o la más reciente, sino identificar el rango dentro del cual varían las magnitudes extremas y, con ello, reconocer la influencia que tiene la propia configuración del modelo en el resultado final.

En este punto conviene distinguir entre dos tipos de incertidumbre que intervienen en la estimación del oleaje extremo. Por un lado, la incertidumbre estadística propia del ajuste extremal, que se refleja en los intervalos de confianza del modelo POT-GPD y depende del tamaño de la muestra y del proceso de extrapolación hacia periodos de retorno elevados. Por otro, la incertidumbre estructural asociada a las diferencias entre configuraciones del sistema de modelización, que se manifiesta cuando distintas etapas proporcionan estimaciones extremas diferentes para un mismo emplazamiento y periodo de retorno.

Ambas dimensiones no son equivalentes. Que el intervalo de confianza obtenido para una etapa concreta incluya los valores estimados por otras configuraciones no implica que estas queden estadísticamente explicadas por aquella, sino simplemente que la variabilidad entre modelos se encuentra dentro del margen de incertidumbre estadística considerado. En términos prácticos, ello significa que la diferencia entre modelos no desaparece, sino que pasa a formar parte de la incertidumbre global del análisis.

Por ejemplo, si una etapa proporciona una estimación de 6,5 m con un intervalo de confianza entre 6,2 y 7,1 m, y otra configuración arroja un valor de 6,9 m, el hecho de que este último quede dentro del intervalo no implica que ambos modelos sean equivalentes, sino que la diferencia observada se sitúa dentro del margen de incertidumbre estadística del primero. En este caso, puede adoptarse como valor de referencia el estimado por la etapa preferente, incorporando, cuando resulte necesario, el límite superior del intervalo de confianza como margen conservador adicional.

En cambio, si otra etapa ofreciera un valor de 7,4 m, claramente fuera de dicho intervalo, ello indicaría que la discrepancia entre configuraciones supera la incertidumbre estadística interna del ajuste y pone de manifiesto una componente adicional de incertidumbre estructural. En esta situación, la decisión de diseño no debería limitarse al intervalo de confianza asociado a una única etapa. Cuando la discrepancia entre configuraciones supera la incertidumbre estadística interna del ajuste, resulta necesario incorporar explícitamente esa diferencia en el proceso de dimensionamiento. Desde el punto de vista ingenieril, pueden adoptarse distintas estrategias coherentes.

Una primera opción podría consistir en considerar el valor más elevado como escenario de diseño severo y verificar el comportamiento estructural frente a dicha hipótesis, evaluando la respuesta del proyecto ante un nivel de sollicitación más exigente.

Una segunda alternativa podría ser seleccionar un valor intermedio dentro del rango observado entre configuraciones, justificando su elección en función de la estabilidad estadística del ajuste, la coherencia física del resultado y el contexto específico del emplazamiento.

En este contexto, el denominado *valor intermedio* puede interpretarse como una estimación situada dentro del rango definido por las distintas configuraciones del modelo, adoptada cuando las discrepancias entre etapas no permiten identificar una única estimación claramente representativa. Su selección debe justificarse a partir de la estabilidad del ajuste extremal, la coherencia física del resultado y el contexto específico del emplazamiento analizado.

En términos prácticos, el denominado *escenario severo* corresponde generalmente al valor extremo más elevado estimado entre las configuraciones disponibles del sistema. Cuando la incertidumbre estadística asociada al ajuste extremal resulta significativa, este valor puede complementarse con un margen adicional derivado del límite superior del intervalo de confianza. Este criterio resulta

especialmente adecuado cuando la divergencia entre configuraciones es elevada y la actuación proyectada corresponde a infraestructuras críticas o de alto coste de fallo.

Otra opción, optar por mantener el valor central de la etapa preferente e incorporar un margen adicional explícito, proporcional a la diferencia detectada entre configuraciones, de manera que la incertidumbre estructural quede integrada de forma transparente en la magnitud adoptada para diseño.

La elección entre estas alternativas debe realizarse en función de las características específicas de la actuación proyectada. Cuando la discrepancia entre configuraciones supera claramente la incertidumbre estadística interna del ajuste extremal, puede interpretarse como una manifestación explícita de incertidumbre estructural significativa. En estas circunstancias, y especialmente en el caso de infraestructuras críticas, como diques, defensas o instalaciones portuarias, donde el fallo puede tener consecuencias estructurales graves, elevados costes económicos o afecciones significativas a la seguridad, resulta razonable considerar directamente el escenario más severo dentro del rango estimado entre configuraciones como hipótesis de diseño.

Por el contrario, en actuaciones reversibles, adaptativas o de menor coste de fallo, como regeneraciones de playa, puede ser razonable basar el dimensionamiento en el valor central de la etapa preferente, complementándolo con análisis de sensibilidad, sin necesidad de adoptar sistemáticamente el extremo más elevado del rango.

En definitiva, el nivel de conservadurismo adoptado debe guardar coherencia con la magnitud del riesgo asumido y con el grado de incertidumbre que el proyecto pueda admitir sin comprometer su funcionalidad o seguridad.

Asimismo, la estimación del régimen extremal no debe considerarse estrictamente invariante en el tiempo. La repetición del análisis en un mismo emplazamiento puede conducir a resultados diferentes si se modifica la configuración de la etapa empleada o se amplía el soporte temporal disponible. Esta circunstancia refuerza la necesidad de documentar explícitamente la versión utilizada, el periodo temporal considerado y los criterios adoptados para la selección del objeto de diseño, garantizando la trazabilidad del estudio y evitando interpretar las actualizaciones del sistema como una mejora en la estimación del régimen extremal.

La Figura 160 sintetiza este proceso de decisión, integrando la disponibilidad instrumental, la selección de etapa, la evaluación de la incertidumbre y la interpretación coherente de los resultados dentro de un marco técnico aplicable al proyecto.

Con el fin de transformar las recomendaciones anteriores en un instrumento operativo más estructurado, se propone la siguiente matriz orientativa de decisión (Tabla 8), en la que se cruzan el grado de divergencia entre configuraciones del sistema y la tipología de la actuación a proyectar. Esta matriz no sustituye el juicio técnico, pero permite reducir la subjetividad en la selección del escenario de diseño.

**Tabla 8.** Matriz orientativa de decisión para la interpretación ingenieril de divergencias entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA en la estimación del oleaje extremal.

Divergencia entre configuraciones del modelo	Actuaciones reversibles o de bajo coste de fallo	Infraestructuras críticas o de alto coste de fallo
Baja divergencia ( $\approx \leq 10\%$ o diferencias menores dentro del intervalo de confianza)	Adoptar el valor central de la etapa preferente.	Adoptar el valor central de la etapa preferente, pudiendo considerar el límite superior del intervalo de confianza como referencia conservadora.
Divergencia moderada ( $\approx 10-15\%$ o del orden de 1 m)	Adoptar el valor central de la etapa preferente y realizar análisis de sensibilidad frente a otras configuraciones.	Considerar un valor intermedio alto dentro del rango observado o verificar el escenario más severo como hipótesis adicional de cálculo.
Divergencia elevada ( $>15\%$ o claramente fuera del intervalo de confianza de la etapa preferente)	Justificar explícitamente la elección. Puede adoptarse un valor intermedio razonado dentro del rango observado acompañado de análisis de sensibilidad.	Adoptar el escenario más severo identificado entre configuraciones y verificar el comportamiento estructural frente a dicha hipótesis.

Fuente: *Elaboración propia.*

Los umbrales de divergencia empleados en la matriz no deben interpretarse como valores normativos universales ni como criterios mecánicos de diseño, sino como rangos orientativos derivados del orden de magnitud de las diferencias observadas en el presente estudio. Su finalidad es proporcionar un marco metodológico de apoyo a la interpretación de la incertidumbre estructural asociada a las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA, debiendo aplicarse siempre de forma contextualizada en función del emplazamiento, la variable analizada, el periodo de retorno considerado y la criticidad de la actuación proyectada.

En términos generales, divergencias del orden del 10% pueden considerarse dentro del margen habitual de variabilidad entre configuraciones del sistema, mientras que discrepancias superiores al 15% o del orden de un metro en la altura significativa del oleaje pueden adquirir relevancia desde el punto de vista ingenieril, especialmente en el caso de infraestructuras críticas donde el coste de fallo es elevado.

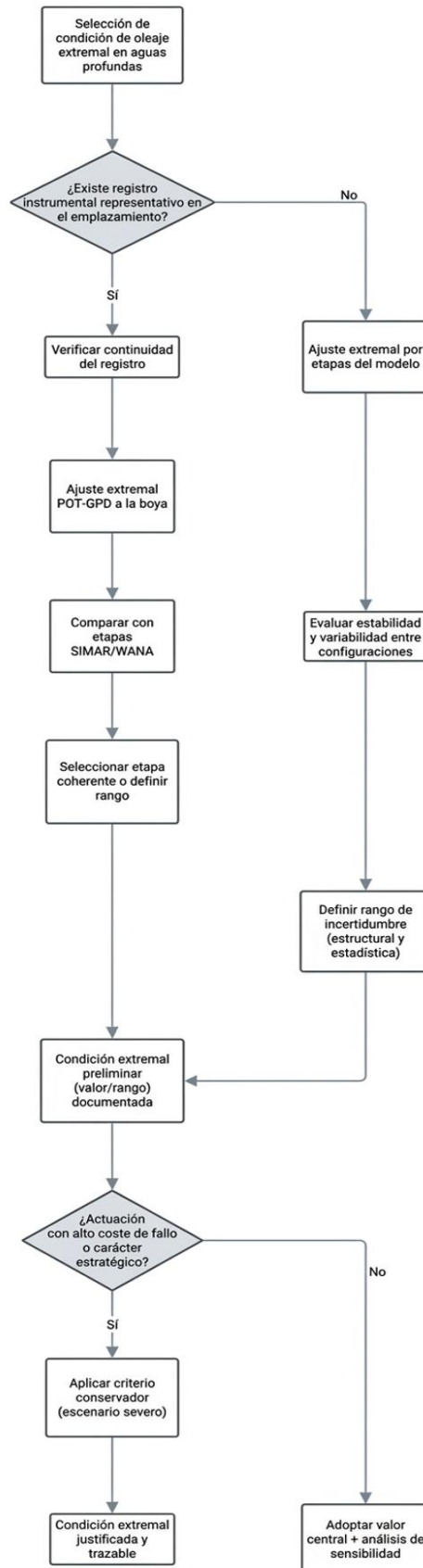


Figura 160.\_ Diagrama de decisión para la utilización de datos SIMAR/WANA en el análisis de oleaje extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

La matriz se organiza cruzando dos dimensiones principales. En primer lugar, el grado de divergencia entre las estimaciones extremas obtenidas con distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA. En segundo lugar, la tipología de la actuación a proyectar, diferenciando entre actuaciones reversibles o de bajo coste de fallo y aquellas infraestructuras donde el fallo puede tener consecuencias estructurales o económicas significativas. El cruce de ambas dimensiones permite orientar la selección del escenario de diseño más adecuado en cada caso.

Con el fin de caracterizar de forma objetiva la discrepancia entre configuraciones del sistema, la divergencia entre estimaciones extremas se evalúa a partir del rango relativo entre los valores obtenidos para un mismo periodo de retorno. En términos operativos, la divergencia relativa entre configuraciones puede expresarse como la diferencia relativa entre la estimación máxima y mínima obtenida entre configuraciones del modelo:

$$\Delta H_s = \frac{H_{s,max} - H_{s,min}}{H_{s,min}} \times 100$$

donde  $H_{s,max}$  y  $H_{s,min}$  representan respectivamente las estimaciones extremas máxima y mínima obtenidas entre las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA para el emplazamiento analizado.

En términos prácticos, la matriz se aplica identificando primero el nivel de divergencia existente entre configuraciones del modelo en el emplazamiento analizado y, posteriormente, seleccionando el criterio de adopción del oleaje de proyecto en función del tipo de actuación y de la gravedad potencial de un eventual fallo estructural.

La aplicación de esta matriz permite vincular explícitamente la dispersión estructural observada entre configuraciones del modelo con el nivel de riesgo asumido en el proyecto, integrando de forma coherente el análisis estadístico, el marco normativo y la responsabilidad técnica del proyectista.

En aquellos casos en los que la matriz de decisión recomienda adoptar un valor situado en la parte alta del rango observado entre configuraciones del modelo (escenario intermedio-alto), resulta conveniente definir un criterio operativo que permita estimar dicha magnitud de forma reproducible. A efectos ilustrativos, en este trabajo se aproxima este valor mediante una estimación situada aproximadamente en el 75 % del intervalo definido entre las estimaciones mínima y máxima obtenidas entre configuraciones, lo que puede expresarse como:

$$H_{s,alto} = H_{s,min} + 0.75 (H_{s,max} - H_{s,min})$$

donde  $H_{s,min}$  y  $H_{s,max}$  representan respectivamente las estimaciones extremales mínima y máxima obtenidas entre las distintas configuraciones del sistema de modelización. Este criterio no pretende establecer una regla normativa estricta, sino proporcionar una referencia operativa que sitúe la hipótesis de cálculo en la parte superior del rango observado, manteniendo al mismo tiempo una cierta distancia respecto al escenario más severo.

Este criterio permite reducir la subjetividad en la selección del escenario de cálculo cuando la divergencia entre configuraciones es apreciable pero no suficientemente elevada como para adoptar directamente el escenario más severo.

Con la finalidad de facilitar la interpretación operativa de los criterios expuestos, la Figura 161 sintetiza la matriz de decisión propuesta, en la que se establece la relación entre el grado de divergencia entre configuraciones del modelo y la criticidad de la actuación proyectada. Esta representación permite identificar de forma inmediata el nivel de conservadurismo recomendado en la selección de la condición de oleaje en aguas profundas empleada como base para el diseño.

	<b>Baja Divergencia</b> ( $\leq 10\%$ o intervalo confianza)	<b>Divergencia Moderada</b> ( $\approx 10-15\%$ o $\sim 1$ m)	<b>Divergencia Elevada</b> ( $> 15\%$ o fuera intervalo)
<b>Infraestructuras críticas / Alto coste de fallo</b>	Valor central e incorporar margen de confianza	Escenario alto del rango o verificar escenario severo	<b>Escenario más severo entre configuraciones</b>
<b>Actuaciones reversibles / Bajo coste de fallo</b>	Adoptar valor central de etapa preferente	Valor central e incorporar análisis de sensibilidad	Valor intermedio entre configuraciones

Aumento de divergencia

Figura 161.\_ Representación sintética del criterio de selección del oleaje de diseño en función del grado de divergencia entre configuraciones del modelo y de la criticidad de la actuación proyectada.  
Fuente: Elaboración propia.

Para ilustrar de forma operativa la aplicación del marco de decisión propuesto, se presenta a continuación un ejemplo simplificado basado en resultados representativos del orden de magnitud observado en el presente estudio.

A modo ilustrativo, considérese un emplazamiento en el que el análisis extremal realizado para un mismo periodo de retorno a partir de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA proporciona las siguientes estimaciones de altura significativa:

- SIMAR-44: 6,6 m
- WANA-HIRLAM: 6,9 m
- WANA-HARMONIE: 7,5 m

El rango de estimaciones se sitúa, por tanto, entre 6,6 m y 7,5 m, lo que corresponde a una divergencia relativa aproximada del 14 % entre configuraciones del modelo. Según los criterios definidos en la Tabla 8, esta discrepancia se situaría dentro del rango de divergencia moderada.

Supóngase, a efectos ilustrativos, que la etapa preferente seleccionada para el emplazamiento considerado corresponde a SIMAR-44, al presentar en este caso un ajuste extremal estadísticamente más estable y una representación más coherente de la cola de la distribución en comparación con otras configuraciones disponibles.

La estimación extremal obtenida a partir de esta configuración proporciona un valor de 6,6 m, con un intervalo de confianza comprendido entre 6,4 m y 7,0 m. Este intervalo refleja la incertidumbre estadística asociada al propio ajuste extremal del modelo POT-GPD, derivada del tamaño de la muestra disponible y del proceso de extrapolación hacia periodos de retorno elevados.

La estimación obtenida a partir de WANA-HIRLAM (6,9 m) se sitúa dentro de este intervalo de confianza, lo que indica que la diferencia entre ambas configuraciones puede interpretarse como compatible con la incertidumbre estadística del ajuste extremal.

Sin embargo, la estimación obtenida con WANA-HARMONIE (7,5 m) supera claramente el límite superior del intervalo de confianza anterior, lo que pone de manifiesto la existencia de una incertidumbre estructural adicional, asociada a las diferencias existentes entre configuraciones del sistema de modelización. En este caso, la discrepancia observada entre configuraciones no puede explicarse únicamente por la incertidumbre estadística interna del ajuste extremal.

En este contexto, el intervalo de confianza describe únicamente la incertidumbre asociada al ajuste extremal dentro de una configuración concreta del modelo, mientras que la diferencia observada entre configuraciones refleja una incertidumbre estructural adicional vinculada a la propia formulación del sistema de modelización. Esta situación es precisamente la que motiva la utilización de la matriz de decisión propuesta, que permite integrar ambas fuentes de incertidumbre en la selección del escenario de diseño.

Si la actuación proyectada correspondiera a una intervención reversible o de bajo coste de fallo, la matriz de decisión indicaría la conveniencia de adoptar como referencia el valor central de la etapa preferente (6,6 m), complementándolo con un análisis de sensibilidad frente a configuraciones alternativas, evaluando cómo varían los resultados del dimensionamiento si se utilizan valores próximos al mínimo y al máximo del rango estimado entre configuraciones.

Por el contrario, si se tratara de una infraestructura crítica, como un dique portuario o una instalación con elevado coste de fallo, el marco de decisión propuesto orientaría hacia la adopción de un escenario situado en la parte superior del rango observado o hacia la verificación del escenario más severo, representado en este caso por la estimación de 7,5 m, como hipótesis adicional de cálculo estructural.

Este ejemplo pone de manifiesto que la interpretación ingenieril del oleaje extremal no depende únicamente de la incertidumbre estadística del ajuste extremal, sino también de la incertidumbre estructural asociada a las diferencias entre configuraciones del modelo. En consecuencia, ambas dimensiones deben considerarse conjuntamente en la selección del escenario de diseño.

En este contexto, la matriz propuesta debe interpretarse como una herramienta orientativa de apoyo a la toma de decisiones. Su formulación se basa en los órdenes de magnitud de las diferencias observadas en el presente estudio entre las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA.

Su objetivo es ayudar a interpretar de forma coherente la incertidumbre asociada al uso de estas configuraciones, relacionando tres aspectos principales. Por un lado, el grado de divergencia entre los resultados obtenidos con distintas configuraciones del modelo. Por otro, la disponibilidad de registros instrumentales que permitan contrastar las estimaciones. Finalmente, la criticidad de la actuación proyectada.

No obstante, la matriz no pretende sustituir el juicio técnico del proyectista ni los análisis específicos que deban realizarse en cada proyecto, sino servir como una referencia metodológica que facilite una interpretación más transparente de las estimaciones extremas.

### **7.5.3. Gestión operativa del periodo de pico ( $T_p$ )**

Aunque la estimación extremal se centra principalmente en la altura significativa del oleaje, la definición del estado de mar de proyecto no puede basarse únicamente en este parámetro. En la aplicación práctica, la selección del estado de mar de contorno debe considerar conjuntamente la

altura significativa y el periodo de pico del oleaje. El periodo de pico debe adoptarse de forma coherente con los episodios que sustentan la Hs de referencia, evitando combinar una Hs extremal con un Tp extremo obtenido de forma independiente. En presencia de discrepancias relevantes en Tp entre configuraciones, resulta recomendable considerar un rango operativo de Tp asociado a los temporales más energéticos y verificar la sensibilidad de los resultados de propagación y respuesta frente a dichas variaciones.

La gestión del periodo de pico del oleaje en el marco del presente estudio requiere una consideración diferenciada respecto a la altura significativa, tanto desde el punto de vista estadístico como ingenieril. A diferencia de Hs, cuya estimación extremal constituye habitualmente el parámetro principal de dimensionamiento estructural, el periodo de pico presenta mayores dificultades asociadas a su variabilidad intrínseca y a la propia naturaleza física del parámetro.

Los resultados obtenidos muestran que la evolución entre etapas del sistema SIMAR/WANA no evidencia una mejora homogénea ni consistente en la representación de Tp. En algunos emplazamientos se observa una mayor coherencia temporal respecto a los registros instrumentales, mientras que en otros no se aprecia una evolución clara. En el entorno insular canario, además, la influencia del dominio de modelización y la presencia de oleaje de largo periodo generado en el hemisferio sur introducen condicionantes adicionales en la caracterización del periodo de pico.

Desde el punto de vista estadístico, Tp presenta, en general, una mayor variabilidad y menor estabilidad entre configuraciones del sistema que Hs. Esta circunstancia aconseja interpretar con cautela cualquier utilización directa de valores extremos de Tp asociados a periodos de retorno elevados. En consecuencia, el periodo de pico no debe considerarse un parámetro extremal independiente, sino evaluarse en coherencia con la altura significativa extremal en aguas profundas adoptada como condición inicial para la posterior propagación y el dimensionamiento de la actuación.

En términos operativos, el periodo de pico no debería seleccionarse de forma aislada respecto a Hs. En un estado de mar real, ambas variables forman parte de un mismo fenómeno físico y mantienen una relación estructural. Por ello, resulta más consistente analizar qué rangos de Tp se asocian a los estados de mar más energéticos identificados en el estudio extremal de Hs, evitando extrapolaciones independientes que puedan conducir a combinaciones físicamente inconsistentes. Este enfoque permite preservar la coherencia hidrodinámica del estado de mar de proyecto y

reducir el riesgo de adoptar condiciones que no se hayan manifestado conjuntamente en el régimen observado.

Cuando se detectan diferencias relevantes entre configuraciones del modelo en la estimación de  $T_p$ , estas deben interpretarse como una manifestación adicional de incertidumbre estructural asociada al sistema de modelización. No obstante, la relevancia de dicha incertidumbre depende del régimen predominante en el emplazamiento considerado.

En determinados sectores, como el sur del archipiélago canario, los mayores valores de  $T_p$  se asocian principalmente a mar de fondo generado en el hemisferio sur y propagado a lo largo de grandes distancias oceánicas. Durante este recorrido, la energía del swell se atenúa progresivamente por efectos acumulados de dispersión y redistribución espacial, de modo que el oleaje alcanza la región con periodos elevados pero alturas significantes moderadas. En consecuencia, los máximos de  $T_p$  no coinciden necesariamente con los episodios de mayor  $H_s$ , que suelen estar vinculados a temporales más próximos. Ambos regímenes responden a mecanismos de generación y propagación distintos, lo que refuerza la necesidad de analizar la relación  $H_s$ - $T_p$  de forma conjunta y físicamente coherente.

Desde una perspectiva metodológica avanzada, esta coherencia puede abordarse mediante enfoques probabilísticos conjuntos en los que  $H_s$  y  $T_p$  se tratan como variables dependientes. Entre estos enfoques se incluyen la construcción de contornos ambientales basados en distribuciones conjuntas o la aplicación de modelos condicionales en los que el periodo de pico se estima condicionado a la superación de un umbral extremo de  $H_s$ . Estos procedimientos permiten extrapolar estados de mar físicamente consistentes hacia periodos de retorno elevados, reduciendo el riesgo de combinaciones artificiales.

Asimismo, en contextos como el archipiélago canario, donde coexisten regímenes asociados a mar de viento local y mar de fondo generado en el hemisferio sur, puede resultar metodológicamente recomendable analizar de forma diferenciada dichas poblaciones antes de proceder al ajuste extremal, especialmente cuando su mezcla pueda afectar a la caracterización conjunta de  $H_s$  y  $T_p$ . Este tipo de segmentación permite reducir distorsiones derivadas de la superposición de mecanismos físicos distintos.

No obstante, dado que el objetivo del presente trabajo se centra en la evaluación de la homogeneidad entre etapas del sistema de modelización, la aplicación formal de estos enfoques se plantea como referencia metodológica para estudios específicos de dimensionamiento.

#### **7.5.4. Consideraciones sobre propagación y uso en diseño**

Las magnitudes extremales obtenidas en el presente estudio corresponden a condiciones de oleaje en aguas profundas, definidas en puntos de análisis homogéneos desde el punto de vista de la modelización. Estas estimaciones constituyen, por tanto, condiciones de contorno para su posterior propagación hacia la zona específica de actuación.

La altura significativa extremal estimada en aguas profundas no debe identificarse directamente con la altura de ola de cálculo en la estructura o en la línea de costa. Entre ambas magnitudes intervienen procesos físicos relevantes como la refracción, el shoaling, la difracción, la rotura y la interacción con la morfología local, lo que influye en la caracterización final del estado de mar en el emplazamiento de interés.

En consecuencia, los valores extremales obtenidos deben interpretarse como punto de partida para estudios específicos de propagación, adaptados a las condiciones de contorno del emplazamiento. La coherencia entre la fase de caracterización estadística en aguas profundas y la fase posterior de modelización física resulta esencial para garantizar la consistencia técnica del proceso de diseño.

Desde esta perspectiva, el presente trabajo se centra en la definición de condiciones extremales en aguas profundas como base para los estudios específicos de propagación y diseño que, en cada proyecto, deberán desarrollarse conforme a las características particulares del emplazamiento. En conjunto, las recomendaciones desarrolladas en este apartado configuran un esquema estructurado de interpretación y toma de decisiones aplicable al dimensionamiento en ingeniería marítima, articulando de forma coherente la caracterización estadística del régimen extremal, la variabilidad entre configuraciones del sistema y el marco normativo vigente.

#### **7.5.5. Implicaciones del estudio en términos de sostenibilidad en infraestructuras marítimas**

El dimensionamiento de infraestructuras marítimas y costeras presenta una relación directa con el consumo de recursos materiales, los costes asociados al ciclo de vida de las obras y la resiliencia de las infraestructuras frente a eventos extremos. En este contexto, la correcta caracterización del clima marítimo constituye un elemento fundamental para garantizar que las decisiones de diseño

se apoyen en bases técnicas sólidas y contribuyan a una gestión sostenible de las actuaciones costeras.

Una estimación inadecuada del oleaje extremal puede conducir a situaciones contrapuestas con implicaciones relevantes desde el punto de vista de la sostenibilidad. Por un lado, la adopción de valores excesivamente conservadores puede dar lugar a infraestructuras sobredimensionadas, con un aumento innecesario en el volumen de materiales empleados, el coste económico de la actuación y la huella ambiental asociada a su construcción. Por otro lado, una estimación insuficiente de las condiciones extremas puede incrementar la probabilidad de fallo o de deterioro prematuro de las infraestructuras, generando costes adicionales derivados de reparaciones, refuerzos o reconstrucciones.

En este sentido, los resultados del presente estudio contribuyen a mejorar la sostenibilidad del proceso de diseño en ingeniería marítima al poner de manifiesto la necesidad de analizar de forma crítica la coherencia entre las distintas configuraciones que componen la base histórica SIMAR/WANA antes de emplearlas en la estimación del oleaje extremal. La identificación de posibles divergencias entre configuraciones del modelo y su correcta interpretación permite adoptar decisiones de diseño más fundamentadas, reduciendo tanto el riesgo de sobredimensionamiento como el de infraestimación de las acciones de oleaje.

El marco interpretativo propuesto en este trabajo, sintetizado mediante la matriz de decisión presentada en el apartado anterior, proporciona una herramienta operativa que facilita la selección del oleaje de referencia en función del grado de divergencia entre configuraciones del modelo y de la criticidad de la actuación proyectada. Este enfoque permite integrar consideraciones de seguridad, eficiencia y gestión del riesgo en el proceso de diseño, favoreciendo soluciones técnicamente robustas y optimizadas desde el punto de vista del uso de recursos.

Desde esta perspectiva, el estudio se alinea con los principios recogidos en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (Industria, innovación e infraestructuras), orientado al desarrollo de infraestructuras resilientes y sostenibles, así como con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (Acción por el clima), en la medida en que contribuye a mejorar la interpretación de la información climática disponible y a reforzar la capacidad de adaptación de las infraestructuras costeras frente a condiciones extremas del medio marino.

### 7.6. Limitaciones del estudio y alcance de la generalización a otras zonas

El análisis desarrollado en este trabajo ha permitido evaluar de forma sistemática la coherencia temporal de los registros de oleaje del sistema SIMAR/WANA y su influencia en la caracterización del régimen extremal en distintos ámbitos del litoral español. No obstante, los resultados obtenidos deben interpretarse teniendo en cuenta una serie de limitaciones inherentes tanto a los datos empleados como a las decisiones metodológicas adoptadas, que condicionan el alcance de las conclusiones y su posible generalización a otros contextos.

En primer lugar, el estudio se apoya en un número limitado de puntos SIMAR y de registros instrumentales representativos de cada ámbito geográfico. Si bien la selección realizada cubre de forma razonable los principales regímenes de oleaje del litoral español (Atlántico norte y oeste, Mediterráneo y entorno insular canario), los resultados no deben interpretarse como una caracterización exhaustiva de todo el litoral, sino como un análisis comparativo basado en casos de estudio representativos. En zonas con condiciones locales singulares de exposición, batimetría o direccionalidad dominante, los patrones observados podrían diferir parcialmente de los aquí descritos.

En segundo lugar, la estimación del régimen extremal se ha realizado mediante el enfoque POT-GPD, cuya robustez depende de forma directa de la longitud temporal de las series y del número de excedencias independientes disponibles tras el proceso de declustering. En este sentido, las etapas más recientes del sistema SIMAR/WANA, caracterizadas por una menor duración temporal, presentan una incertidumbre elevada en la extrapolación hacia periodos de retorno largos. Aunque esta limitación ha sido tratada de forma explícita en el análisis, debe reconocerse que condiciona la fiabilidad de las magnitudes extremales estimadas para retornos muy superiores a la longitud de las series disponibles.

Asimismo, el análisis extremal se ha centrado de manera prioritaria en la altura significativa del oleaje como variable representativa de los eventos extremos, complementada por el análisis estadístico del periodo de pico y su coherencia temporal. No se ha abordado de forma explícita la caracterización conjunta multivariante de  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección, ni su integración directa en modelos de impacto o de respuesta estructural. En consecuencia, las conclusiones obtenidas deben entenderse como relativas al comportamiento estadístico y extremal del oleaje en aguas profundas, y no como una definición directa de condiciones de diseño en zona costera.

Otra limitación relevante se refiere al propio dominio de modelización del sistema SIMAR/WANA. En determinados ámbitos, y de forma particularmente acusada en el entorno insular canario, la proximidad del límite del dominio de cálculo condiciona la representación de oleajes de largo recorrido, especialmente aquellos asociados a swell remoto generado en latitudes alejadas. Este aspecto no invalida los resultados obtenidos para la caracterización de las alturas significantes extremas dominantes, pero sí introduce restricciones adicionales en la interpretación de parámetros como el periodo de pico y en la comparación directa modelo-boya.

En cuanto al alcance de la generalización de los resultados, el trabajo permite extraer conclusiones robustas sobre la no intercambiabilidad de las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA y sobre la sensibilidad del análisis extremal a las actualizaciones del sistema de modelización, especialmente cuando se trabaja con series de distinta longitud temporal y diferente soporte estadístico.

Estas conclusiones son transferibles, en términos metodológicos y de interpretación, a otros tramos del litoral español y, con las debidas cautelas, a otros ámbitos en los que se empleen series modelizadas de larga duración sujetas a cambios estructurales en el tiempo. No obstante, la extrapolación de los resultados no debe entenderse como una transferencia directa de magnitudes extremales, sino como una guía para la lectura crítica, comparativa y contextualizada de los datos en estudios de oleaje extremo.

Sin embargo, la cuantificación concreta de las diferencias en magnitud de Hs extremal, así como la jerarquización relativa entre etapas, debe considerarse dependiente del ámbito geográfico, del régimen de oleaje dominante y de la disponibilidad de registros instrumentales de contraste. En este sentido, la extrapolación directa de valores numéricos a otras zonas sin un análisis específico previo no resulta recomendable.

En conjunto, las limitaciones identificadas no comprometen los objetivos del estudio, sino que delimitan con claridad su alcance y refuerzan la validez de las conclusiones obtenidas. El trabajo no pretende proporcionar valores universales de oleaje extremo, sino establecer un marco metodológico riguroso para el análisis crítico de series SIMAR/WANA, la evaluación de su coherencia temporal y la interpretación ingenieril de sus resultados, sentando así una base sólida para estudios específicos de carácter aplicado en distintos ámbitos del litoral español.

## 8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

---

El presente capítulo sintetiza los principales resultados y aportaciones del trabajo, integrando de forma crítica los análisis estadísticos, extremales y comparativos desarrollados a lo largo del estudio. El objetivo no es reiterar los resultados obtenidos, sino extraer conclusiones fundamentadas sobre la coherencia temporal de los registros de oleaje en España, el efecto de las actualizaciones del sistema SIMAR/WANA y las implicaciones que dichas actualizaciones tienen en la caracterización del oleaje extremo desde una perspectiva ingenieril.

Asimismo, se ponen en contexto las principales limitaciones del análisis realizado y se delimita el alcance real de la generalización de los resultados, identificando aquellos aspectos que dependen de las características regionales del oleaje, de la disponibilidad de registros instrumentales y de la longitud de las series analizadas. Sobre esta base, se plantean líneas futuras de trabajo orientadas tanto a la mejora metodológica del análisis extremal como a su aplicación práctica en proyectos de ingeniería marítima y en estudios de apoyo a la planificación y al diseño de infraestructuras costeras.

Con ello, el capítulo finaliza el trabajo aportando una visión integrada y coherente de los resultados obtenidos, reforzando su utilidad técnica y estableciendo un marco claro para la continuidad y extensión de la investigación desarrollada.

### 8.1. Conclusiones principales del estudio

A partir del análisis desarrollado y de los resultados obtenidos en los distintos ámbitos geográficos considerados, se sintetizan a continuación las principales conclusiones del presente trabajo:

**1º. Las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA no constituyen una serie temporal estadísticamente homogénea.**

El análisis desarrollado a escala nacional pone de manifiesto que las configuraciones SIMAR-44, WANA-HIRLAM y WANA-HARMONIE presentan diferencias estructurales que afectan a la caracterización estadística del oleaje. Las discontinuidades detectadas entre etapas no se interpretan como una evolución progresiva del clima marítimo durante el periodo analizado, sino como el resultado de modificaciones introducidas en el propio sistema de modelización, incluyendo cambios en el forzamiento atmosférico, la resolución espacial, el dominio de cálculo y la extensión temporal de las simulaciones.

**2º. La estimación del oleaje extremal a partir de bases de datos modelizadas está condicionada por dos fuentes diferenciadas de incertidumbre.**

La estimación del oleaje extremal a partir de bases de datos modelizadas está condicionada por dos fuentes diferenciadas de incertidumbre.

Los resultados obtenidos muestran que la variabilidad observada en la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a periodos de retorno elevados no responde únicamente a la incertidumbre estadística inherente al ajuste extremal, sino también a diferencias estructurales entre las distintas configuraciones del sistema de modelización empleadas para reconstruir el clima marítimo.

En el caso del sistema SIMAR/WANA, estas diferencias estructurales pueden traducirse en variaciones apreciables en la estimación del régimen extremal entre configuraciones del modelo, incluso cuando se analizan series correspondientes a un mismo emplazamiento y periodo temporal.

La consideración explícita de ambas fuentes de incertidumbre, estadística y estructural, resulta por tanto esencial para interpretar adecuadamente las estimaciones extremales y para fundamentar de forma transparente la selección de las condiciones de oleaje utilizadas en proyectos de ingeniería marítima.

**3º. La no homogeneidad entre etapas se manifiesta con mayor intensidad en el régimen extremal que en los estadísticos básicos del oleaje.**

La no homogeneidad entre etapas se manifiesta con mayor intensidad en el régimen extremal que en los estadísticos básicos del oleaje.

Mientras que las medias y percentiles intermedios de la altura significativa del oleaje (Hs) muestran en general una estabilidad razonable entre configuraciones del modelo, las diferencias tienden a amplificarse en la cola superior de las distribuciones.

En consecuencia, la estimación de Hs asociada a periodos de retorno de interés ingenieril resulta especialmente sensible tanto a la etapa de modelización utilizada como a la longitud de las series disponibles para el ajuste extremal.

**4º. Las diferencias entre configuraciones del modelo pueden traducirse en variaciones apreciables en la estimación del oleaje extremal.**

Las diferencias entre configuraciones del modelo pueden traducirse en variaciones relevantes en la estimación del oleaje extremal.

El análisis comparativo desarrollado sugiere que la sensibilidad entre configuraciones del sistema de modelización puede situarse habitualmente en torno al 5–15 % en aquellos ámbitos donde la coherencia entre etapas resulta relativamente elevada, mientras que en regiones más sensibles las discrepancias pueden alcanzar valores del orden del 20–35 % en el tramo alto de la distribución.

En determinados emplazamientos, estas diferencias pueden traducirse en discrepancias próximas o incluso superiores al metro en la estimación de Hs asociada a periodos de retorno elevados, lo que pone de manifiesto la relevancia ingenieril de la configuración del sistema de modelización empleada.

**5º. Las diferencias entre etapas del sistema SIMAR/WANA presentan una marcada dependencia regional.**

El análisis por ámbitos geográficos evidencia comportamientos claramente contrastados entre el norte y oeste peninsular, el Mediterráneo y el entorno insular canario. Los resultados muestran que la divergencia entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA no sigue un patrón uniforme a escala nacional, sino que depende de forma significativa de la región considerada.

En las fachadas peninsulares se observan, en varios casos, diferencias apreciables entre etapas de modelización para un mismo periodo de retorno, llegando determinadas configuraciones a proporcionar estimaciones extremales claramente superiores o inferiores al resto. Este comportamiento se manifiesta, por ejemplo, en el predominio de WANA-HIRLAM en el norte peninsular, en los valores elevados de WANA-HARMONIE en el oeste peninsular y en la progresión ascendente observada hacia WANA-HARMONIE en el este peninsular.

Por el contrario, en el norte de Canarias las estimaciones extremales muestran una mayor proximidad entre configuraciones, mientras que en el sur del archipiélago reaparecen discrepancias relevantes entre etapas. En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que

la sensibilidad del régimen extremal a la configuración del modelo está fuertemente condicionada por el contexto regional y que, en consecuencia, la interpretación de la base histórica SIMAR/WANA no puede plantearse de forma homogénea para todo el litoral español.

**6º. El entorno insular canario constituye un caso particularmente sensible a las limitaciones del dominio de modelización.**

El entorno insular canario constituye un caso particularmente sensible a las limitaciones del dominio de modelización.

Los resultados obtenidos sugieren que la proximidad del archipiélago al límite del dominio de cálculo de los modelos regionales puede influir en la representación de determinados estados de mar, especialmente los oleajes de largo periodo asociados a swell procedente de latitudes australes.

Aunque este efecto tiene una influencia limitada en la estimación de la altura significativa extrema, introduce desajustes relevantes en la caracterización espectral del oleaje, particularmente en el periodo de pico ( $T_p$ ).

**7º. La comparación entre resultados modelizados y registros instrumentales constituye un elemento esencial para evaluar la coherencia física de las estimaciones extremales.**

La comparación entre resultados modelizados y registros instrumentales constituye un elemento esencial para evaluar la coherencia física de las estimaciones extremales.

El análisis realizado muestra que ninguna de las etapas del sistema SIMAR/WANA reproduce de forma consistente en todas las regiones el comportamiento extremo registrado por las boyas, lo que pone de manifiesto la existencia de diferencias entre las estimaciones modelizadas y la evidencia instrumental.

En consecuencia, cuando existen registros instrumentales próximos, su contraste con las series modelizadas resulta especialmente recomendable, ya que permite contextualizar las estimaciones extremales y evaluar la consistencia física de los resultados obtenidos.

Desde esta perspectiva, las bases de datos modelizadas deben interpretarse como una herramienta complementaria que amplía la información disponible sobre el clima marítimo, particularmente en términos de longitud de serie y cobertura espacial, cuya interpretación

resulta más robusta cuando se integra con la evidencia proporcionada por los registros instrumentales.

**8º. La estimación del oleaje extremo no puede interpretarse como un proceso puramente mecánico orientado a la obtención de un único valor representativo.**

Los resultados obtenidos indican que la concatenación directa de las distintas configuraciones que componen la base histórica SIMAR/WANA puede transmitir una aparente continuidad estadística que no siempre responde a la evolución real del clima marítimo, sino a cambios introducidos por el propio sistema de modelización.

En consecuencia, la utilización conjunta de la serie histórica completa como si se tratara de una única serie homogénea puede introducir incertidumbre estructural adicional en la estimación del oleaje extremo, al incorporar en un mismo ajuste resultados generados bajo configuraciones de modelización distintas.

Desde esta perspectiva, la estimación de la altura significativa del oleaje asociada a un determinado periodo de retorno no debe interpretarse como un valor único derivado automáticamente de la base de datos disponible, sino como el resultado de un proceso de análisis en el que intervienen decisiones metodológicas relacionadas con la selección de la etapa del modelo considerada, la longitud de las series analizadas y la coherencia física de los resultados obtenidos.

**9º. La conveniencia de analizar separadamente las distintas etapas del sistema SIMAR/WANA depende del grado de coherencia entre configuraciones en cada región.**

Los resultados obtenidos indican que la concatenación de las distintas etapas que componen la base histórica SIMAR/WANA puede proporcionar una representación estadística razonable del régimen de oleaje en aquellos ámbitos donde las diferencias entre configuraciones resultan moderadas. Este comportamiento se observa, por ejemplo, en el norte del archipiélago canario, donde las distintas configuraciones del sistema presentan estimaciones extremales relativamente próximas.

Por el contrario, en regiones donde el análisis ha evidenciado divergencias significativas entre configuraciones, como ocurre en determinados sectores de las fachadas peninsulares o en el sur del archipiélago canario, la utilización directa de la serie concatenada puede introducir una

mayor incertidumbre en la estimación del oleaje extremo. En estos casos, el análisis diferenciado de las etapas de modelización o la contrastación con registros instrumentales próximos puede contribuir a mejorar la interpretación de los resultados.

## **8.2. Implicaciones metodológicas e ingenieriles**

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten extraer una serie de implicaciones relevantes tanto desde el punto de vista metodológico como desde la práctica de la ingeniería marítima. Más allá de la caracterización específica del comportamiento del oleaje en las distintas regiones analizadas, el estudio pone de manifiesto aspectos que afectan directamente al modo en que deben utilizarse e interpretarse las bases de datos de clima marítimo derivadas de sistemas de modelización numérica, en particular las asociadas al sistema SIMAR/WANA desarrollado por Puertos del Estado, cuando se emplean en estudios aplicados a la caracterización del oleaje para proyectos de ingeniería marítima

### **8.2.1. Implicaciones metodológicas**

Una primera implicación metodológica derivada del estudio es la conveniencia de evaluar la coherencia temporal de las series modelizadas antes de utilizarlas en análisis extremos. Cuando una serie histórica se construye mediante la concatenación de distintas configuraciones de un sistema de modelización, pueden aparecer discontinuidades que no responden a cambios reales en el régimen físico del oleaje, sino a modificaciones introducidas en el propio sistema de cálculo. En este contexto, el análisis diferenciado por etapas constituye una herramienta útil para identificar en qué medida las estimaciones extremas dependen de la configuración del modelo empleada.

Asimismo, el trabajo pone de manifiesto la importancia de considerar explícitamente la longitud de las series utilizadas en el ajuste extremal. La robustez de la estimación de magnitudes asociadas a periodos de retorno elevados depende en gran medida del número de excedencias independientes disponibles tras el proceso de *declustering*. Cuando el soporte temporal de la serie es limitado, la extrapolación hacia periodos de retorno elevados introduce necesariamente una mayor incertidumbre. En estas condiciones, resulta recomendable interpretar conjuntamente el valor central estimado y los intervalos de confianza asociados al ajuste.

Otra implicación metodológica relevante es la necesidad de integrar el análisis estadístico con la coherencia física del régimen de oleaje. En este sentido, la comparación entre resultados modelizados y registros instrumentales constituye una referencia fundamental para evaluar la

consistencia física de las estimaciones obtenidas. Esta comparación no debería limitarse a estadísticos globales de ajuste, sino extenderse al comportamiento de la cola de la distribución y a la coherencia regional de las magnitudes extremas estimadas.

Por otra parte, el estudio pone de relieve que las características del dominio espacial de modelización pueden influir en la representación de determinados estados de mar. En entornos insulares o próximos al límite del dominio de cálculo, como ocurre en el archipiélago canario, esta circunstancia puede condicionar la representación de algunos tipos de oleaje, lo que aconseja interpretar los resultados dentro de un marco físico amplio y no exclusivamente estadístico.

En conjunto, estas consideraciones ponen de manifiesto que la estimación del régimen extremal no depende únicamente del método estadístico empleado, sino también de las características del sistema de modelización y de la disponibilidad de información instrumental. En consecuencia, la documentación explícita de la etapa del modelo utilizada, del periodo temporal analizado y de los criterios adoptados en el ajuste extremal resulta esencial para garantizar la trazabilidad y la reproducibilidad de los resultados.

### **8.2.2. Implicaciones ingenieriles**

Desde una perspectiva aplicada, uno de los resultados más importantes del estudio es que la altura significativa del oleaje estimada para un determinado periodo de retorno no debe interpretarse como un valor único, fijo e independiente del procedimiento seguido para obtenerla. En otras palabras, el valor extremo calculado no depende solo del comportamiento físico del oleaje, sino también de cómo se haya construido y analizado la serie de datos empleada.

En este sentido, influyen de forma directa aspectos como la configuración del sistema de modelización utilizada, la longitud temporal de la serie disponible y la existencia o no de registros instrumentales con los que contrastar los resultados. Todos estos factores pueden modificar no solo la magnitud estimada del oleaje extremo, sino también el grado de incertidumbre con el que dicha estimación debe interpretarse.

En consecuencia, el dimensionamiento de infraestructuras marítimas no debería basarse en la selección de un único valor extremo procedente de una serie modelizada sin un análisis previo de su coherencia. Las diferencias observadas entre configuraciones del sistema pueden interpretarse como una manifestación de la incertidumbre estructural asociada al proceso de modelización, por

lo que su consideración explícita resulta necesaria para una definición técnicamente justificada de las condiciones de partida del diseño.

Esta implicación se traduce, en la práctica, en la necesidad de incorporar criterios explícitos para interpretar la divergencia entre configuraciones del sistema SIMAR/WANA, integrar adecuadamente la información instrumental disponible y adaptar el nivel de conservadurismo al tipo de actuación proyectada.

Cuando existe registro instrumental representativo del emplazamiento analizado, este constituye una referencia física prioritaria para contextualizar el orden de magnitud del oleaje extremo y evaluar la coherencia de las estimaciones obtenidas mediante modelización. Cuando dicha información no está disponible, la comparación entre distintas configuraciones del sistema permite acotar un rango de valores compatible con los resultados obtenidos y fundamentar de forma más transparente las decisiones de diseño.

En este contexto, conviene recordar que las magnitudes extremales estimadas en aguas profundas no constituyen directamente las condiciones de oleaje empleadas en el dimensionamiento final de una infraestructura marítima. Estas magnitudes representan el estado de mar de referencia en aguas profundas y deben ser posteriormente propagadas, mediante modelos de propagación de oleaje, al área costera objeto de estudio, antes de su utilización en el cálculo estructural.

Finalmente, aunque el objetivo principal del presente trabajo es metodológico, una caracterización más rigurosa del régimen extremal del oleaje permite definir con mayor precisión las condiciones de partida empleadas en el diseño de infraestructuras marítimas. Una mejor estimación del oleaje de referencia puede contribuir a evitar tanto el sobredimensionamiento innecesario de las estructuras como el incremento injustificado del consumo de materiales, favoreciendo soluciones más ajustadas a las solicitudes reales. Desde esta perspectiva, el trabajo se alinea indirectamente con los principios promovidos por la Agenda 2030, particularmente con el ODS 9 y el ODS 13.

### **8.3. Líneas futuras de trabajo**

Los resultados obtenidos en el presente trabajo han puesto de manifiesto la sensibilidad de la estimación del régimen extremal del oleaje frente a las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA, así como la existencia de discontinuidades entre etapas que no pueden atribuirse a variaciones del clima marítimo, sino a cambios introducidos en el propio sistema de modelización. A partir de estos resultados, y considerando las limitaciones inherentes al alcance del estudio, se

identifican diversas líneas de investigación que permitirían profundizar en la interpretación física y estadística de los patrones detectados y reforzar su aplicación en el ámbito de la ingeniería marítima.

### **1º. Ampliación espacial del análisis**

Una primera línea de trabajo consiste en extender el análisis a un mayor número de emplazamientos del litoral español, incorporando nuevos nodos del sistema SIMAR/WANA y registros adicionales de la red de boyas. Esta ampliación permitiría evaluar si la sensibilidad detectada entre configuraciones del sistema presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del litoral o si, por el contrario, depende del régimen energético dominante en cada región.

El litoral español abarca contextos marítimos claramente diferenciados, desde áreas de elevada energía en las fachadas atlánticas hasta zonas de menor energía media en el Mediterráneo o determinados sectores del archipiélago canario. La incorporación de emplazamientos representativos de estos distintos contextos permitiría analizar si los patrones detectados entre etapas del sistema se mantienen con independencia del régimen predominante o si están condicionados por particularidades físicas del entorno marítimo local.

Este enfoque facilitaría discriminar con mayor precisión si las diferencias observadas responden principalmente a características inherentes al sistema de modelización o si están moduladas por las condiciones físicas propias de cada región marítima

### **2º. Segmentación direccional del régimen extremal**

El presente estudio se ha desarrollado a partir del régimen escalar integrado del abanico de direcciones incidentes en cada una de las regiones costeras objeto de análisis. Aunque este enfoque resulta adecuado para una caracterización global, la integración de todas las direcciones en un único régimen escalar puede suavizar diferencias entre etapas que, en determinados sectores de incidencia, presentan mayor relevancia.

La realización de un análisis extremal sectorial permitiría identificar si determinadas orientaciones concentran la mayor sensibilidad entre etapas del sistema y evaluar su repercusión en emplazamientos donde la orientación de la costa o de las estructuras condiciona

de forma significativa la exposición al oleaje. Este planteamiento facilitaría una integración más precisa entre la caracterización estadística del régimen extremal.

Asimismo, la segmentación direccional permitiría analizar la influencia de efectos de apantallamiento derivados de la presencia de obstáculos insulares o configuraciones geomorfológicas relevantes. La representación del efecto sombra puede alterar la frecuencia de superación en determinados sectores y modificar la estimación de la cola de la distribución en emplazamientos parcialmente protegidos, con implicaciones directas en la definición de condiciones de proyecto.

### **3º. Influencia del dominio de modelización en el archipiélago canario**

En el ámbito específico del archipiélago canario, resulta especialmente pertinente profundizar en la influencia del límite espacial del dominio de modelización sobre la representación de determinados estados de mar, en particular aquellos asociados a swell remoto generado en el hemisferio sur.

La comparación de los resultados obtenidos con modelos de mayor extensión espacial o con reanálisis globales permitiría evaluar en qué medida la configuración del dominio condiciona la caracterización del régimen extremal, especialmente en lo relativo al periodo de pico y a la posible subestimación de eventos de largo recorrido.

Esta línea de investigación permitiría diferenciar con mayor precisión hasta qué punto las discrepancias observadas responden a limitaciones inherentes al dominio de modelización o si reflejan particularidades propias del régimen de oleaje que caracteriza al entorno insular.

### **4º. Caracterización conjunta de las variables del estado de mar**

El análisis desarrollado en este trabajo se ha centrado principalmente en la caracterización extremal de la altura significativa del oleaje en aguas profundas. No obstante, en el dimensionamiento de infraestructuras marítimas el estado de mar de diseño viene definido por la combinación conjunta de varias variables, entre las que destacan la altura significativa, el periodo y la dirección del oleaje.

En la práctica ingenieril habitual, una vez estimada la altura significativa correspondiente a un determinado periodo de retorno, se identifican los periodos de pico representativos que suelen

acompañar a dichos eventos. Para ello, se selecciona normalmente un número reducido de valores de  $T_p$  coherentes con la  $H_s$  de referencia. Estos estados de mar combinados constituyen posteriormente las condiciones de partida para los estudios de propagación y para la evaluación de las sollicitaciones sobre las estructuras.

En este contexto, una línea futura de investigación consistiría en analizar con mayor detalle la relación estadística entre  $H_s$  y  $T_p$  en las distintas configuraciones del sistema SIMAR/WANA, con el objetivo de evaluar si las diferencias detectadas entre etapas del modelo afectan también a la caracterización conjunta de estas variables. Este tipo de análisis permitiría mejorar la coherencia física de los estados de mar utilizados como base para el diseño de infraestructuras marítimas.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---


- [1] Afonso, J.A. (2010). *Canarias y los eventos extremos en el mar*. Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, 63-111.
- [2] Afonso, J.A. (2016). *El clima marítimo en la ingeniería de puertos y costas*. III Máster Interuniversitario en Ingeniería de Puertos y Costas ULL-ULPGC (Curso 2016-2017). La Laguna, España.
- [3] Afonso, J.A. (2018). *Las zonas de clima marítimo del Atlántico, los climas marítimos de Canarias, Madeira y África Occidental*. IV Maestría Universitaria en Ingeniería de Puertos y Costas ULPGC-ULL (Curso 2018-2019). Las Palmas de Gran Canaria, España.
- [4] Balkema, A.A., & de Haan, L. (1974). Residual life time at great age. *The Annals of Probability*, 2(5), 792-804.
- [5] Beguería, S. (2005). Uncertainties in partial duration series modelling of extremes related to the choice of the threshold value. *Journal of Hydrology*, 303, 215-230.
- [6] Beirlant, J., Goegebeur, Y., Segers, J., & Teugels, J. (2004). *Statistics of Extremes: Theory and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [7] Bidlot, J.R., Janssen, P.A.E.M., & Abdalla, S. (2007). A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. *ECMWF Technical Memorandum*, 509.
- [8] Bidlot, J.R., et al. (2002). *Intercomparison of wave forecast and analysis data sets*. ECMWF Technical Report.
- [9] Caires, S., & Sterl, A. (2005). 100-year return value estimates for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data. *Journal of Climate*, 18(7), 1032-1048.
- [10] Caires, S., & Sterl, A. (2005). Validation of ocean wind and wave reanalysis data. *Journal of Geophysical Research*, 110(C03003).
- [11] Campos, R.M., Guedes Soares, C., & Weisse, R. (2016). Comparison and evaluation of three wave hindcasts in the North Atlantic Ocean. *Ocean Engineering*, 112, 1-13.
- [12] Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer.
- [13] Cox, A.T., & Swail, V.R. (2001). A global wave hindcast over the period 1958-1997: Validation and climate assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C2), 2313-2329.
- [14] Davison, A.C., & Smith, R.L. (1990). Models for exceedances over high thresholds. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 52(3), 393-442.
- [15] Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

- [16] Janssen, P.A.E.M. (2008). Progress in ocean wave forecasting. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3572-3594.
- [17] Katz, R.W. (2013). Statistical methods for nonstationary extremes. In: AghaKouchak, A., Easterling, D., Hsu, K., Schubert, S., & Sorooshian, S. (eds.), *Extremes in a Changing Climate: Detection, Analysis and Uncertainty*. Dordrecht: Springer, 15-37.
- [18] Luceno, A., Menéndez, M., & Méndez, F.J. (2006). The effect of temporal dependence on the estimation of the frequency of extreme ocean climate events. *Proceedings of the Royal Society A*, 462, 1683-1697.
- [19] Megías, E., & García-Román, M. (2022). Influence of trade winds on the detection of transhemispheric swells near the Canary Islands. *Atmosphere*, 13(4), 505.
- [20] Megías, E., & García-Román, M. (2023). A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: The case of the southern coast of Tenerife. *Journal of Marine Science and Technology*, 31(3), 324-340.
- [21] Megías, E., & García-Román, M. (2024). Naturaleza dispersiva de los swells que llegan a Canarias desde el Atlántico Sur. *Ingeniería del Agua*, 28(4), 297-309.
- [22] Megías Dorado, E.J. (2024). *Estudio del comportamiento de los swells provenientes del Hemisferio Sur en las costas de las Islas Canarias* (Tesis doctoral). Universidad de La Laguna.
- [23] Mora, J.I., Díaz-Hernández, G., Medina, R., Maza, M., Lara, J.L., Dobos, D., & Rodríguez, B. (2013). Caracterización numérica de los eventos extremos de rebase e inundación y diseño de la protección costera en San Andrés, Tenerife. *XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*.
- [24] Munk, W.H., Miller, G.R., Snodgrass, F.E., & Barber, N.F. (1963). Directional recording of swell from distant storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 255(1062), 505-584.
- [25] Pickands, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics. *The Annals of Statistics*, 3(1), 119-131.
- [26] PIANC (2019). *Guidelines for Metocean Data Collection and Analysis for Maritime Structures*. Report of Working Group 178. Brussels.
- [27] Puertos del Estado (2001). ROM 0.0-01. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias. Madrid.
- [28] Puertos del Estado (2005). ROM 0.5-05. *Recomendaciones geotécnicas para el proyecto y ejecución de obras marítimas y portuarias. Parte I: Bases y factores para el proyecto*. Madrid.
- [29] Puertos del Estado (2024a). *Red de Medida del Estado del Mar y Sistema SIMAR/WANA. Documentación técnica institucional*. Madrid.

- [30] Puertos del Estado (2024b). *Conjunto de datos SIMAR. Procedencia y obtención del conjunto de datos*. Madrid.
- [31] Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R., & Losada, I.J. (2012). A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 65, 38-55.
- [32] Rodríguez-Báez, J.A., Yanes Luque, A., & Dorta Antequera, P. (2017). Determinación y caracterización de situaciones de temporal marino e inundación costera por rebase del oleaje en San Andrés, NE de Tenerife (1984-2014). *Investigaciones Geográficas*, 68, 95-114.
- [33] Snodgrass, F.E., Groves, G.W., Hasselmann, K.F., Miller, G.R., Munk, W.H., & Powers, W.H. (1966). Propagation of ocean swell across the Pacific. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 259(1103), 431-497.
- [34] Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- [35] USACE (2008). *Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100)*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- [36] Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., & Zanuttigh, B. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures (2nd ed.)*.
- [37] Von Storch, H., & Zwiers, F.W. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press.

## 10. ANEXO

---

 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA Nº1 : PUNTO SIMAR 3080042 - BOYA CABO DE PEÑAS</b>	
Identificación del punto		Localización y referencia	
<b>Boya:</b>	Cabo de Peñas	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (zona 29T)
<b>Nodo SIMAR:</b>	3080042	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	29 T 727042.31 4847971.81
<b>Fachada marítima:</b>	Norte Peninsular	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	29 T 727042.31 4847971.81
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	615 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Cabo de Peñas / Punto SIMAR 3080042.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 1998-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1 \text{ h}$ )

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

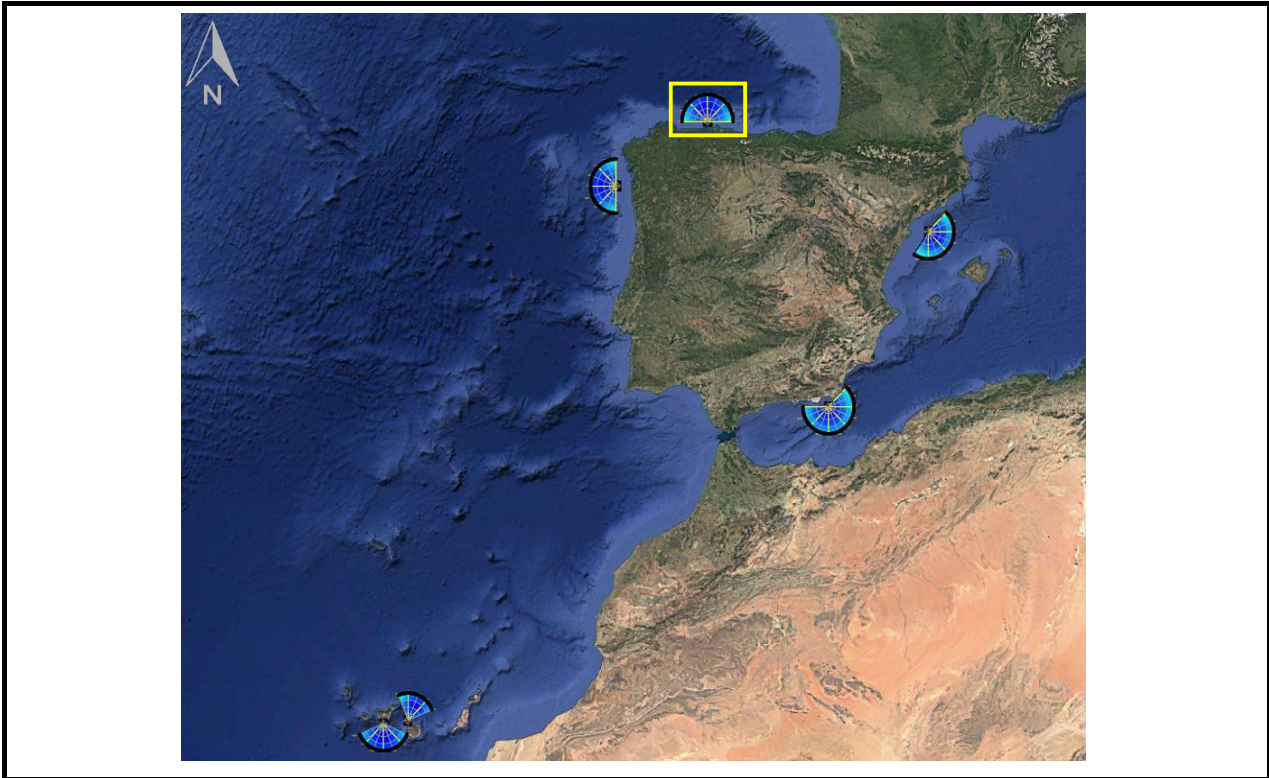
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

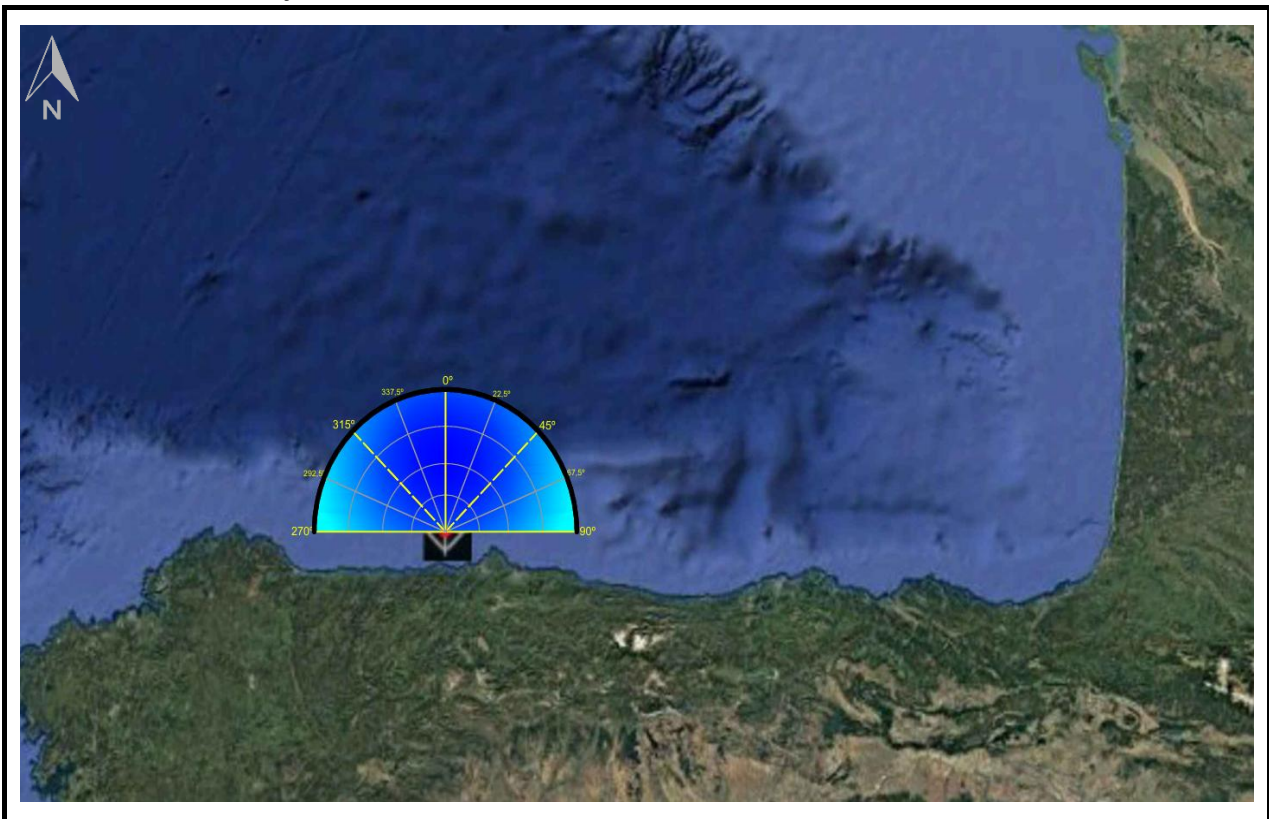
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

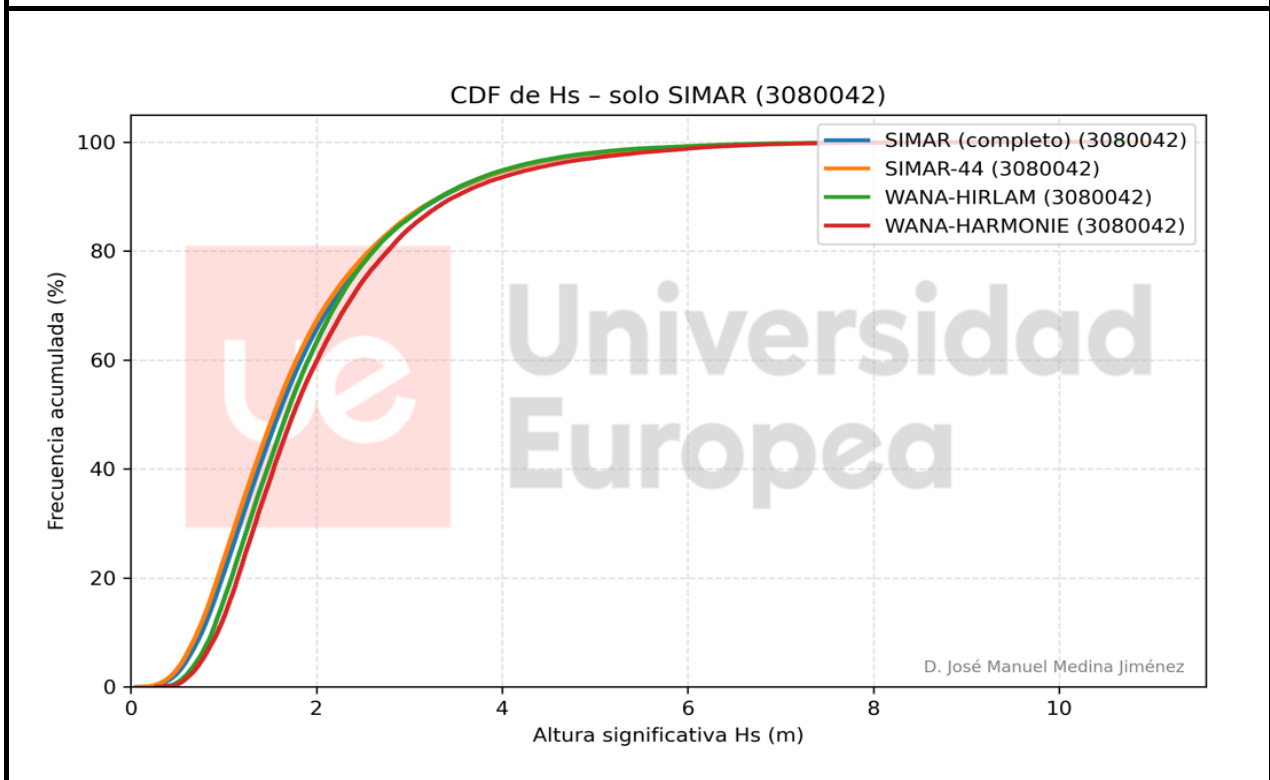
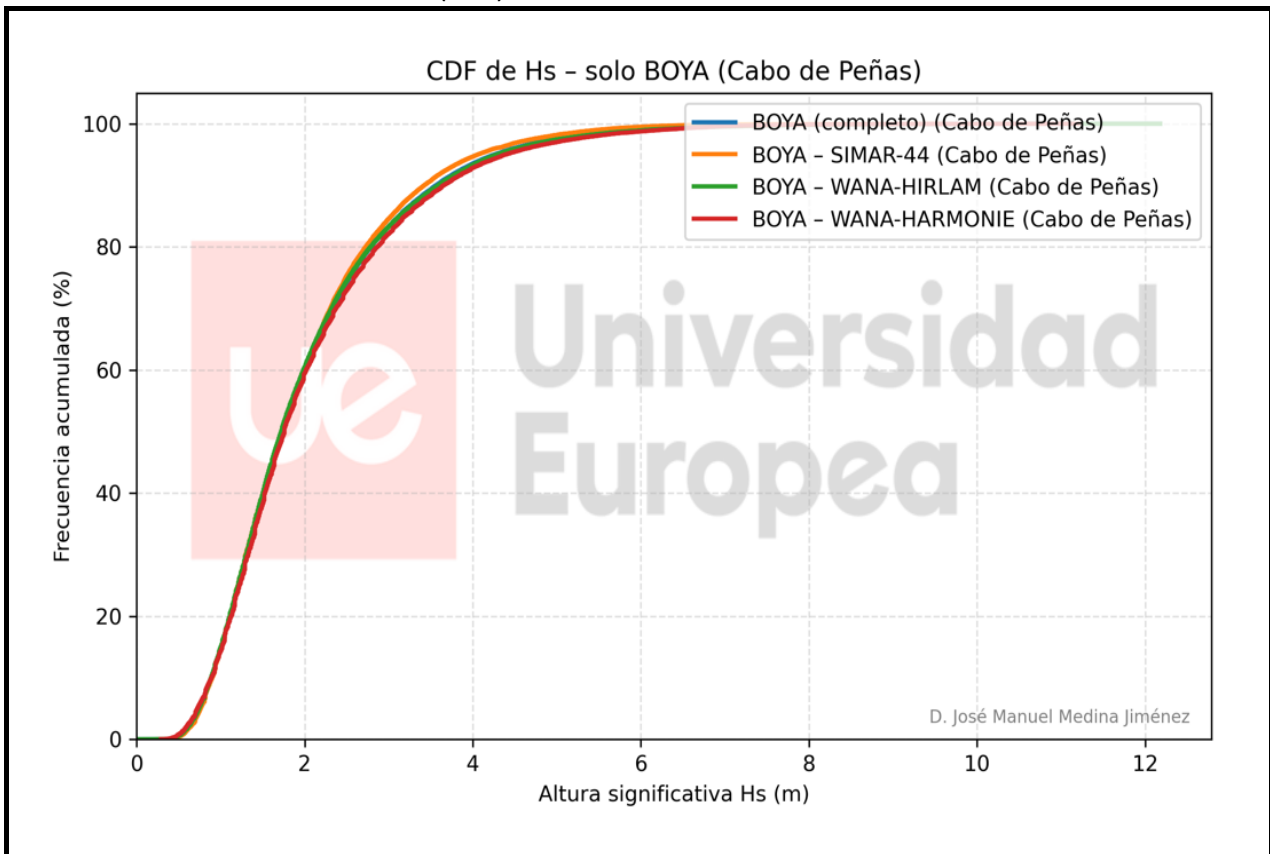


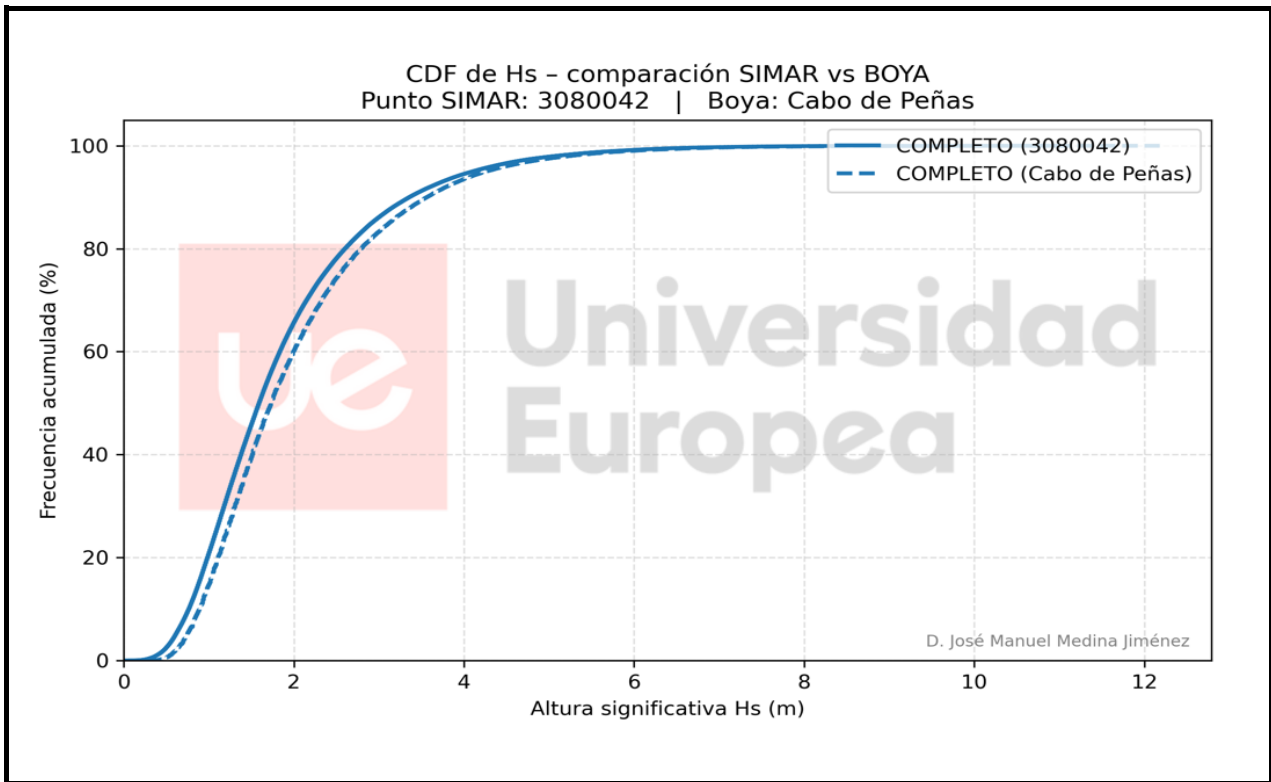
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



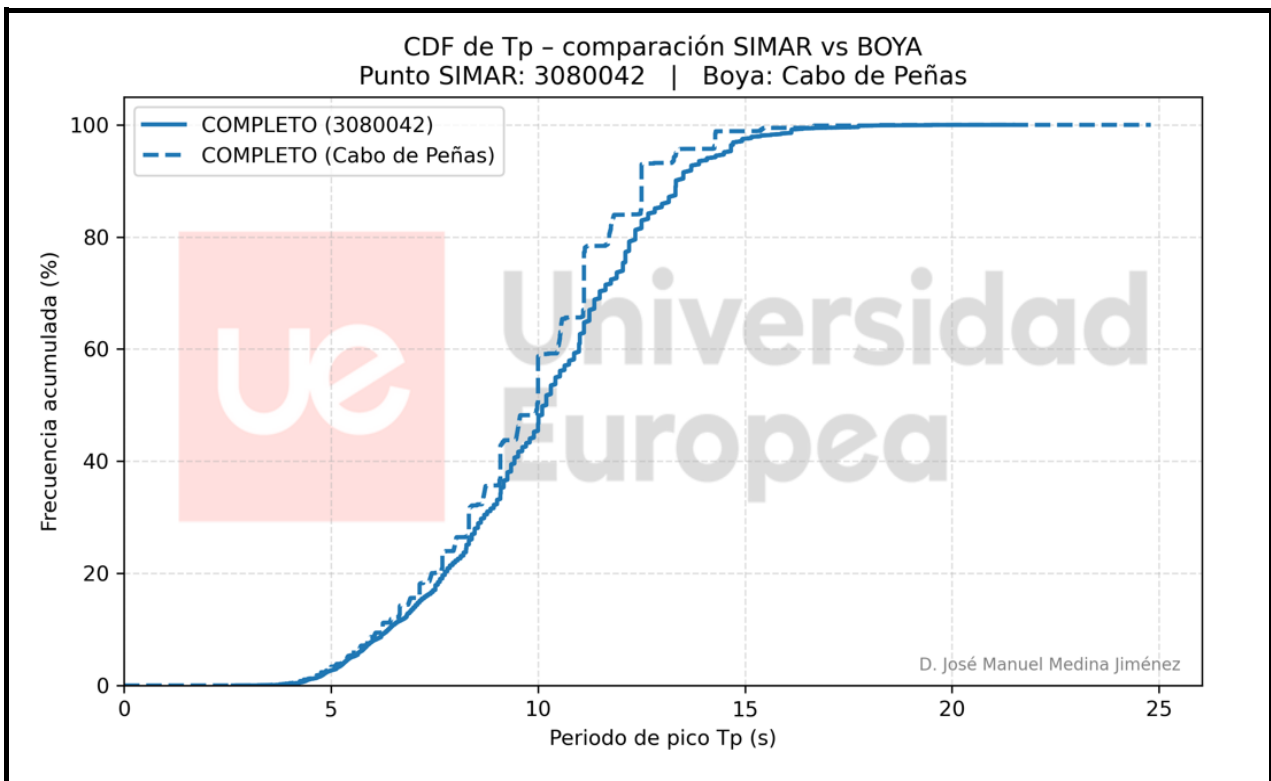
#### 4. Análisis Homogeneidad modelos

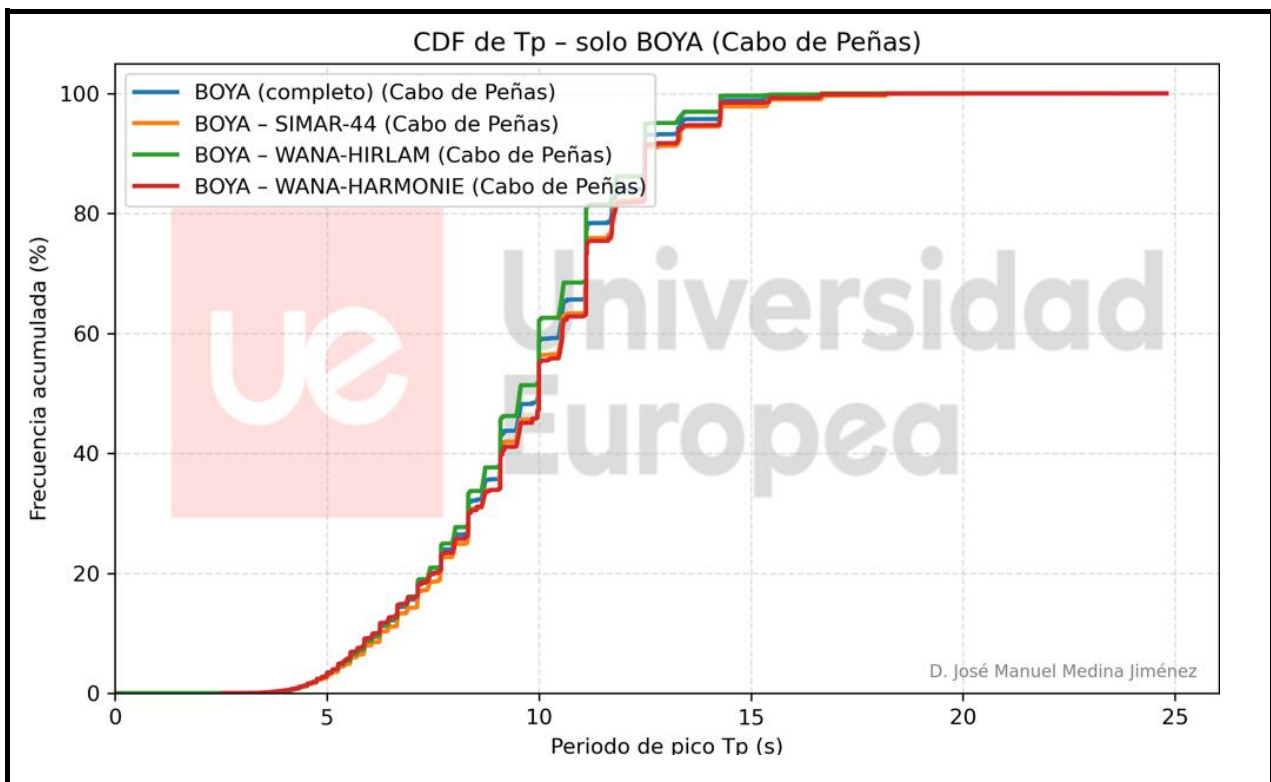
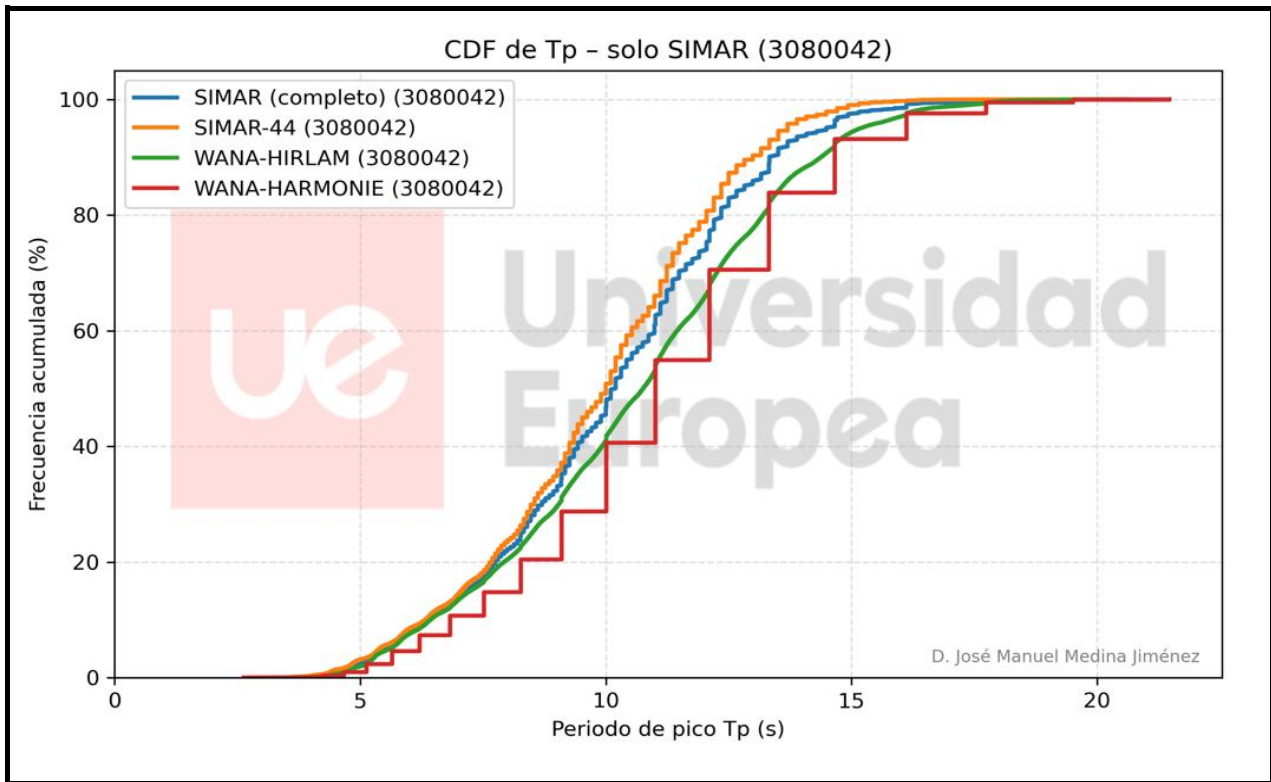
##### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



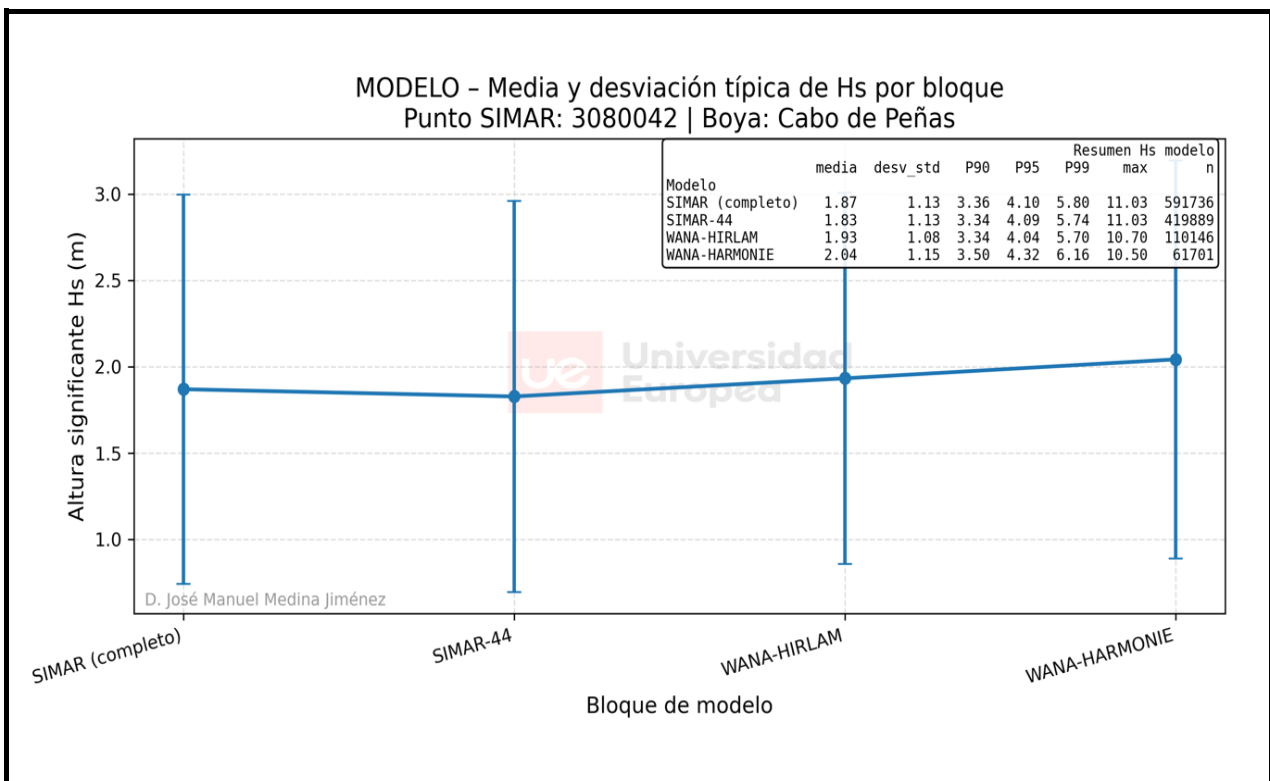
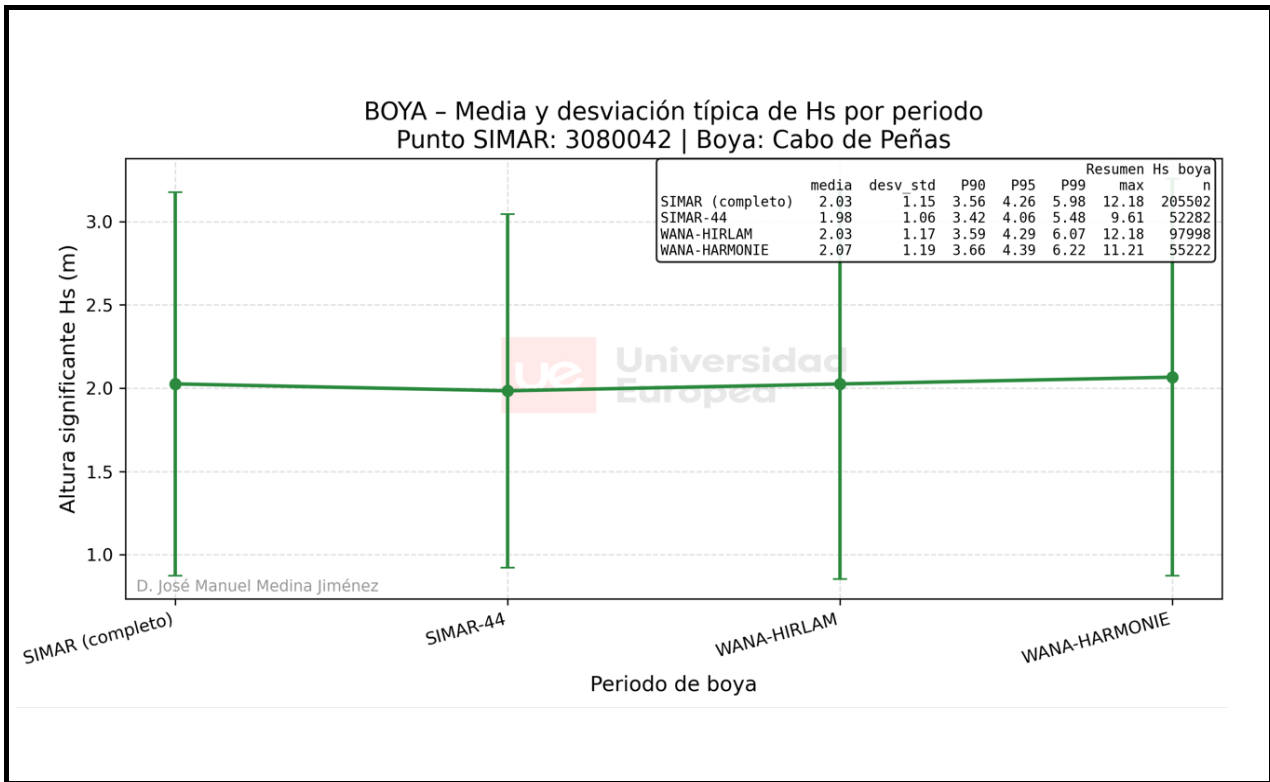


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

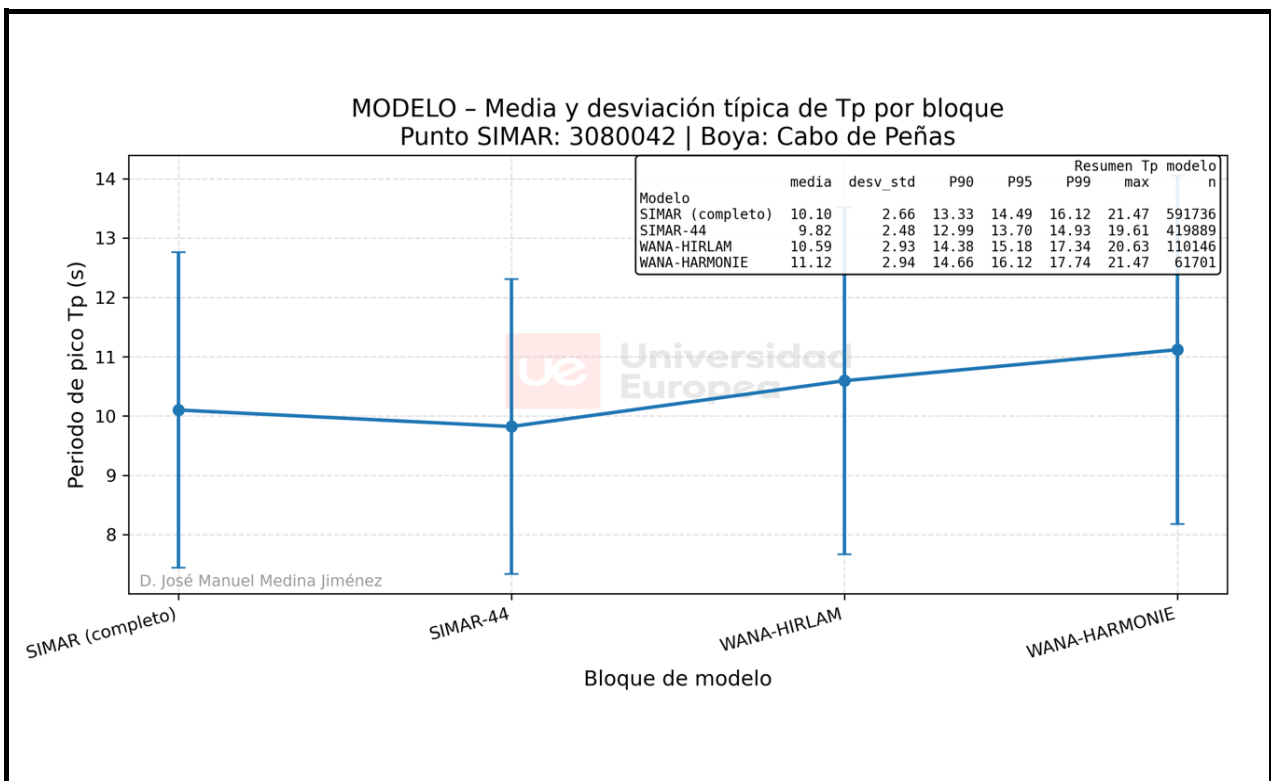
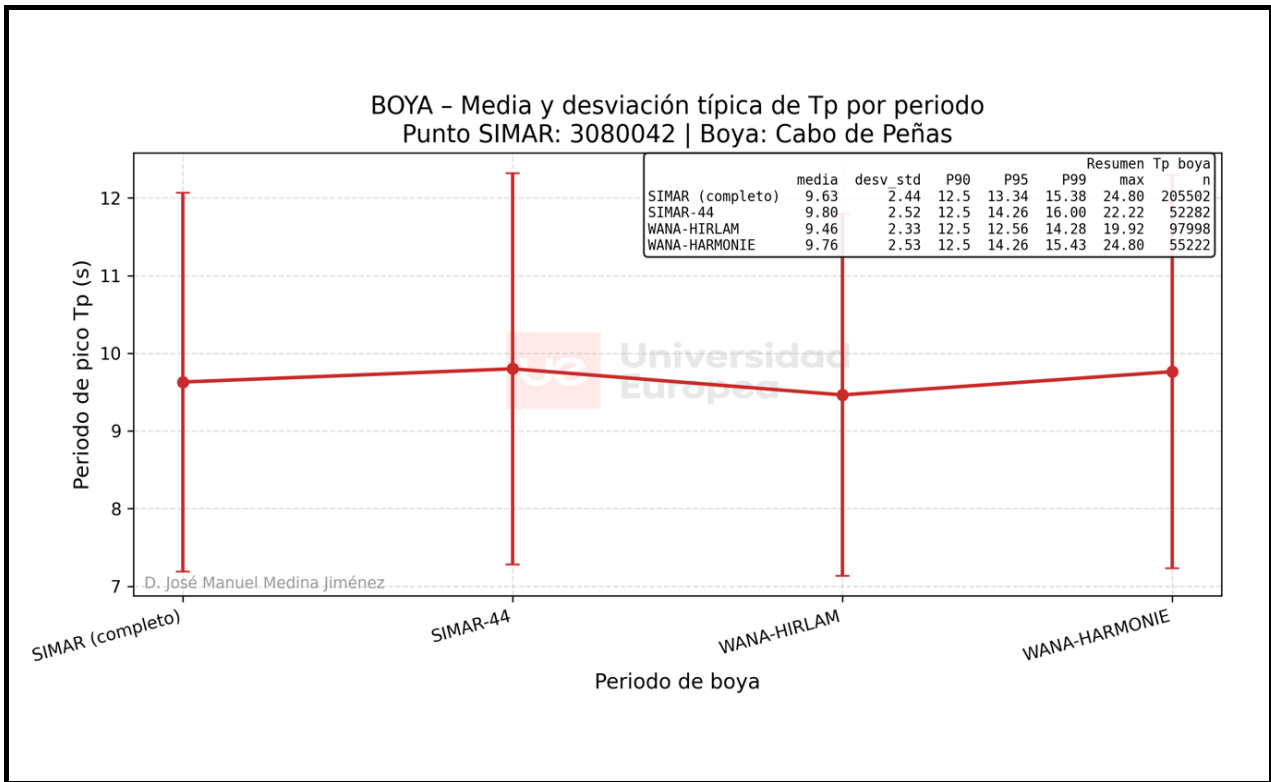




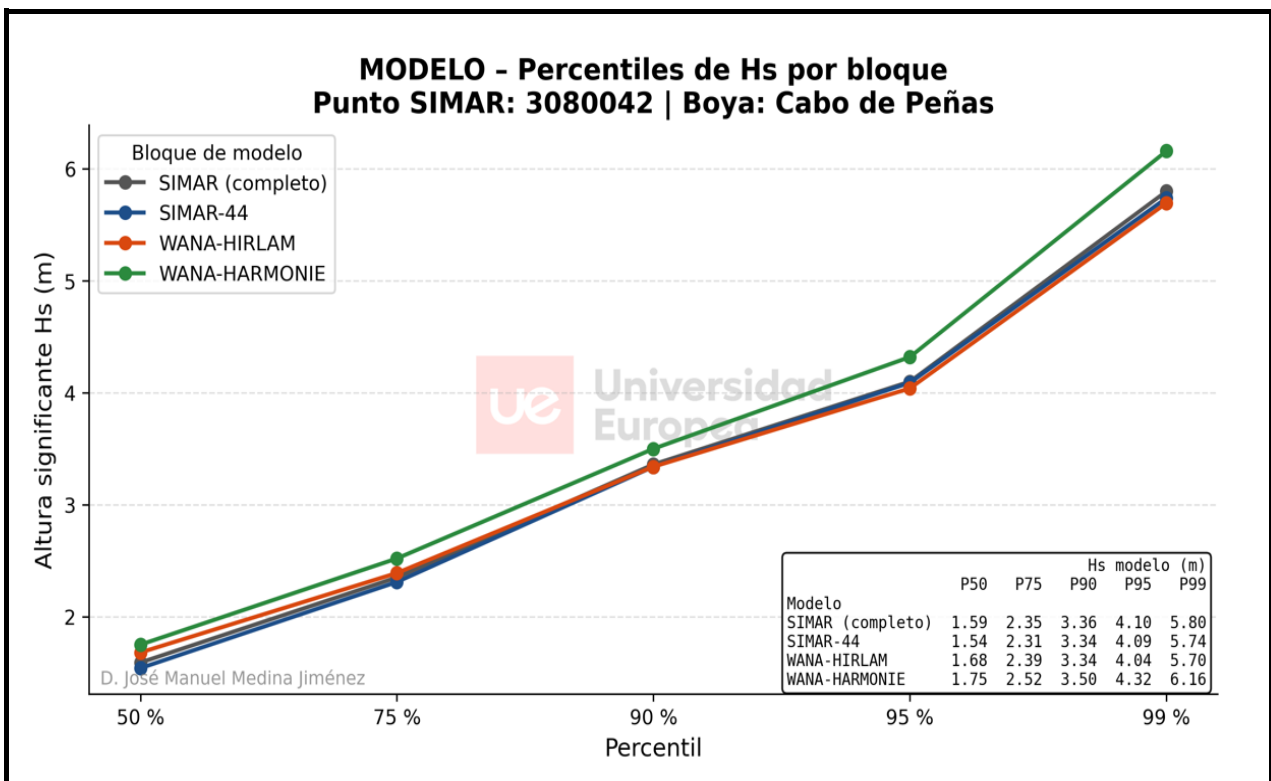
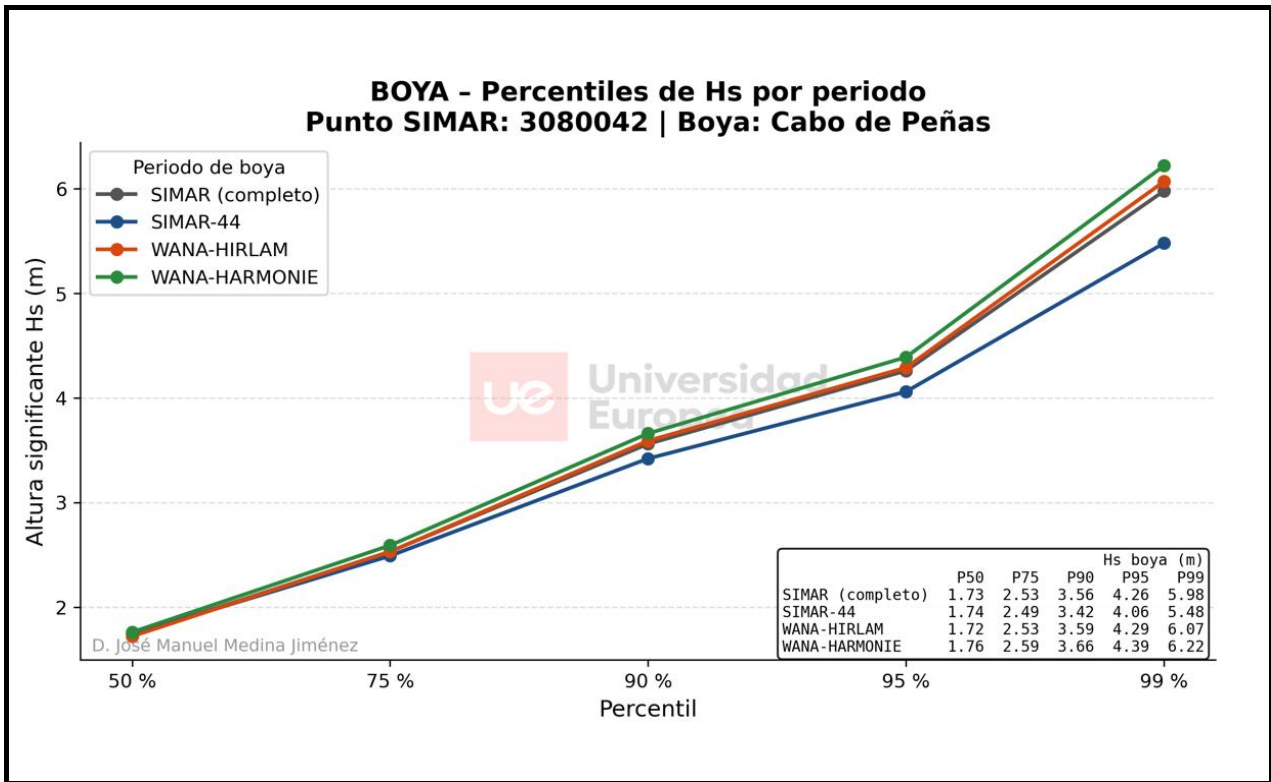
### 5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



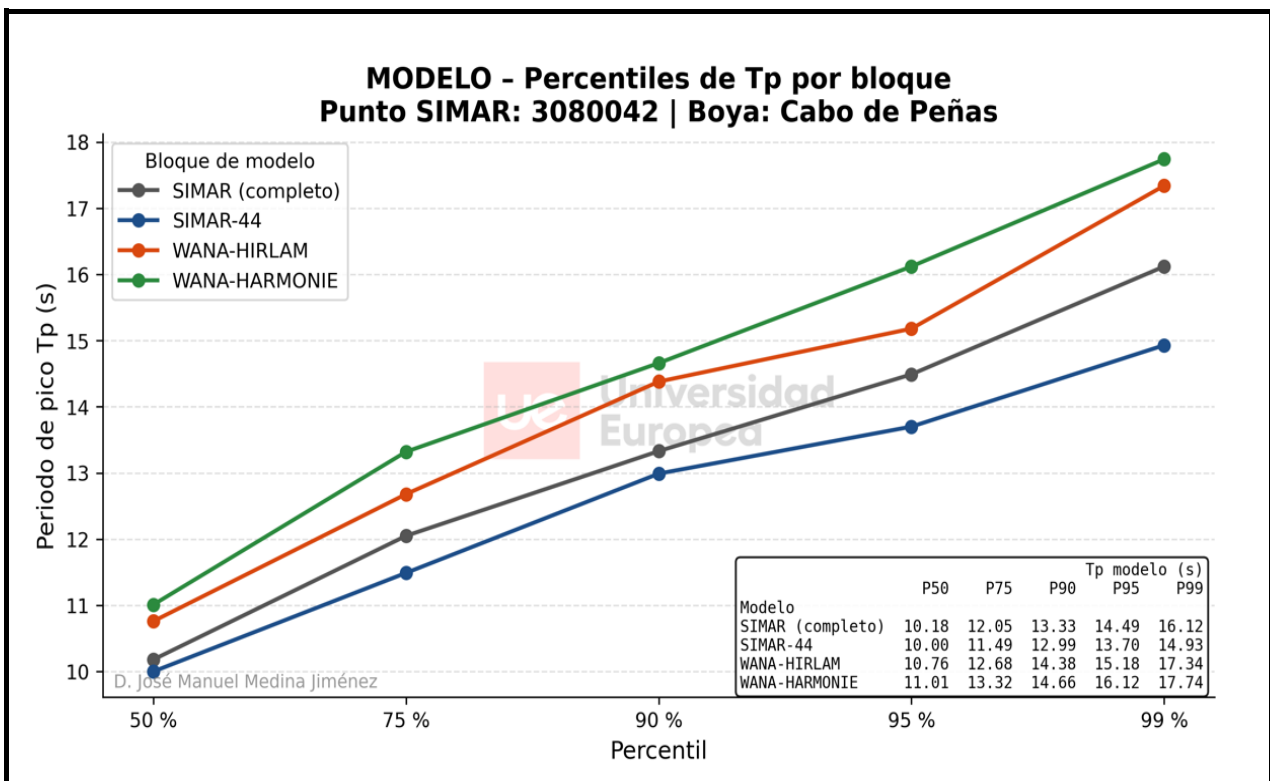
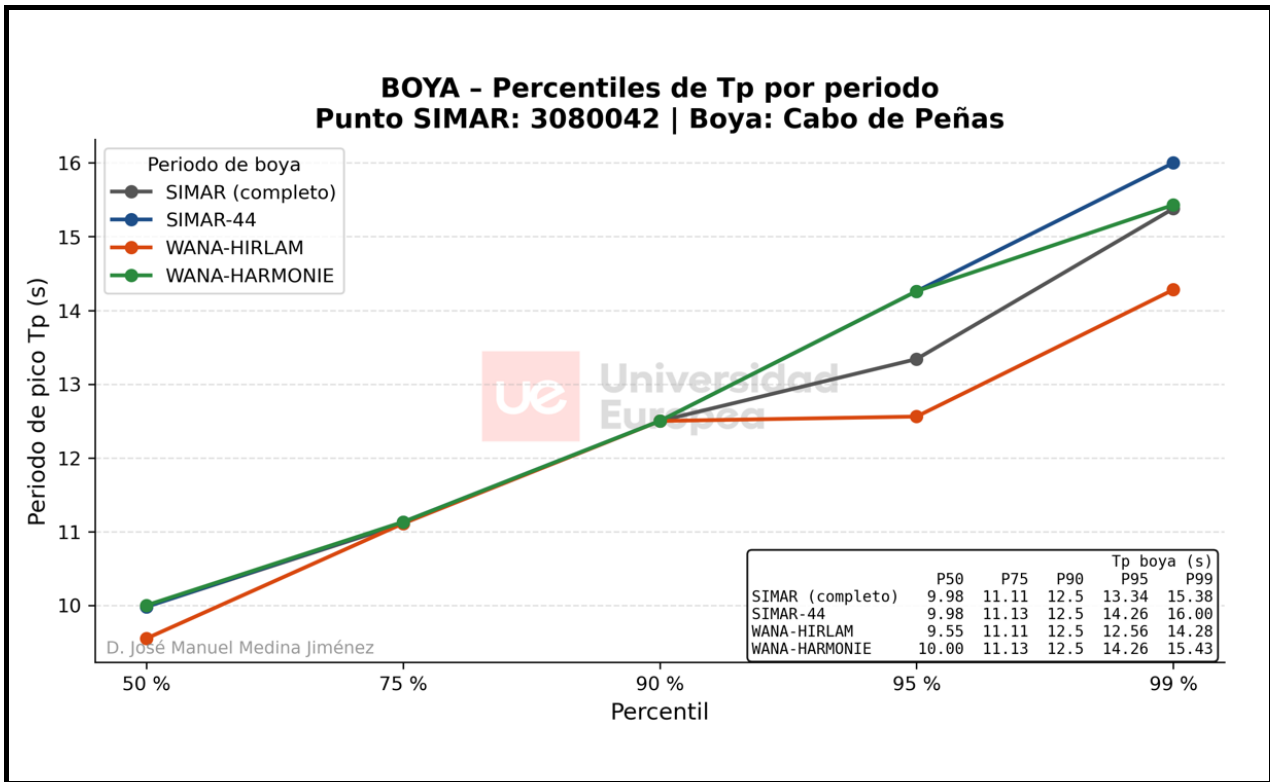
6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



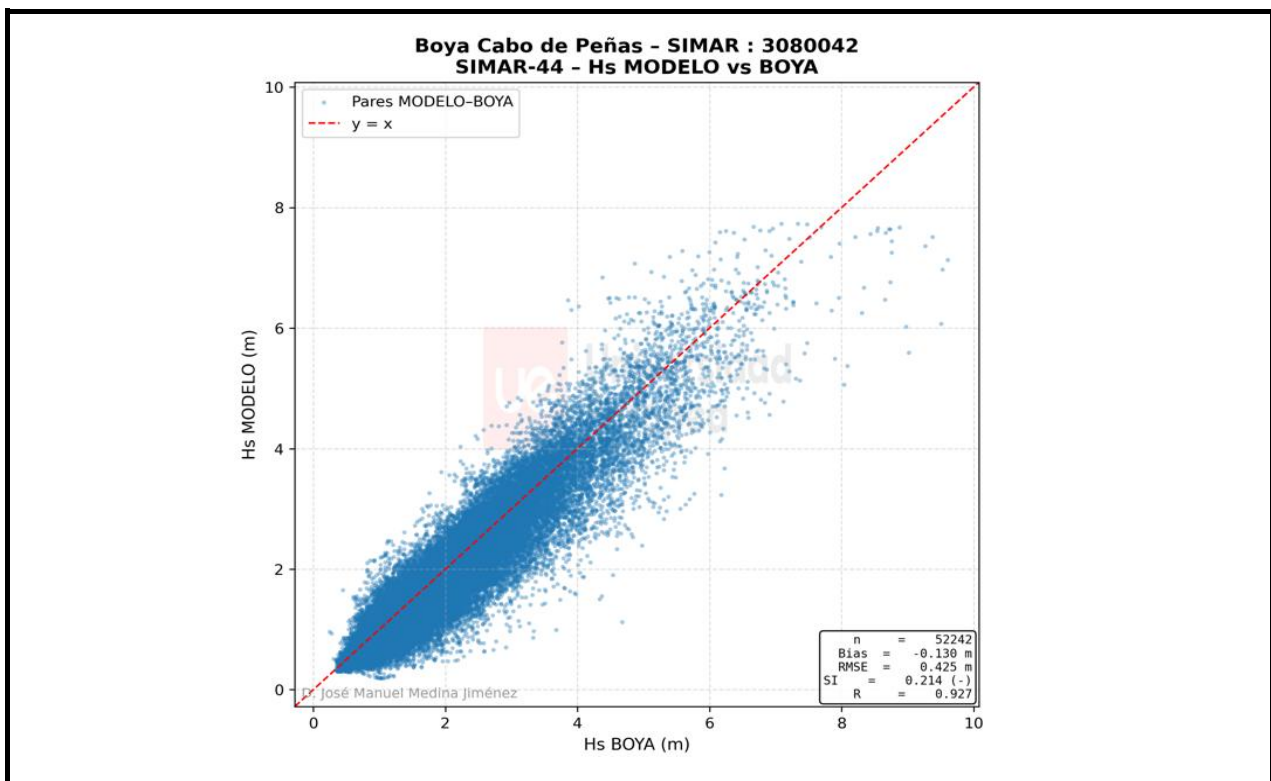
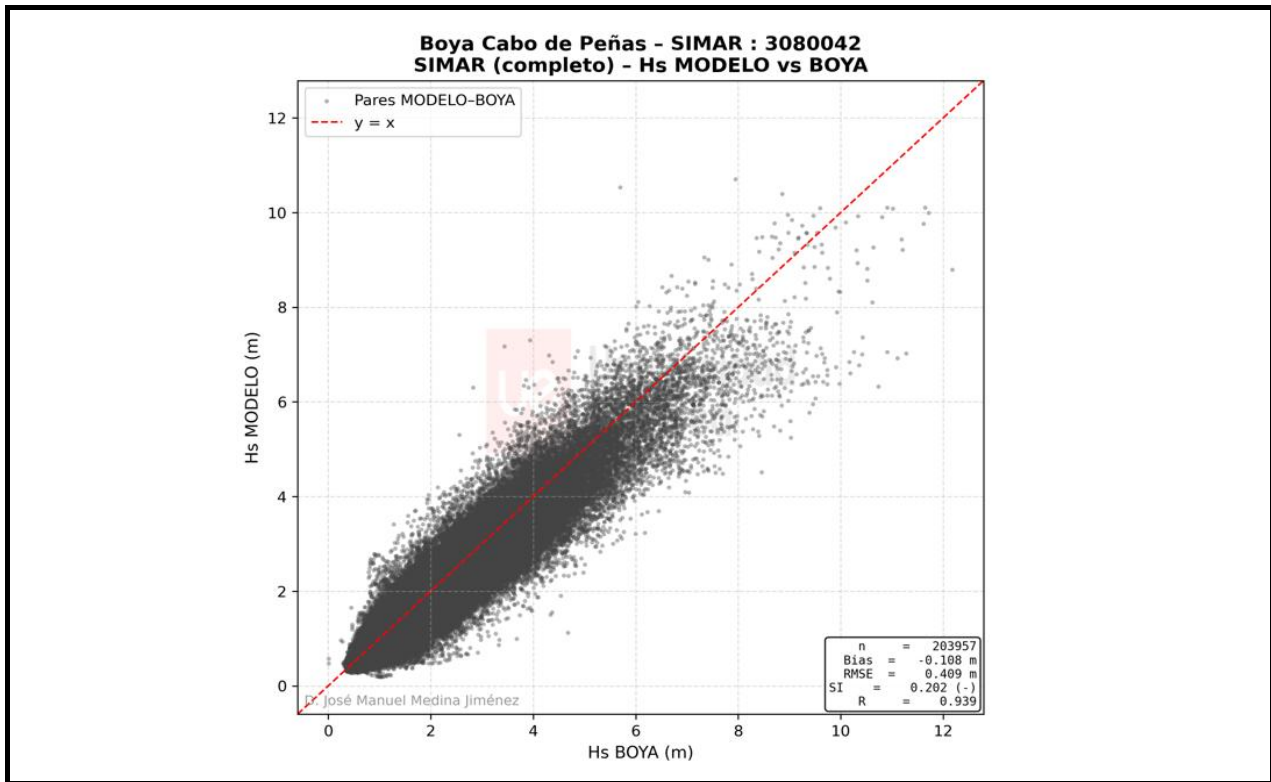
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

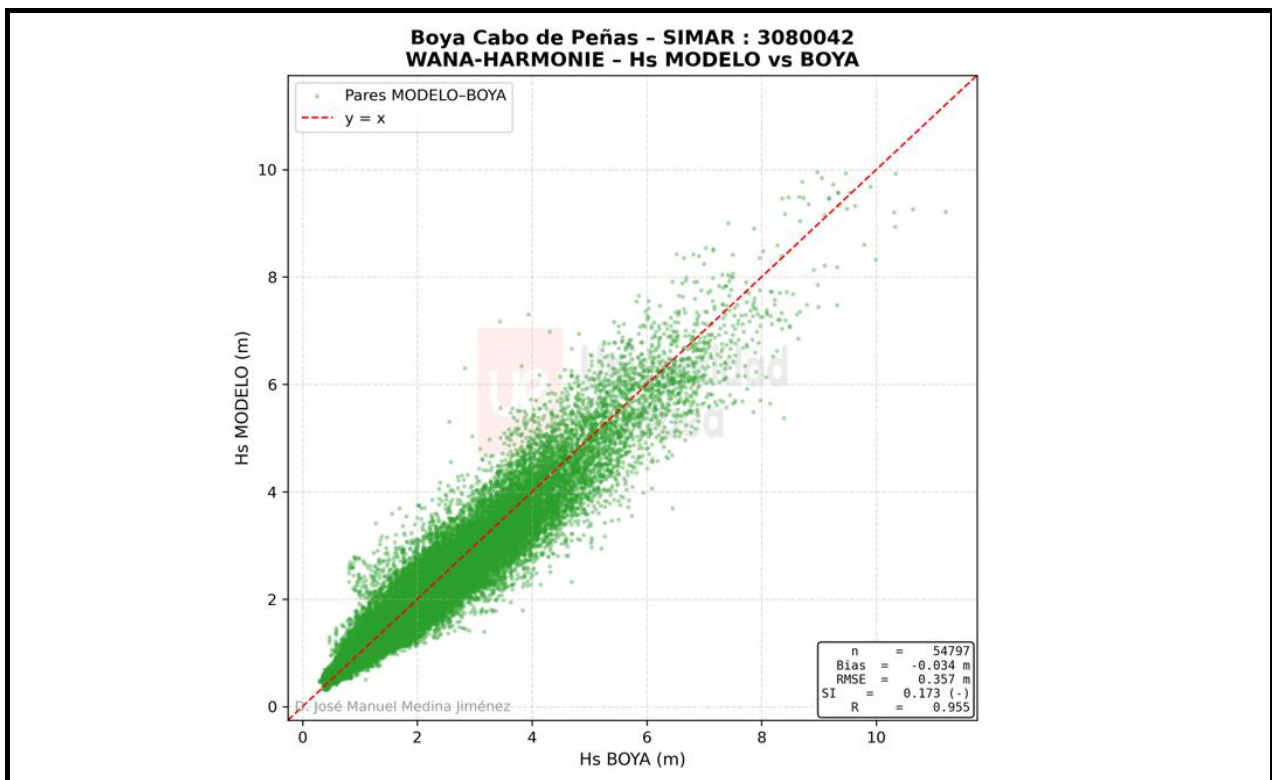
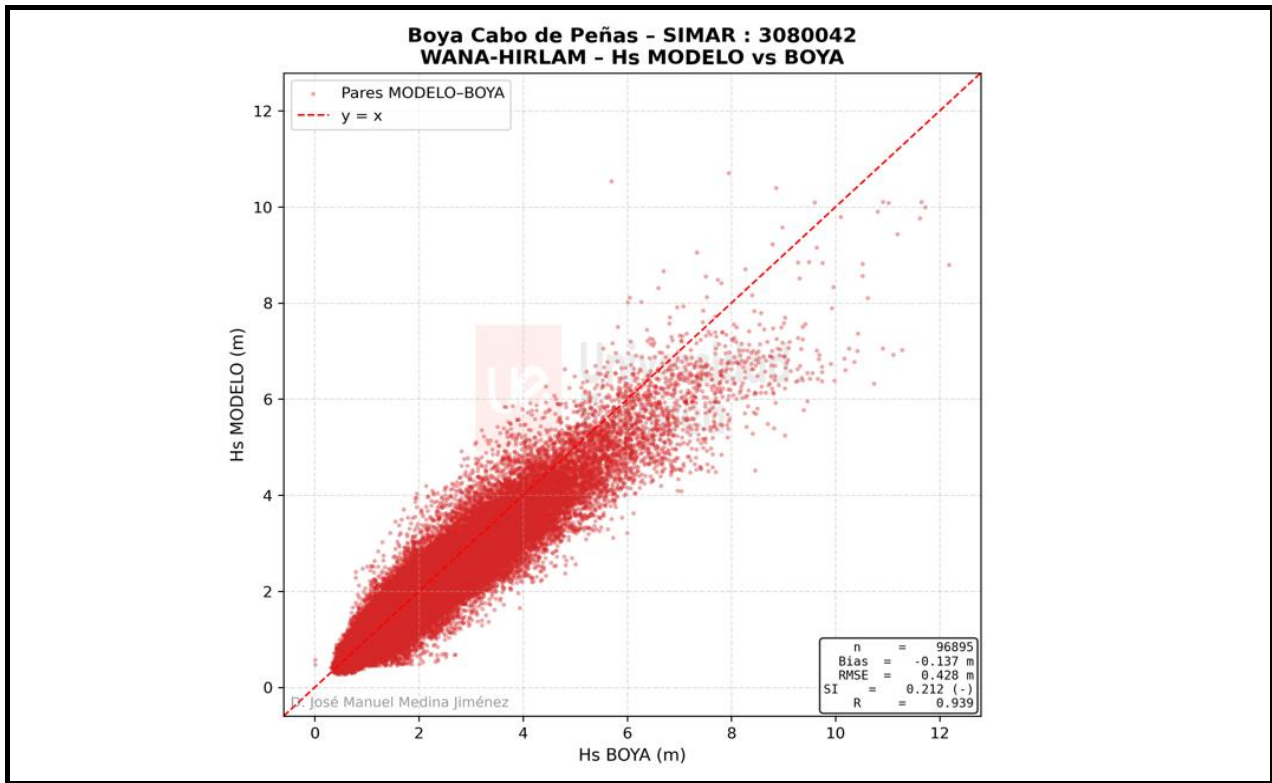


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

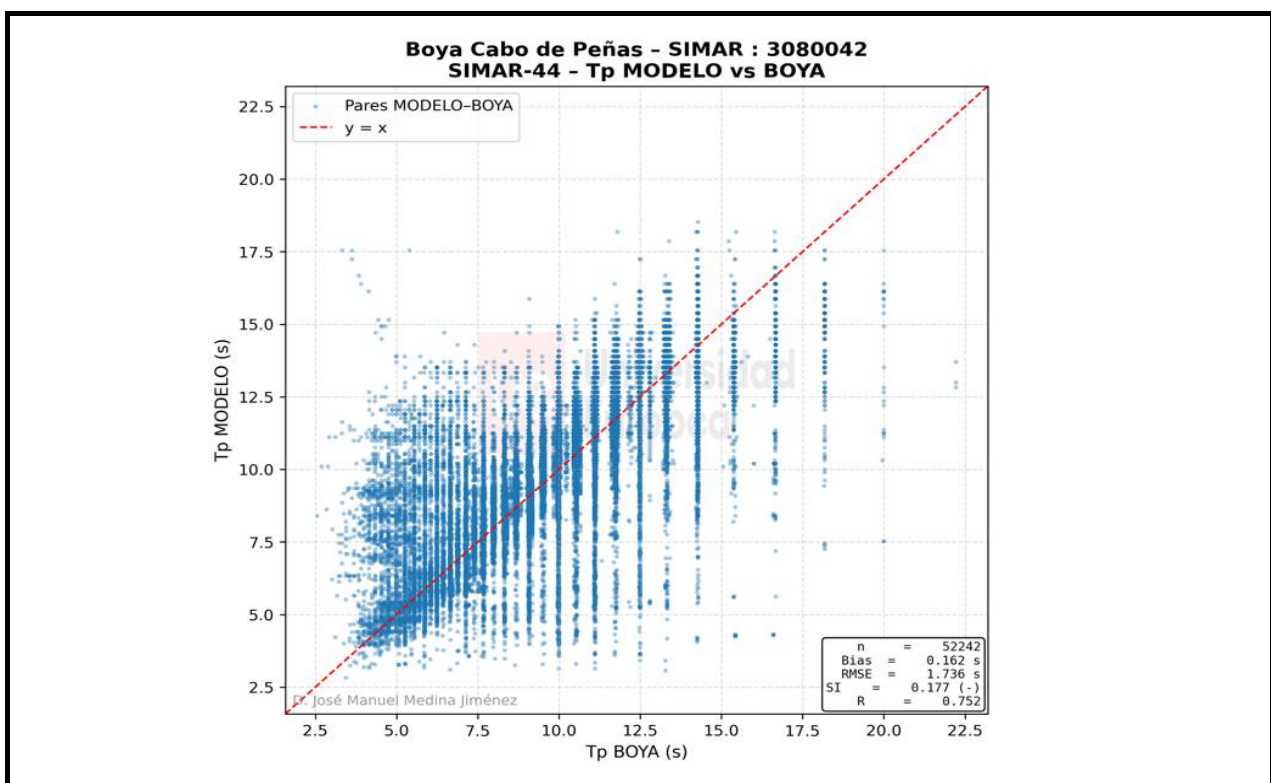
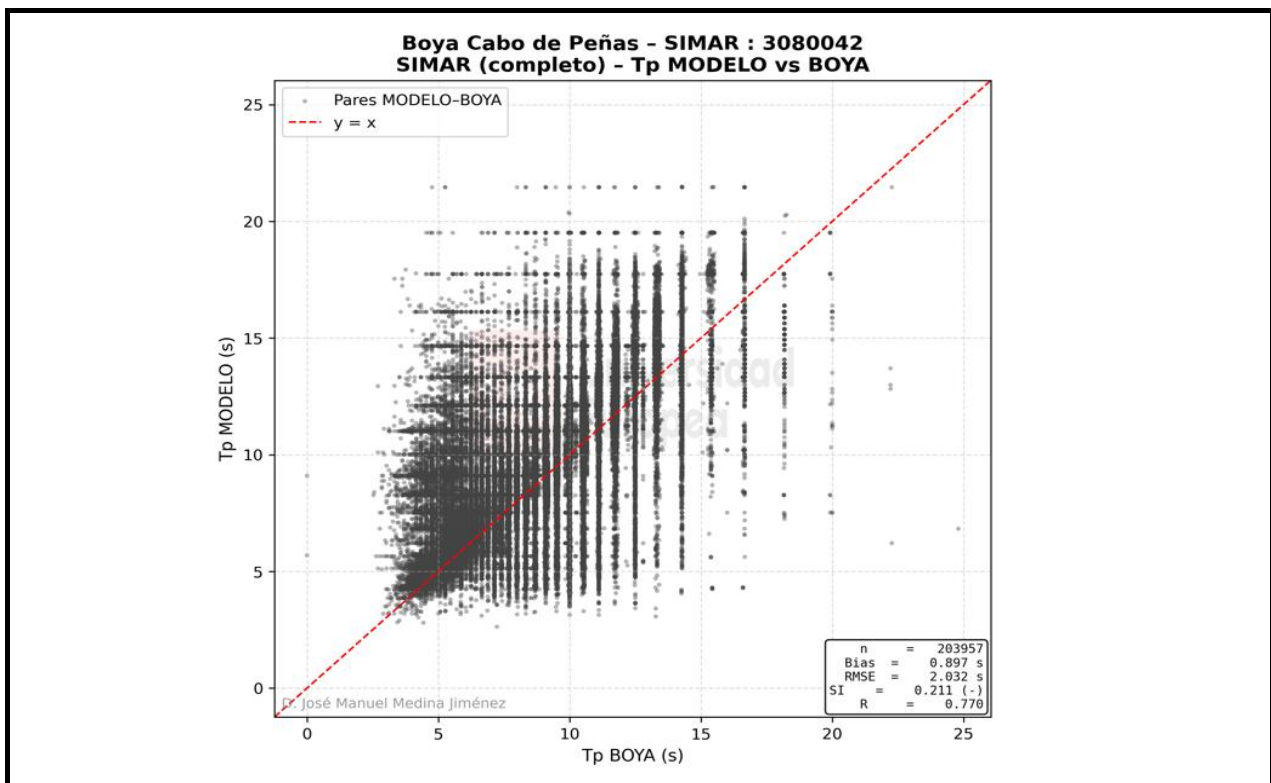


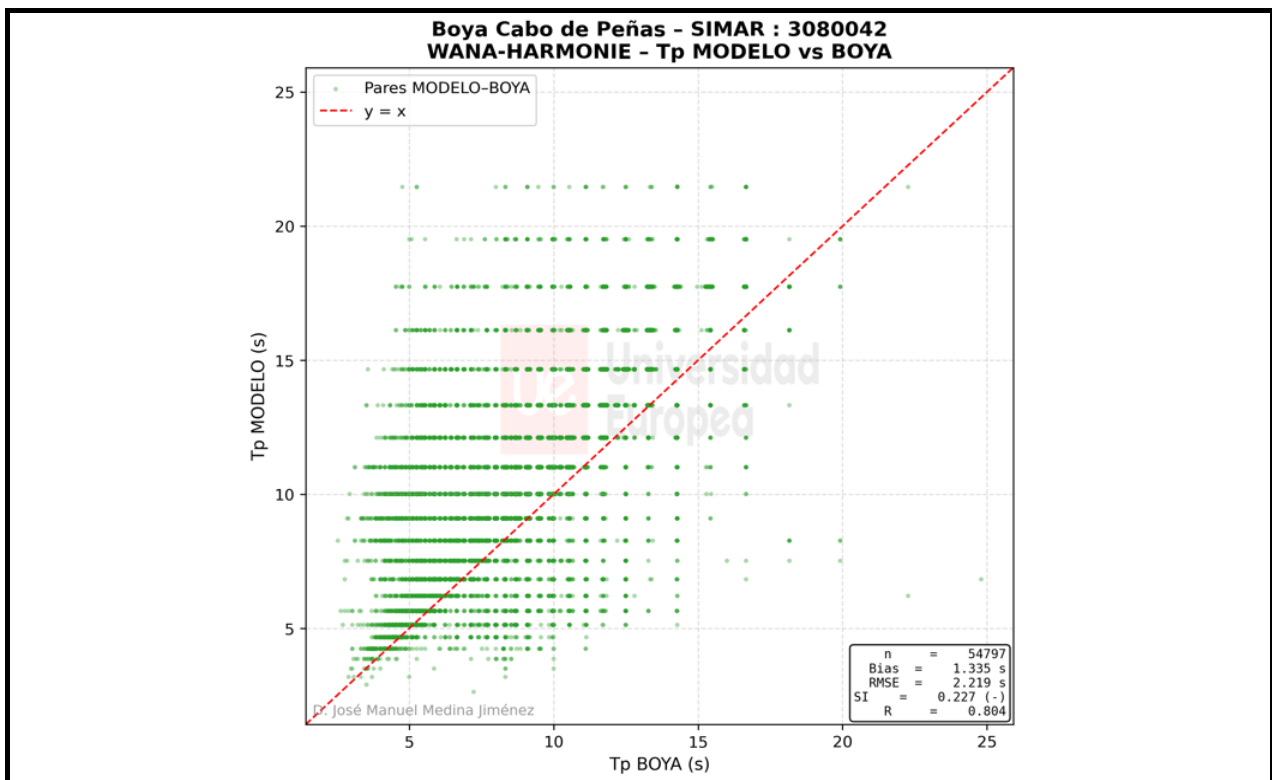
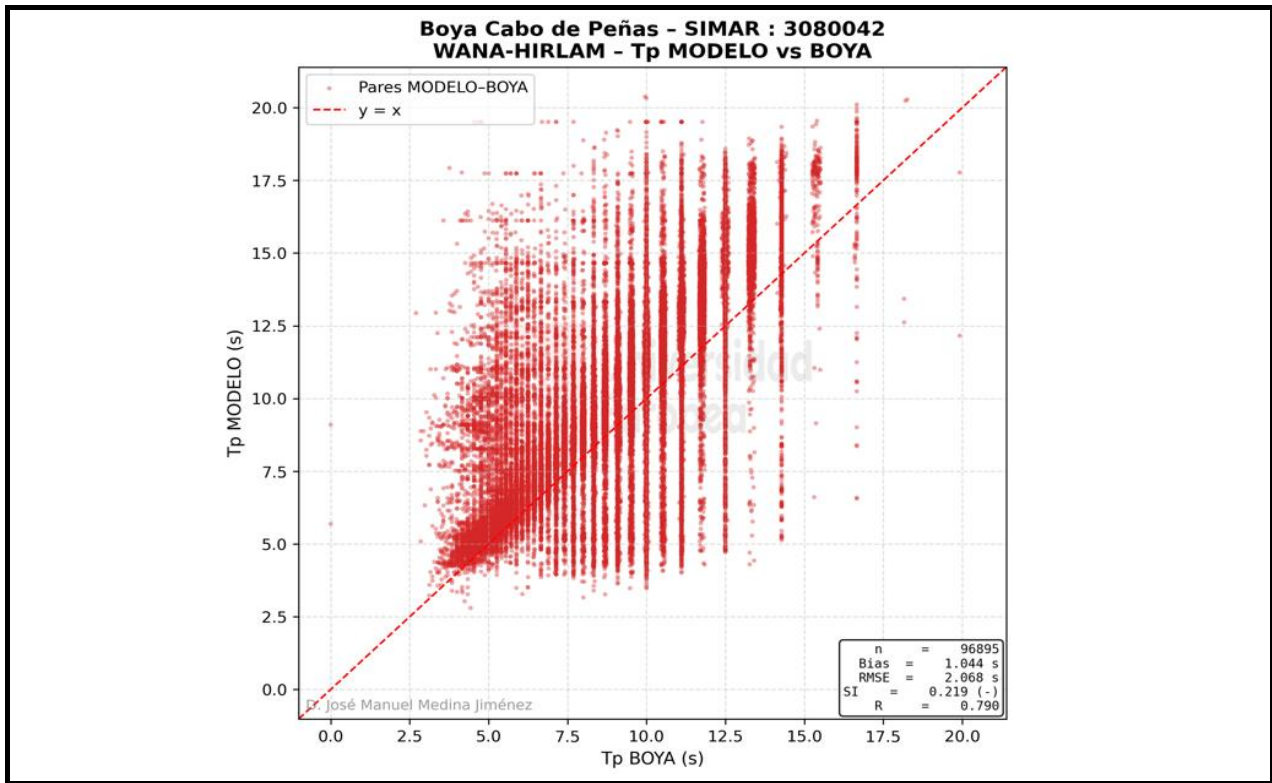
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs



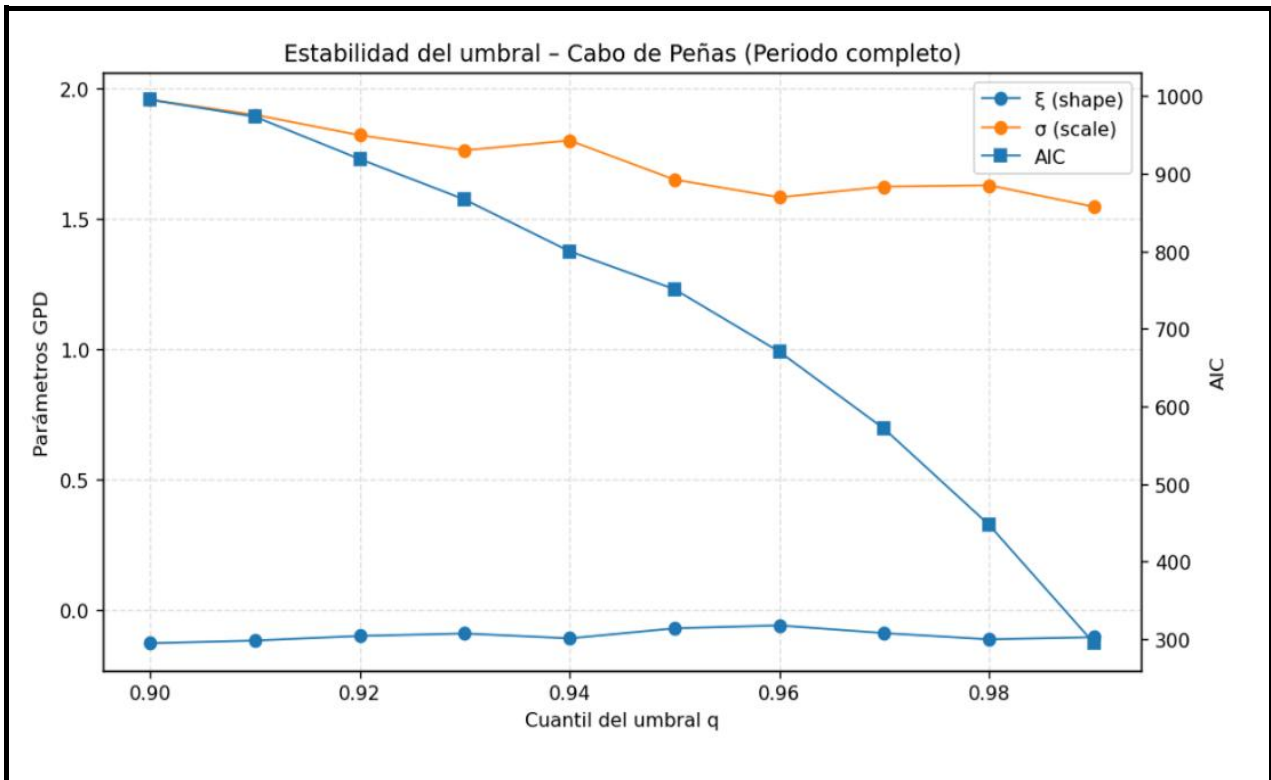
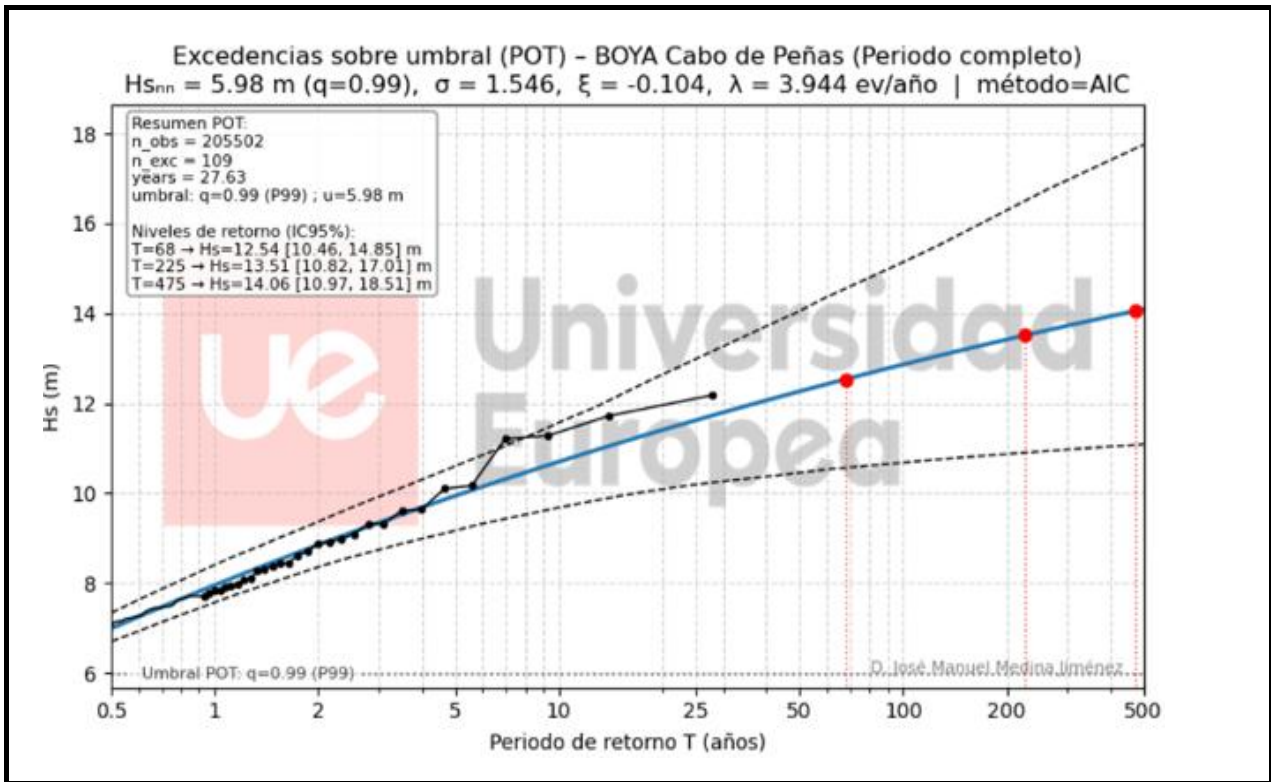


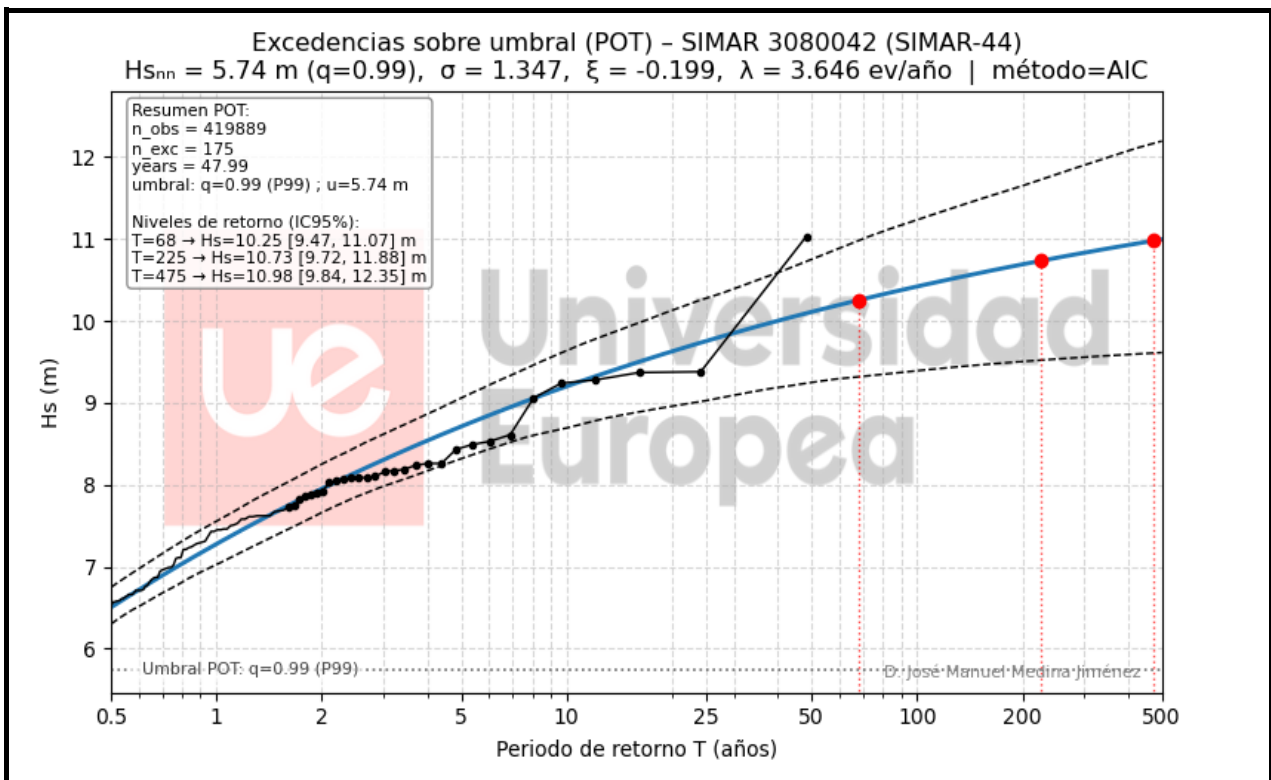
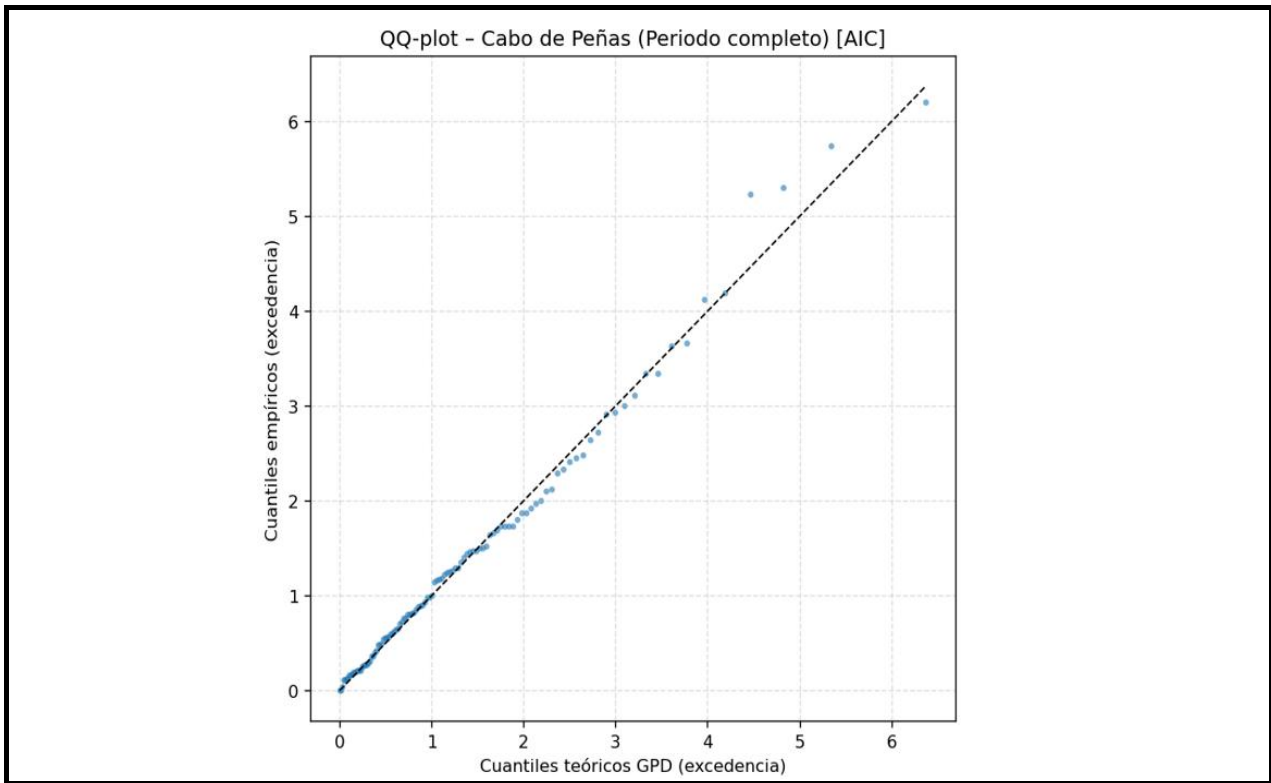
10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp

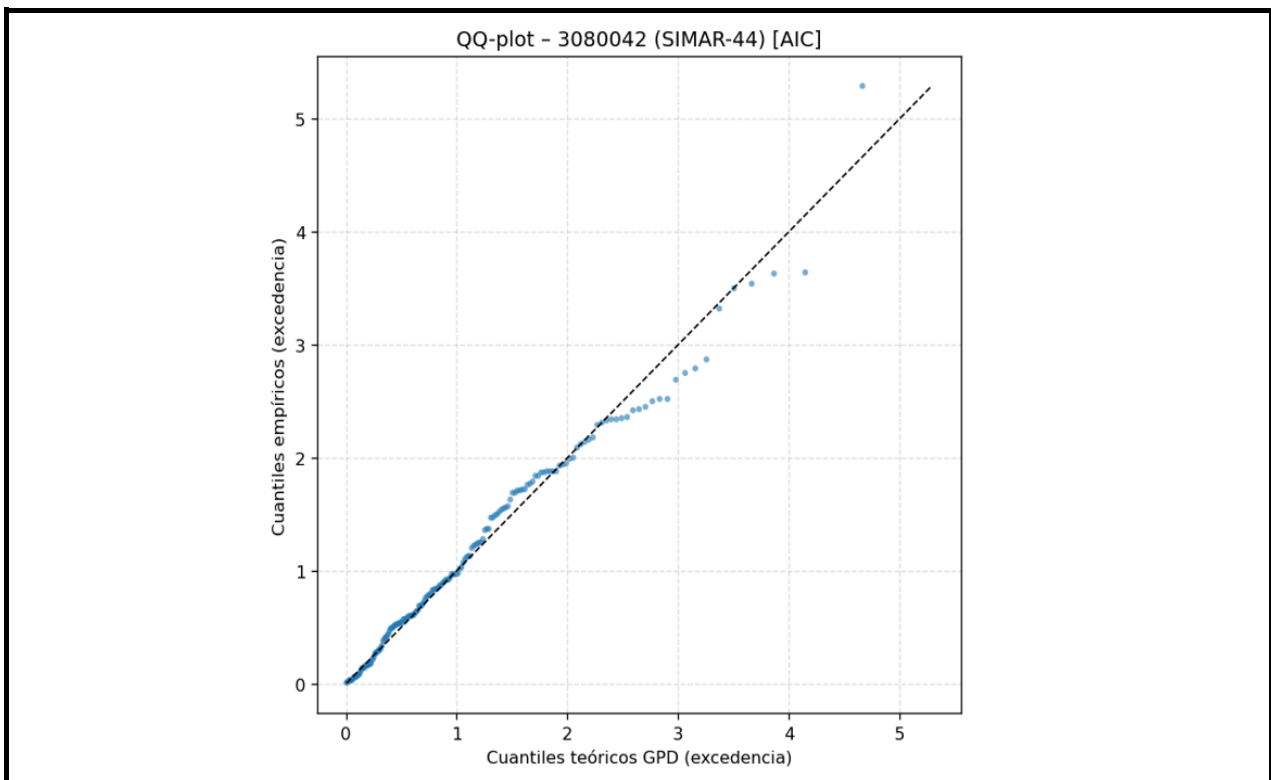
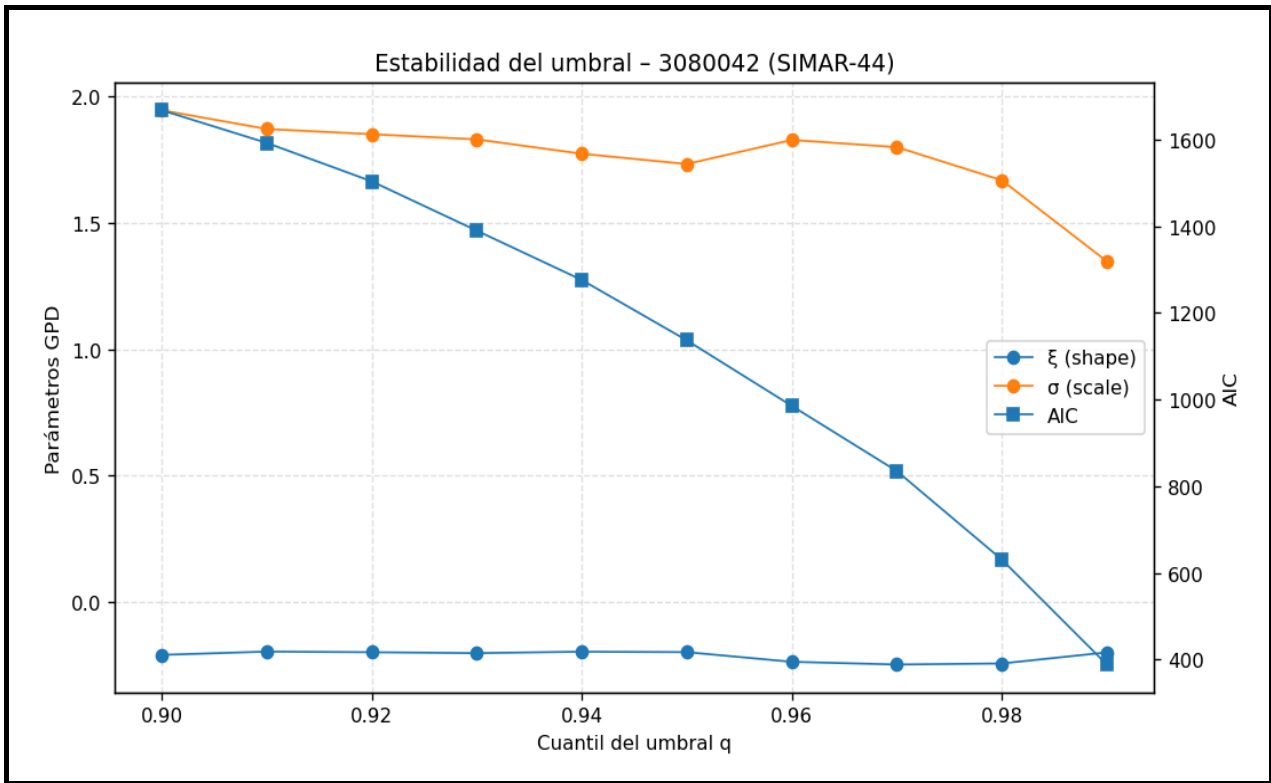


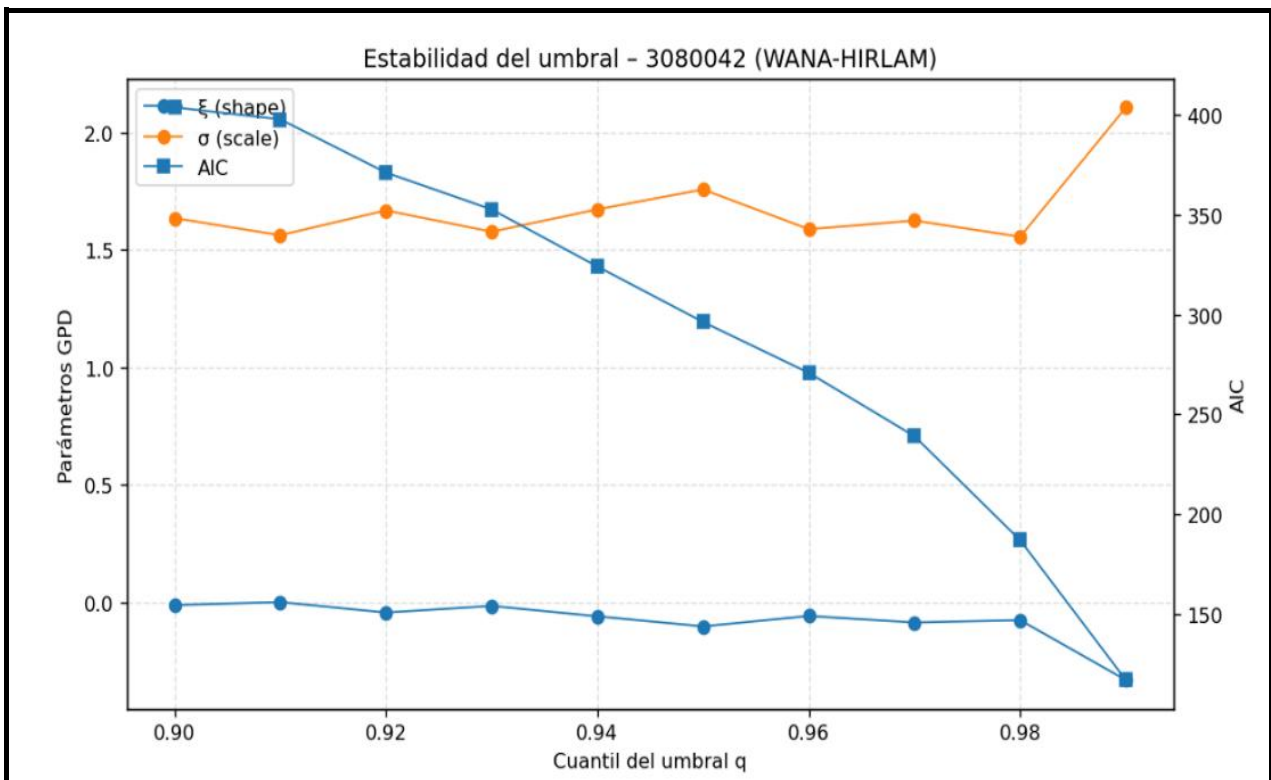
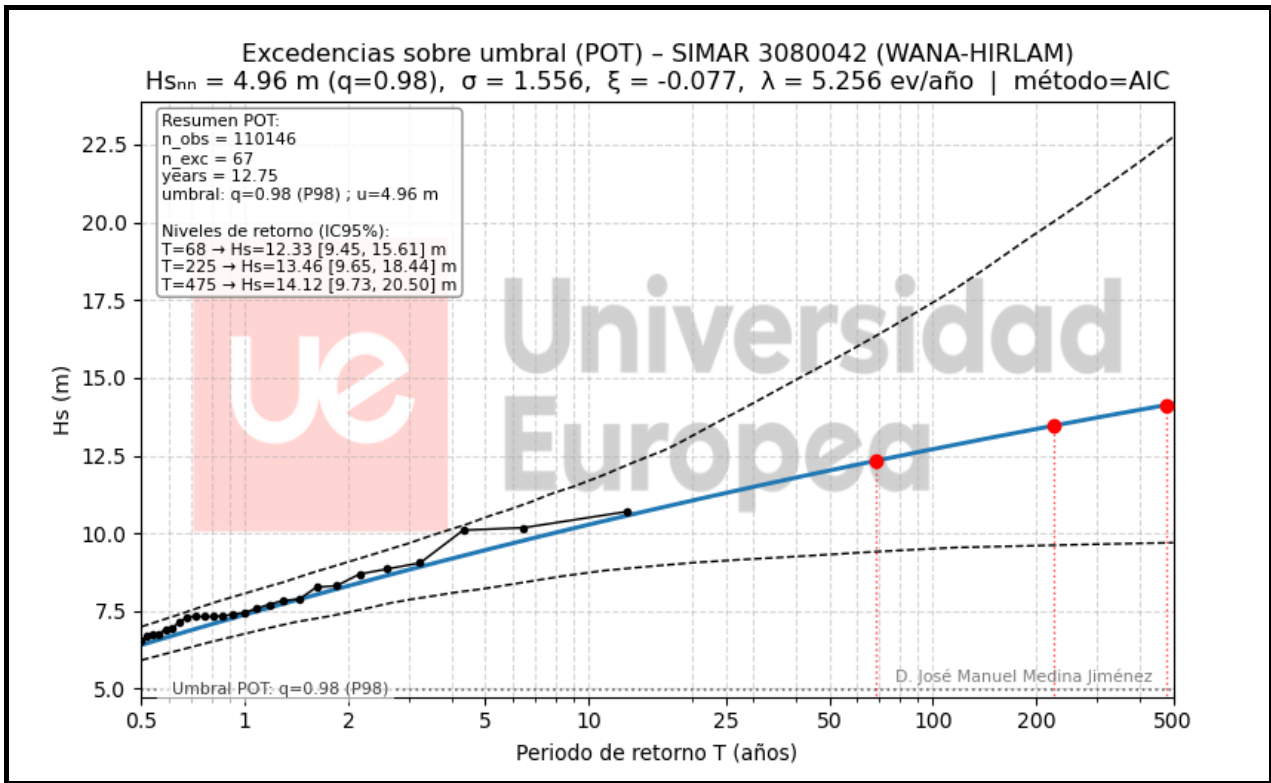


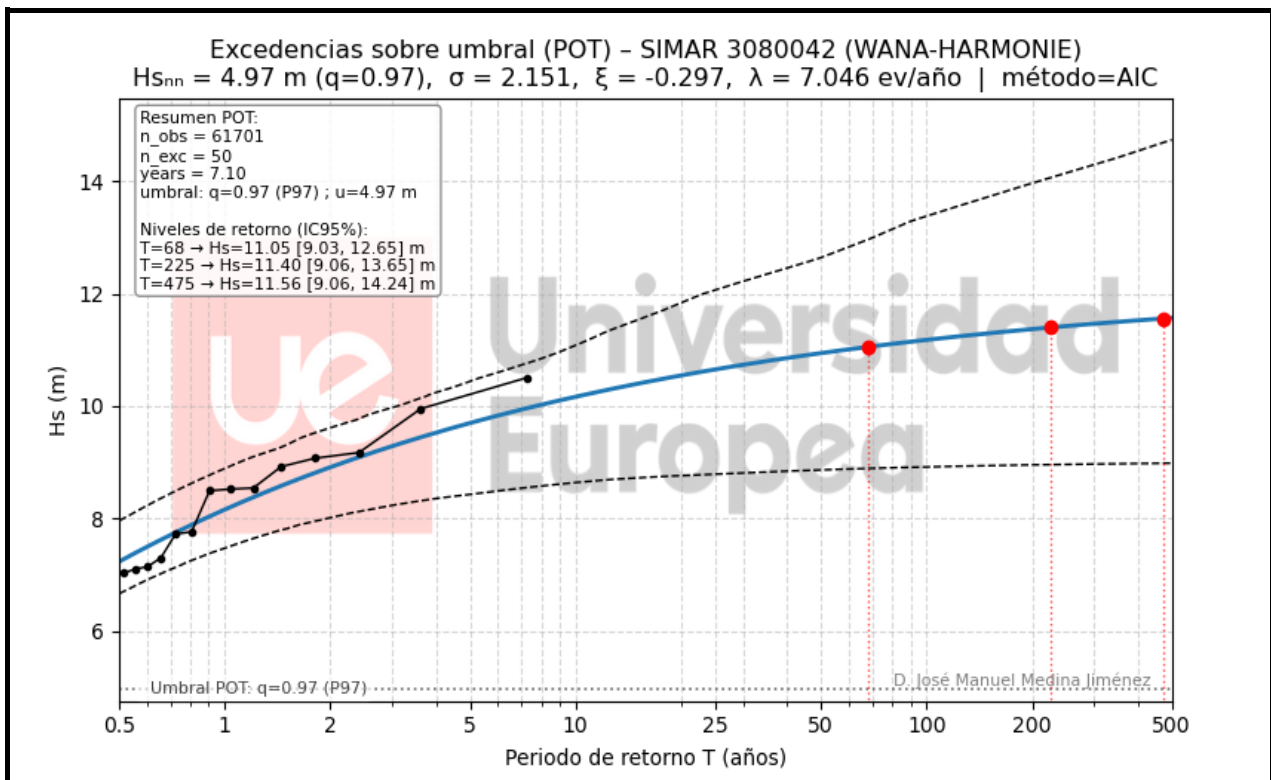
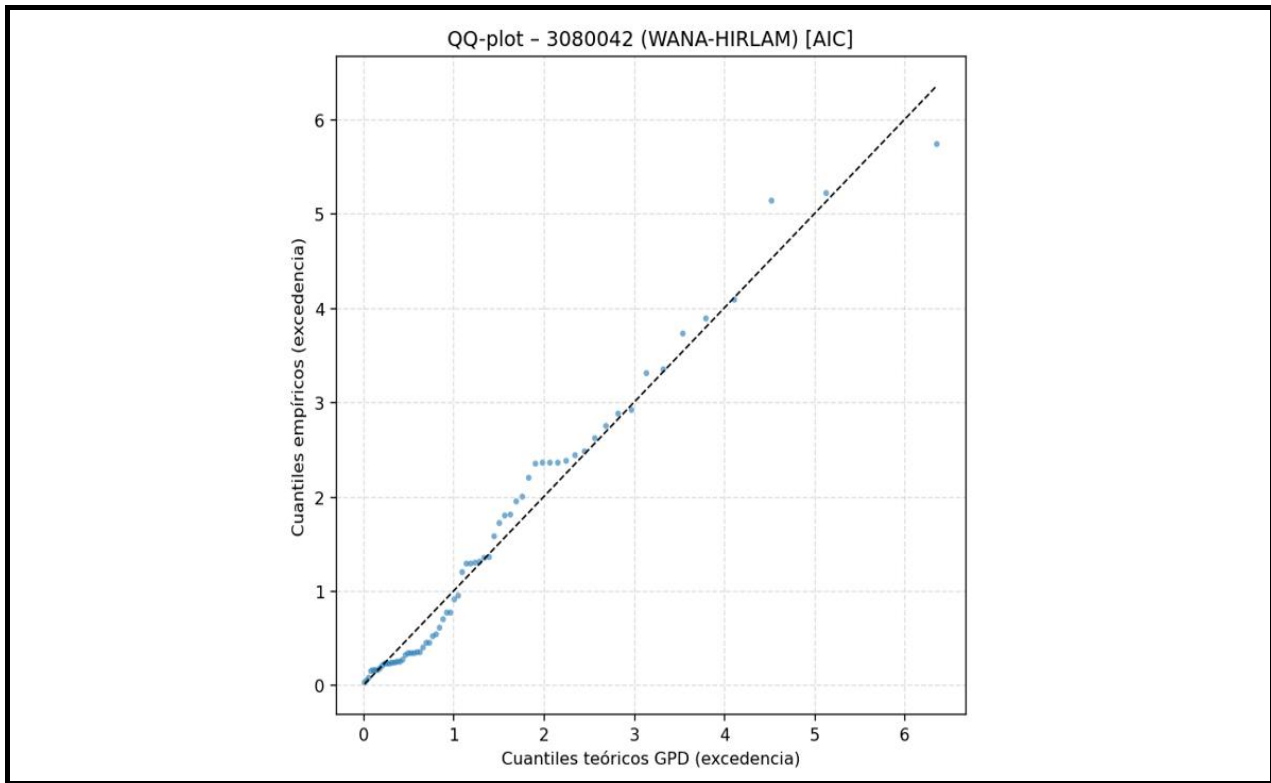
### 11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

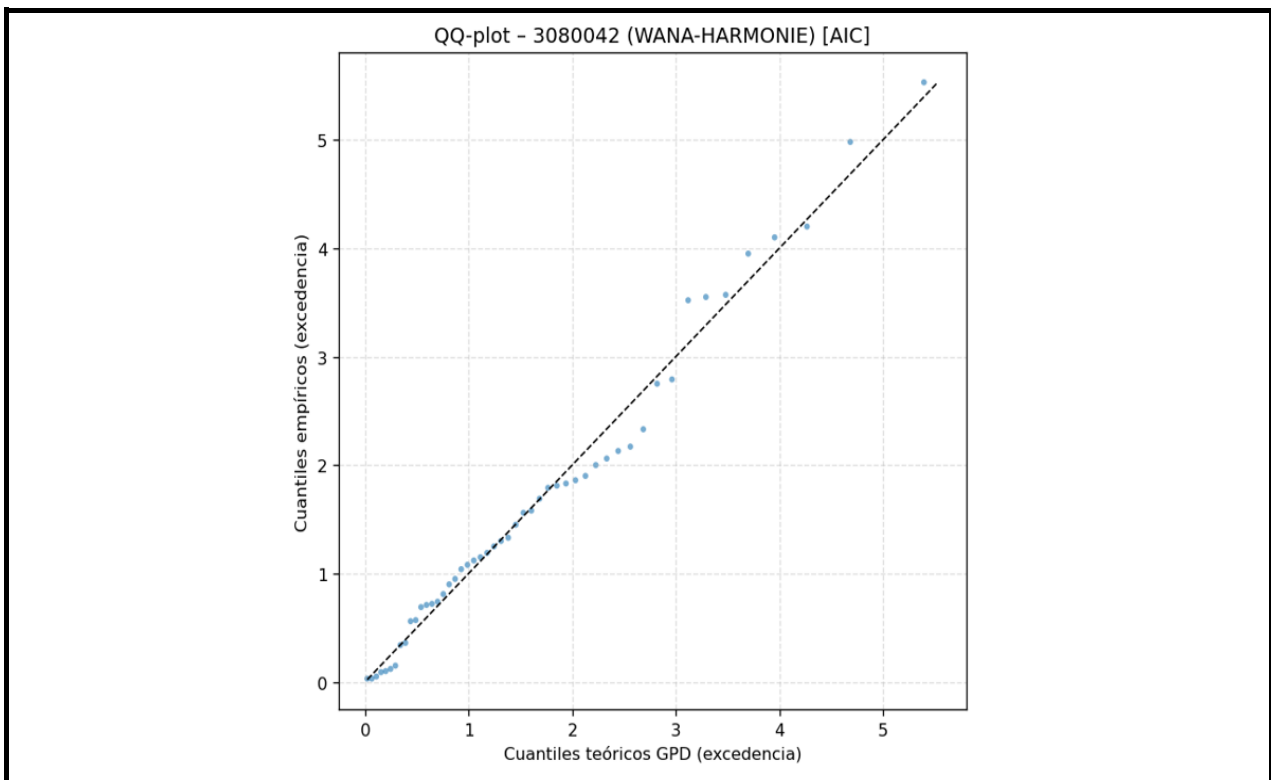
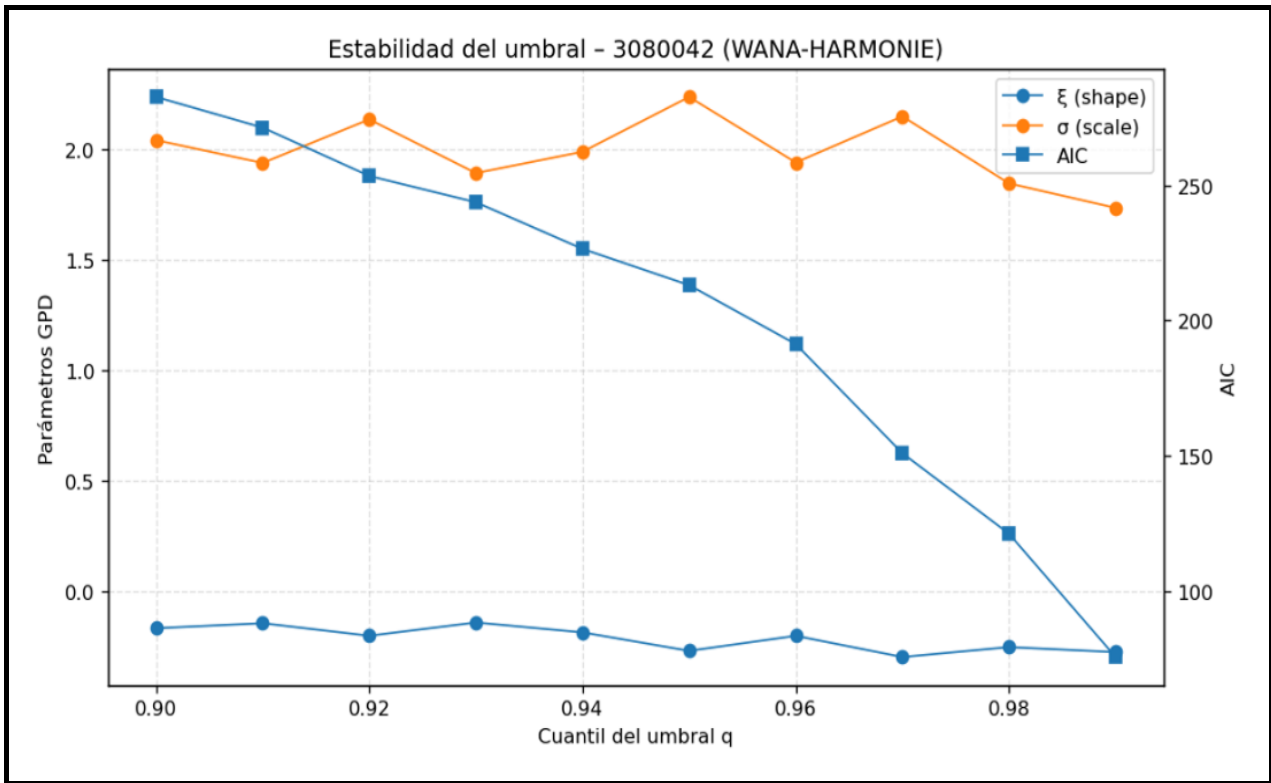


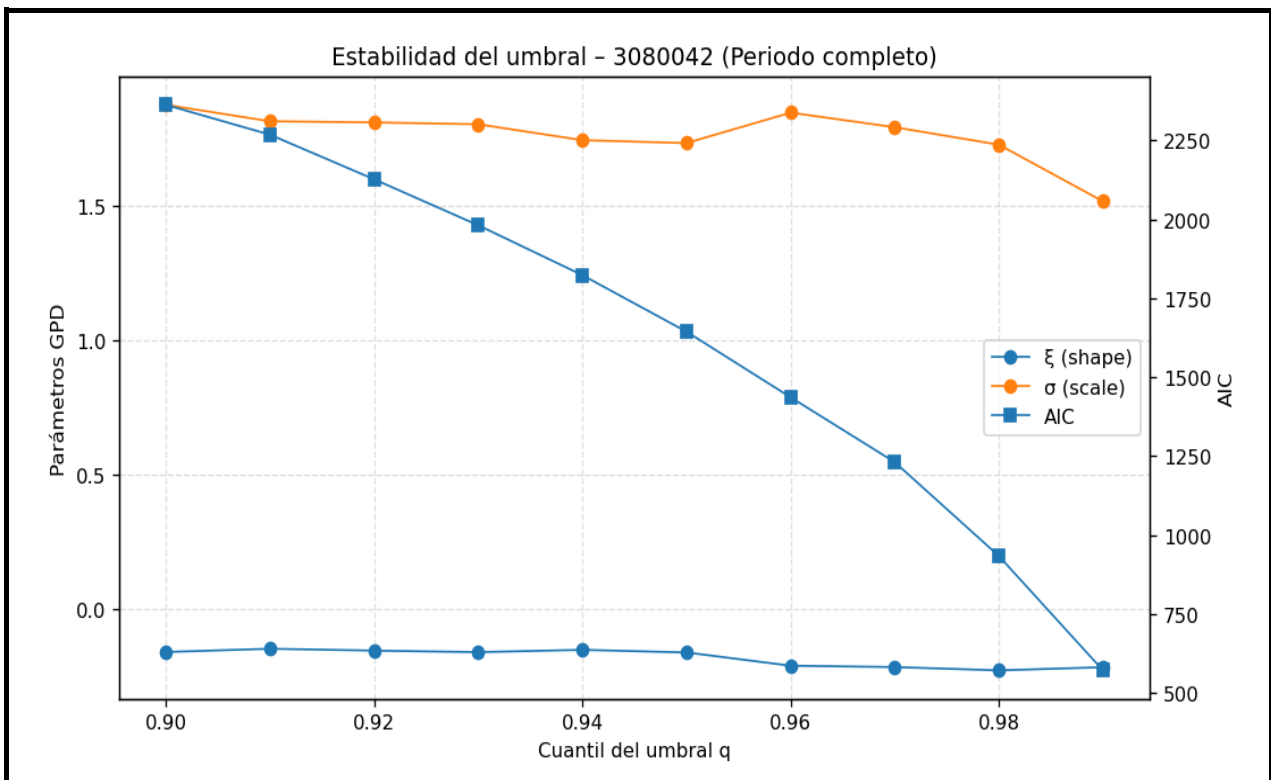
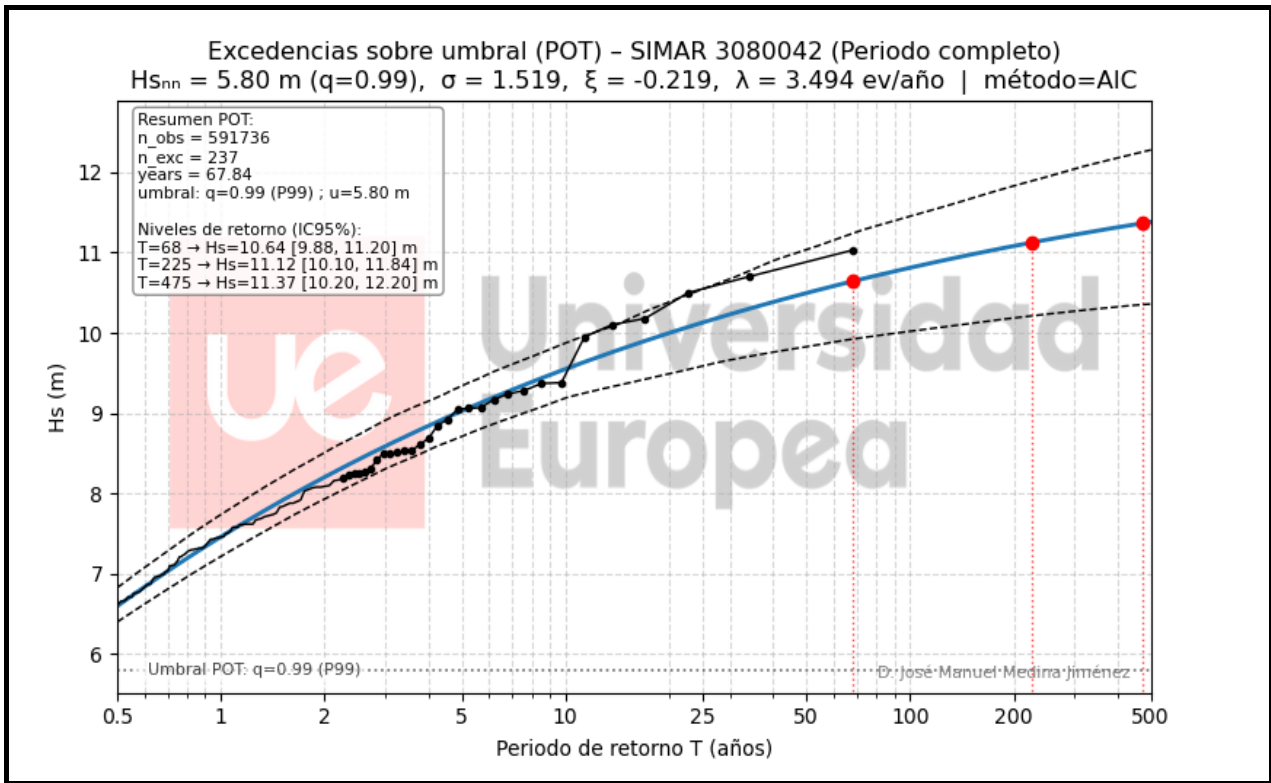


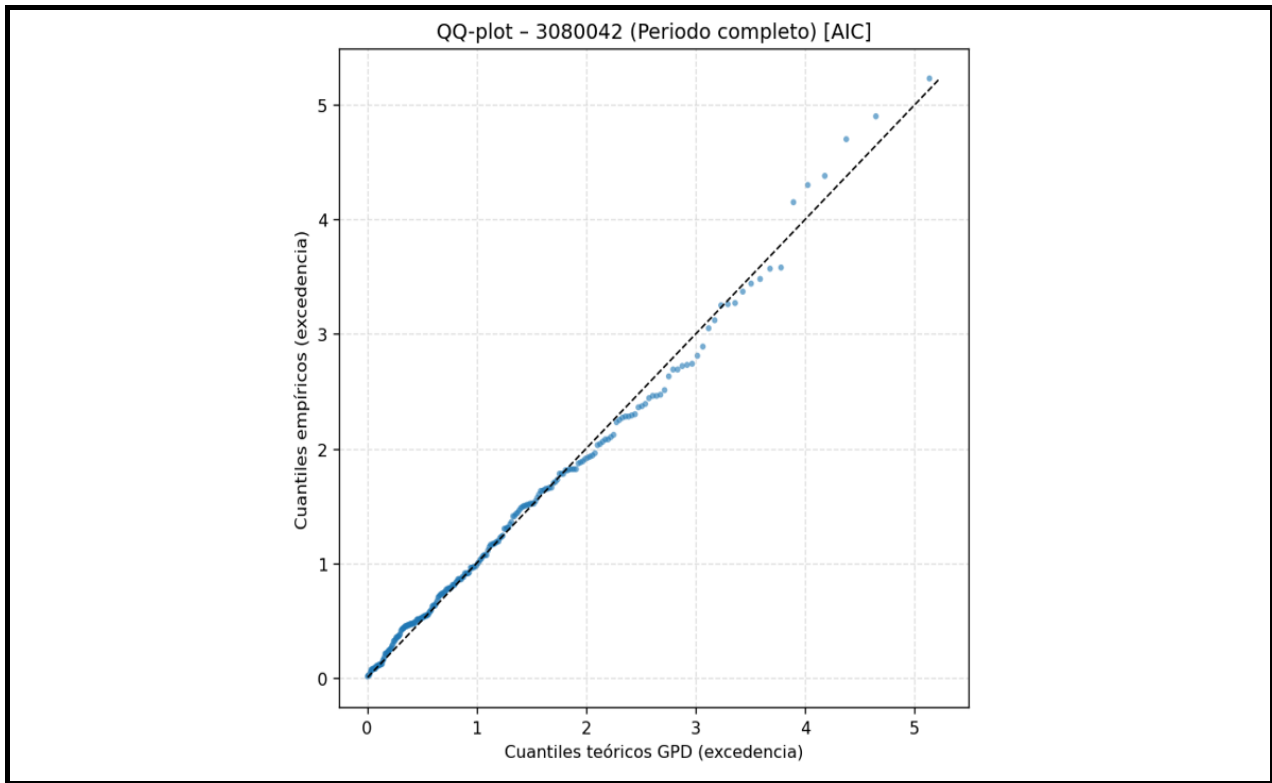













 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA Nº2 : PUNTO SIMAR 3002002 - BOYA CABO DE SILLEIRO</b>	
<b>Identificación del punto</b>		<b>Localización y referencia</b>	
<b>Boya:</b>	Cabo de Silleiro	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (Zona 29 T)
<b>Nodo SIMAR:</b>	3002002	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	29 T 465260.17 4658743.93
<b>Fachada marítima:</b>	Oeste Peninsular	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	29 T 464455.37 4663189.28
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	600 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Cabo de Silleiro / Punto SIMAR 3002002.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 2003-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1$  h)

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

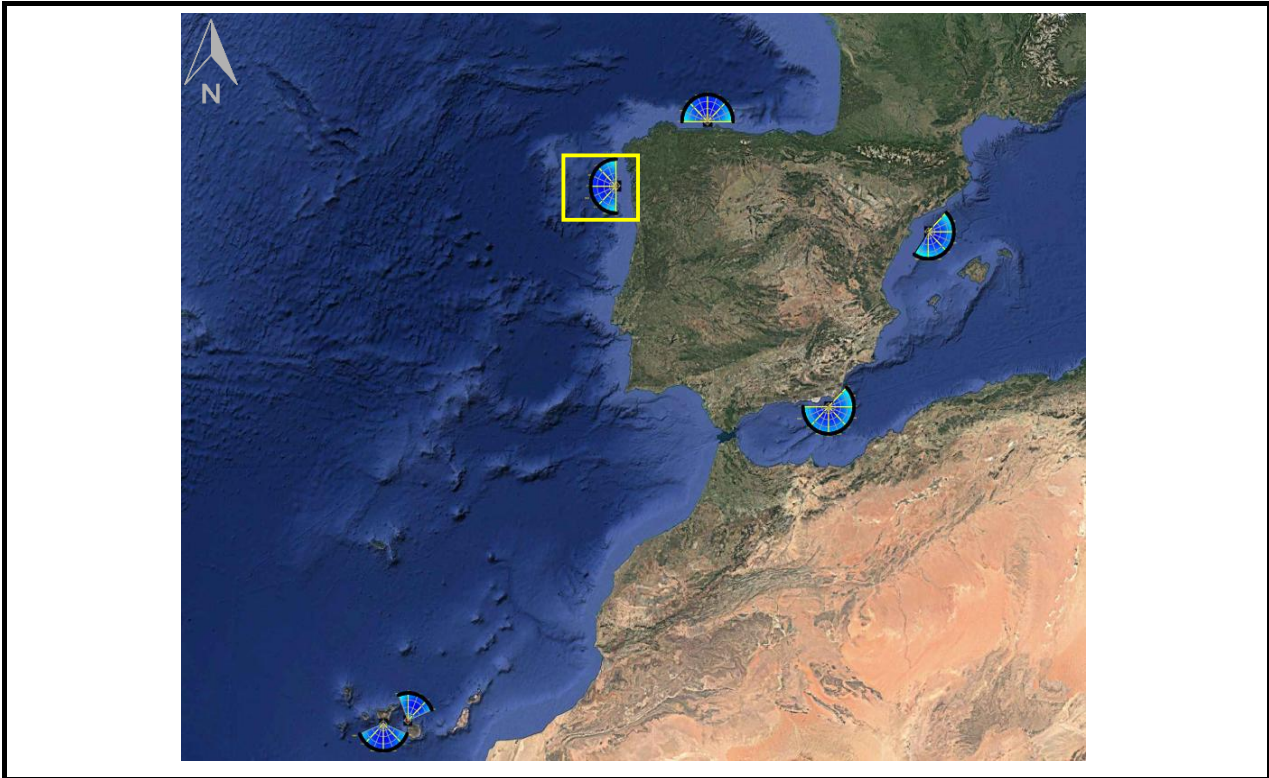
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

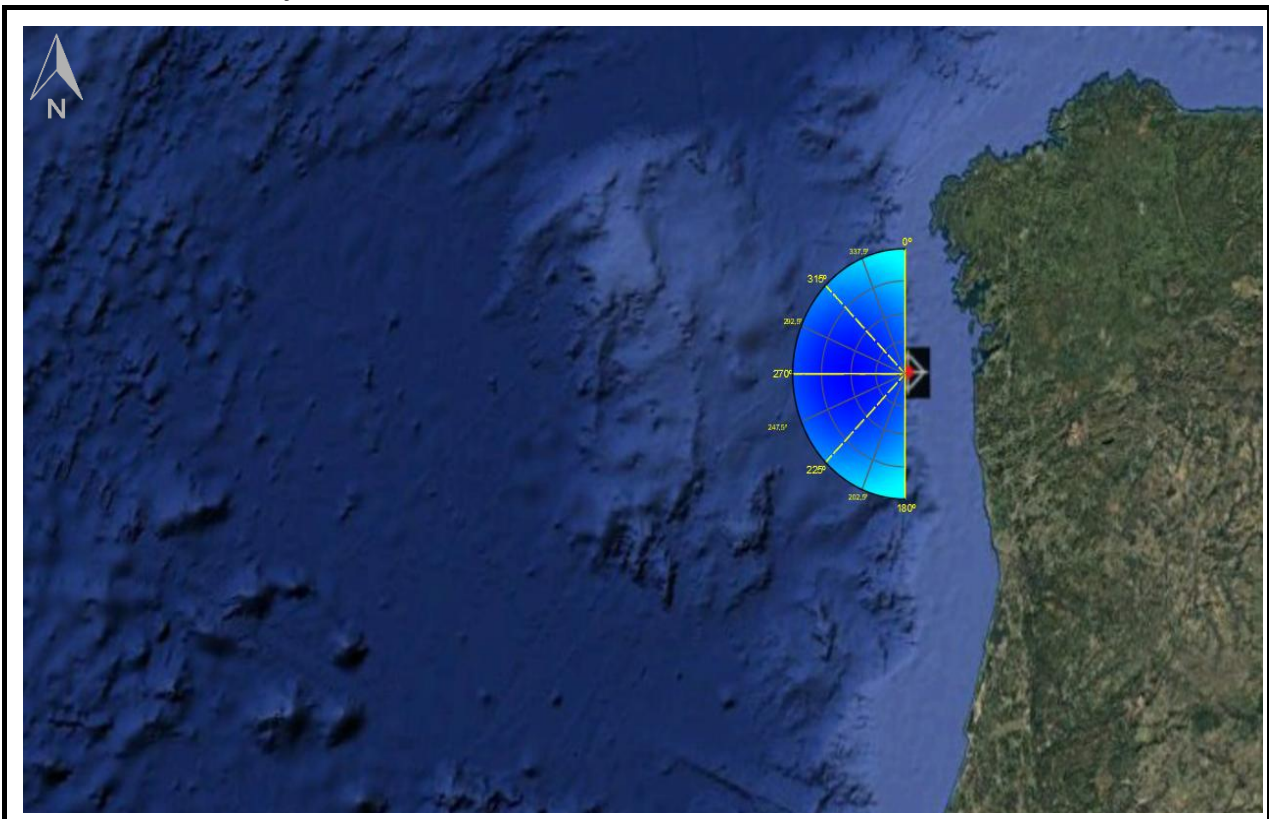
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

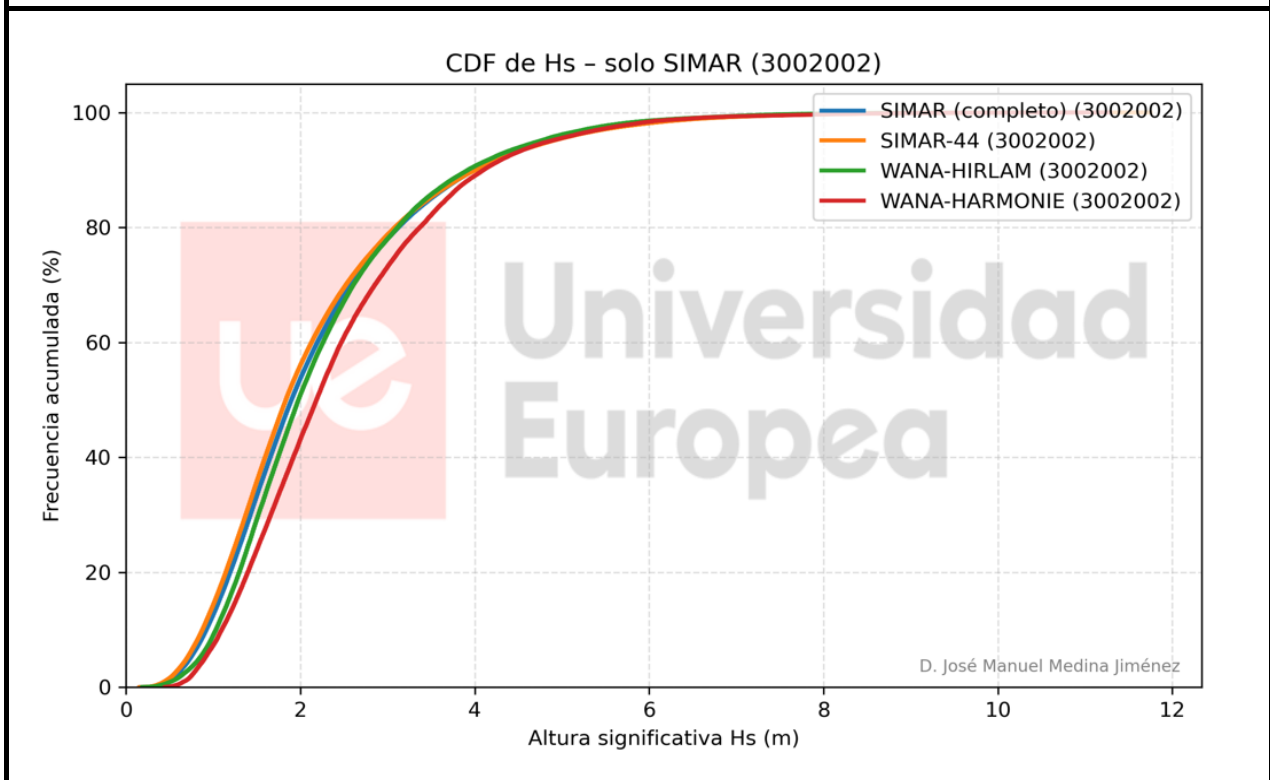
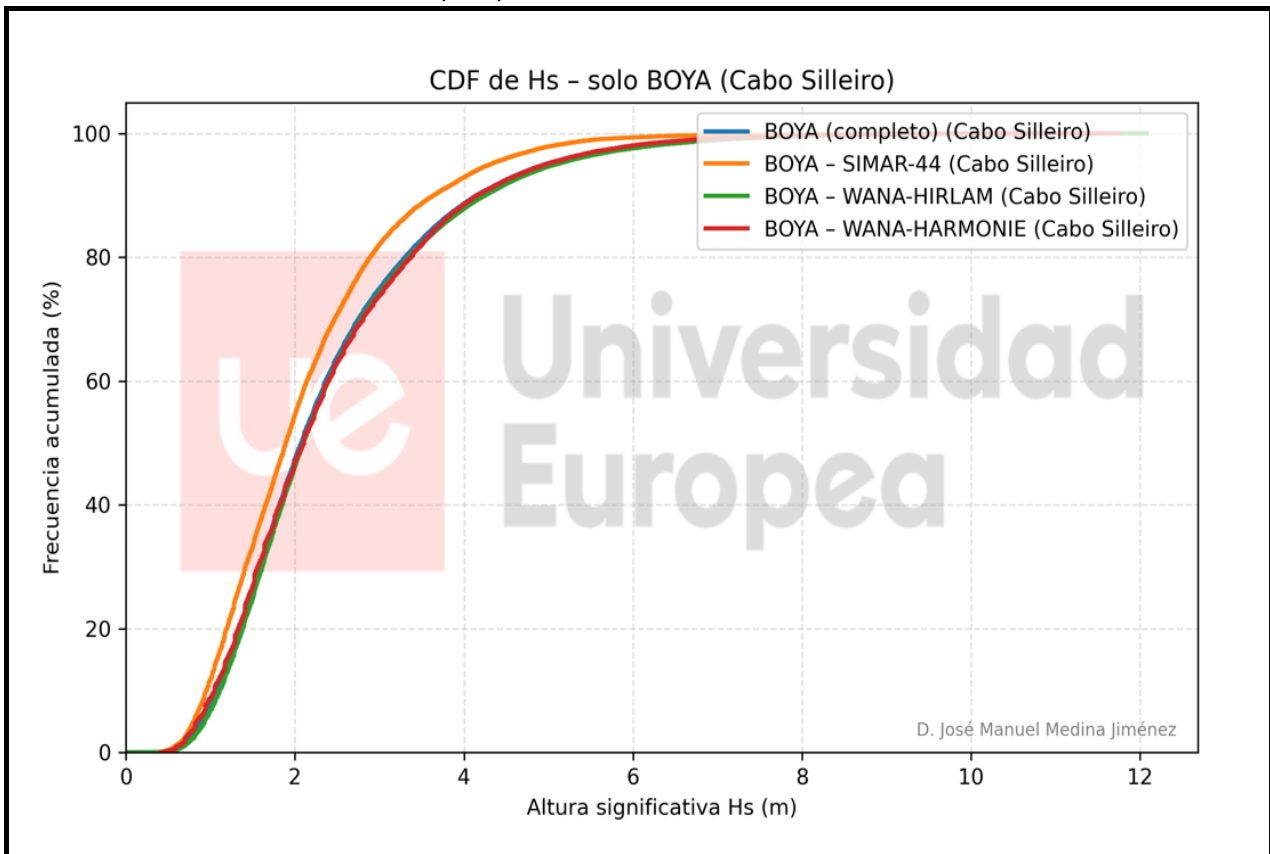


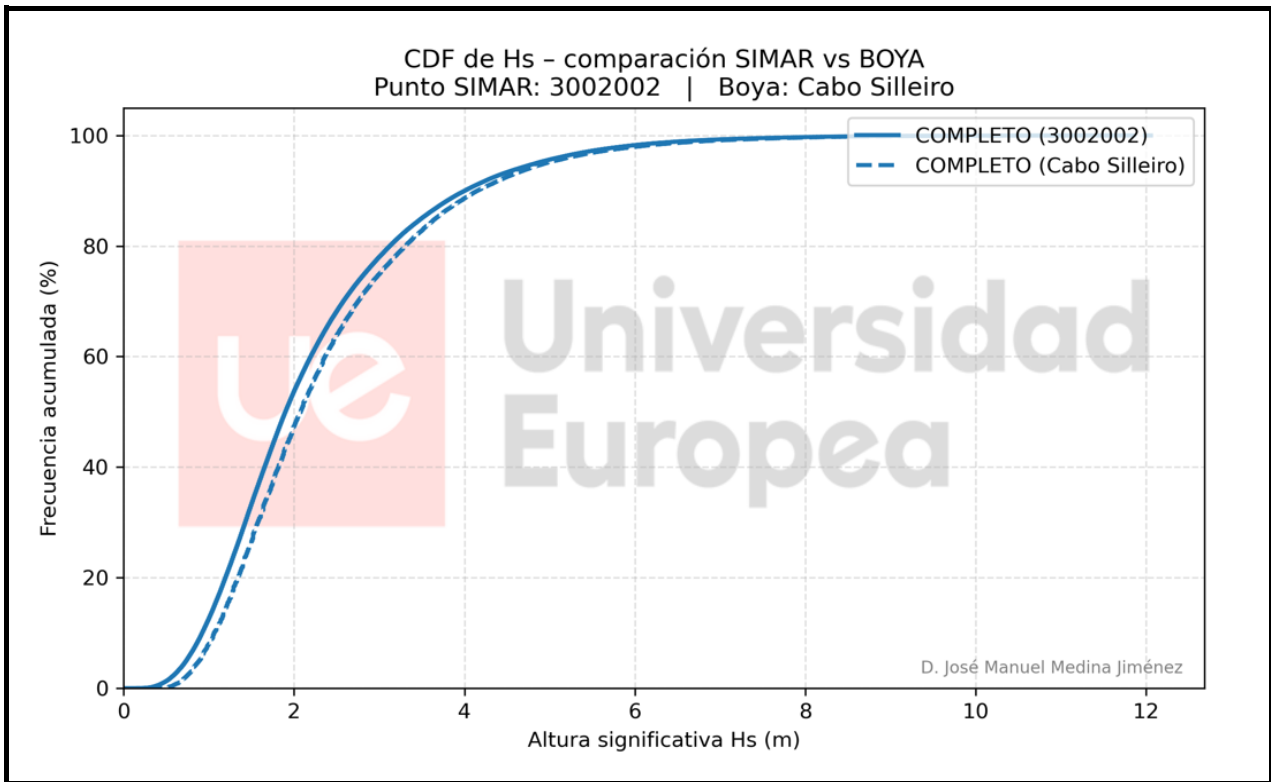
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



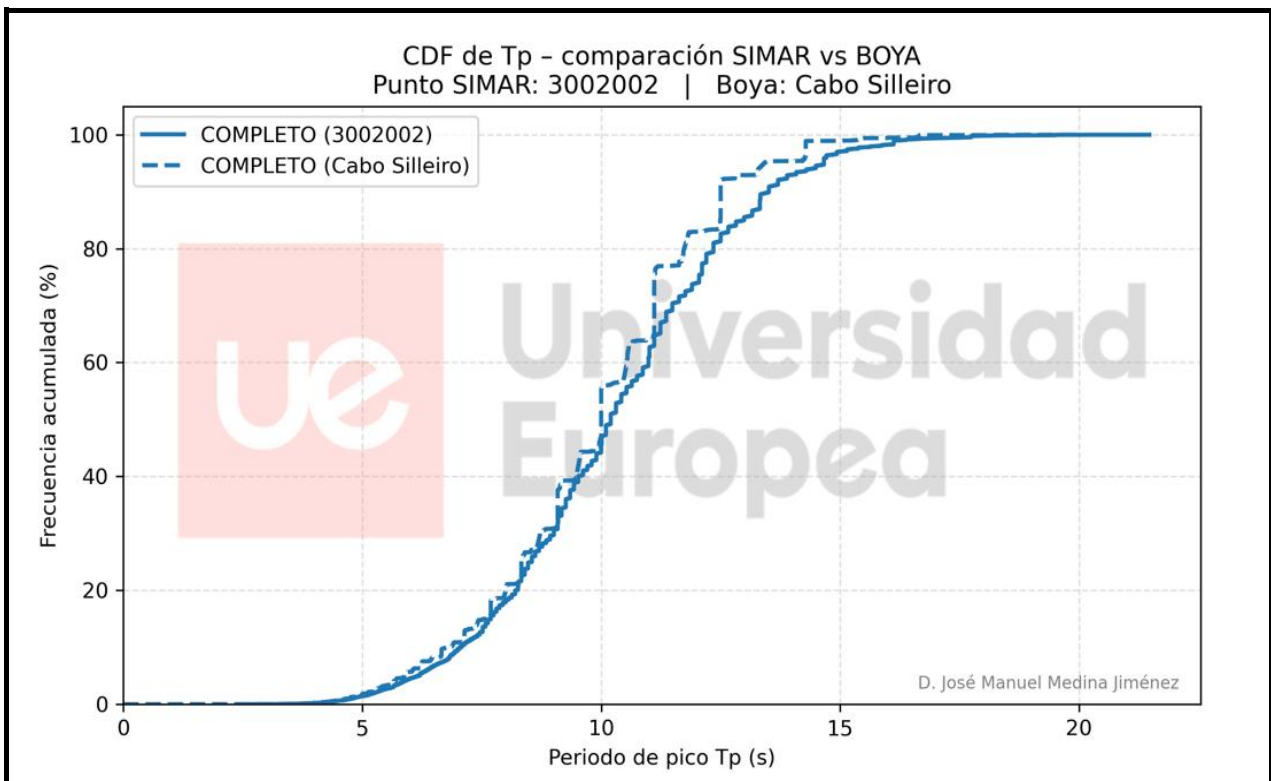
### 4. Análisis Homogeneidad modelos

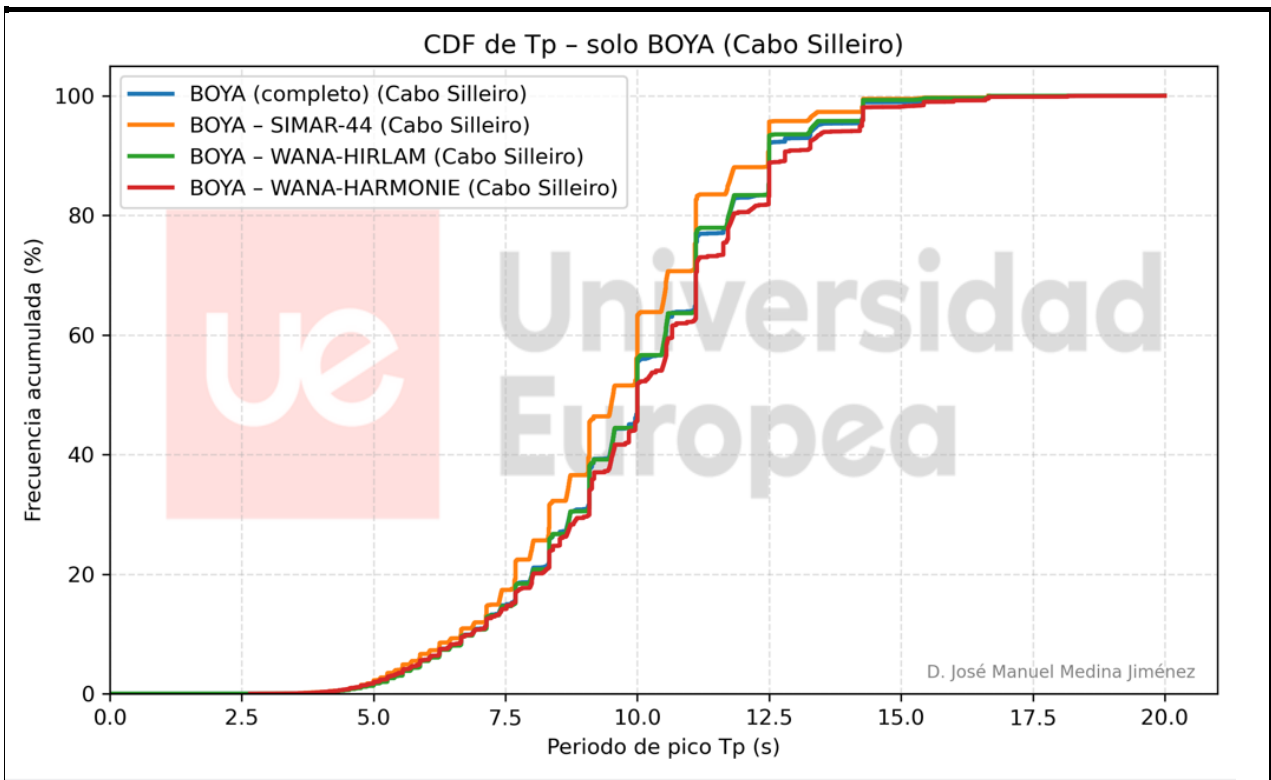
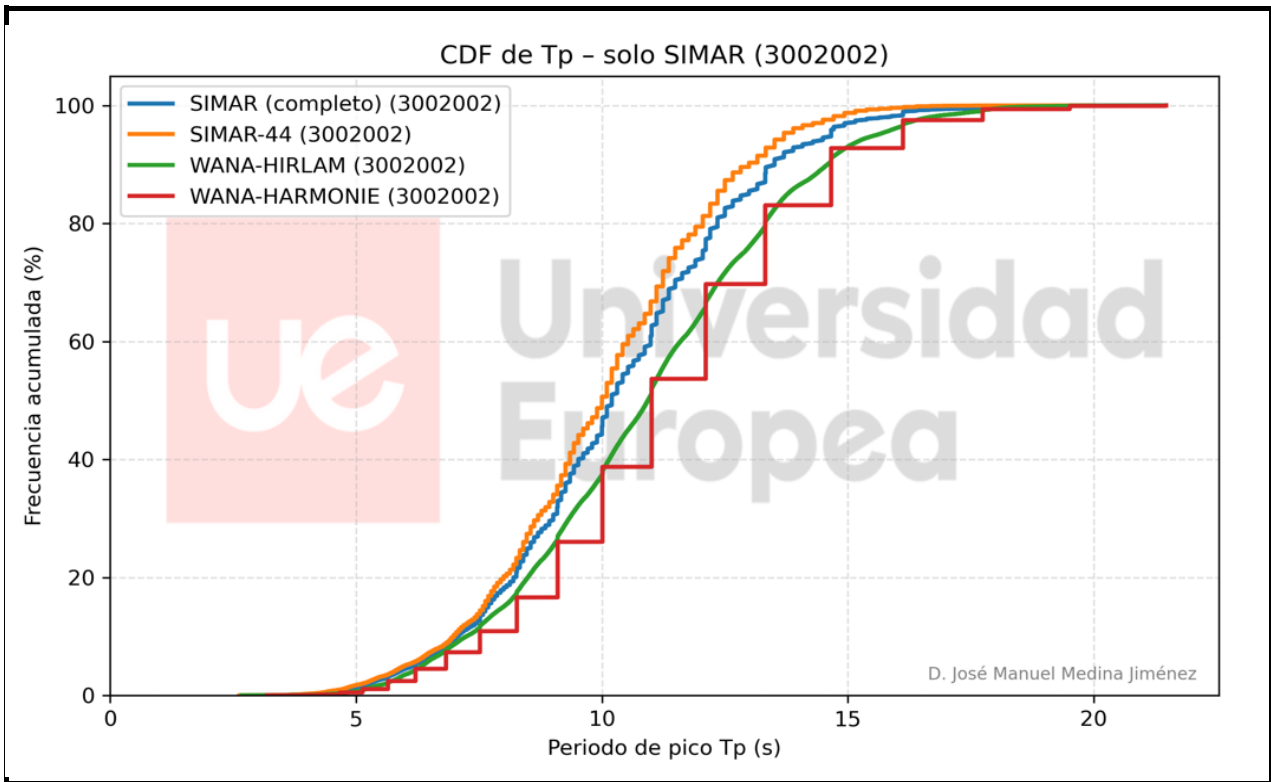
#### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



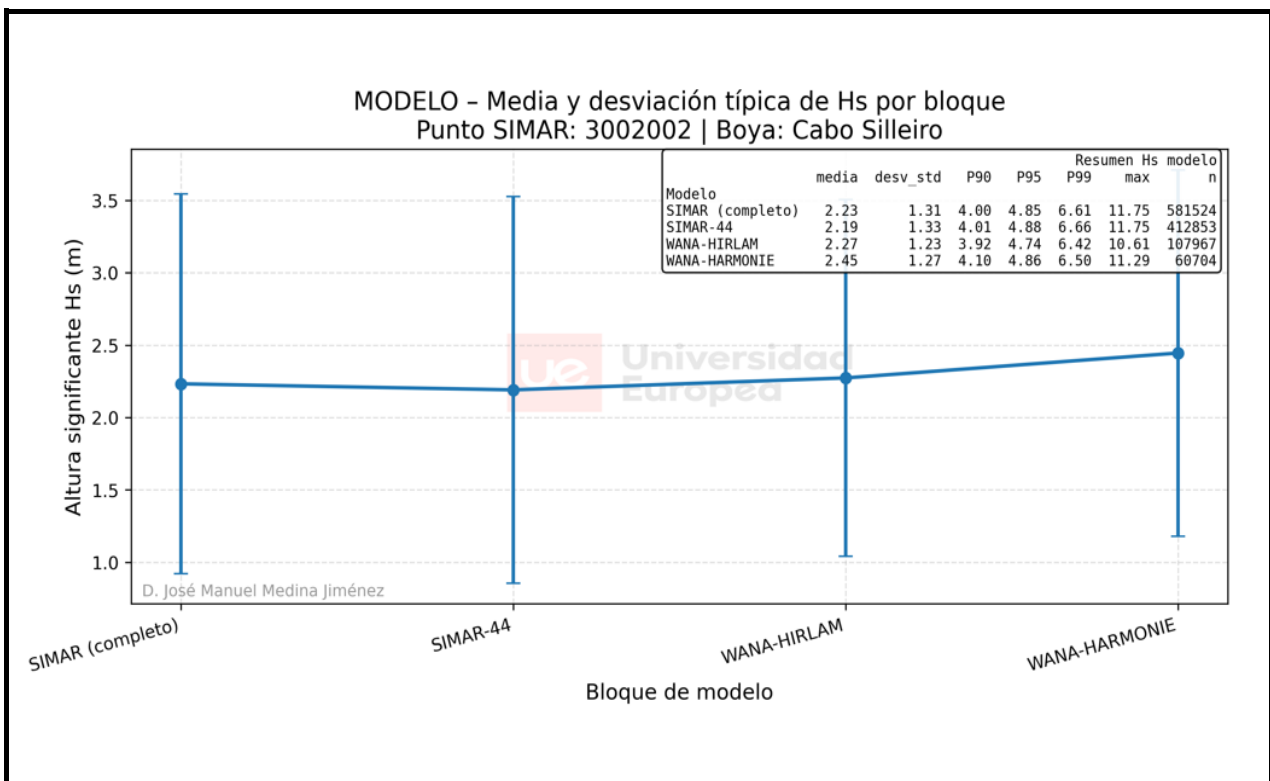
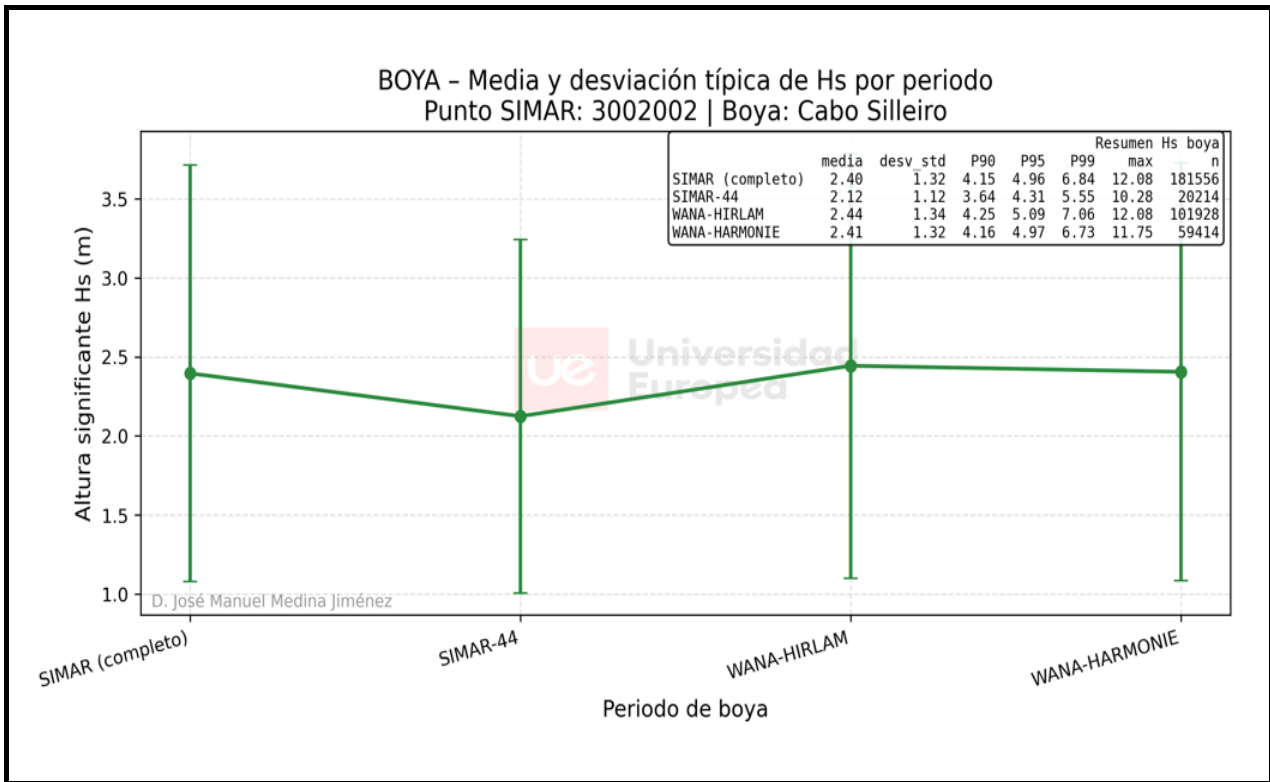


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

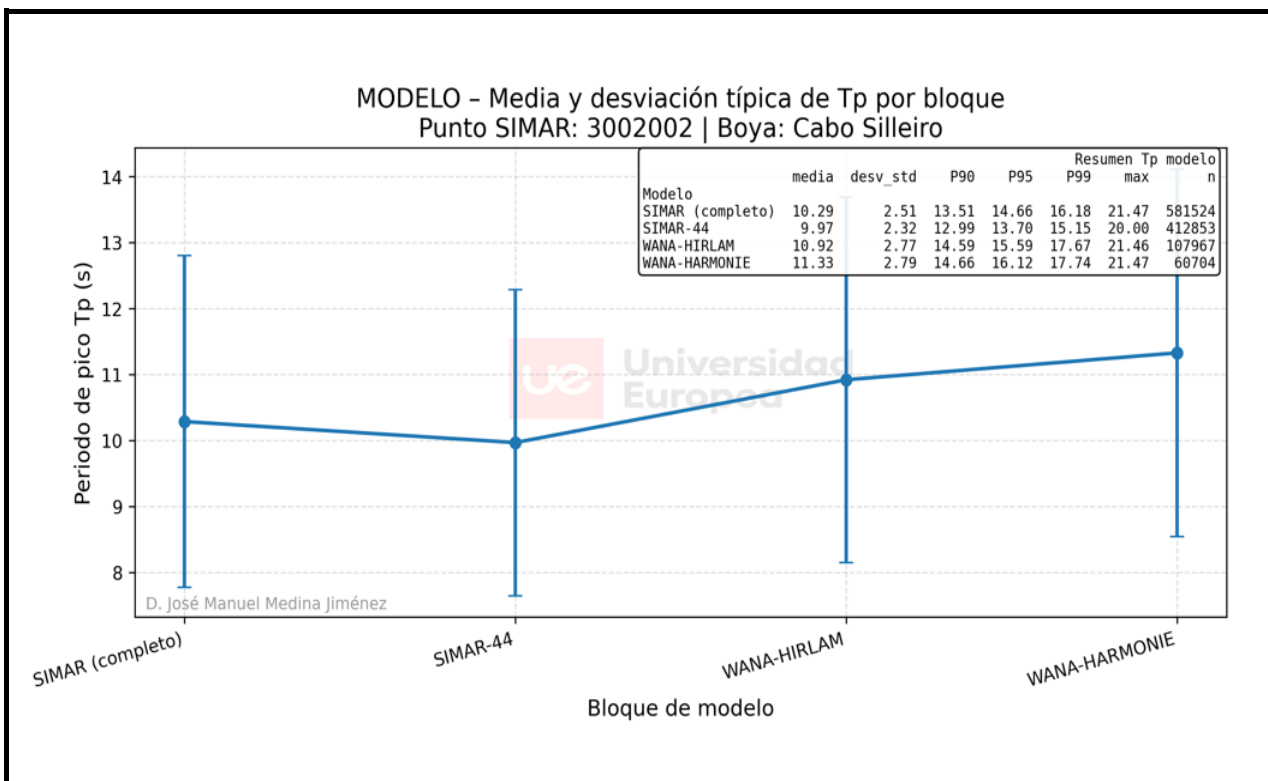
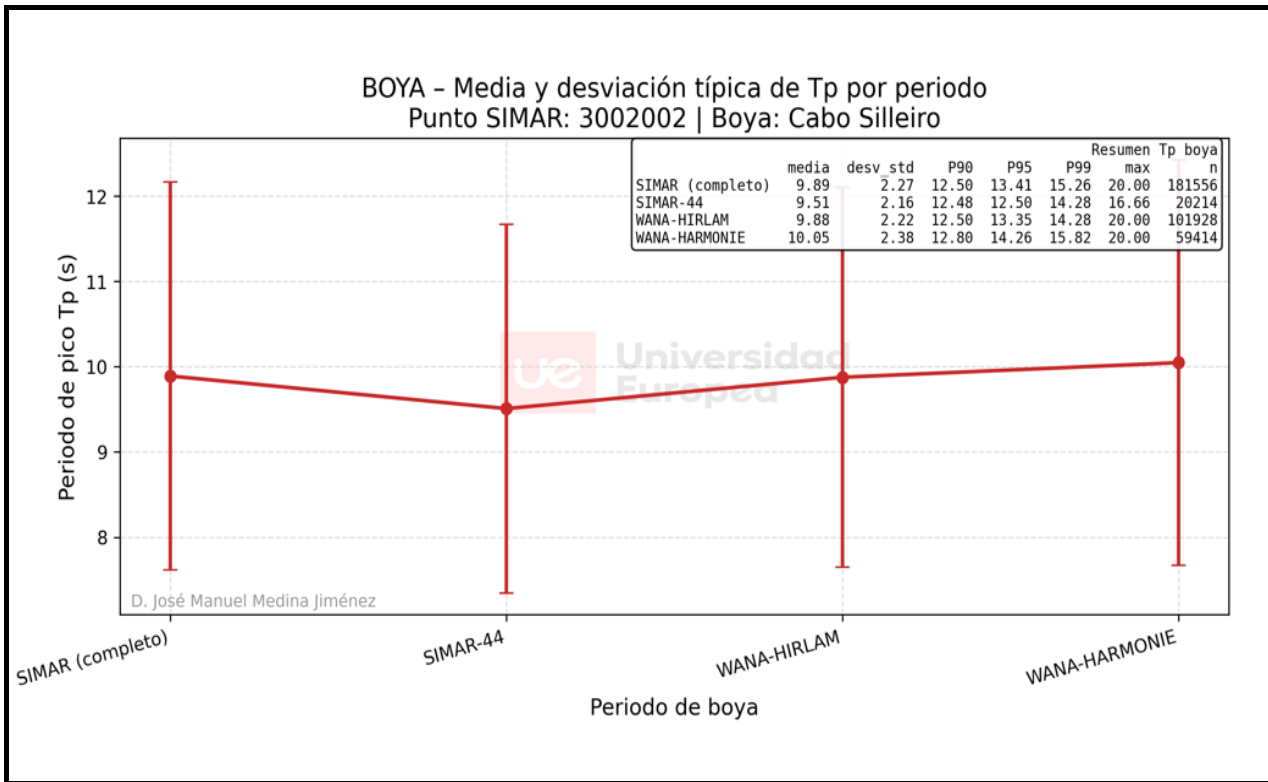




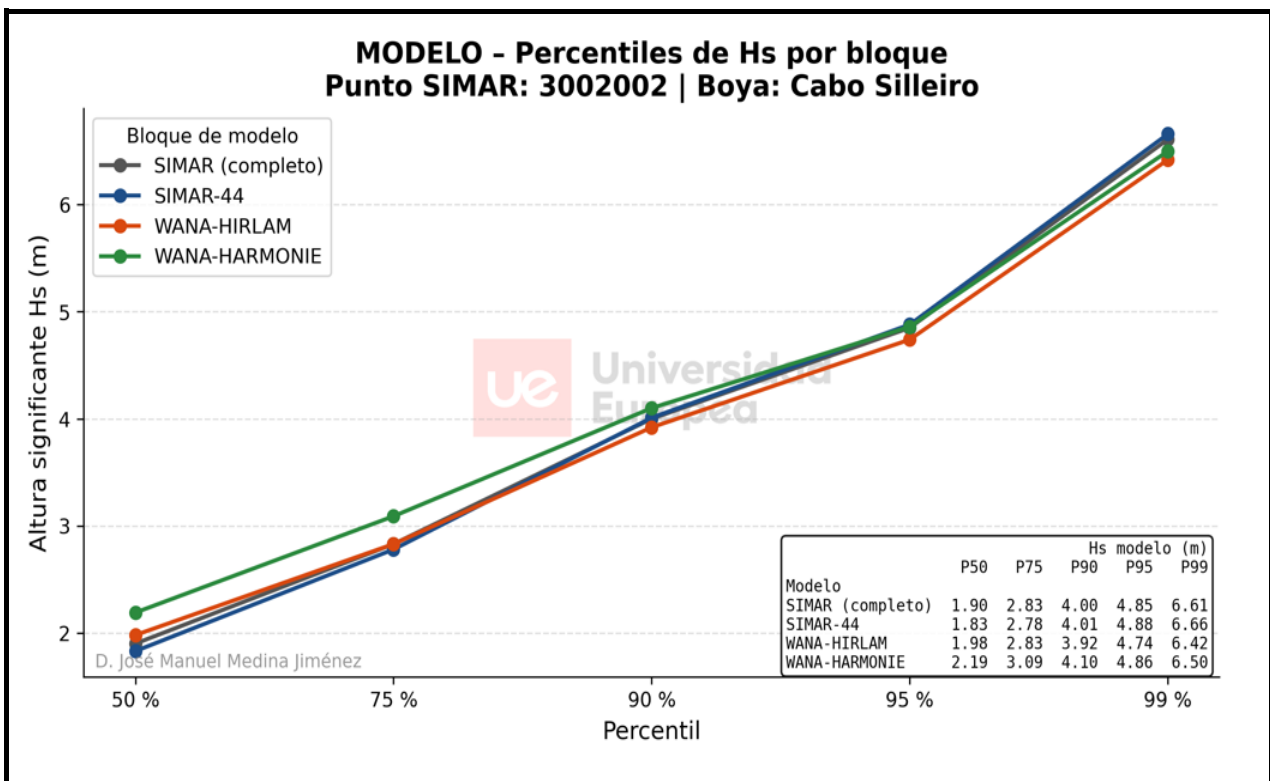
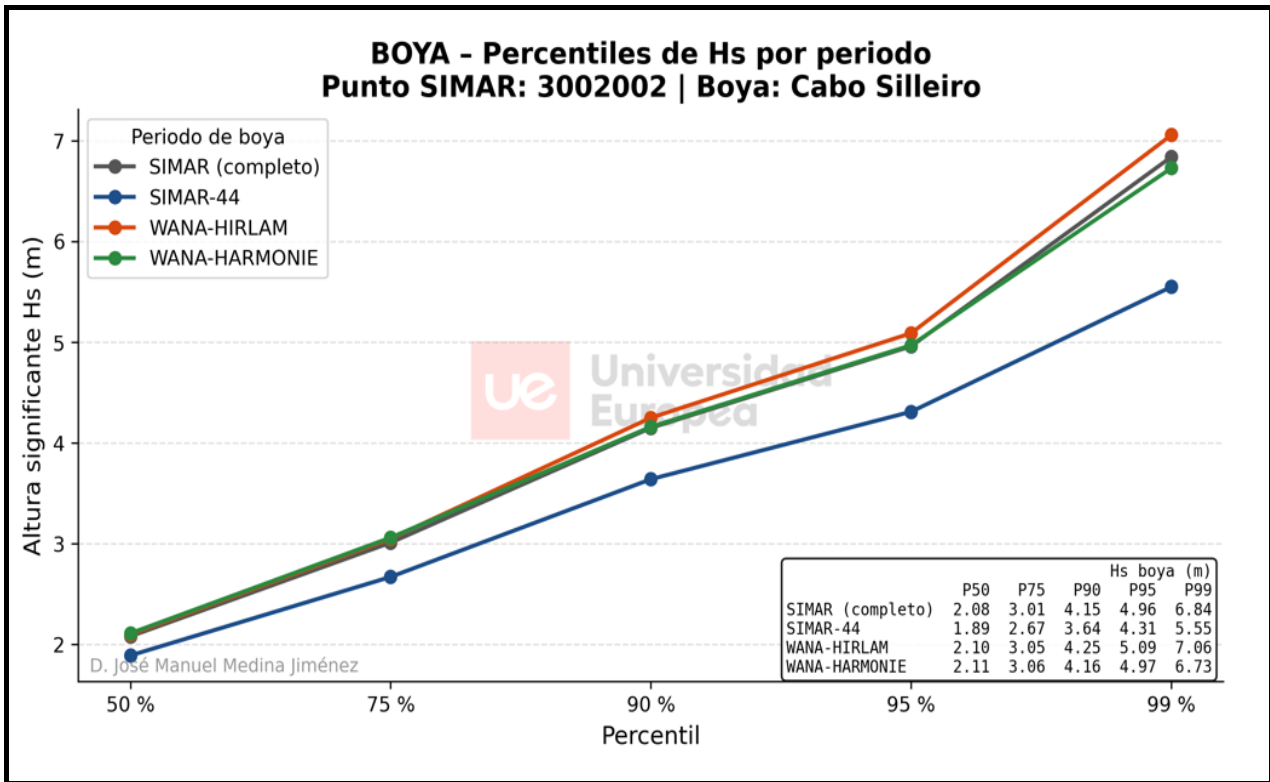
### 5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



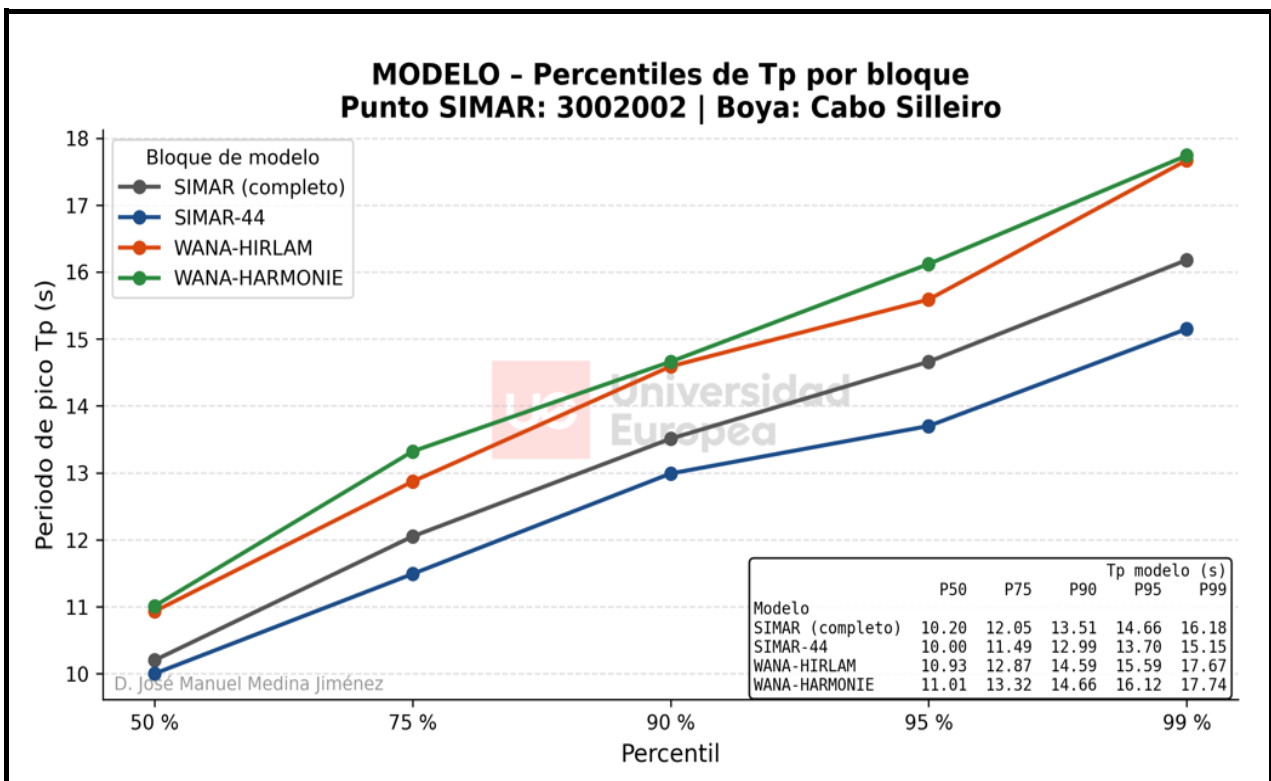
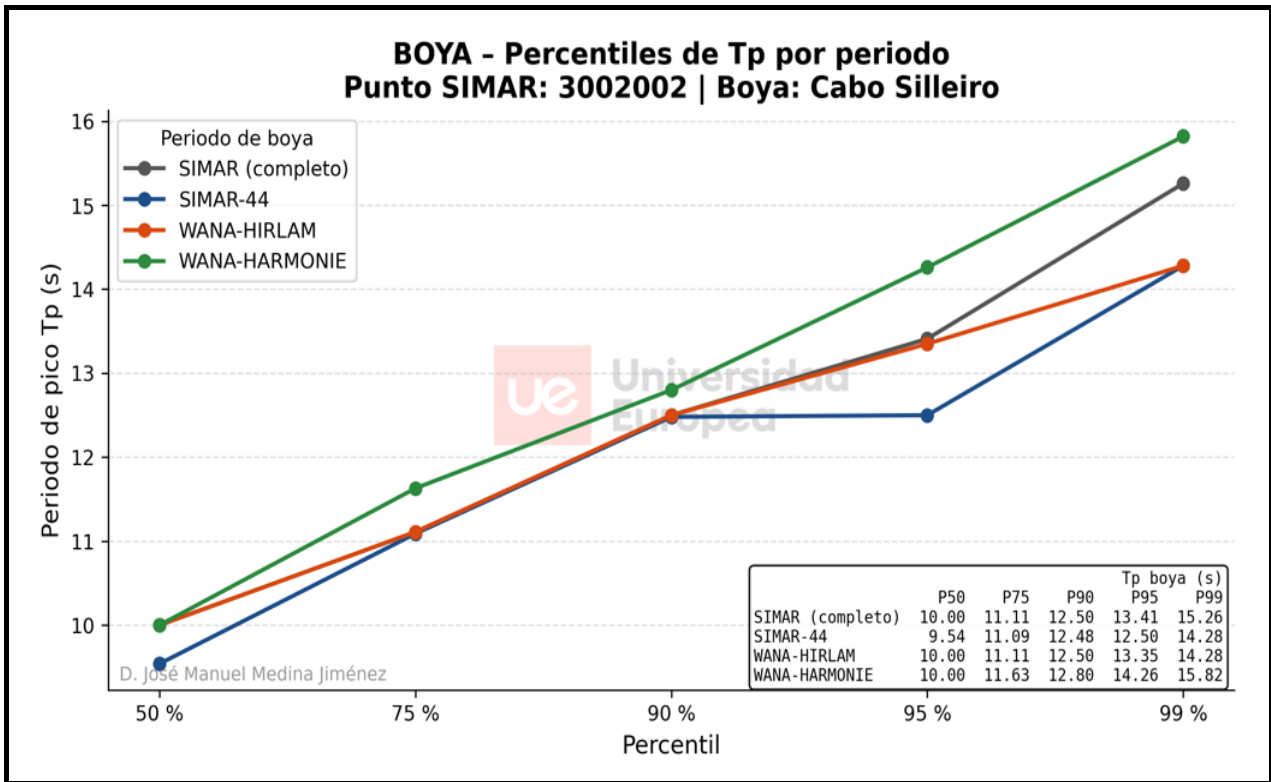
6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



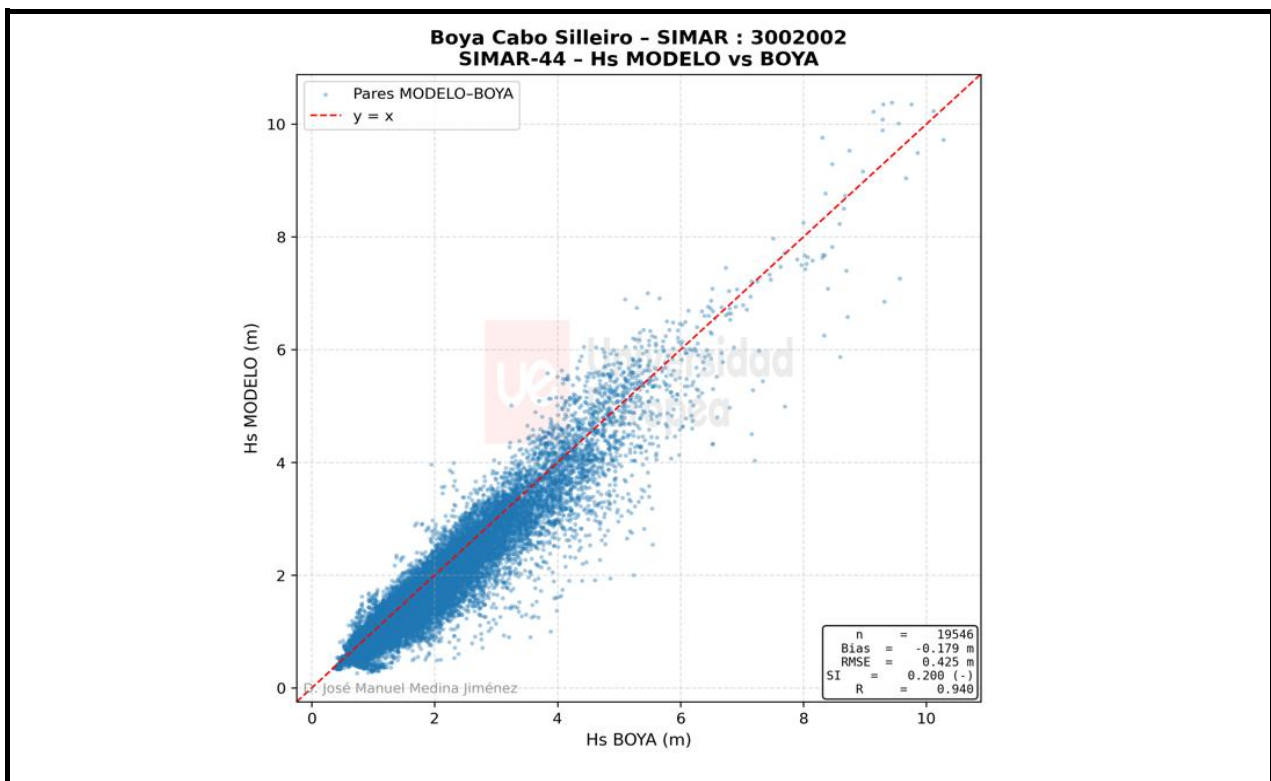
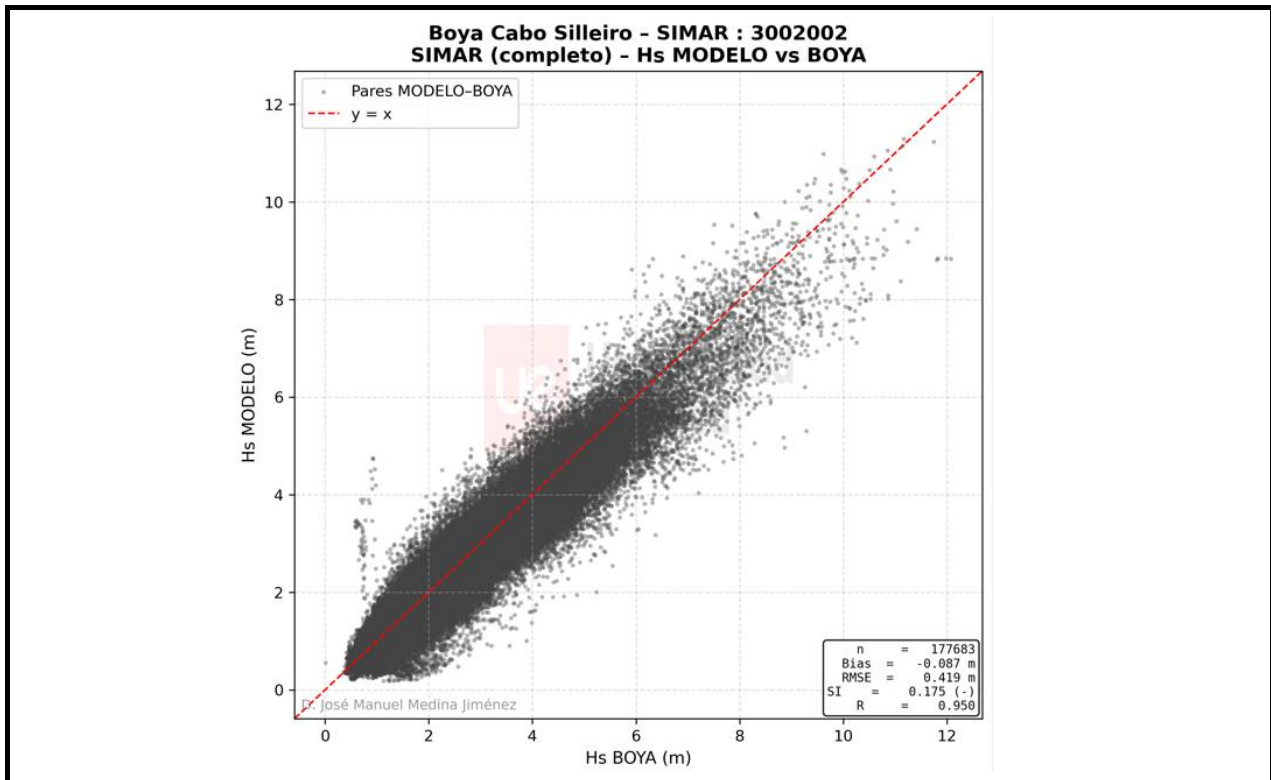
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

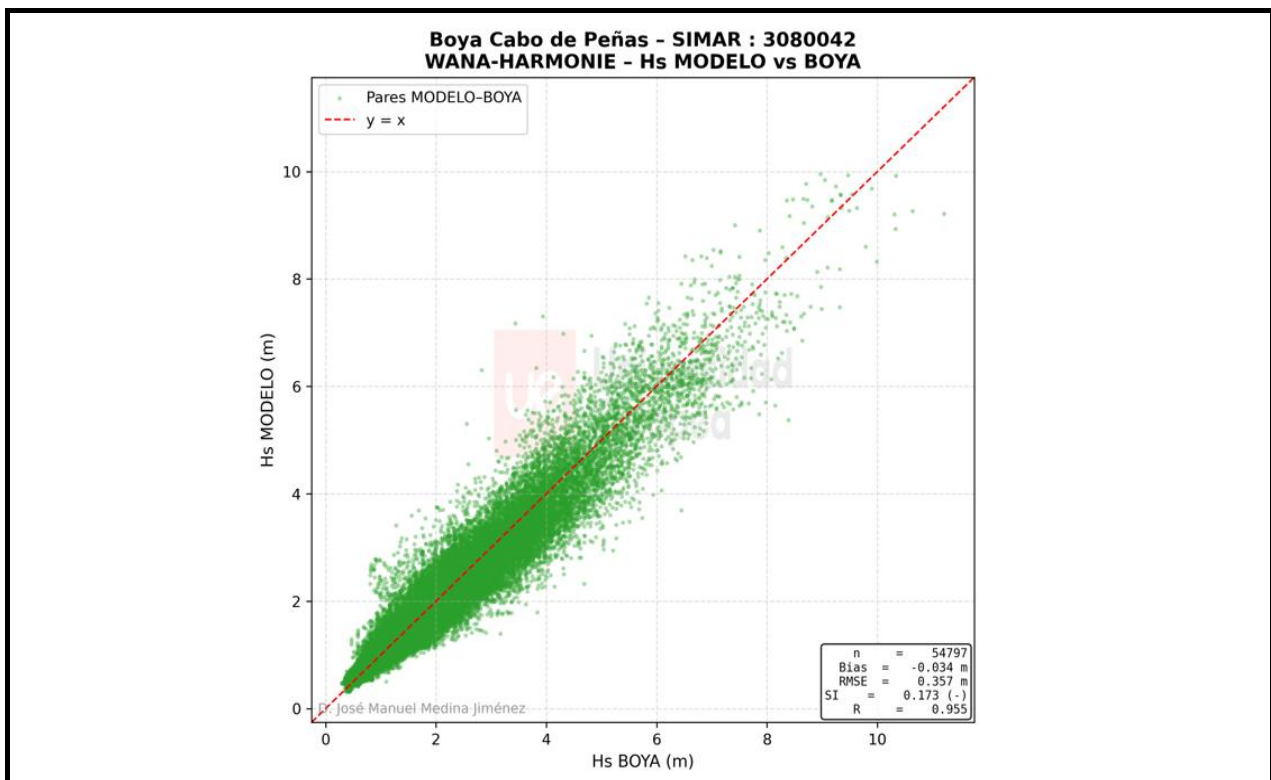
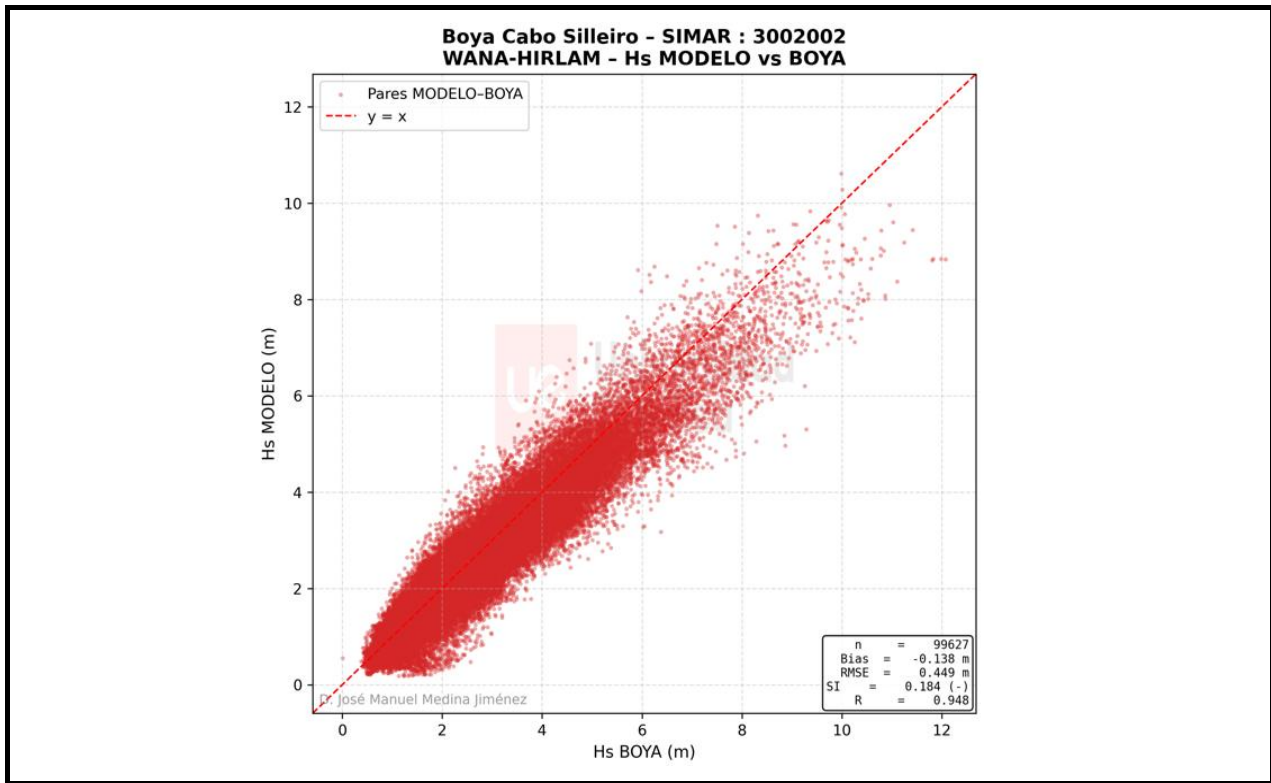


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

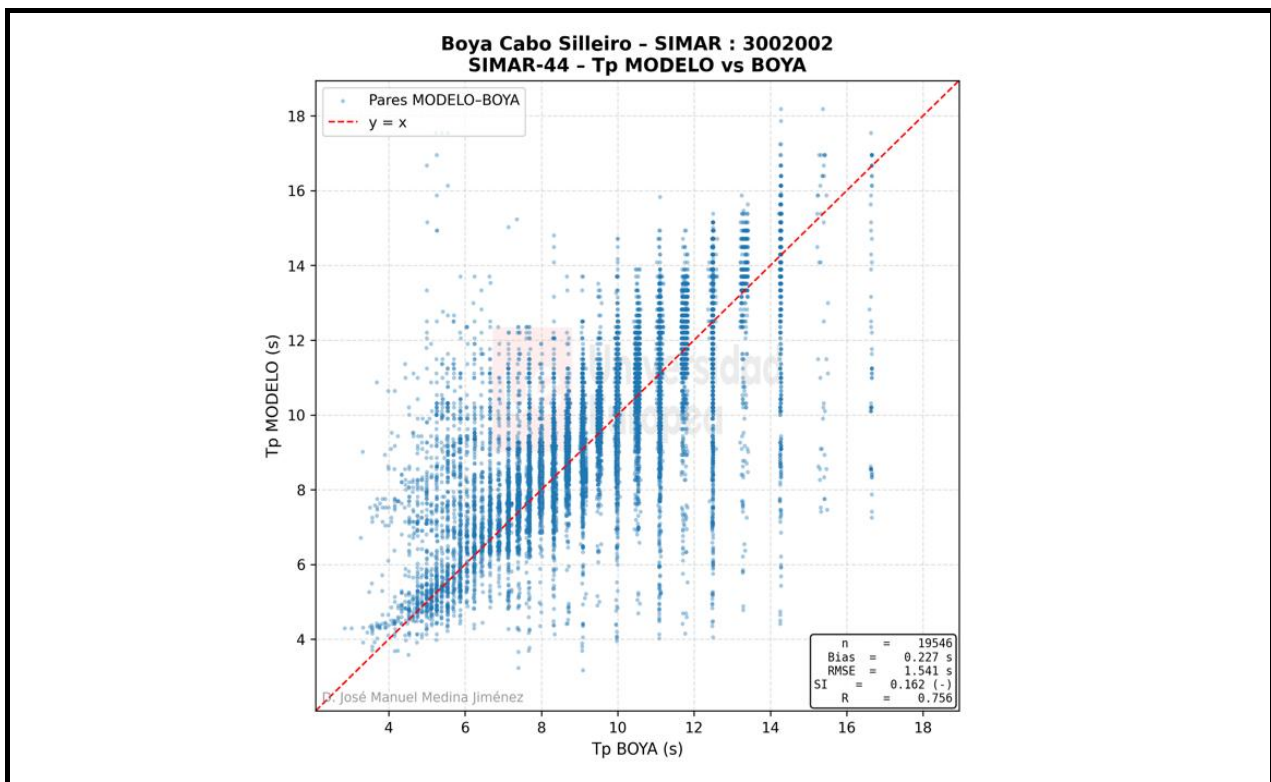
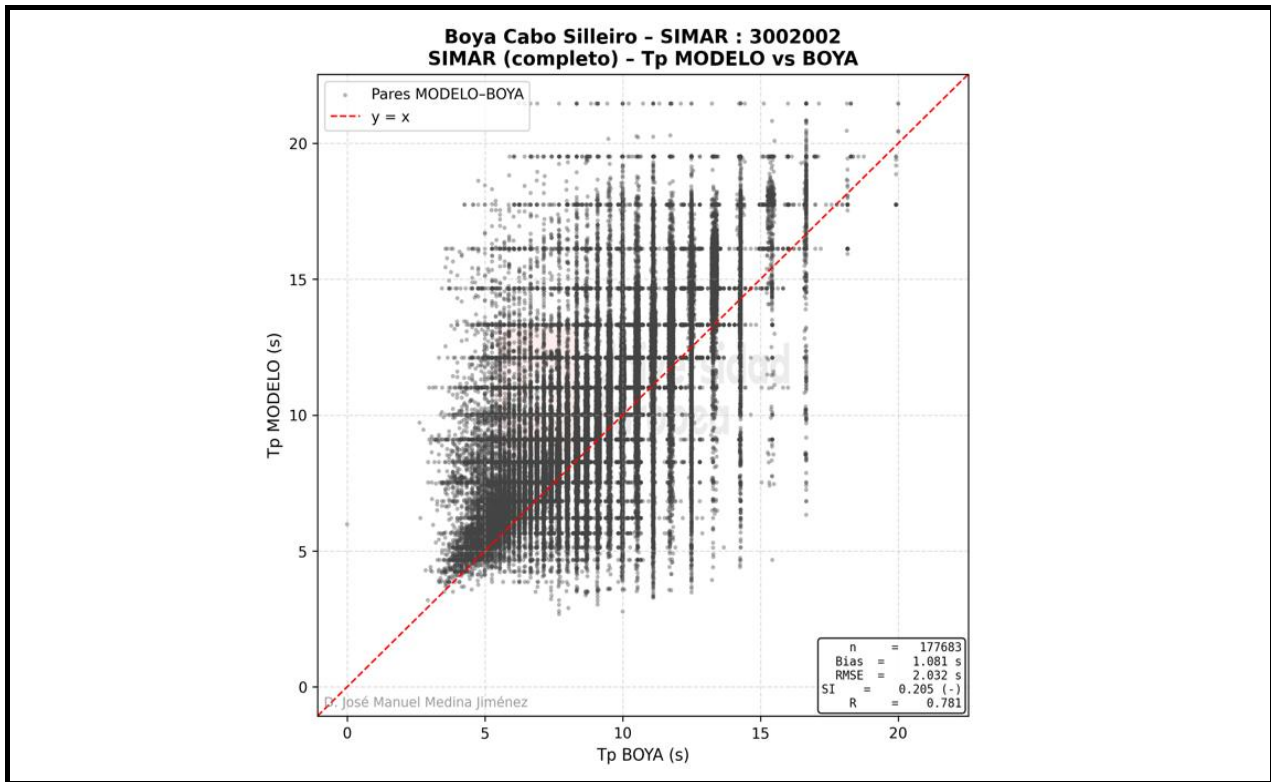


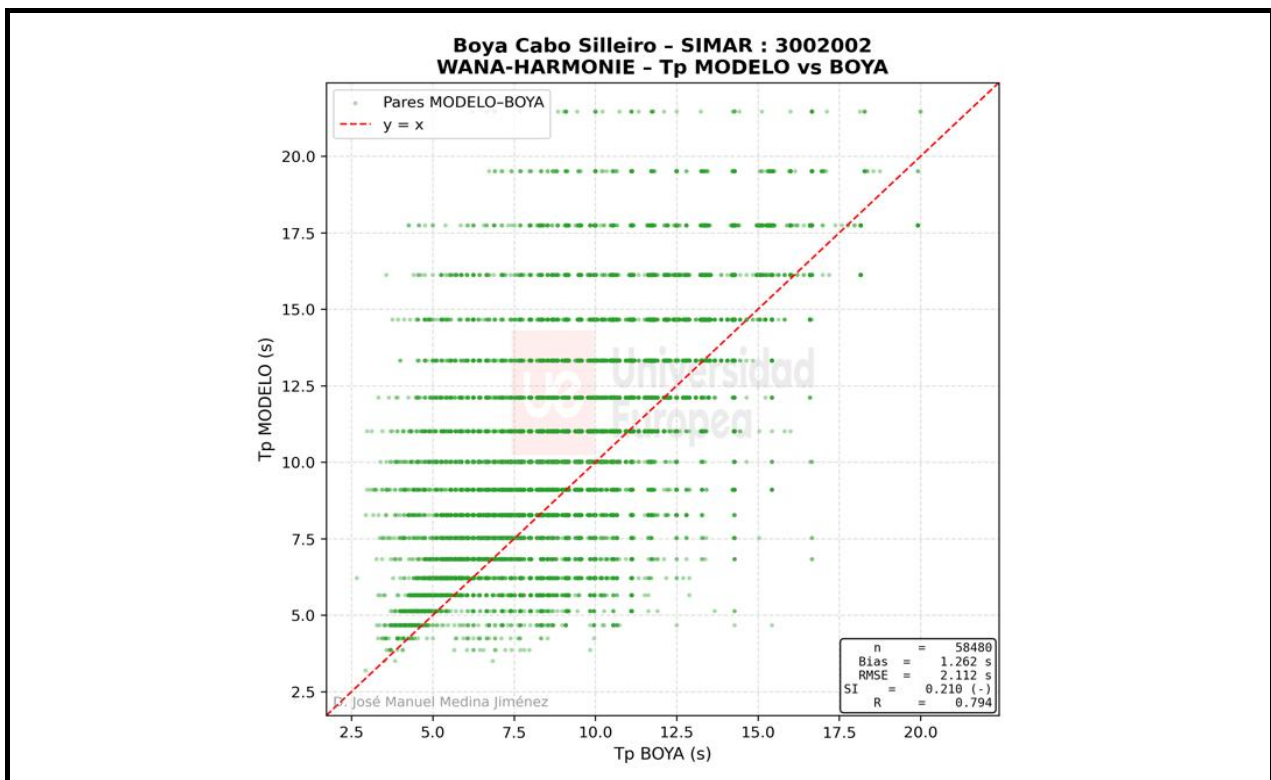
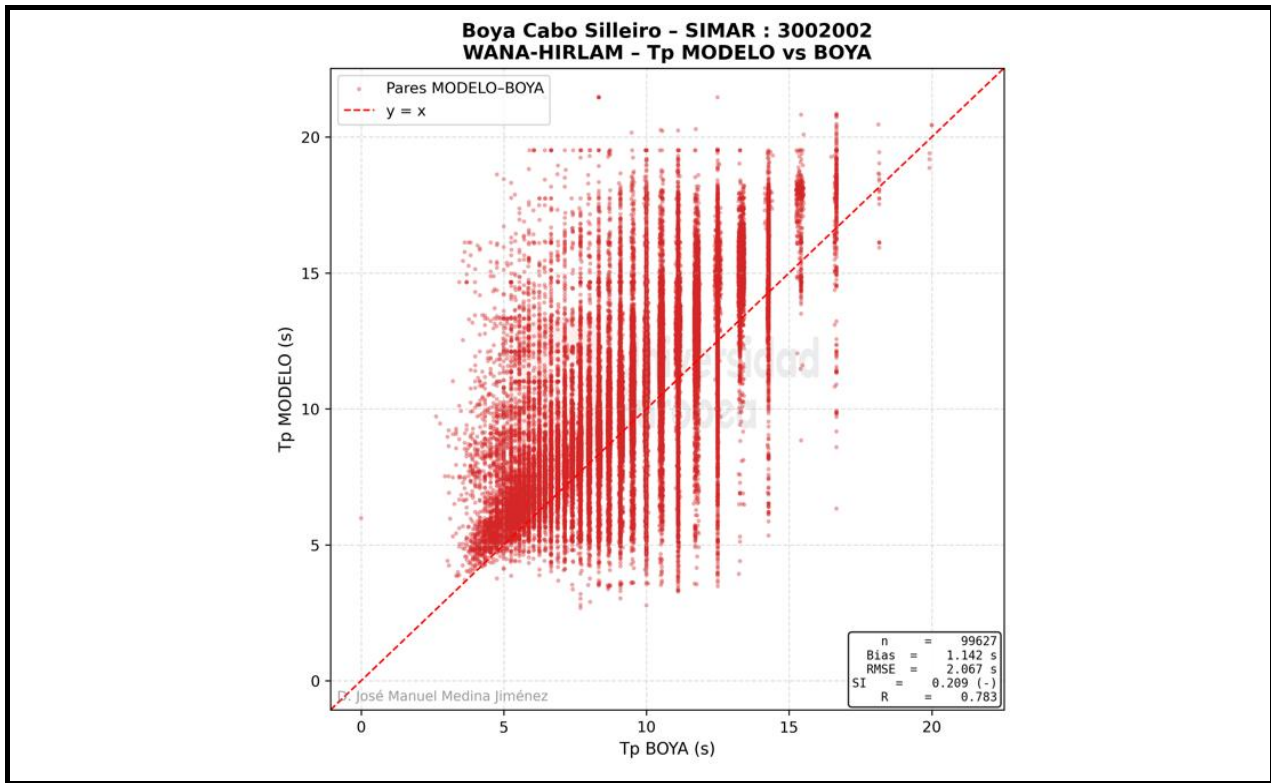
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs



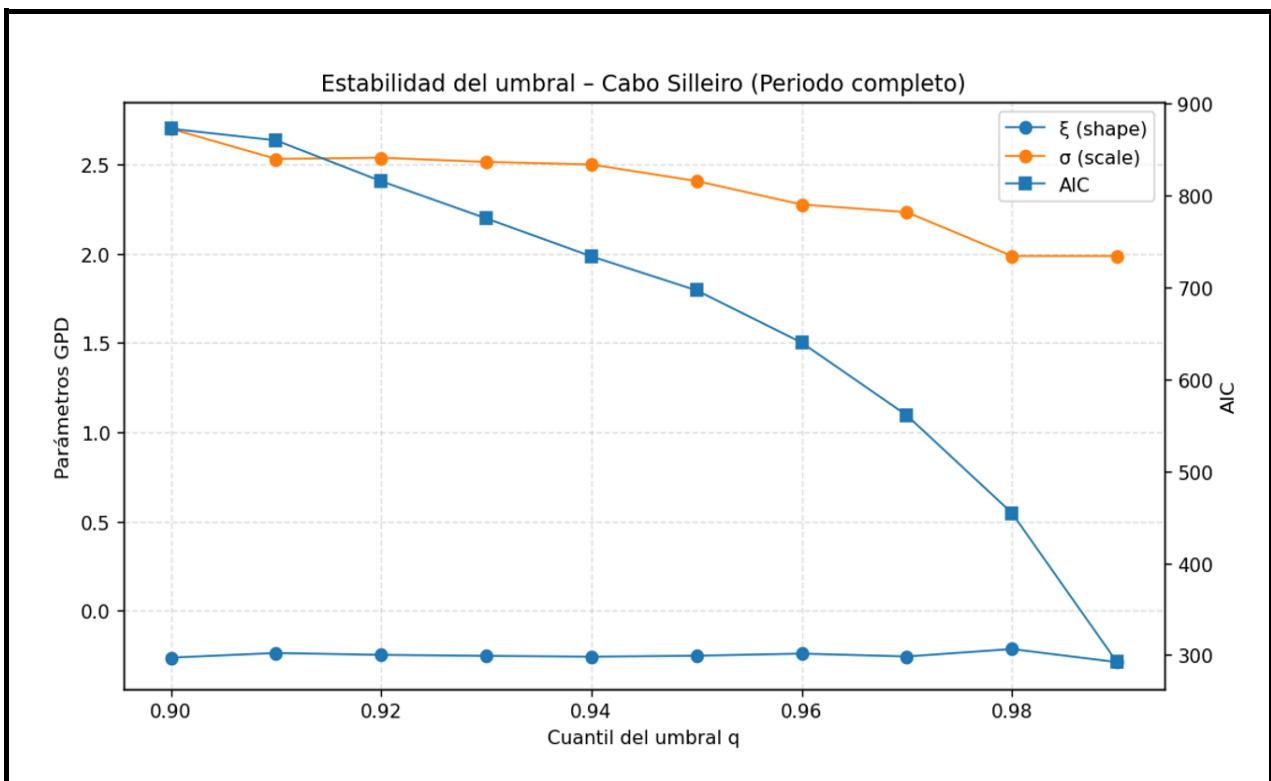
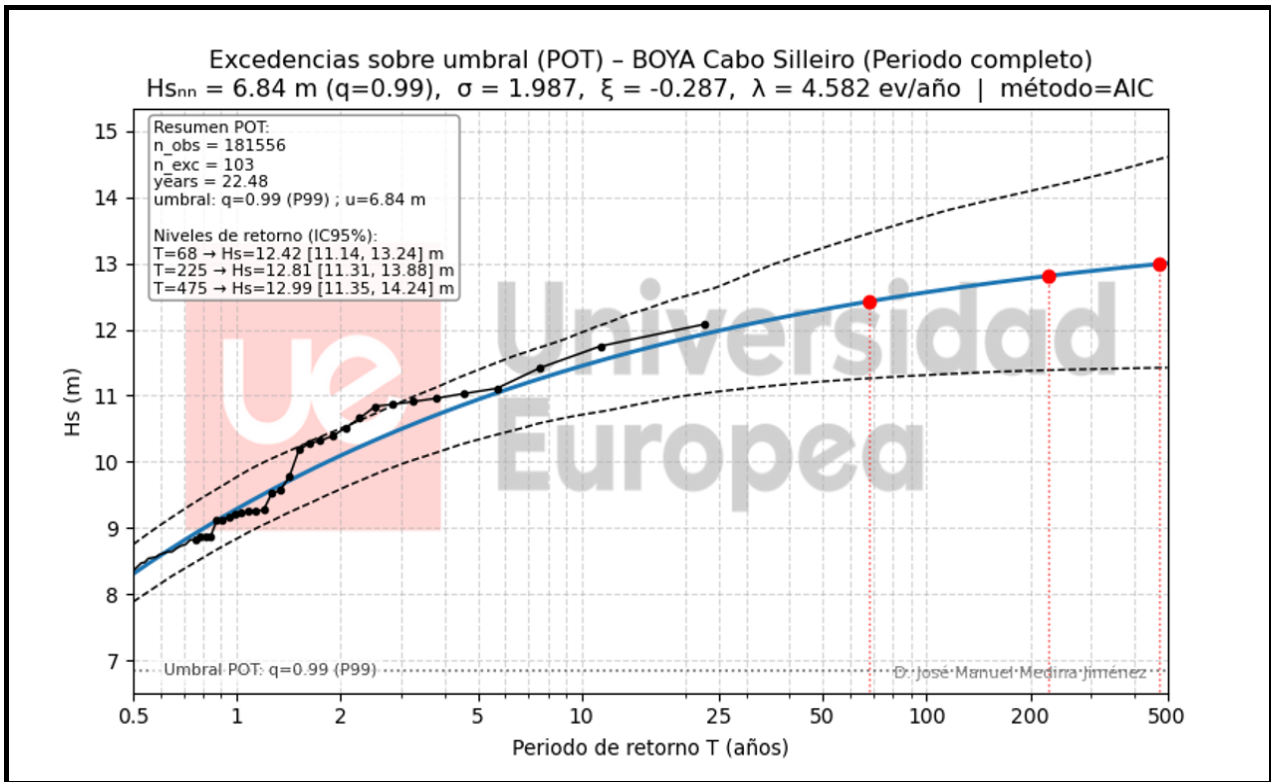


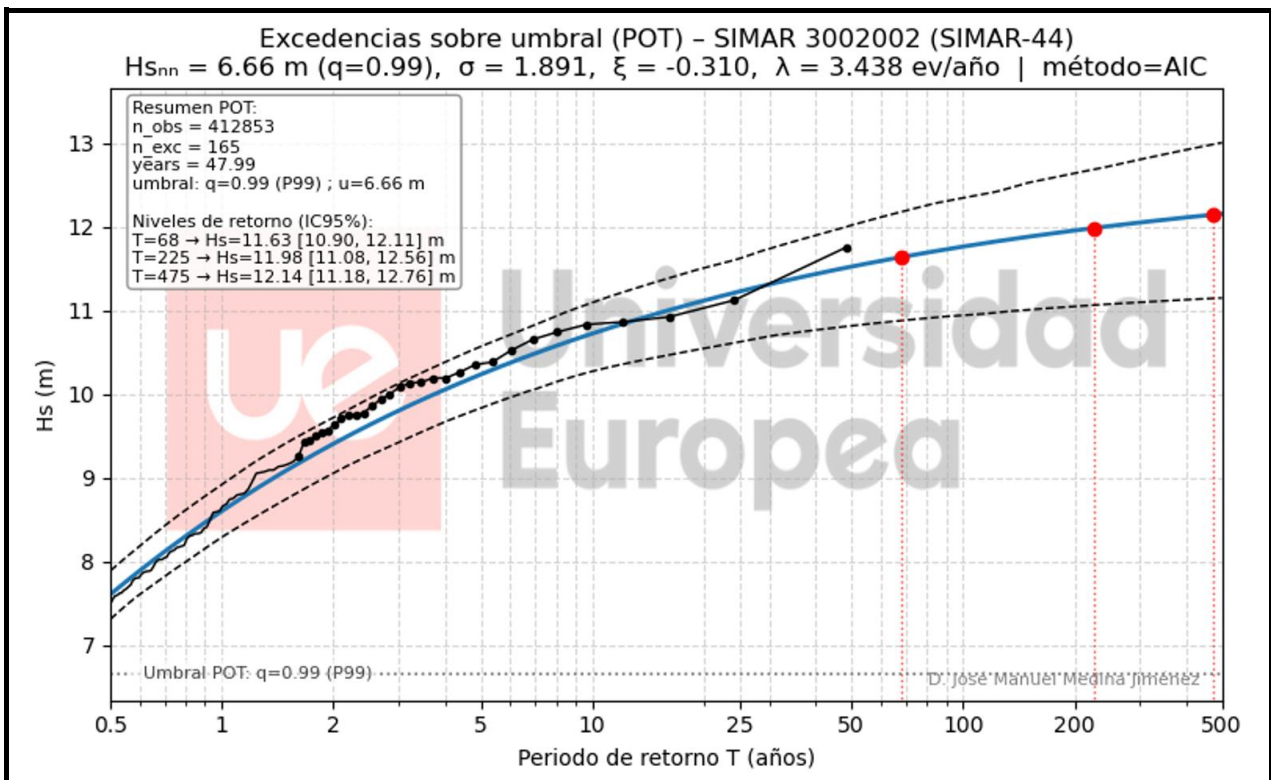
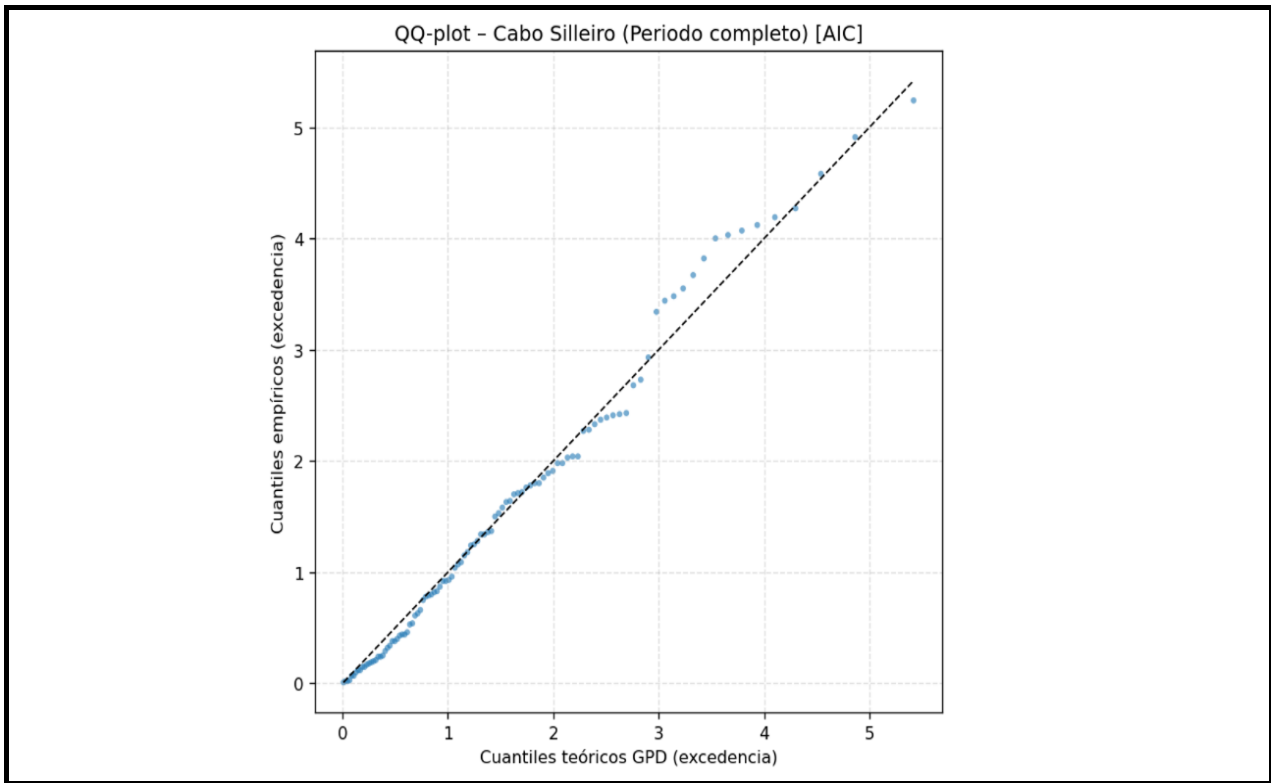
10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp

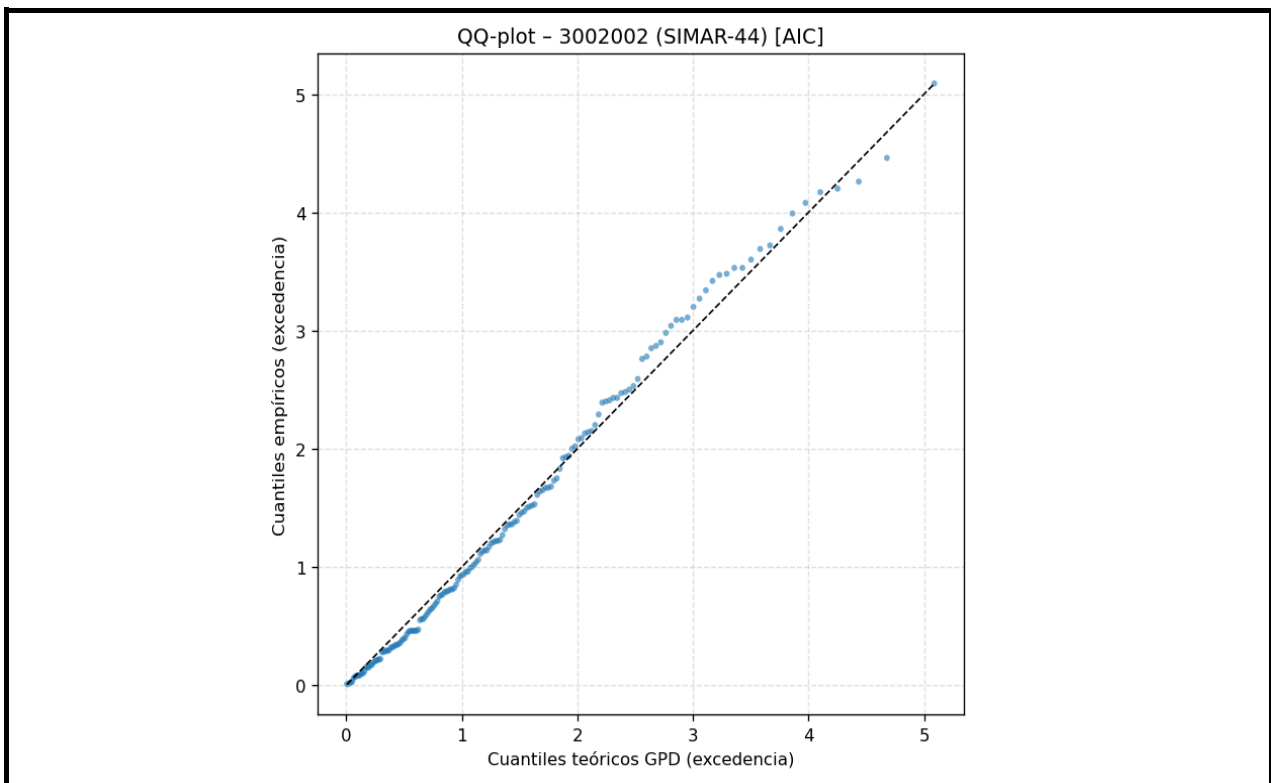
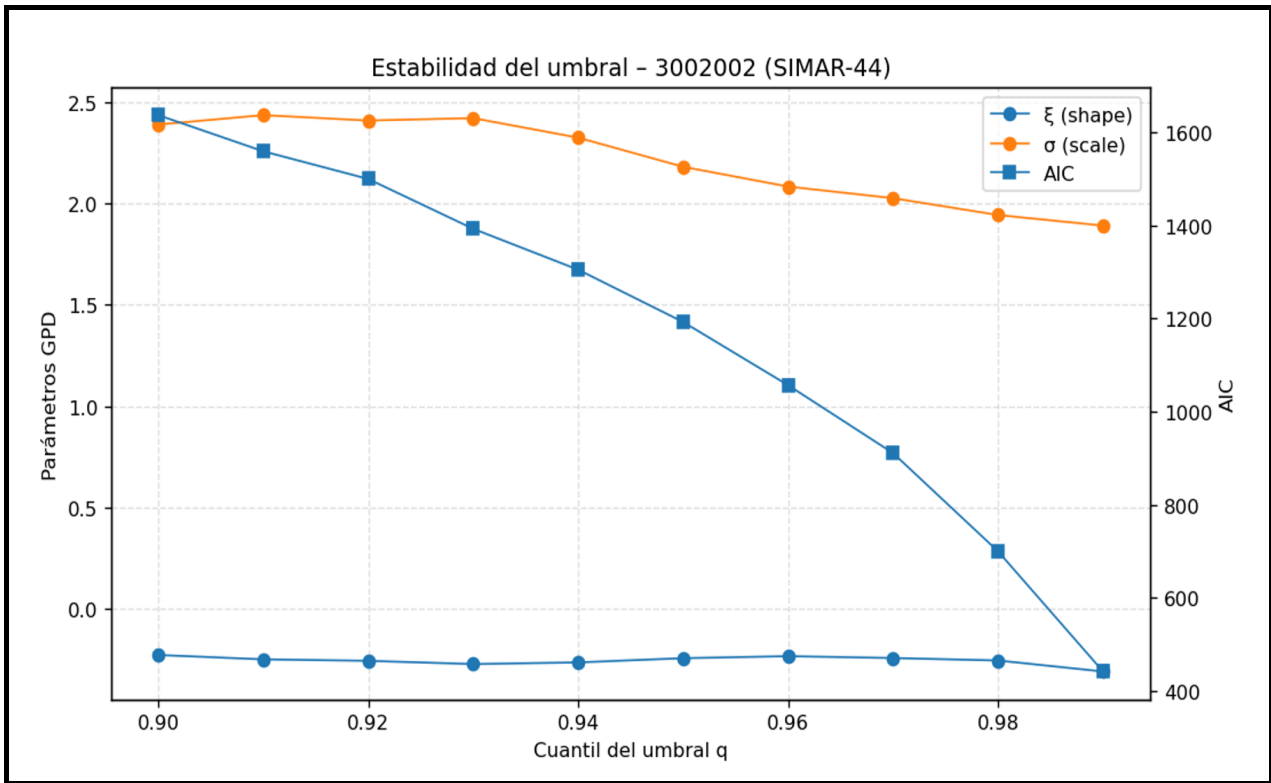


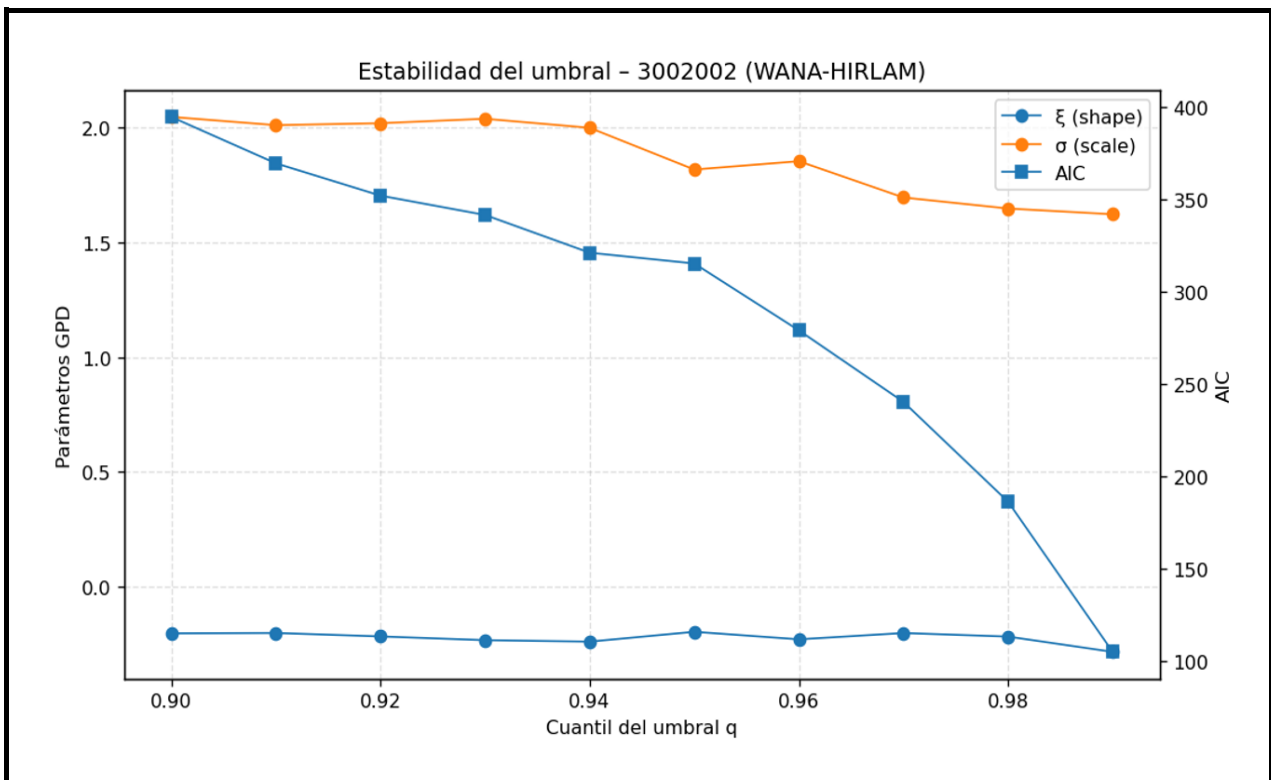
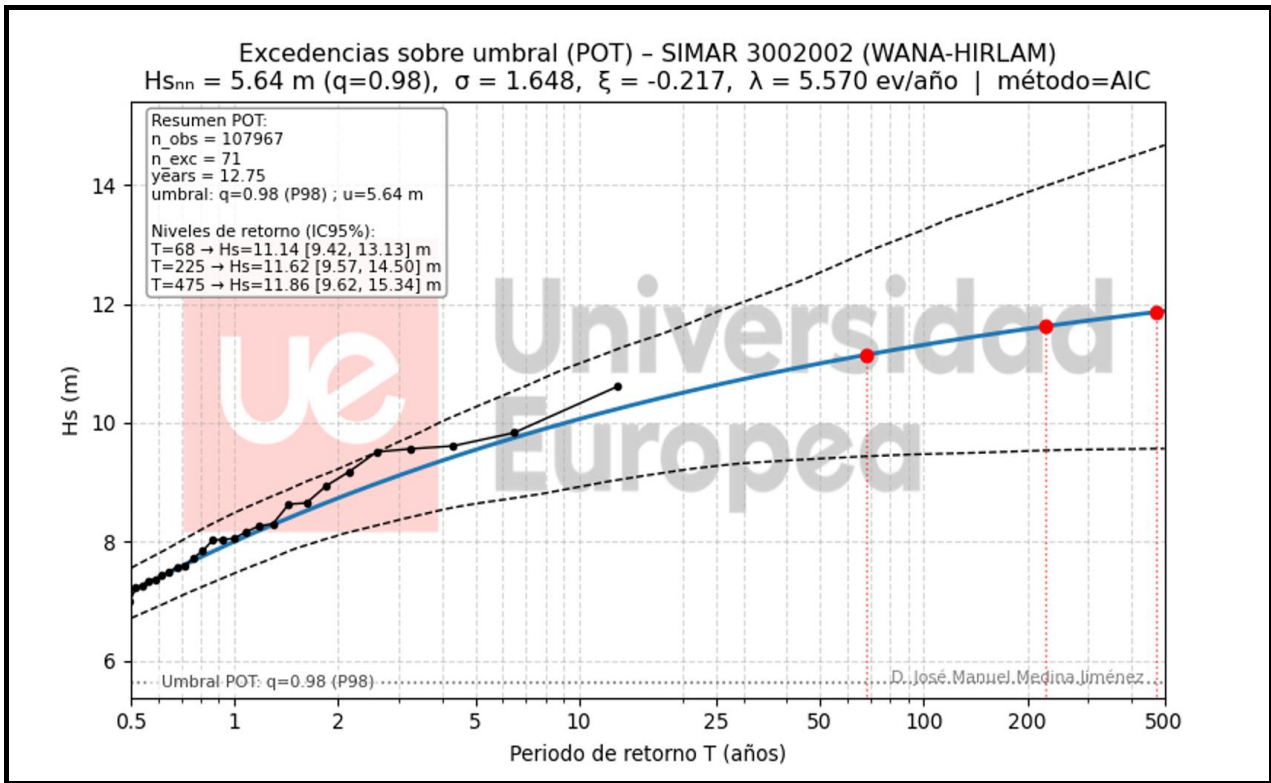


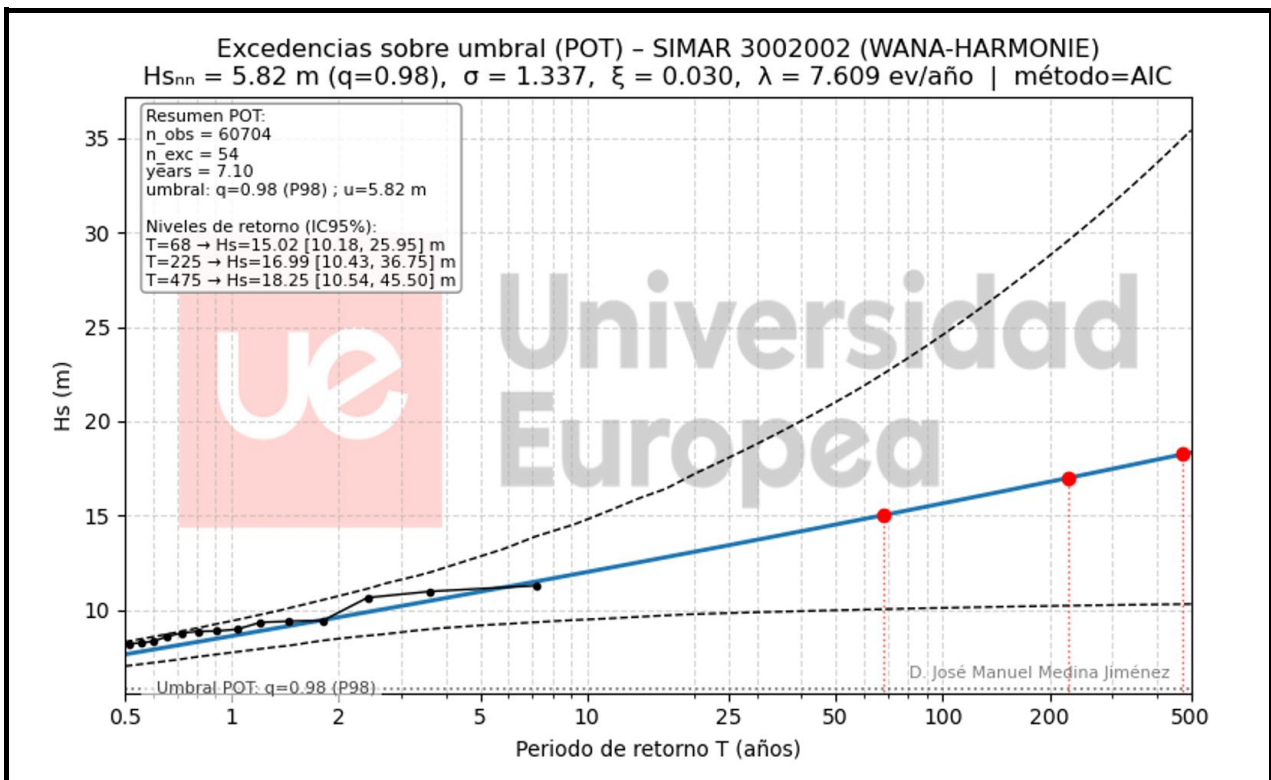
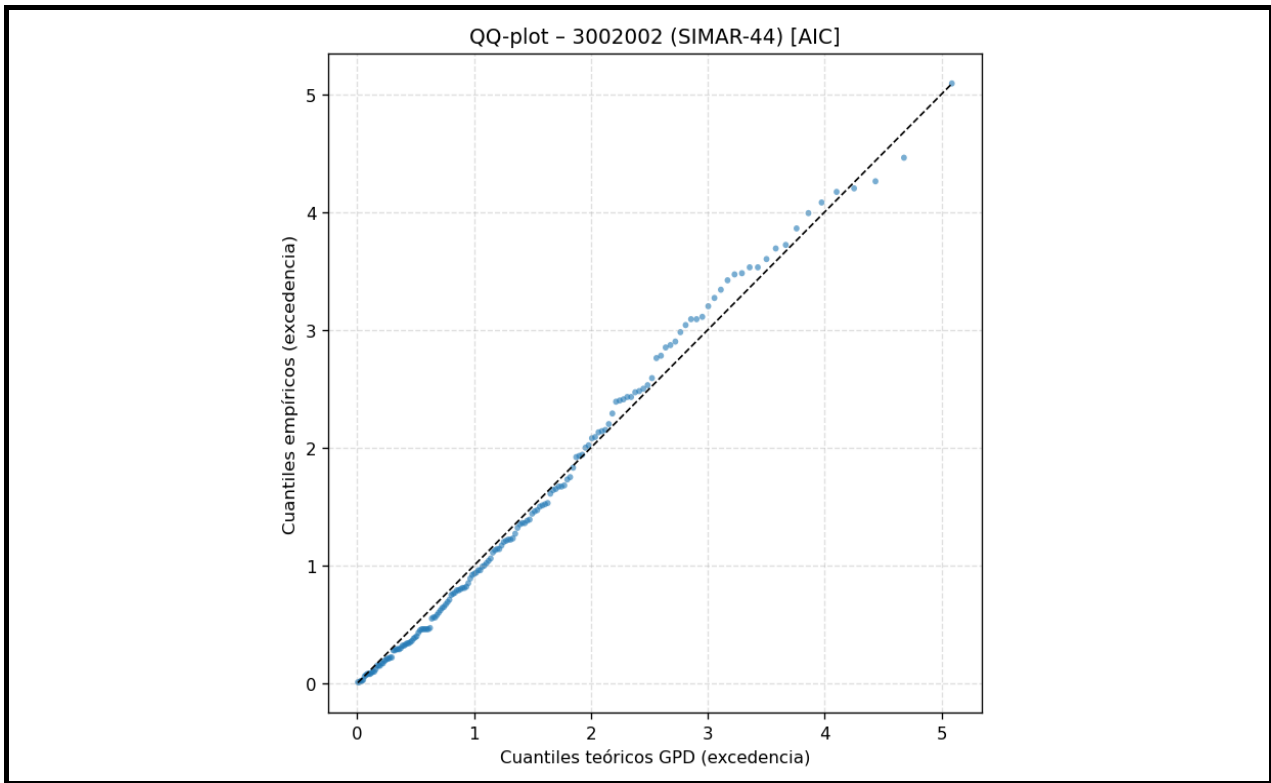
### 11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

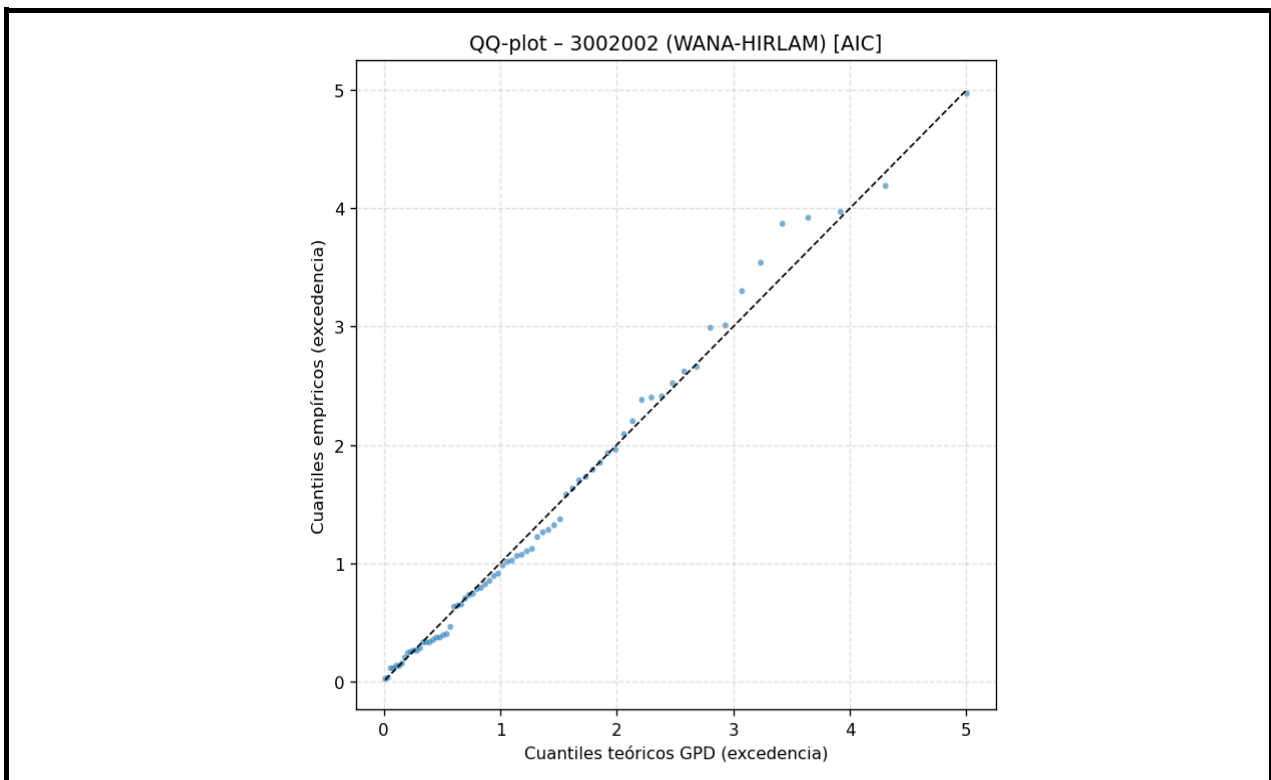
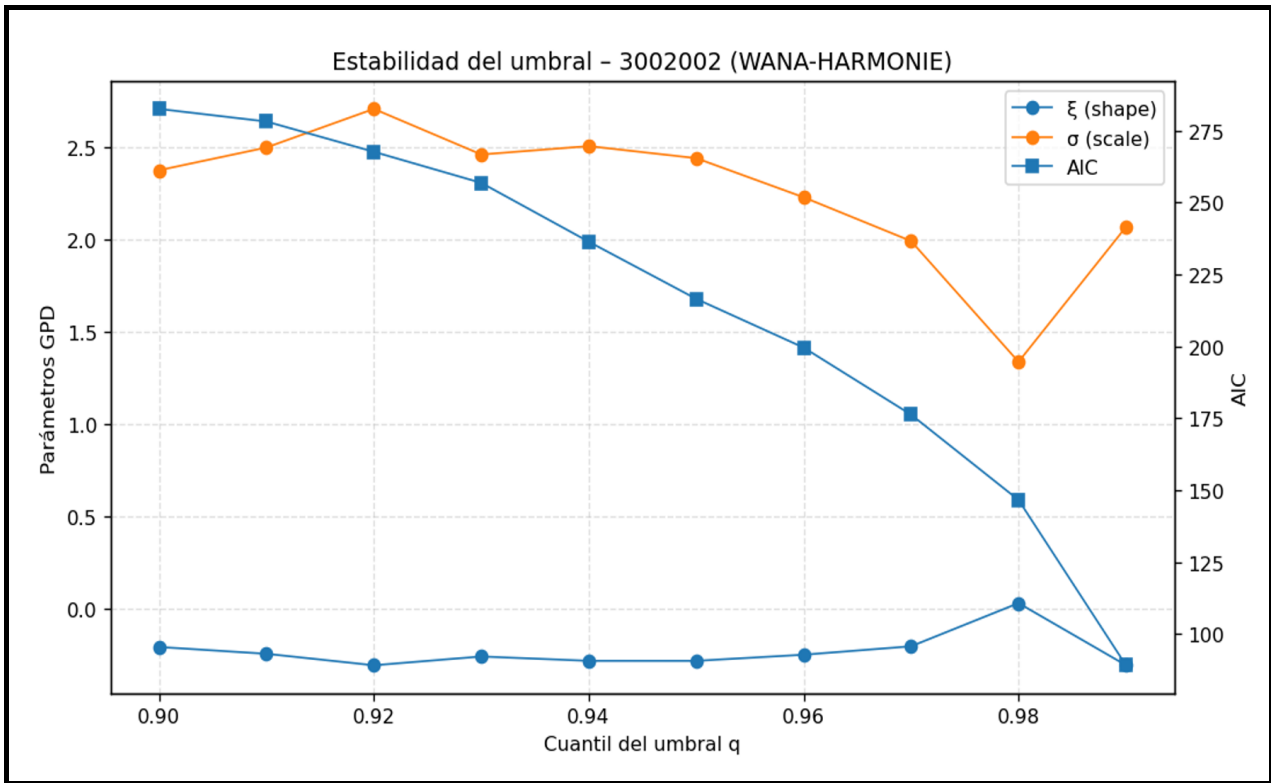


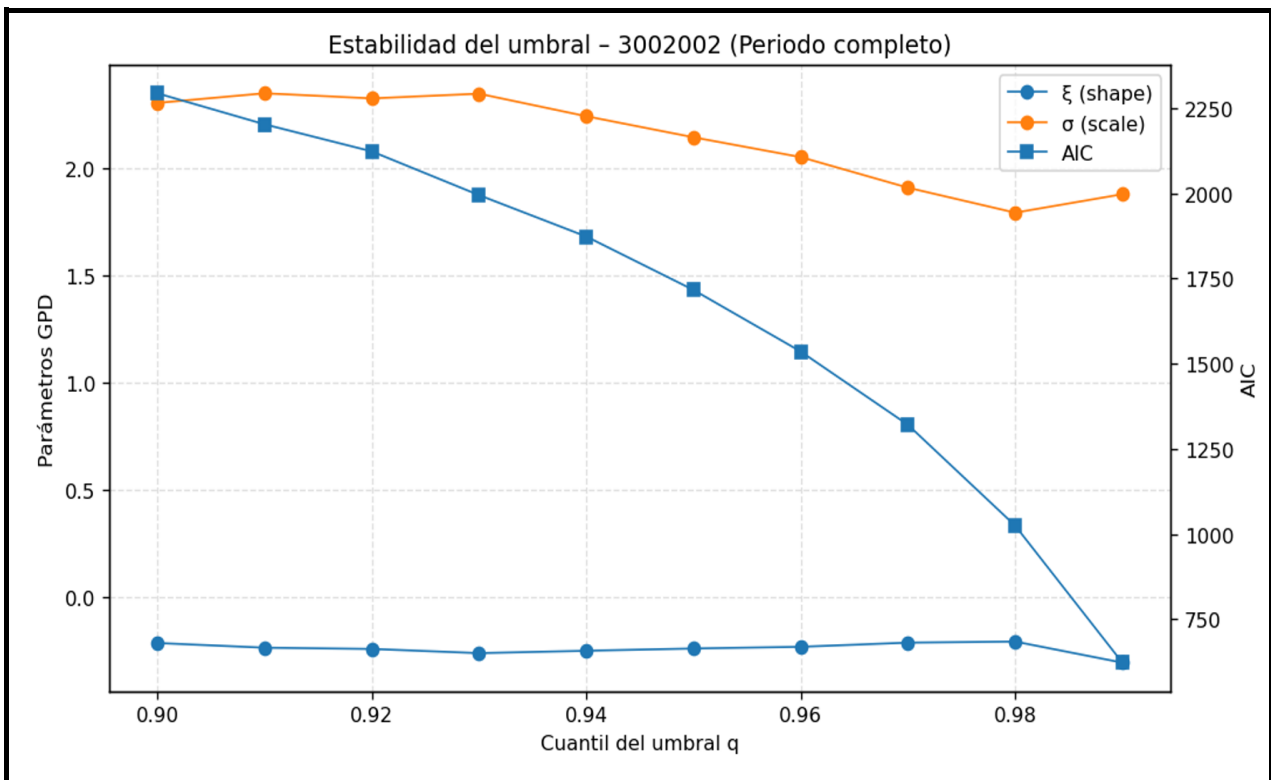
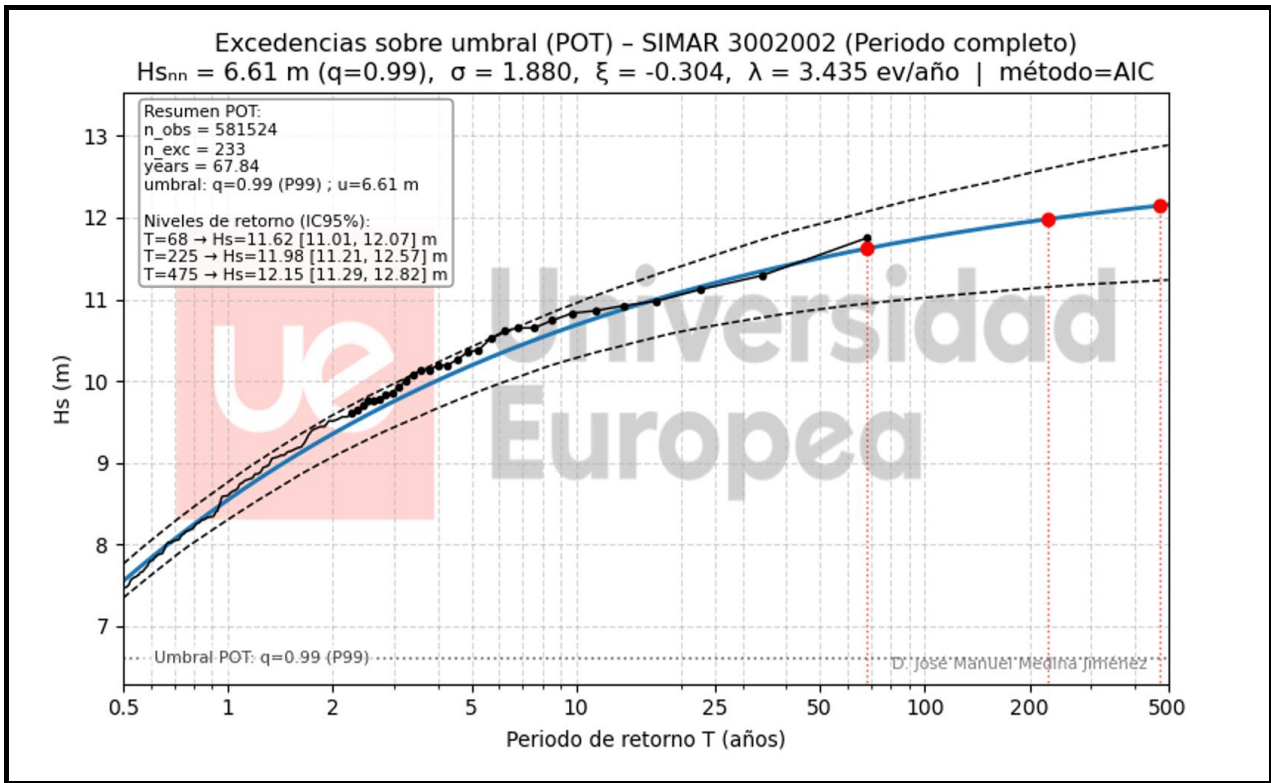


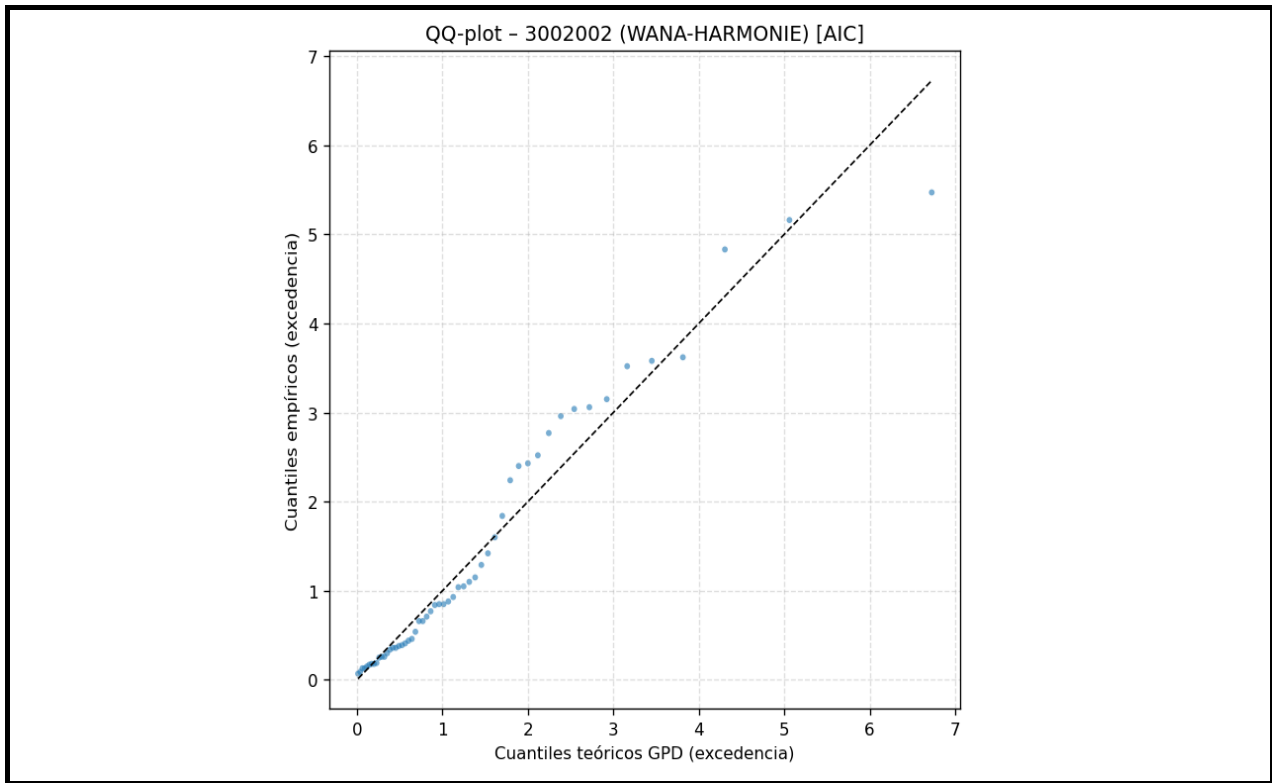













 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA Nº3 : PUNTO SIMAR 2056079 - BOYA CABO DE GATA</b>	
<b>Identificación del punto</b>		<b>Localización y referencia</b>	
<b>Boya:</b>	Cabo de Gata	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (Zona 30 S)
<b>Nodo SIMAR:</b>	2056079	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	30 S 559940.64 4048490.92
<b>Fachada marítima:</b>	Oeste Peninsular	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	30 S 559948.37 4047381.64
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	600 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Cabo de Gata / Punto SIMAR 2056079.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 2004-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1$  h)

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

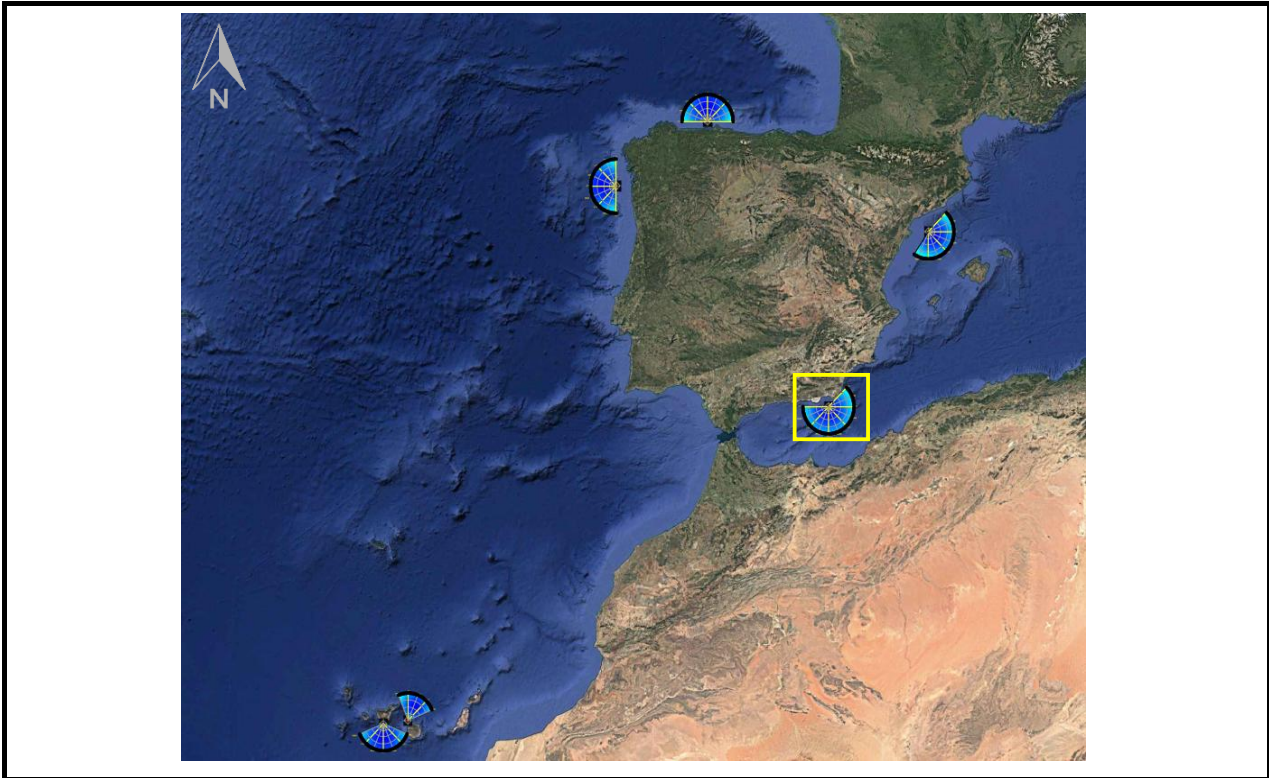
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

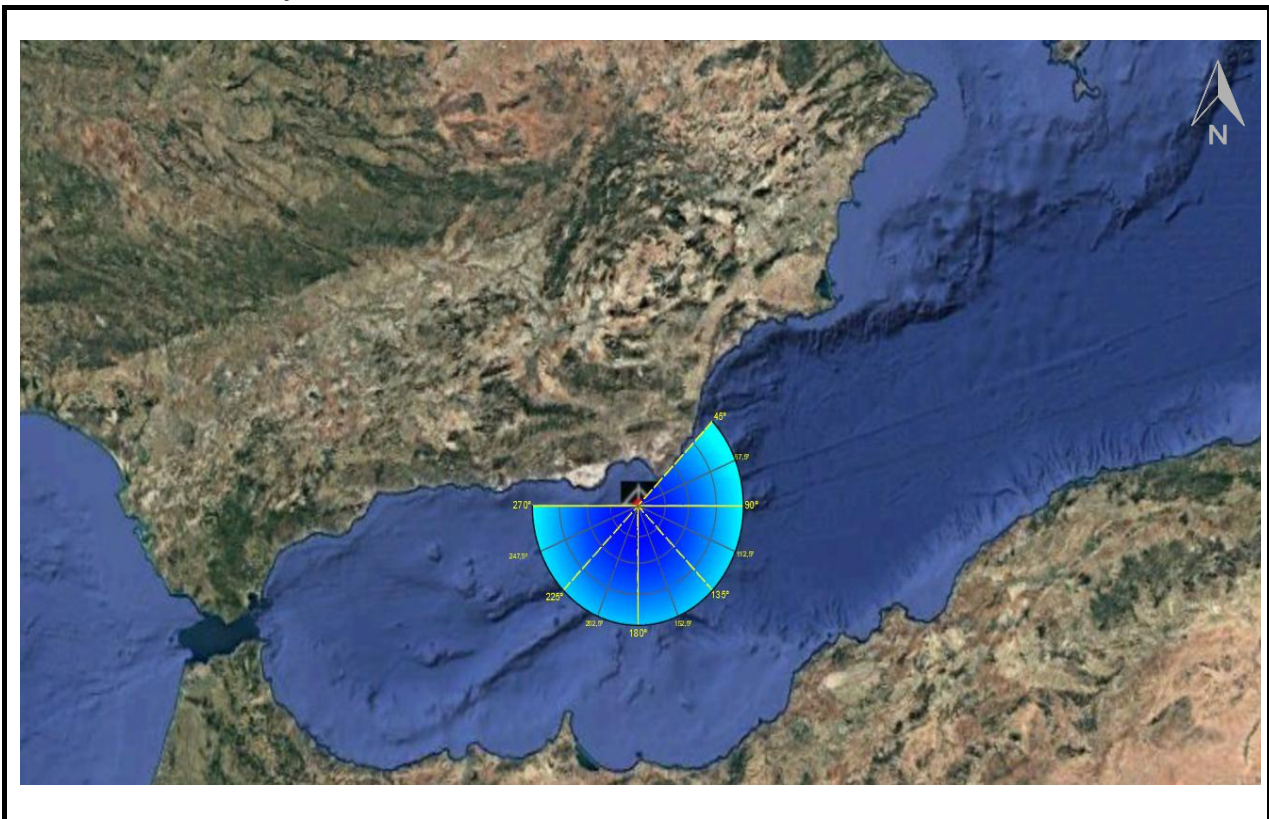
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

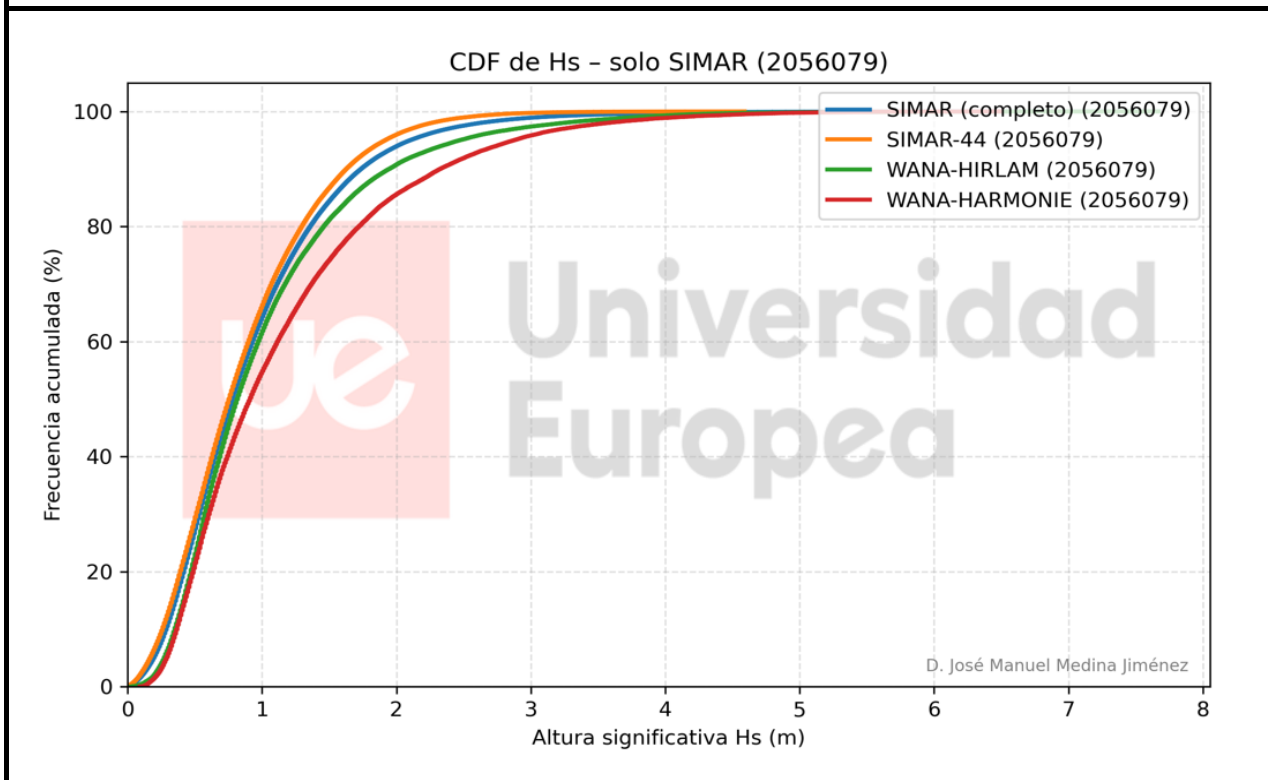
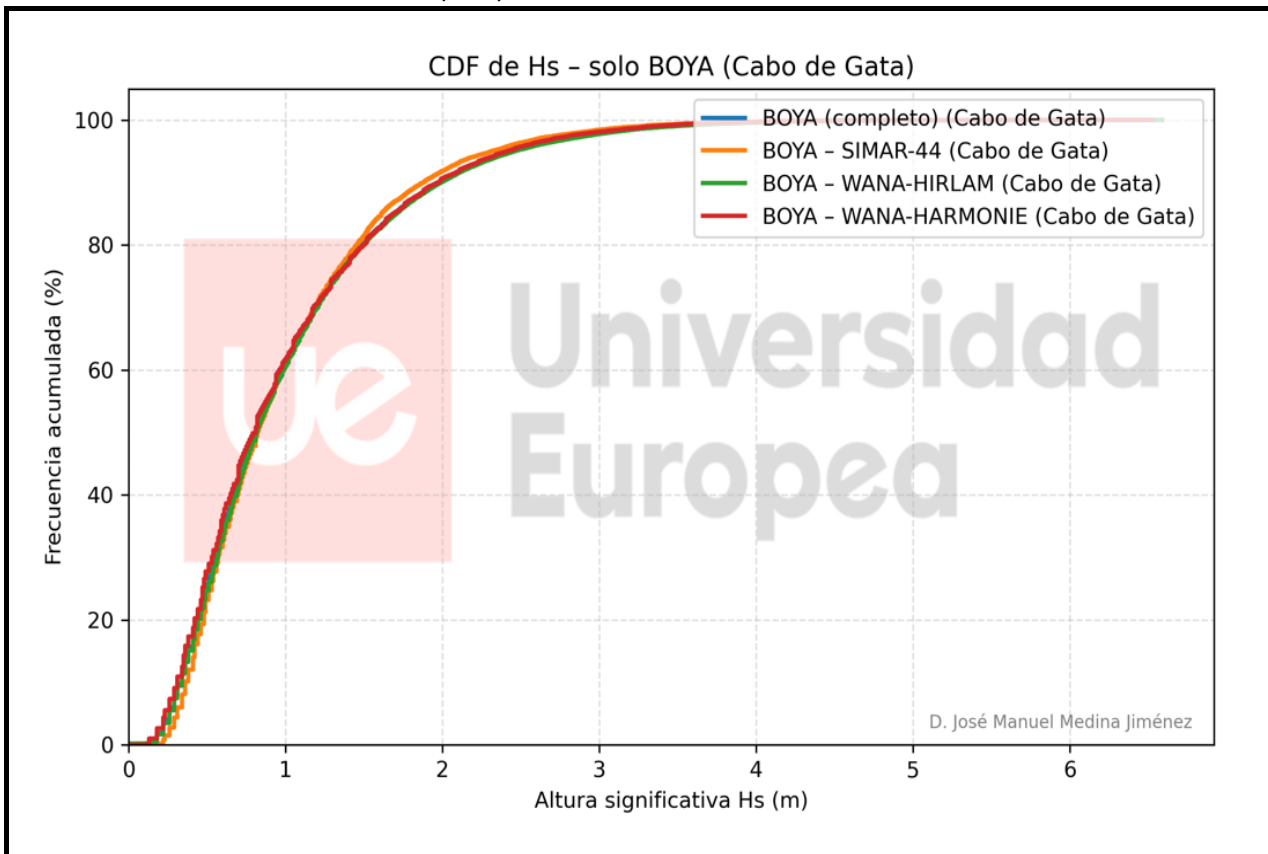


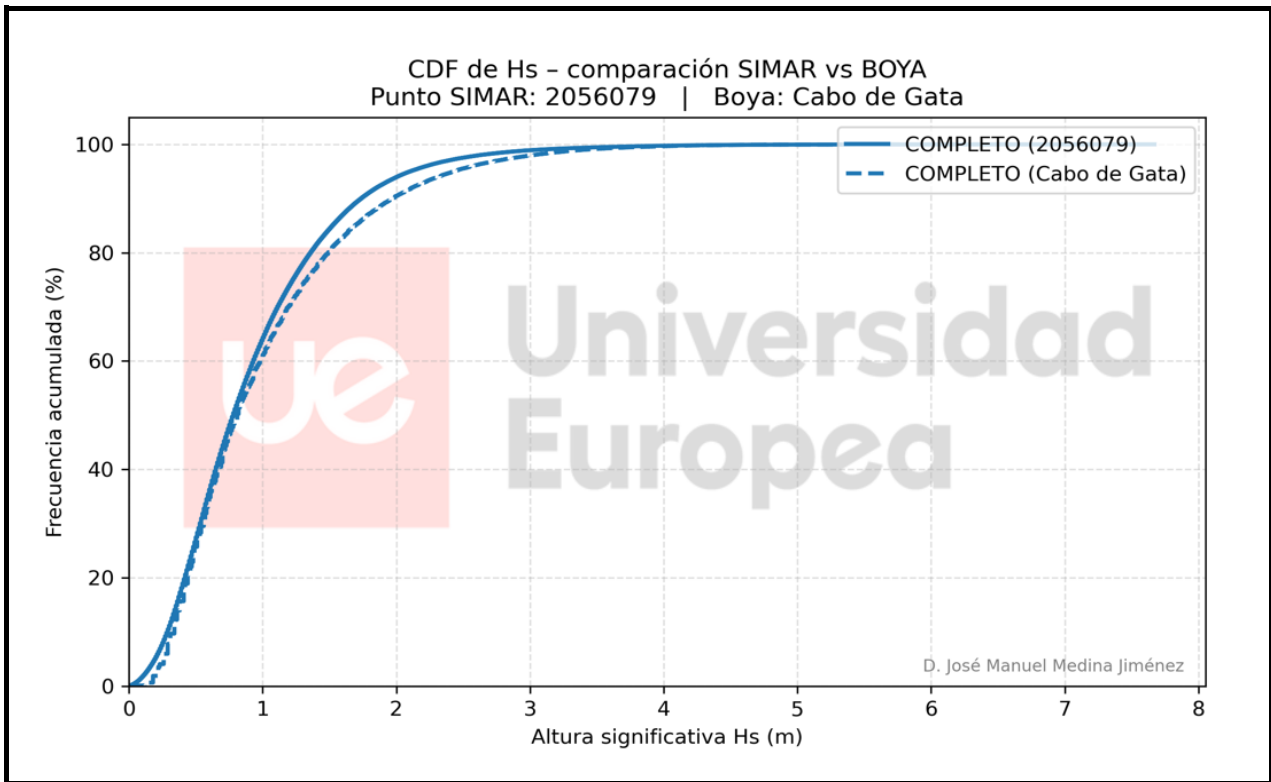
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



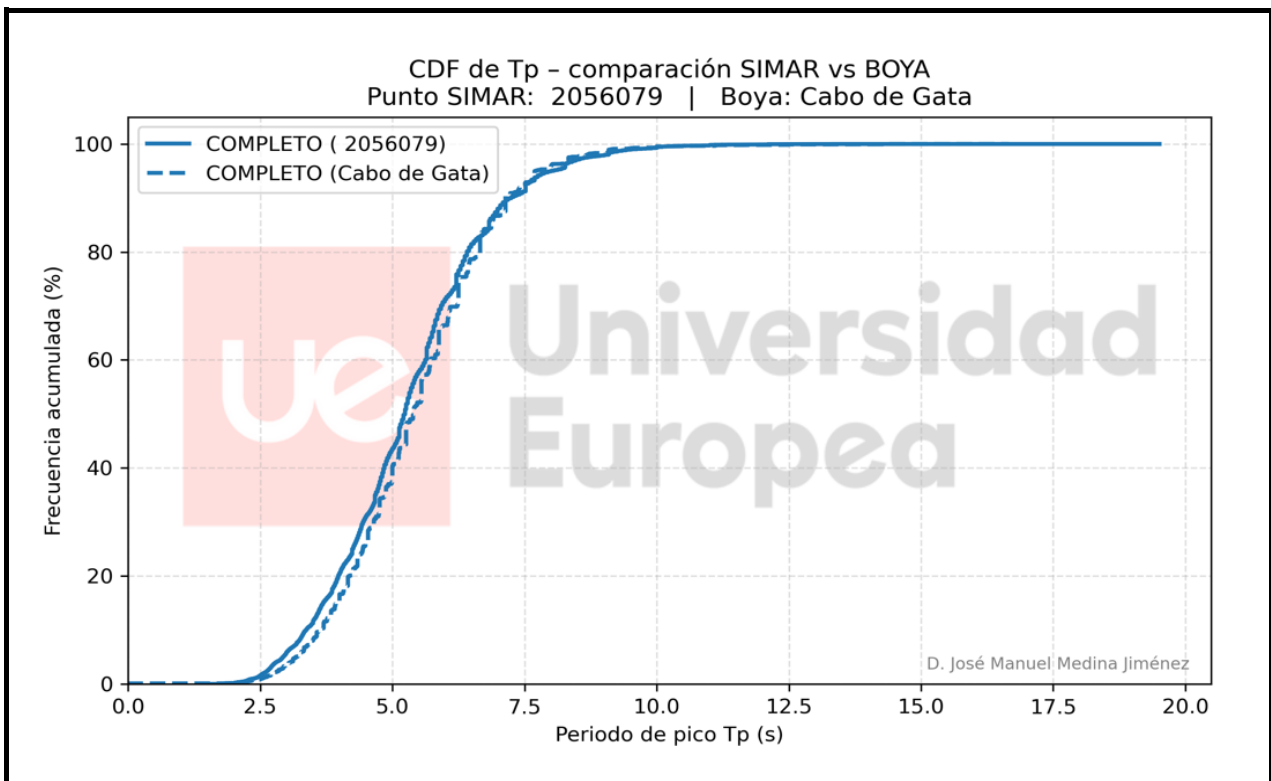
#### 4. Análisis Homogeneidad modelos

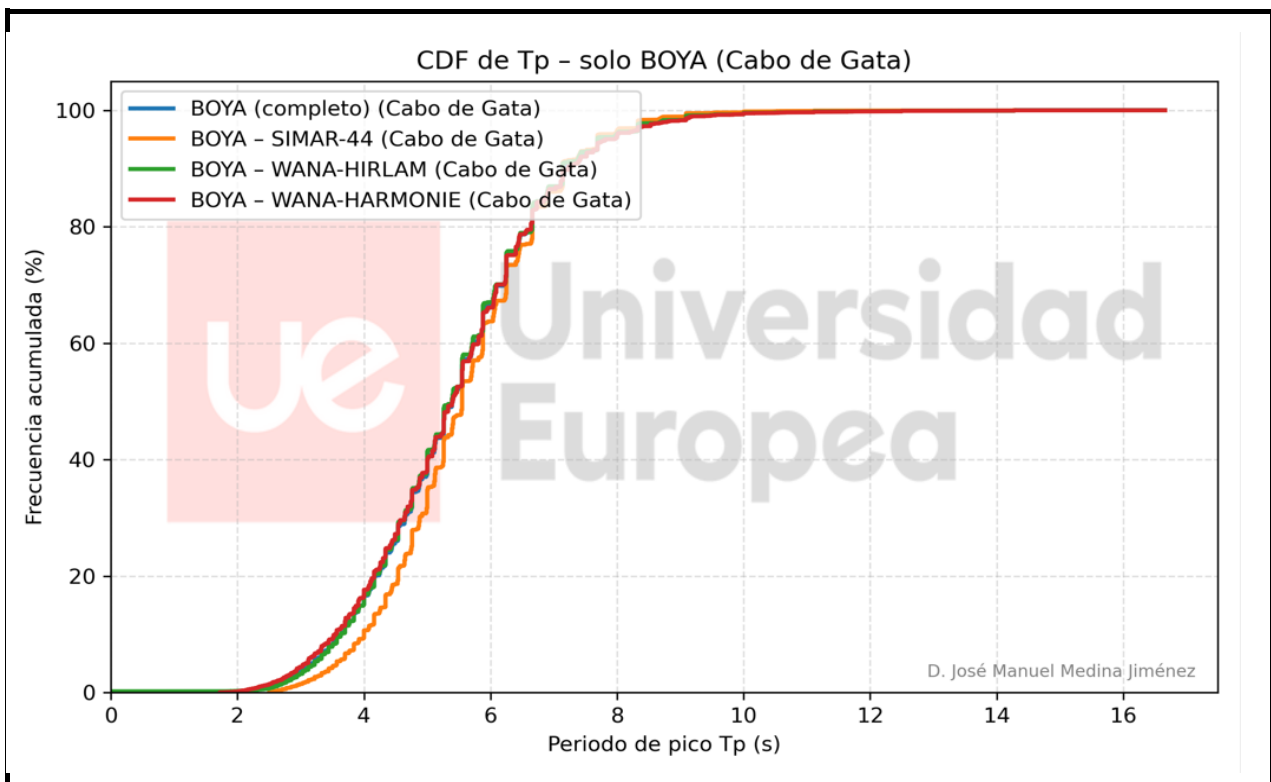
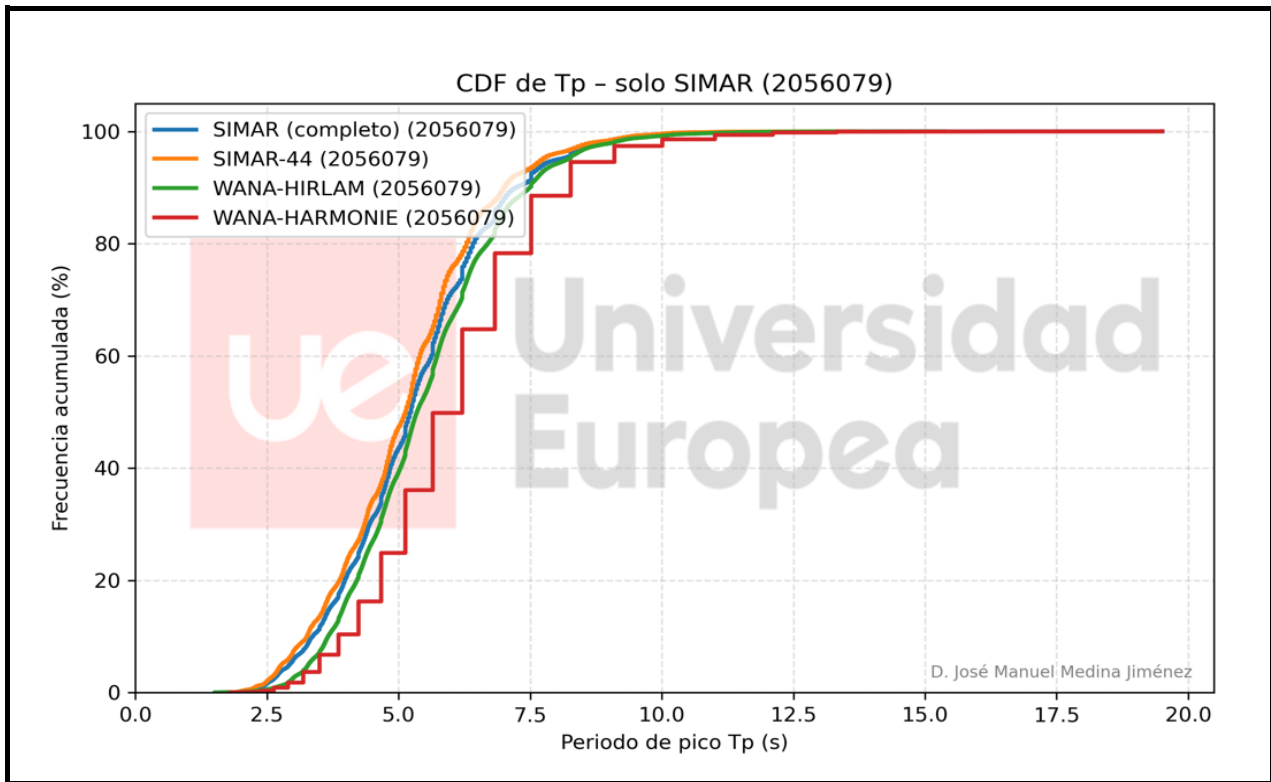
##### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



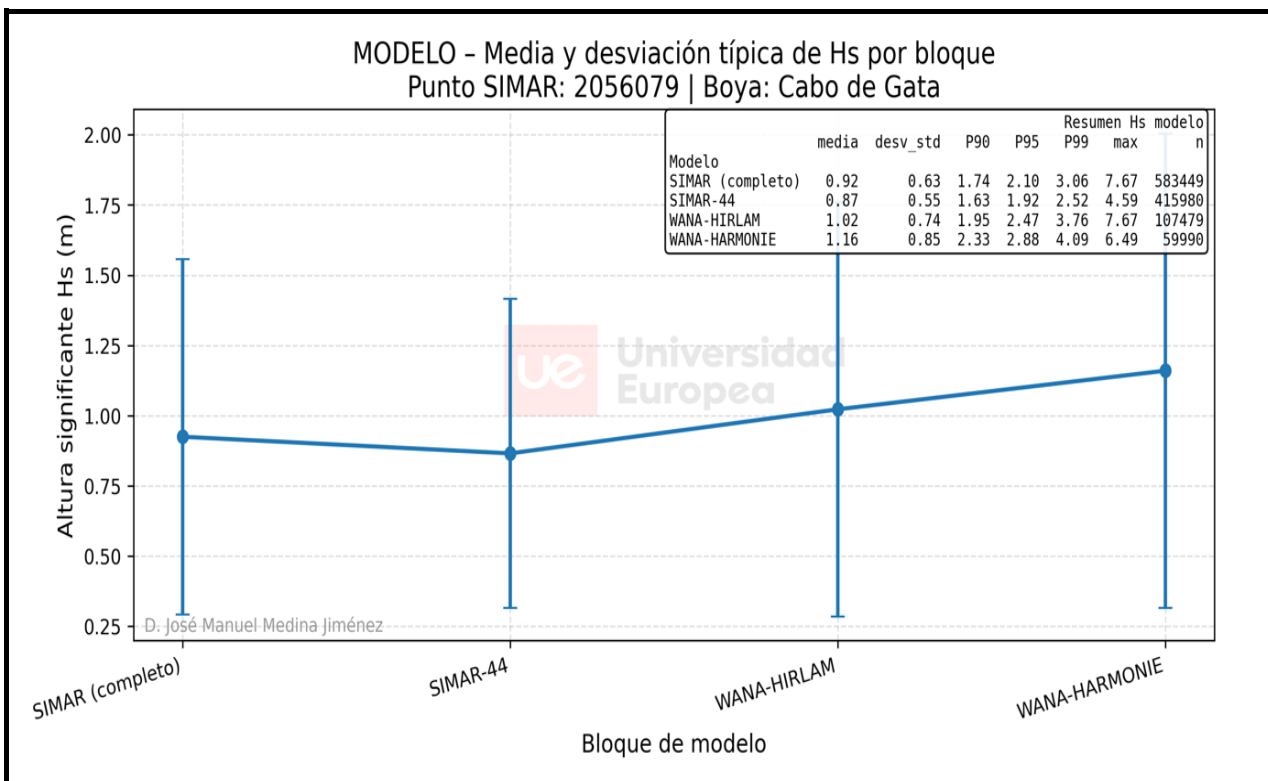
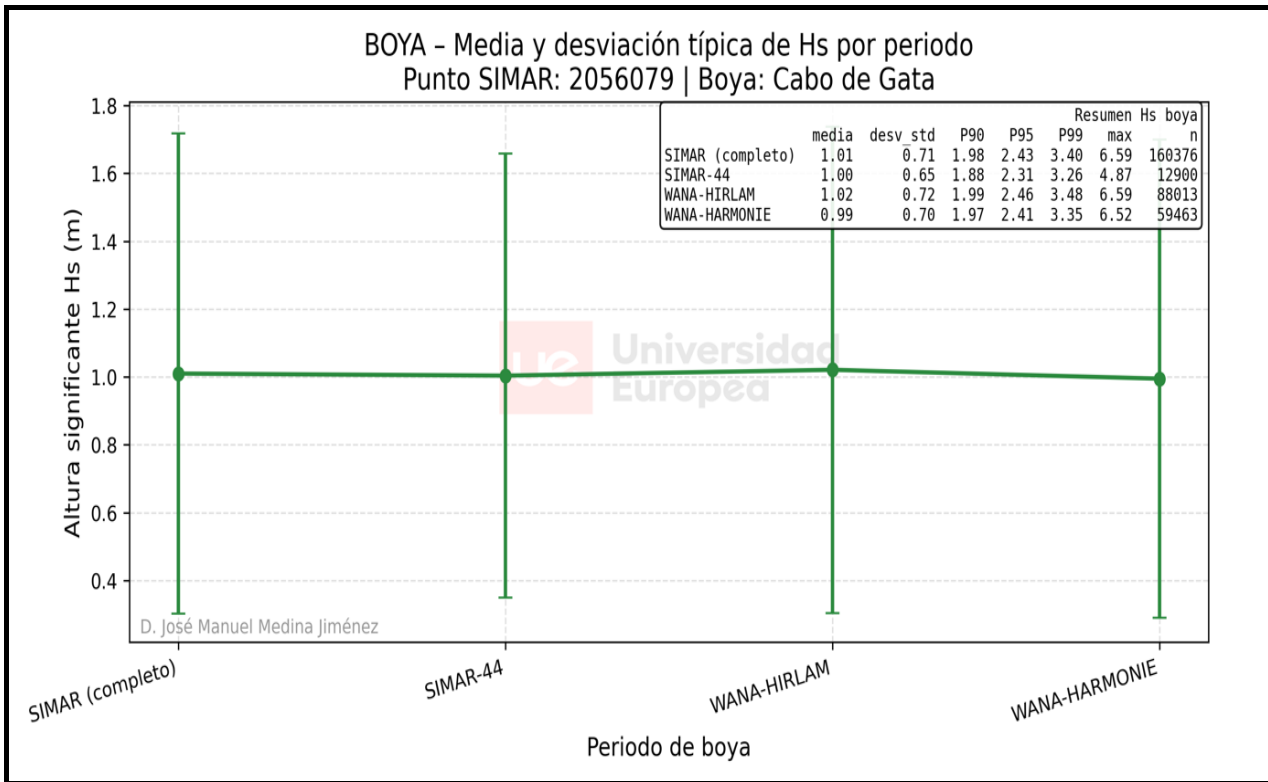


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

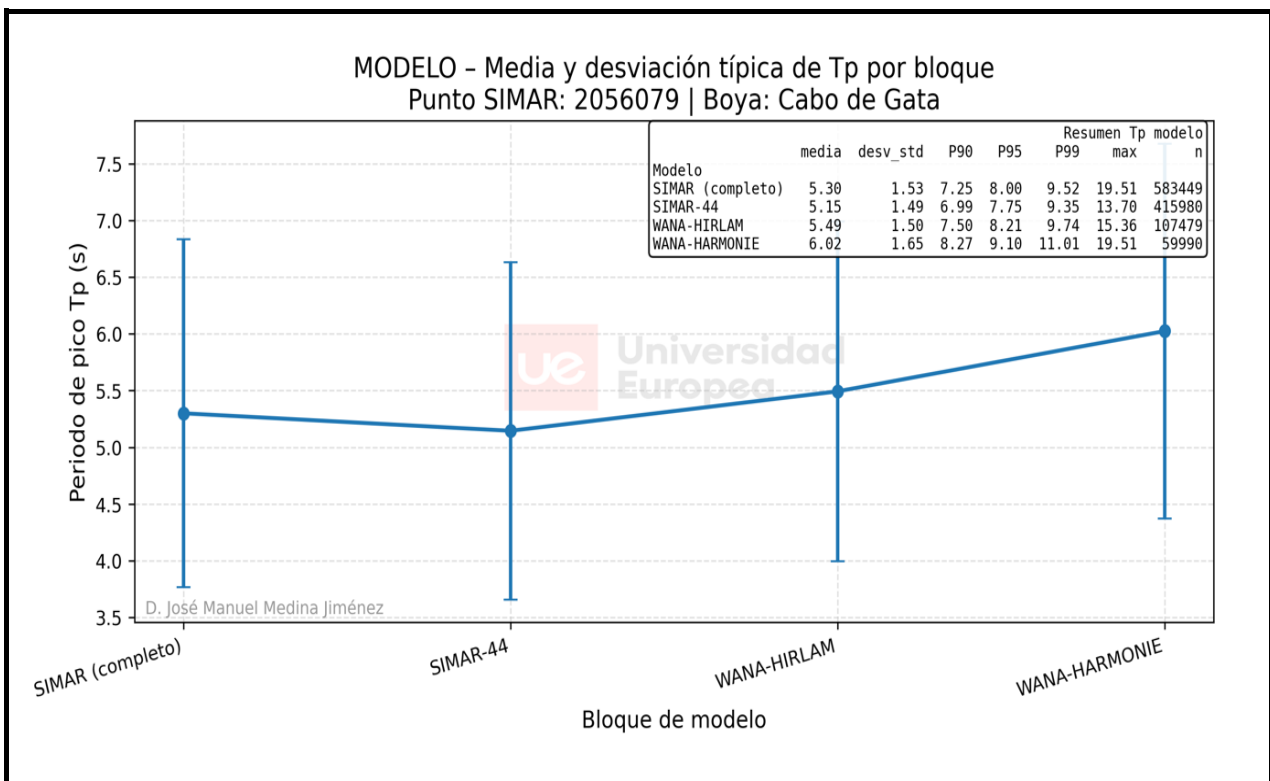
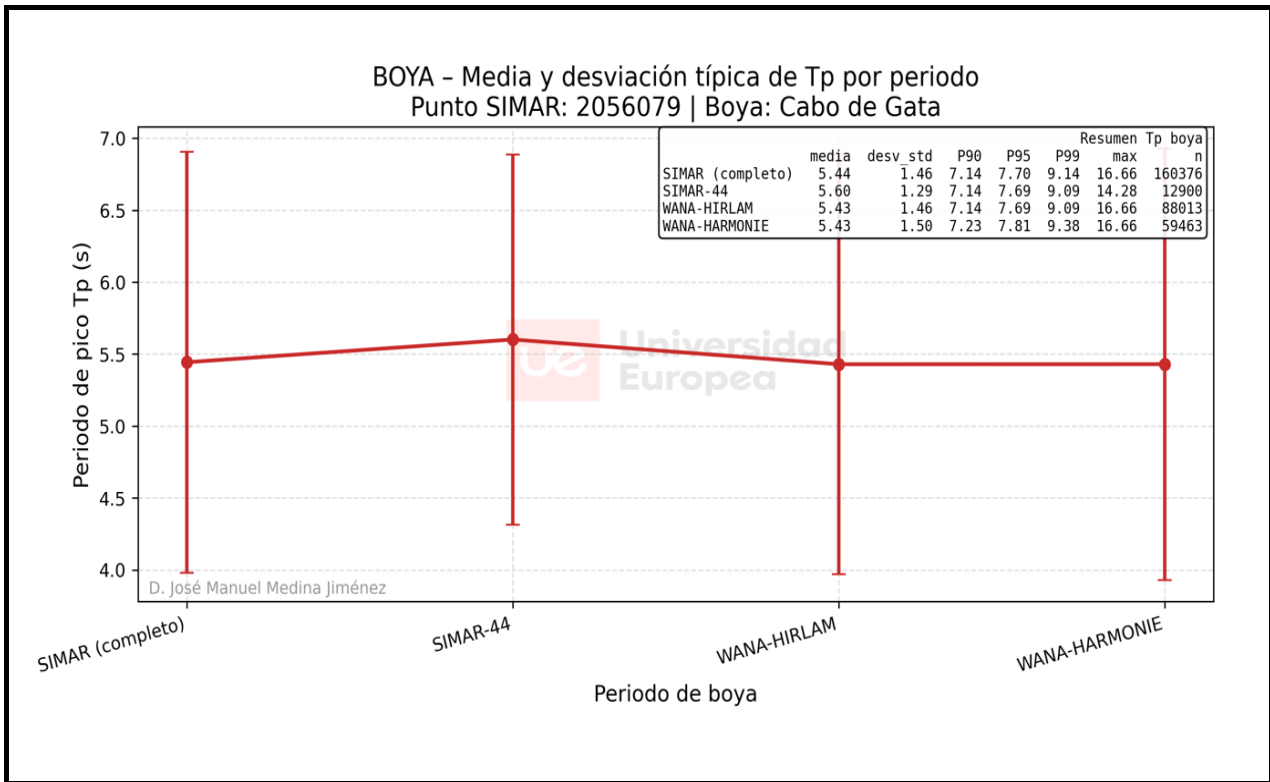




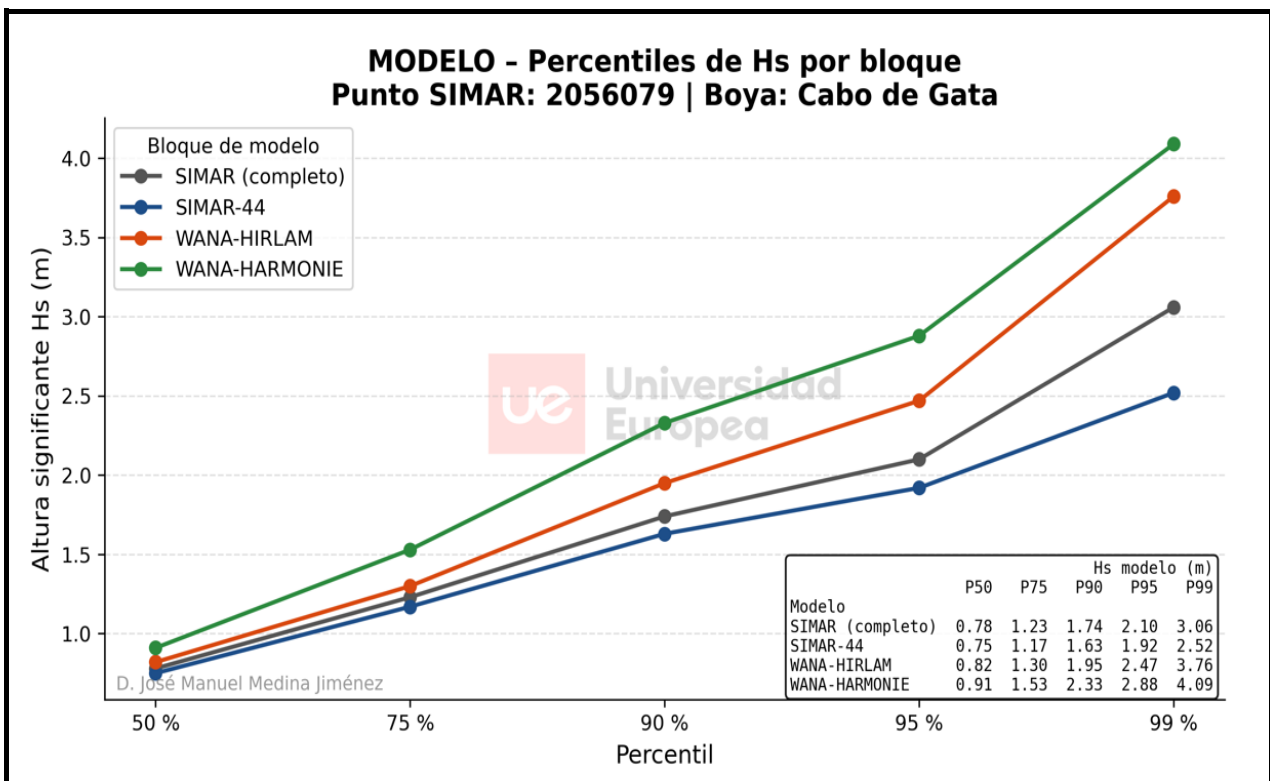
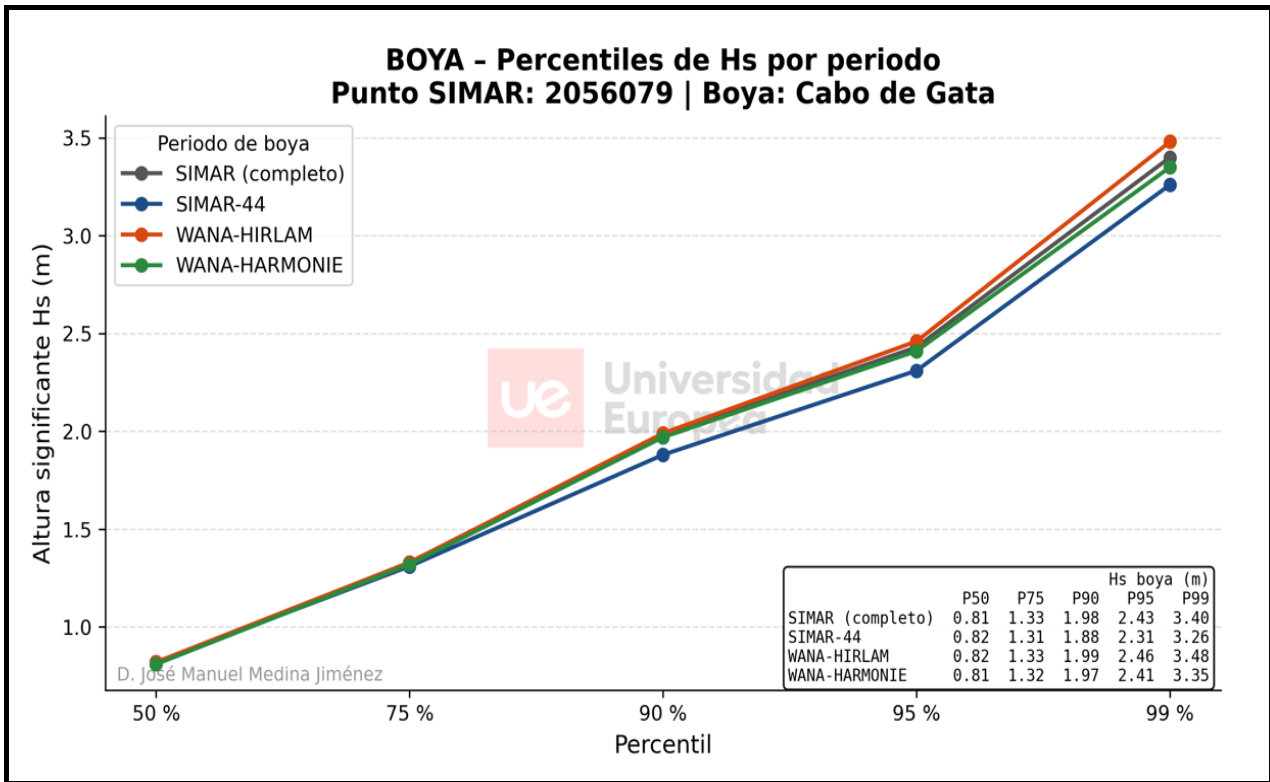
### 5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



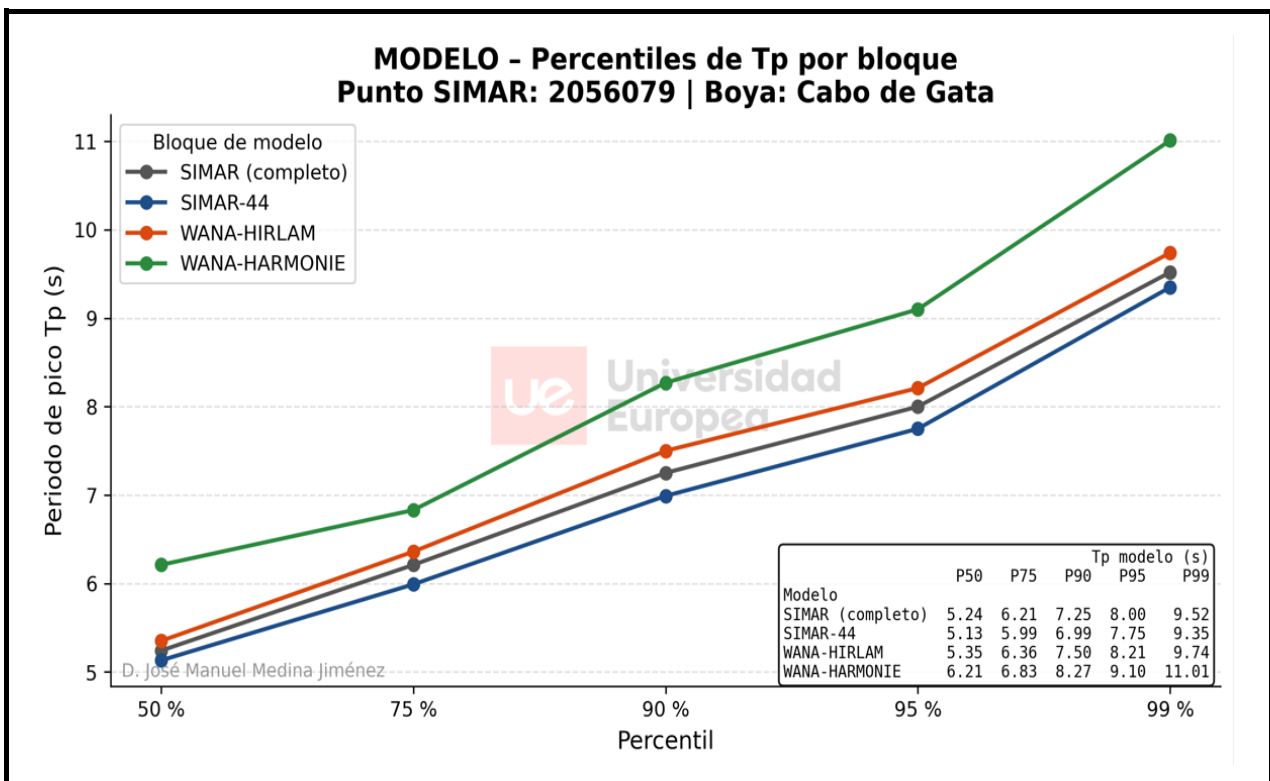
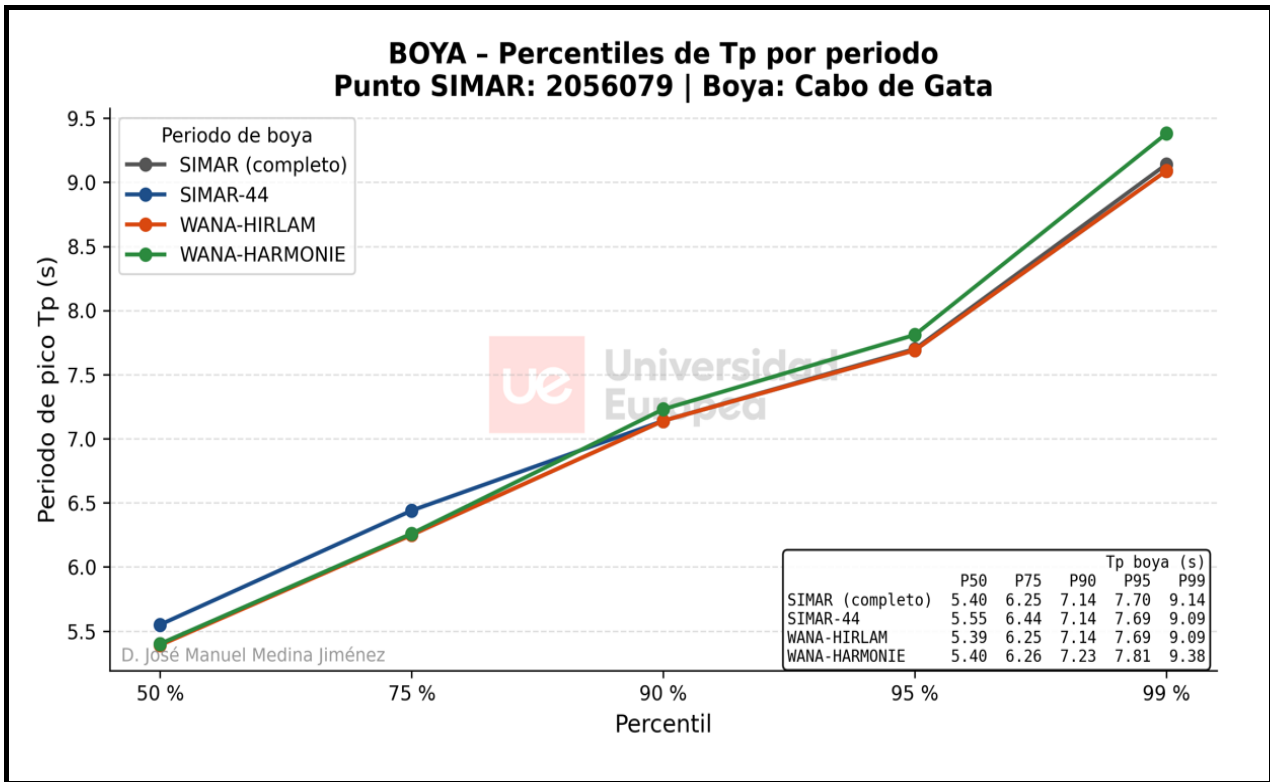
6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



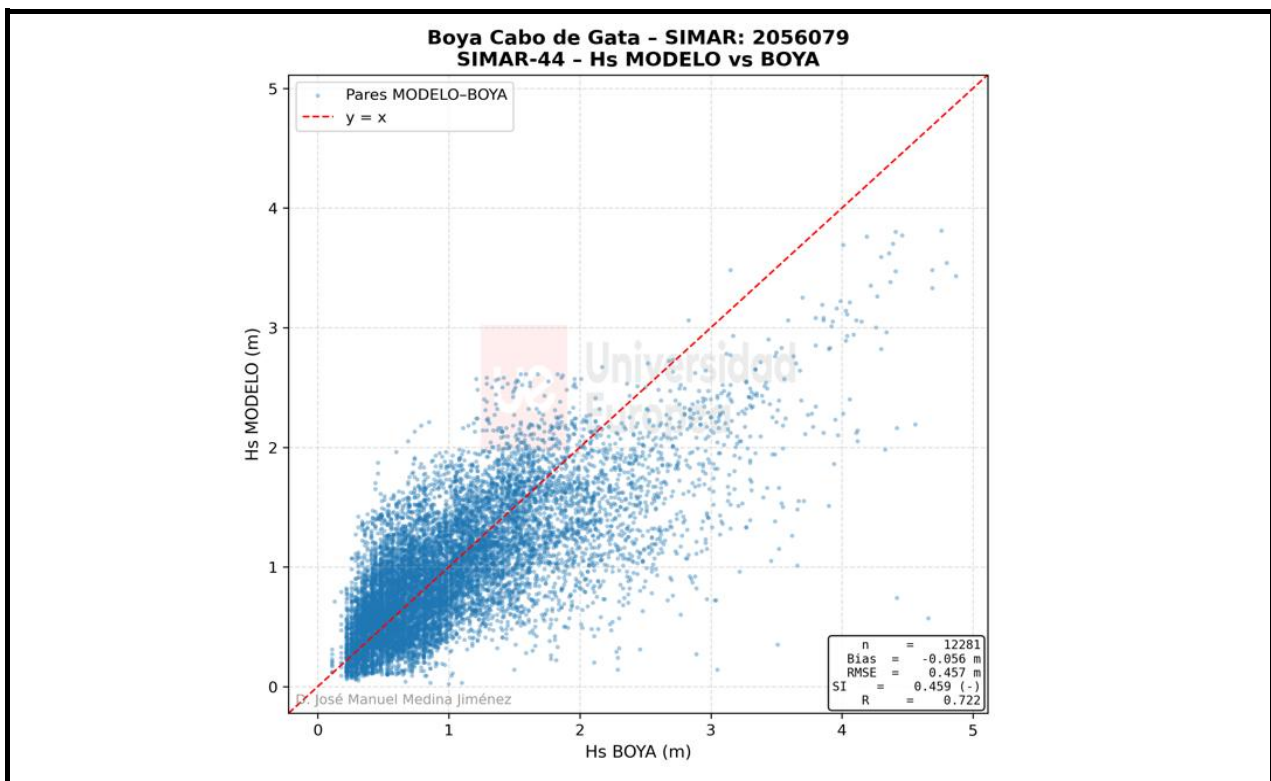
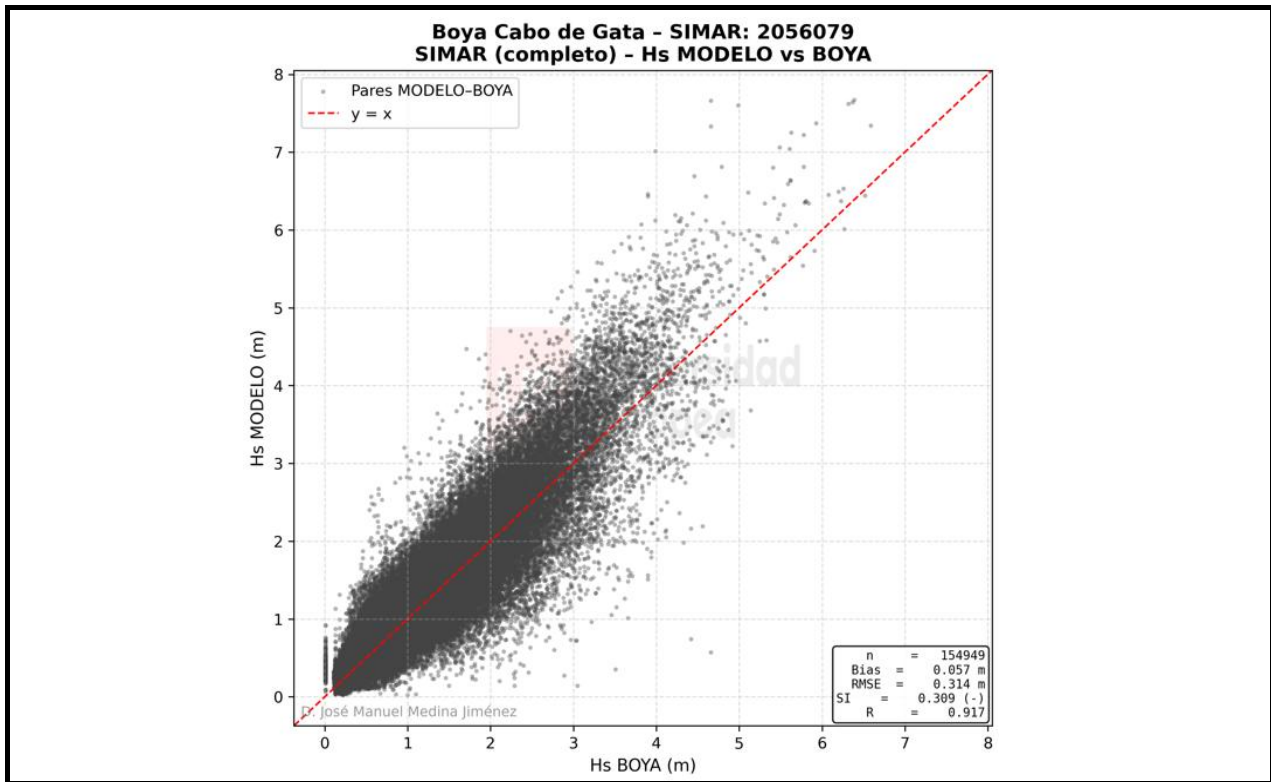
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

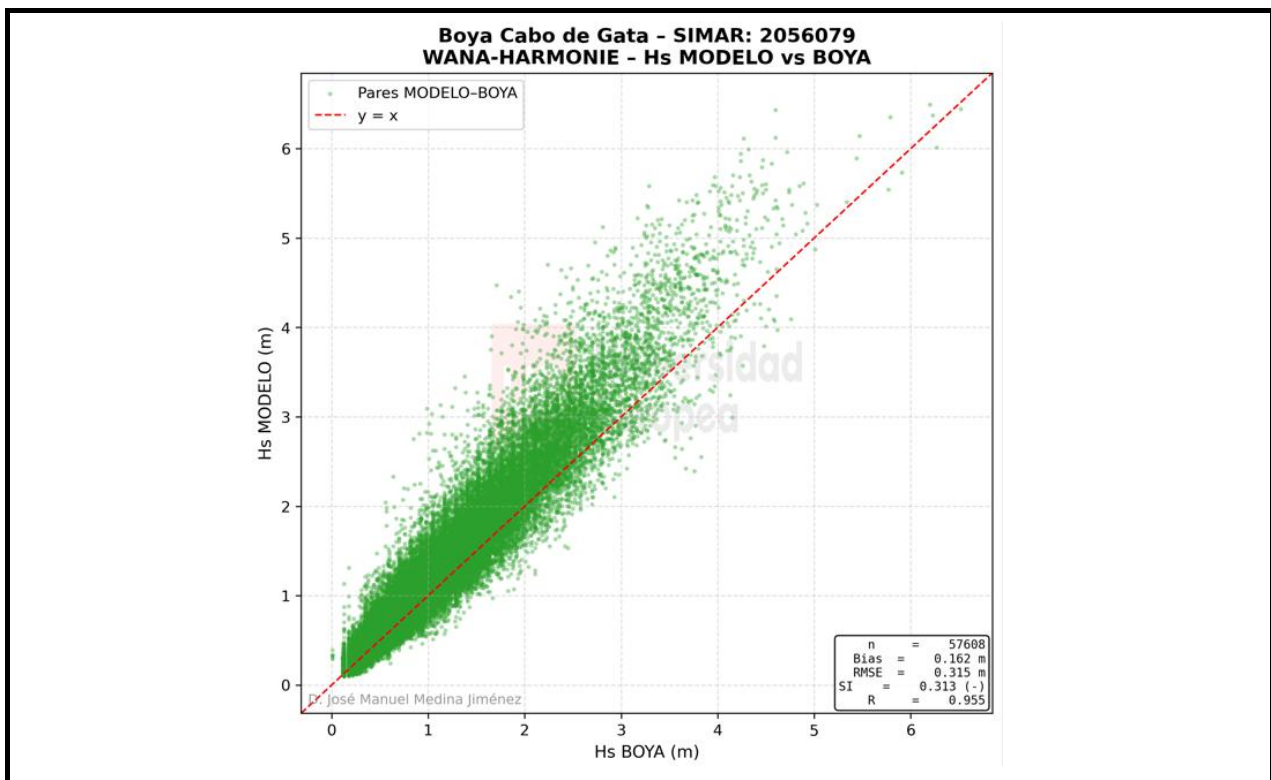
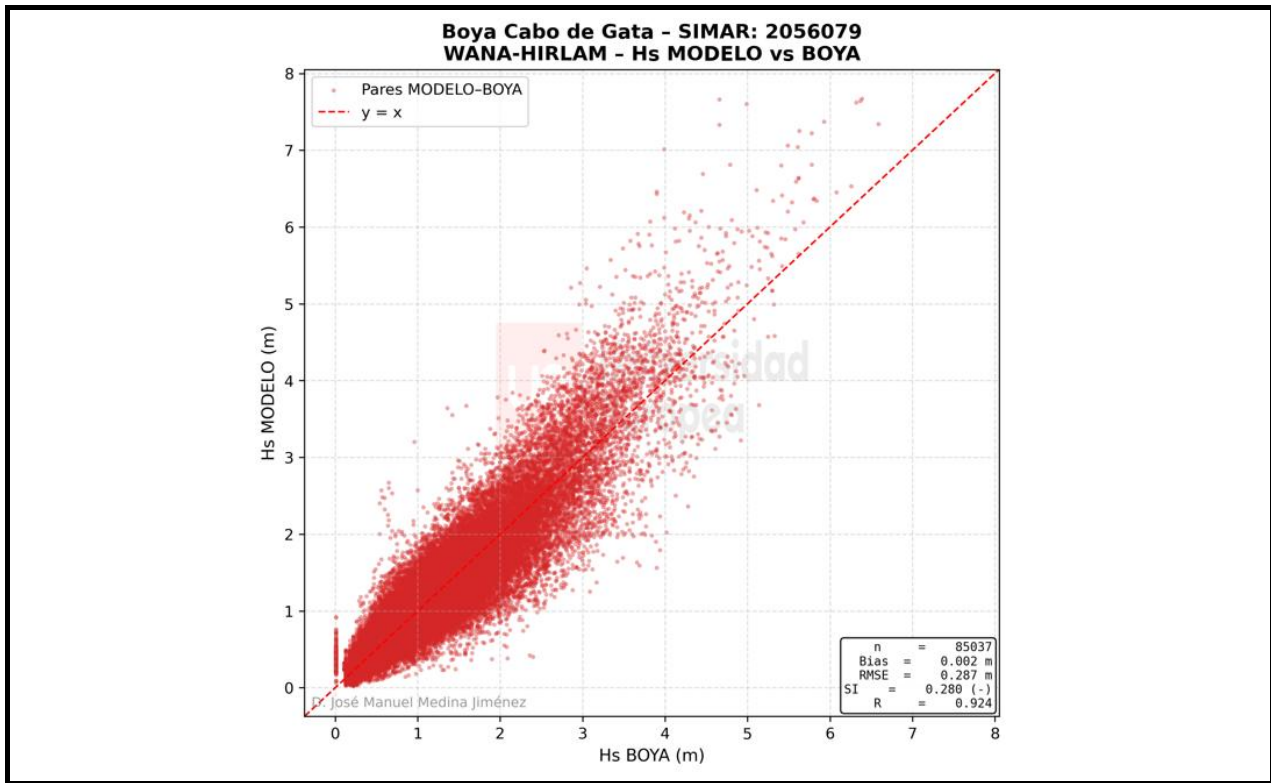


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

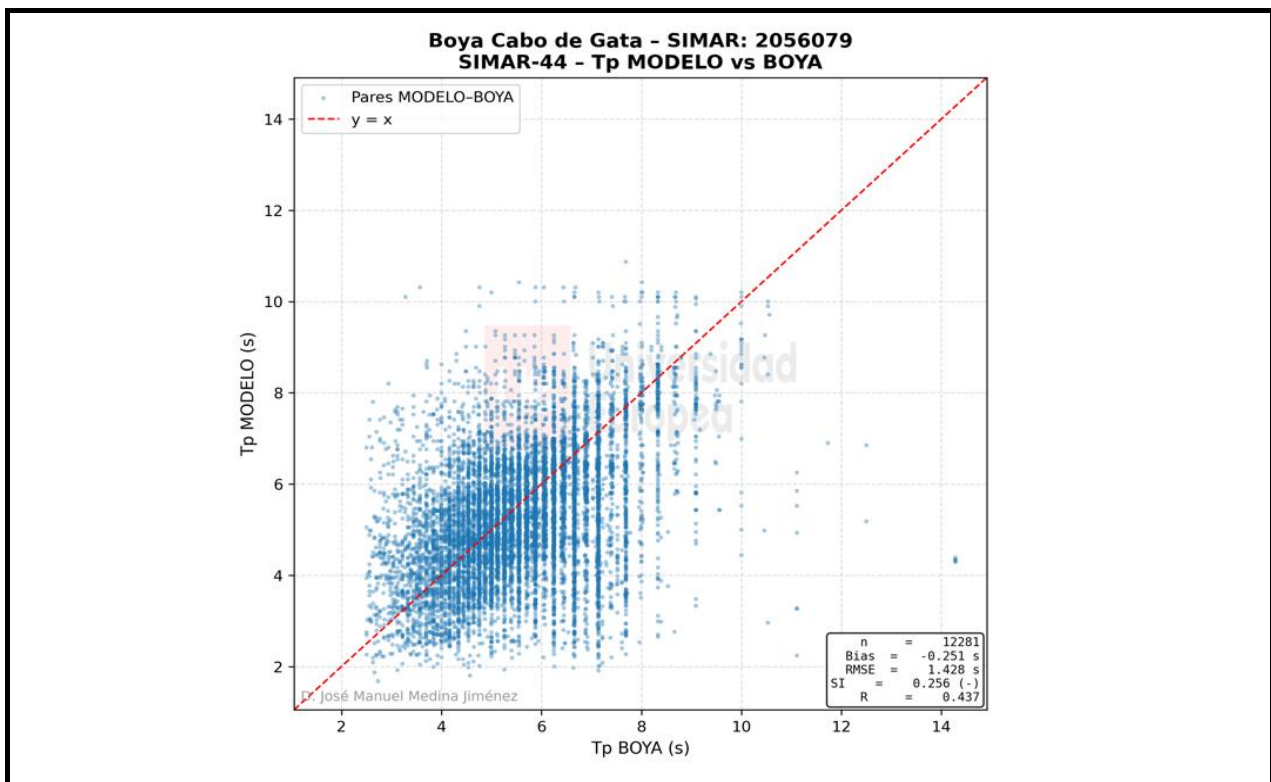
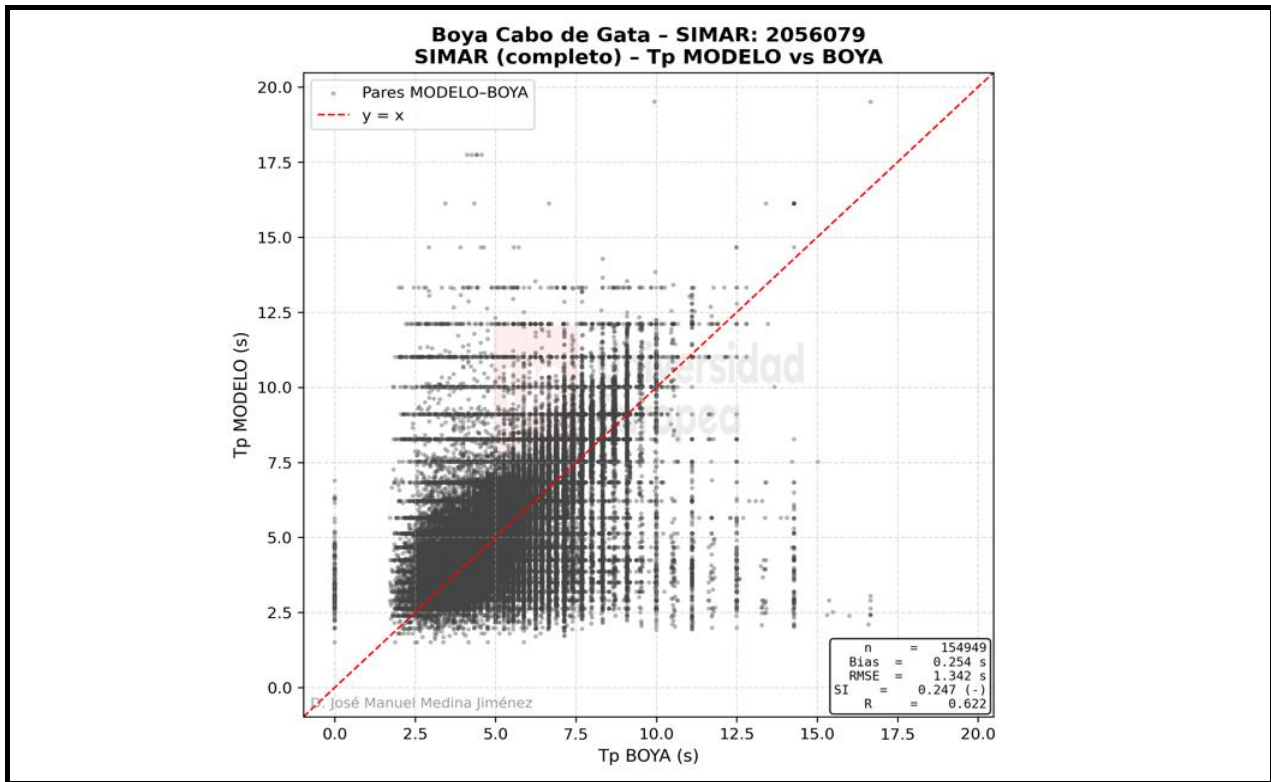


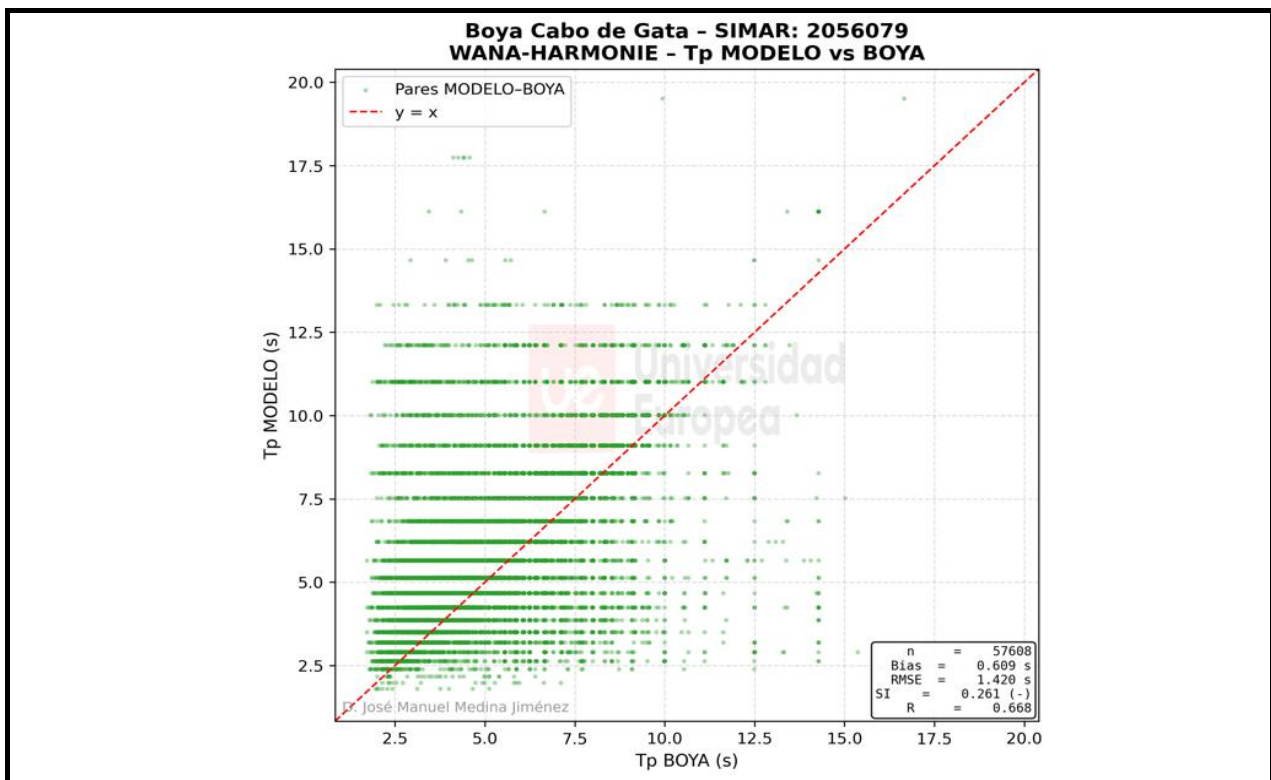
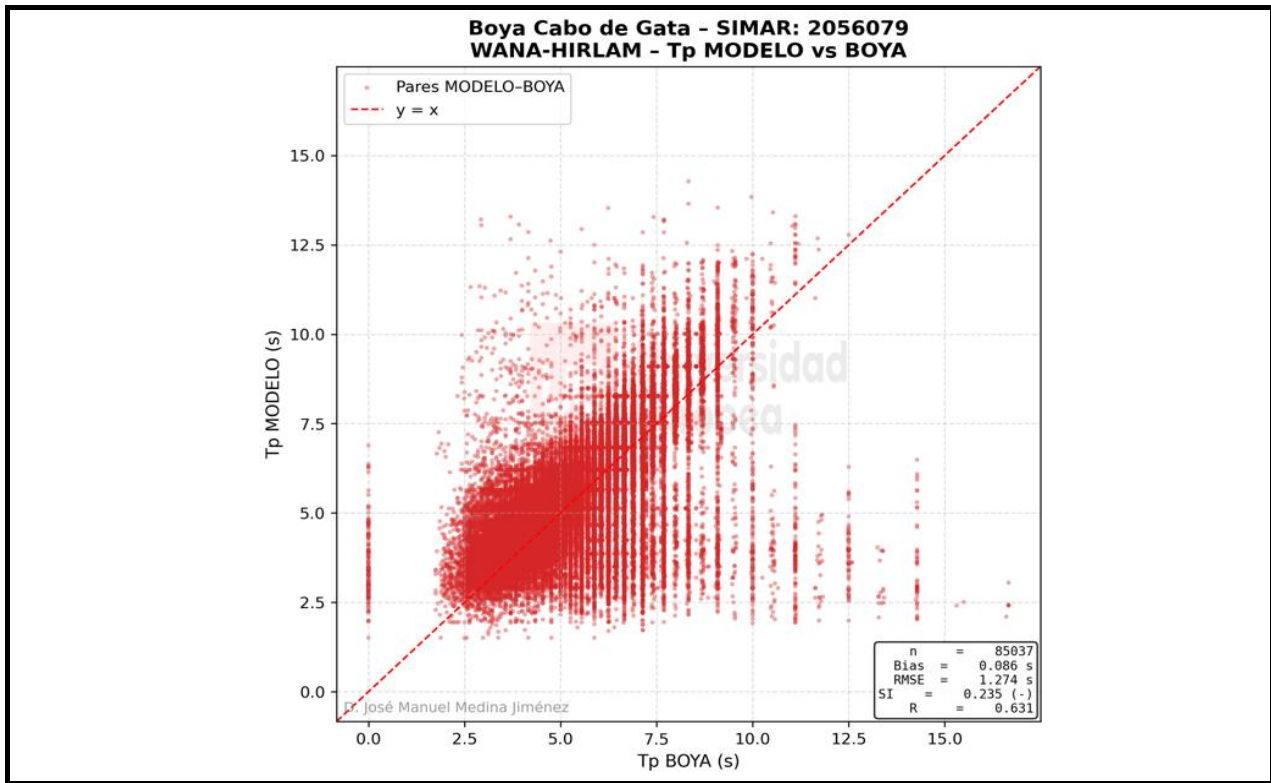
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs



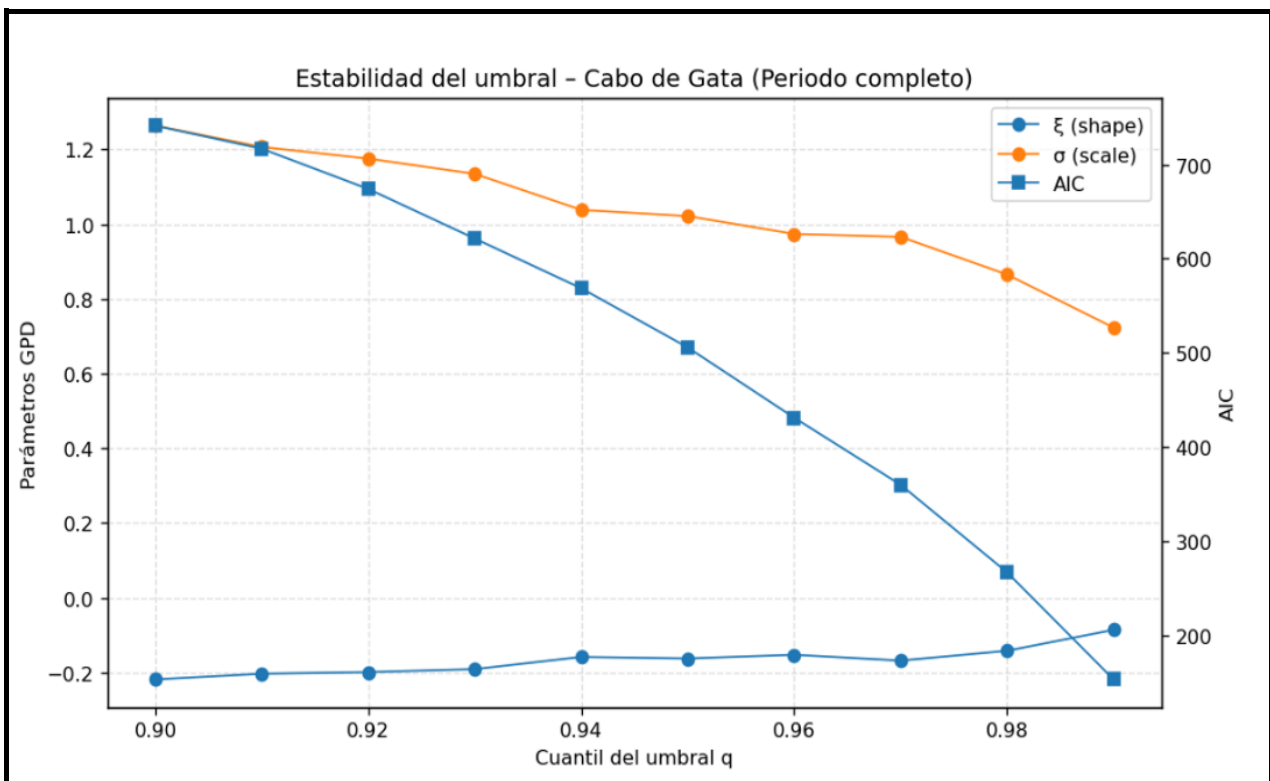
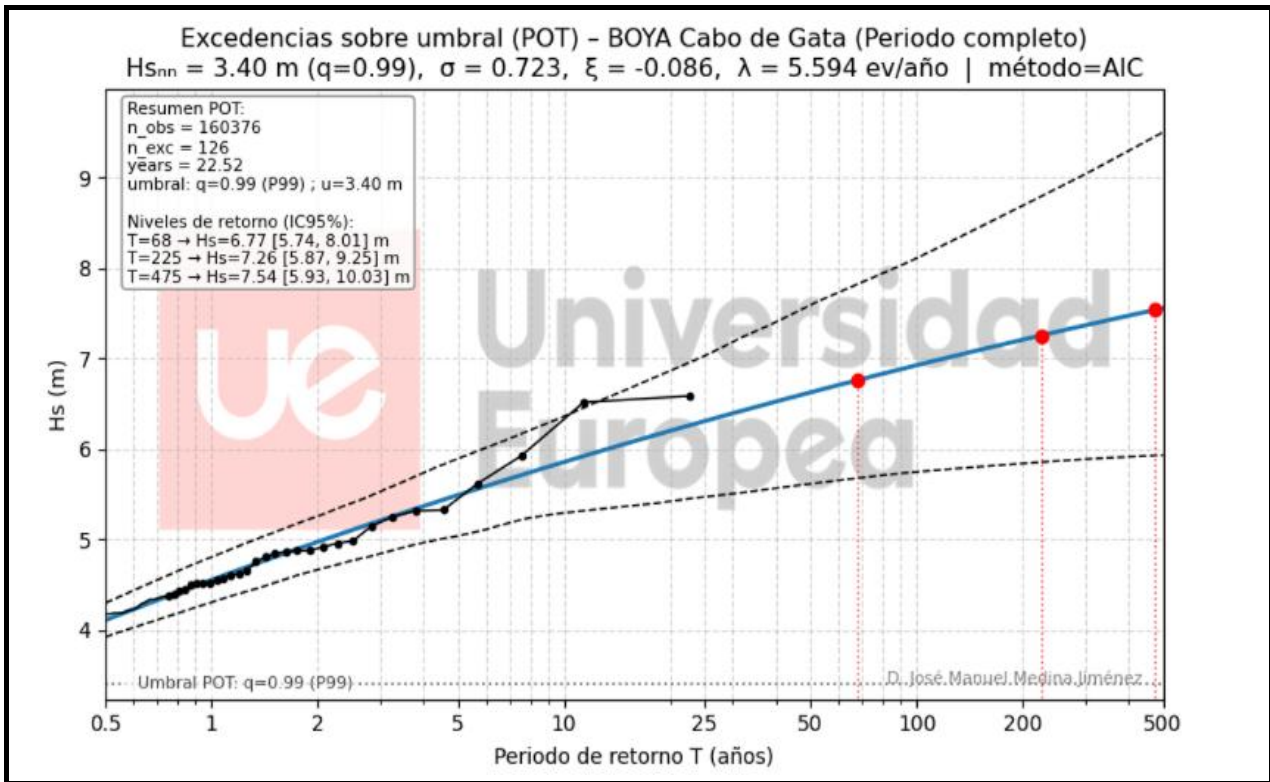


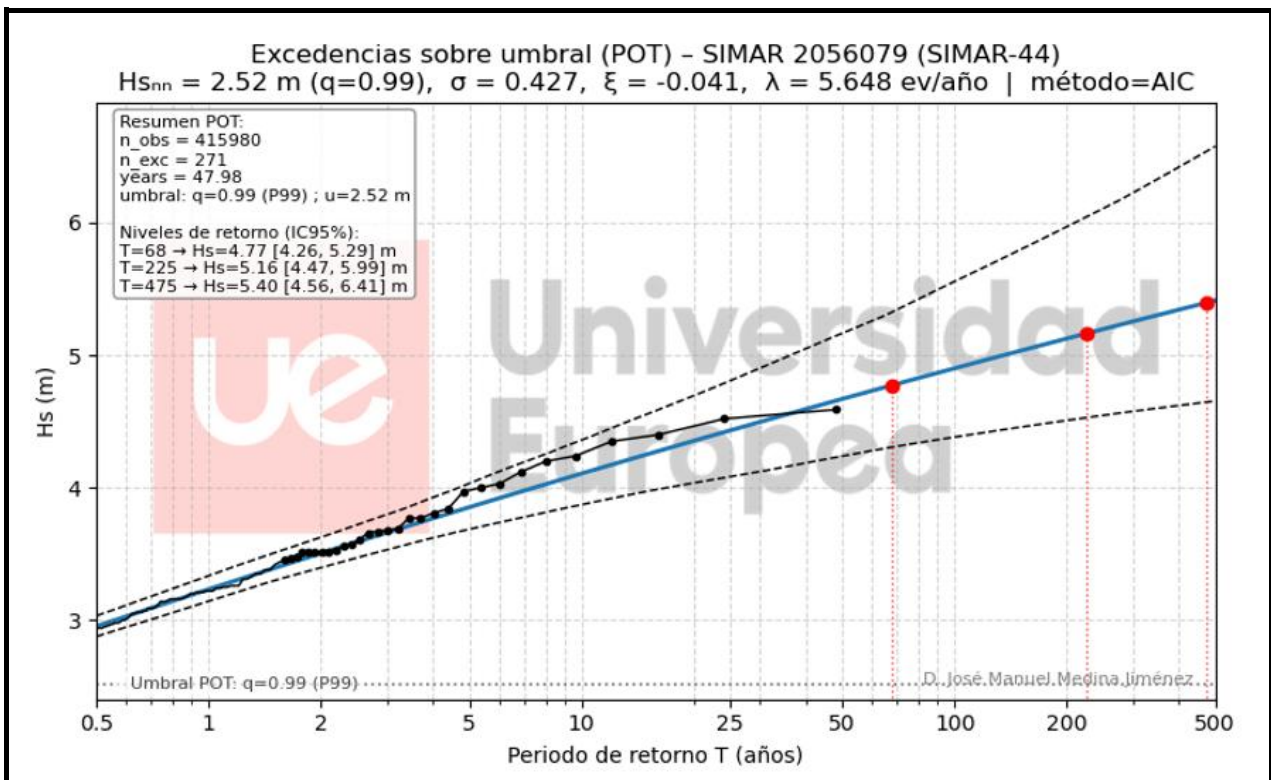
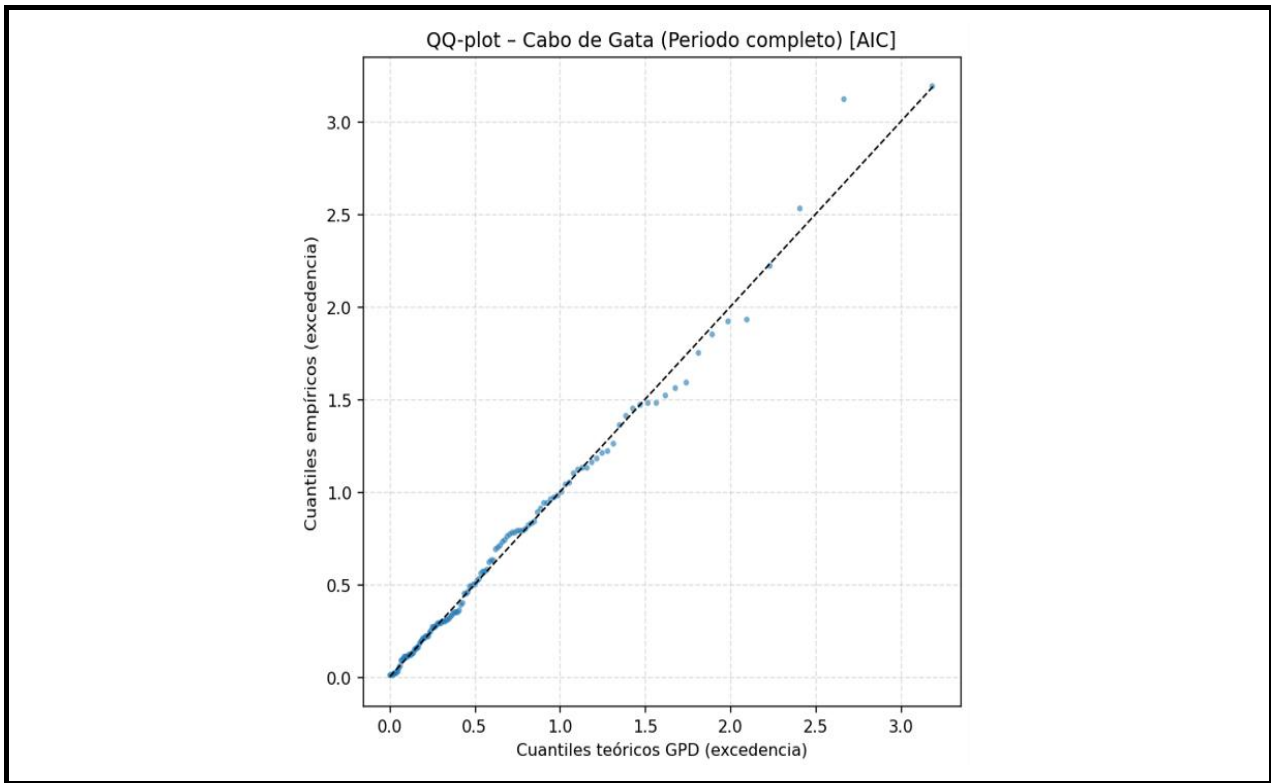
10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp

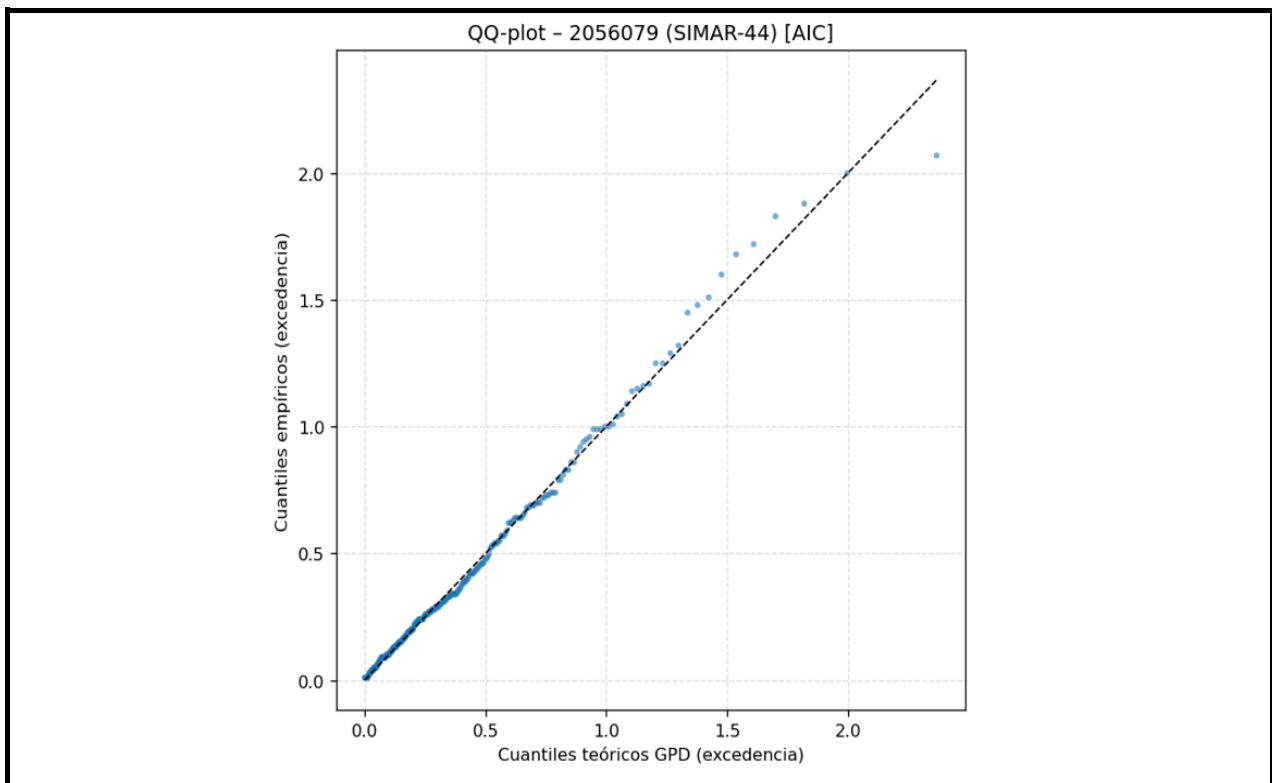
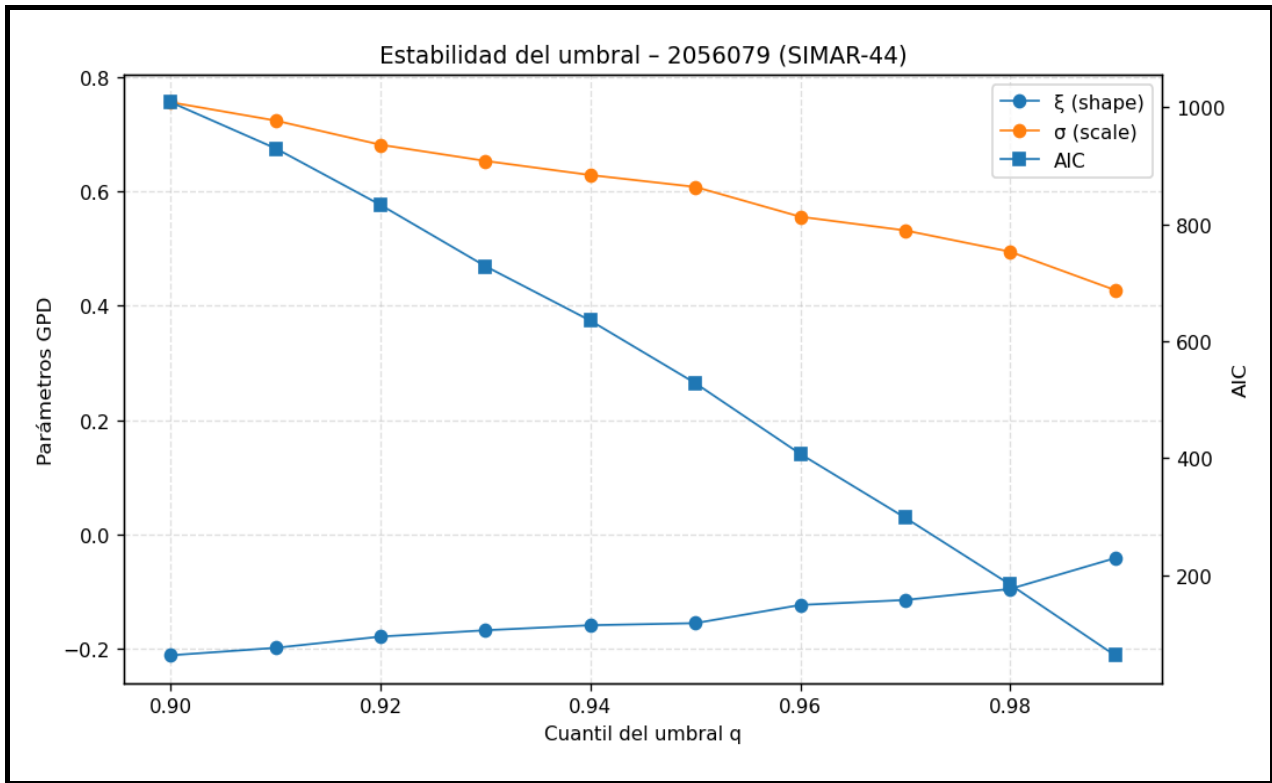


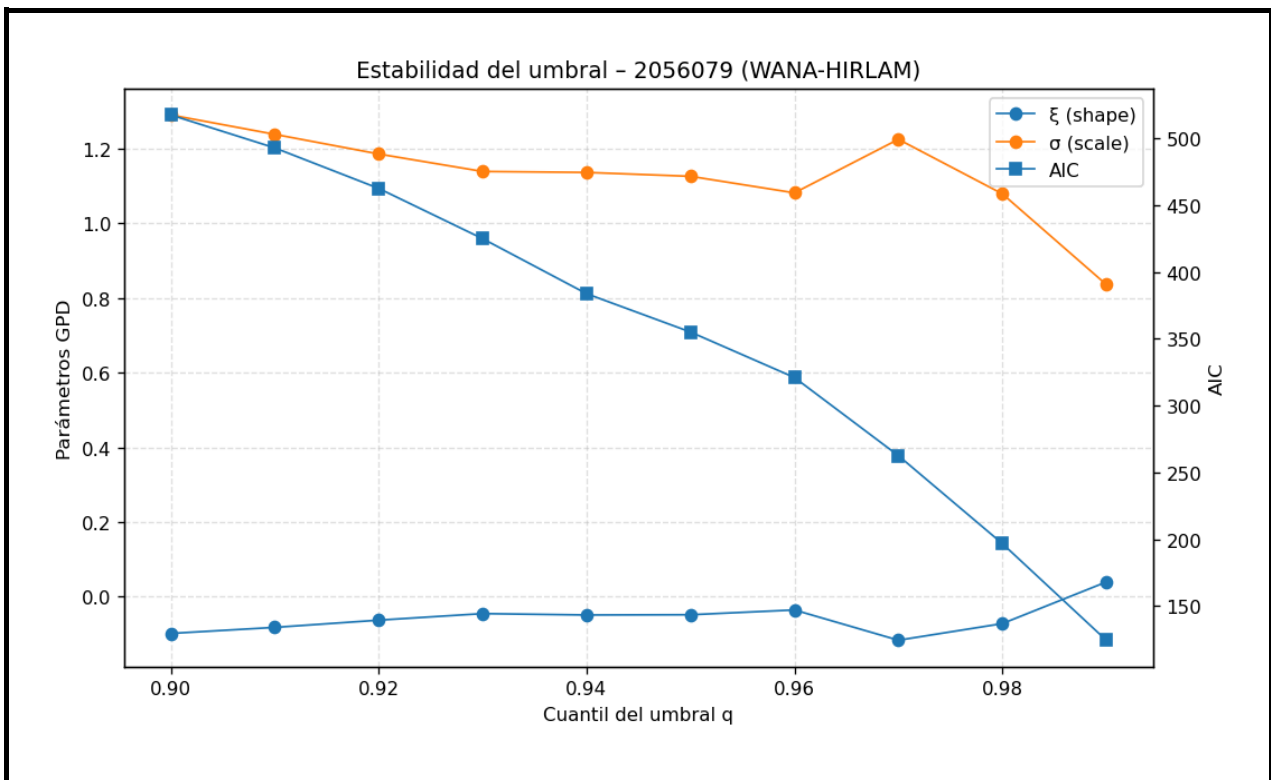
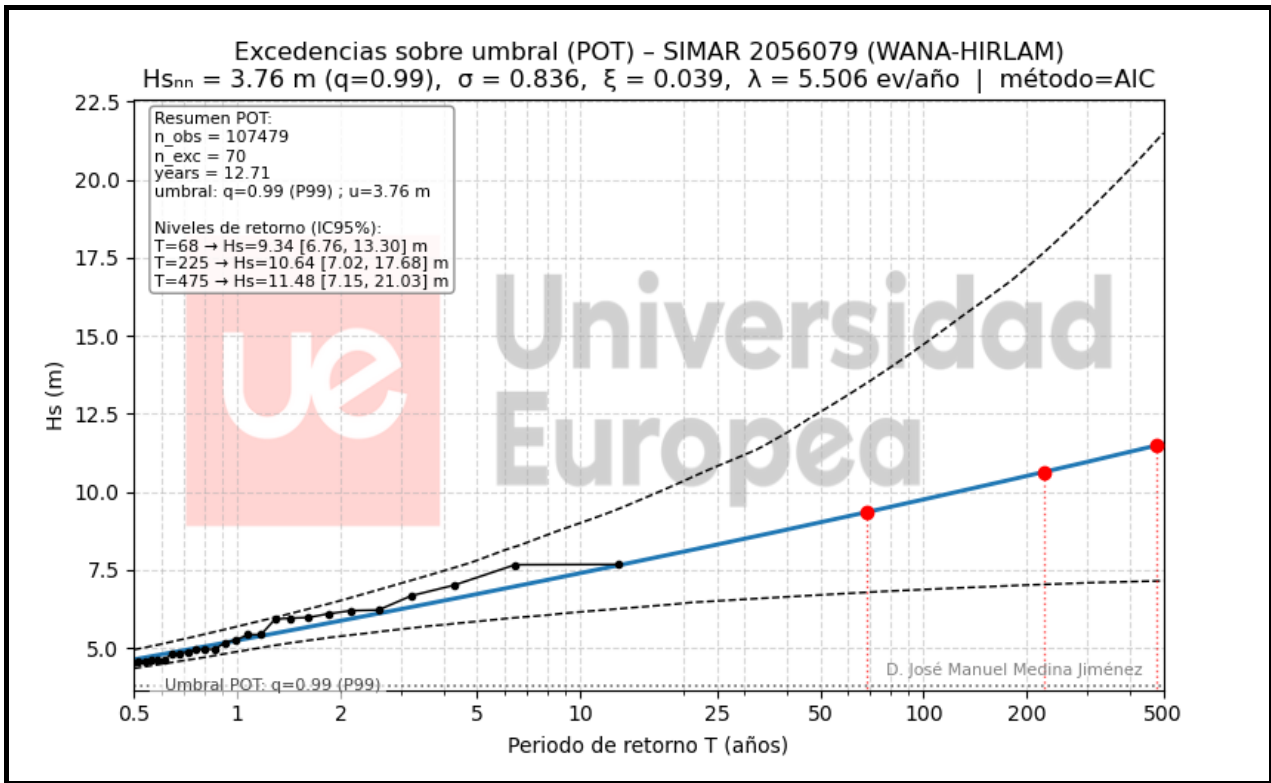


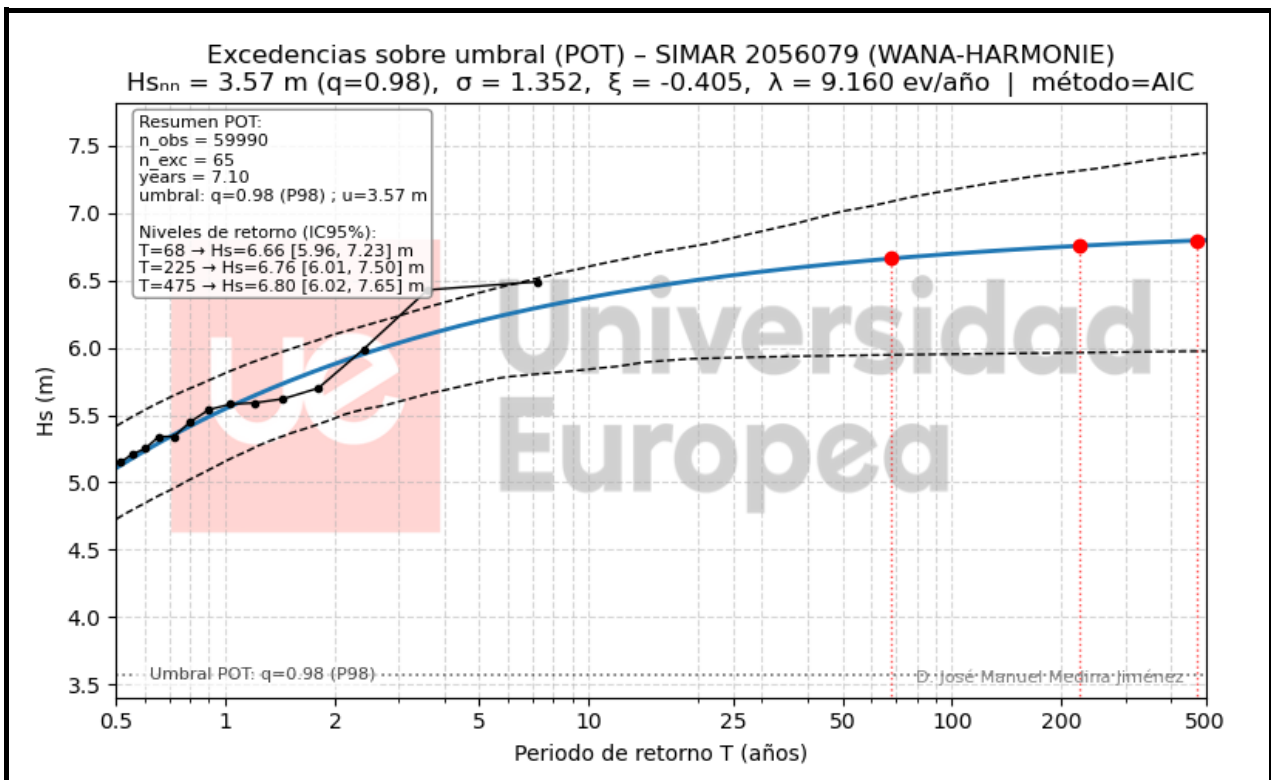
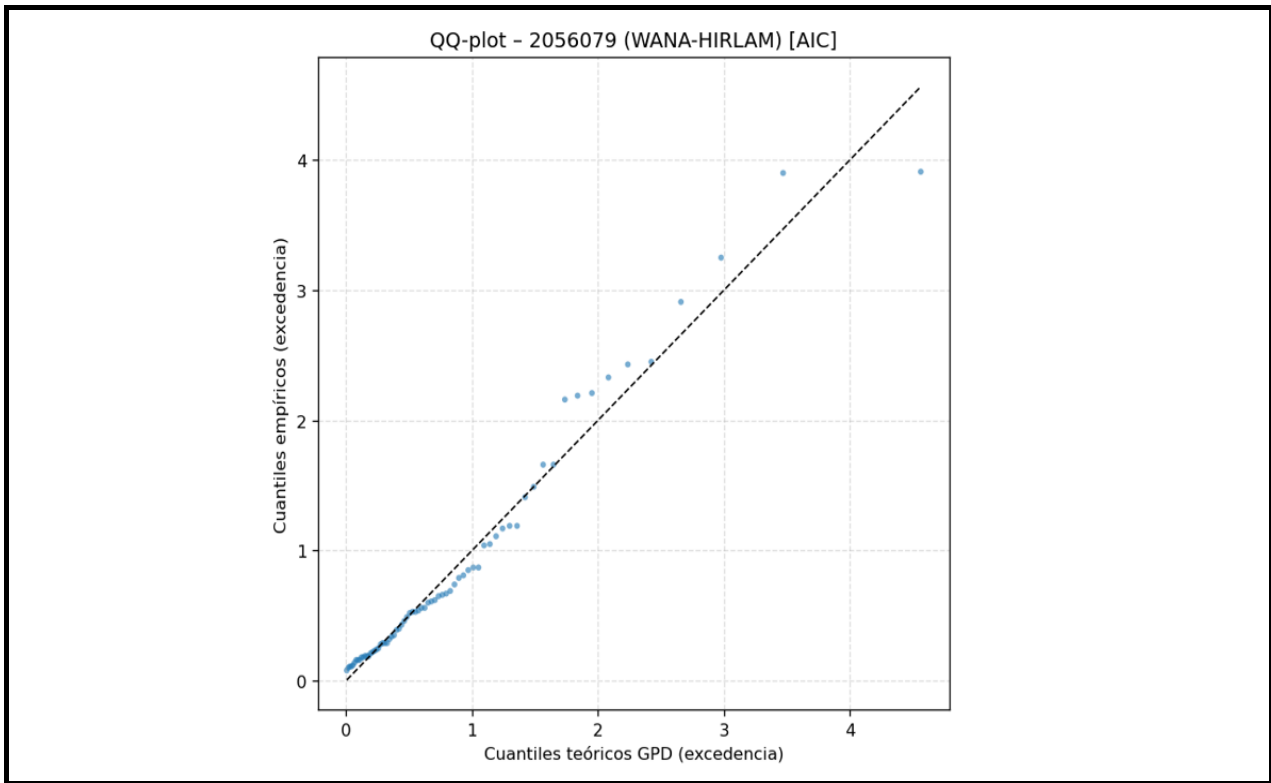
11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

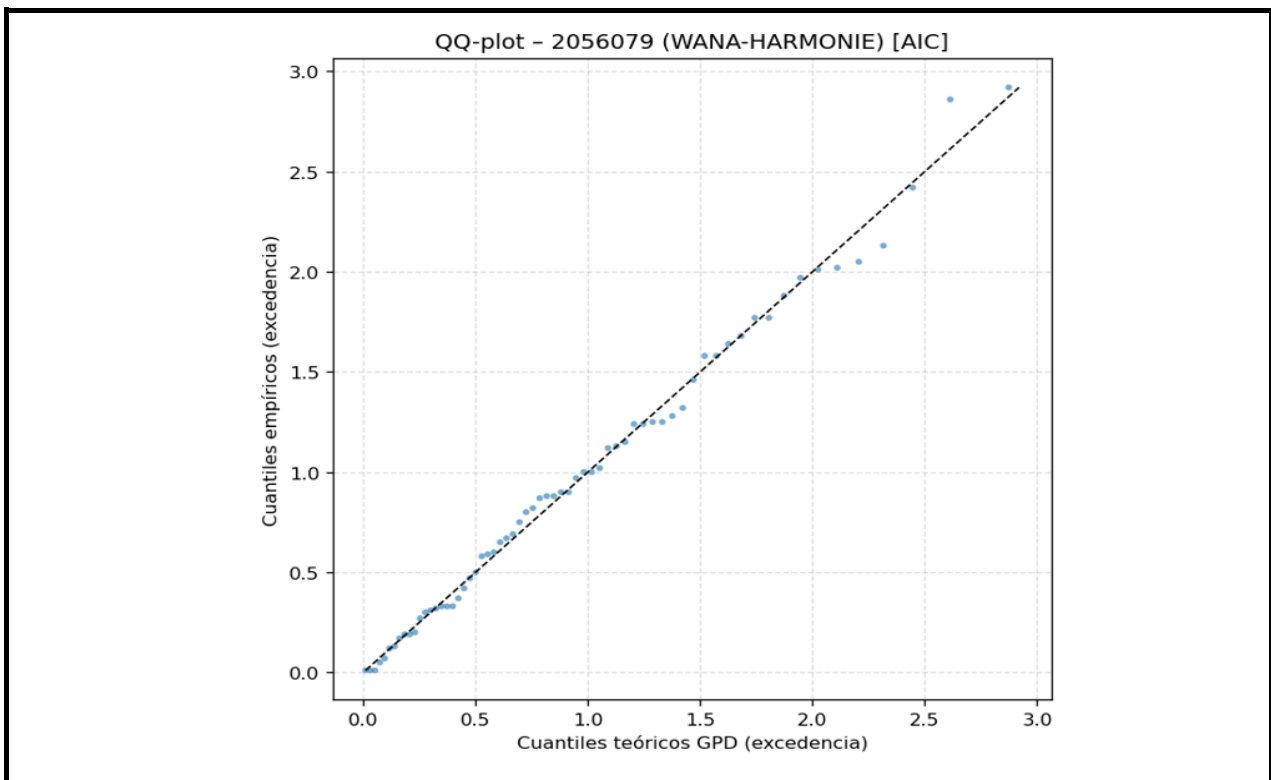
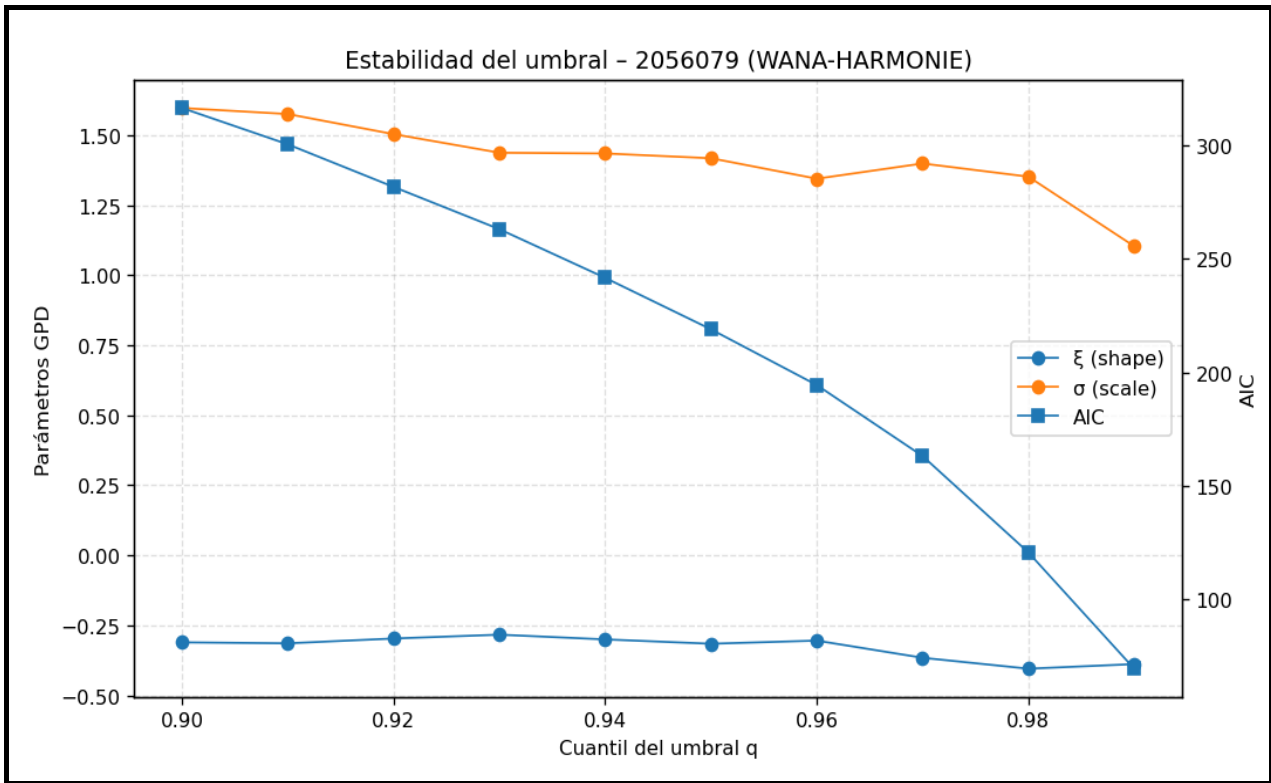


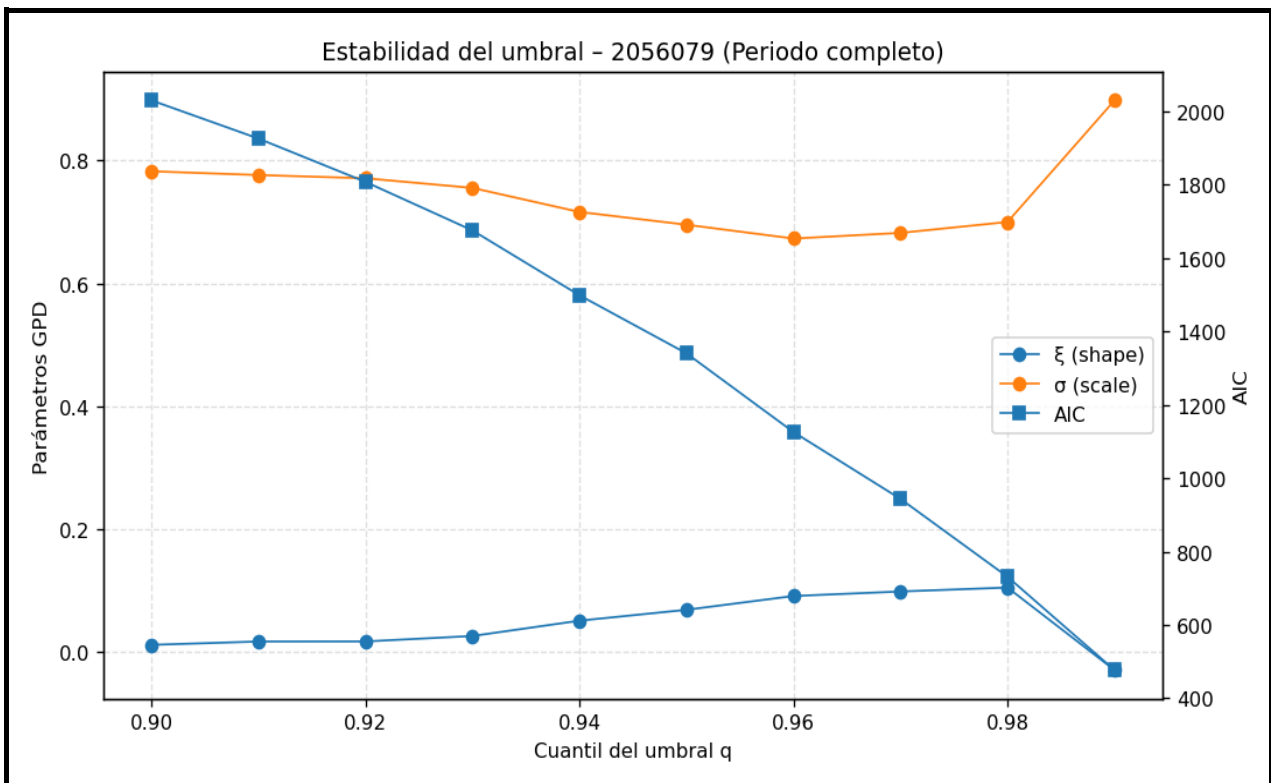
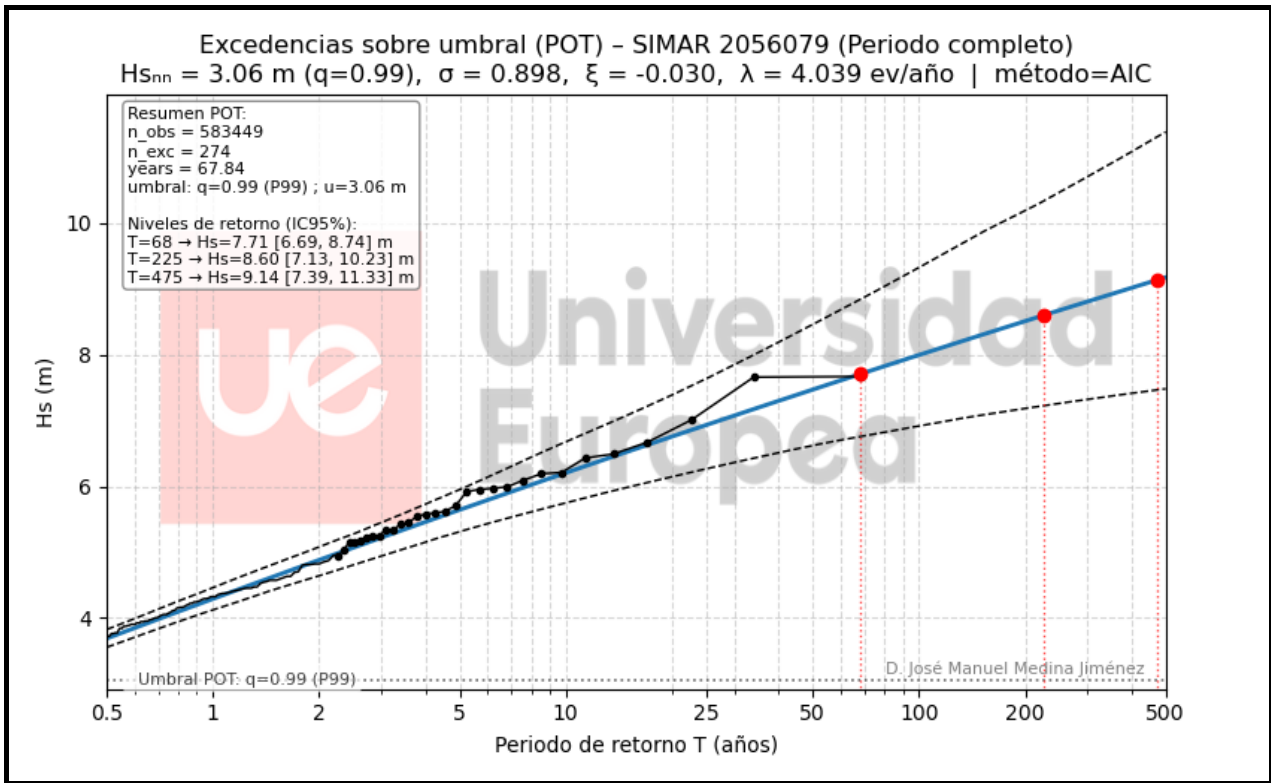


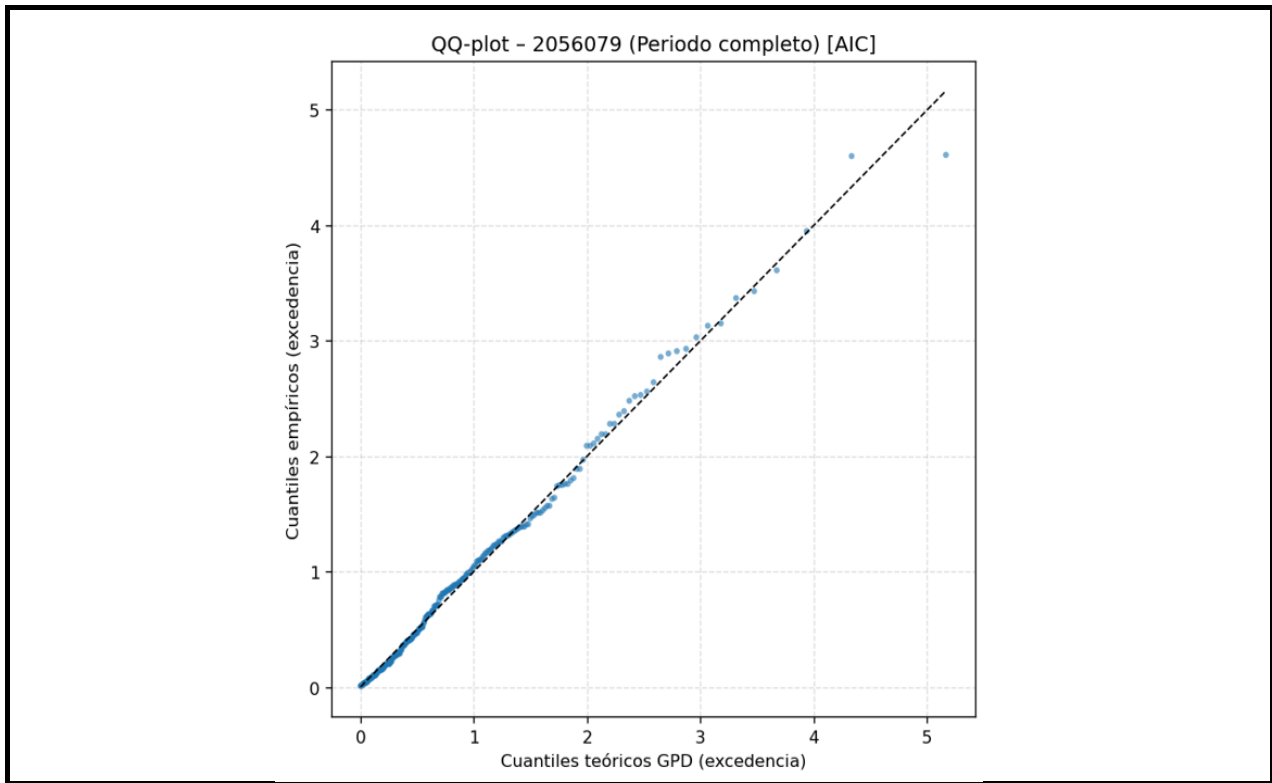













 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA Nº4 : PUNTO SIMAR 2102128 - BOYA TARRAGONA</b>	
<b>Identificación del punto</b>		<b>Localización y referencia</b>	
<b>Boya:</b>	Tarragona	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (Zona 31 T)
<b>Nodo SIMAR:</b>	2102128	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	31 T 373218.40 4503206.66
<b>Fachada marítima:</b>	Este Peninsular	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	31 T 370721.33 4505470.55
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	688 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Tarragona / Punto SIMAR 2102128.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 2004-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1$  h)

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

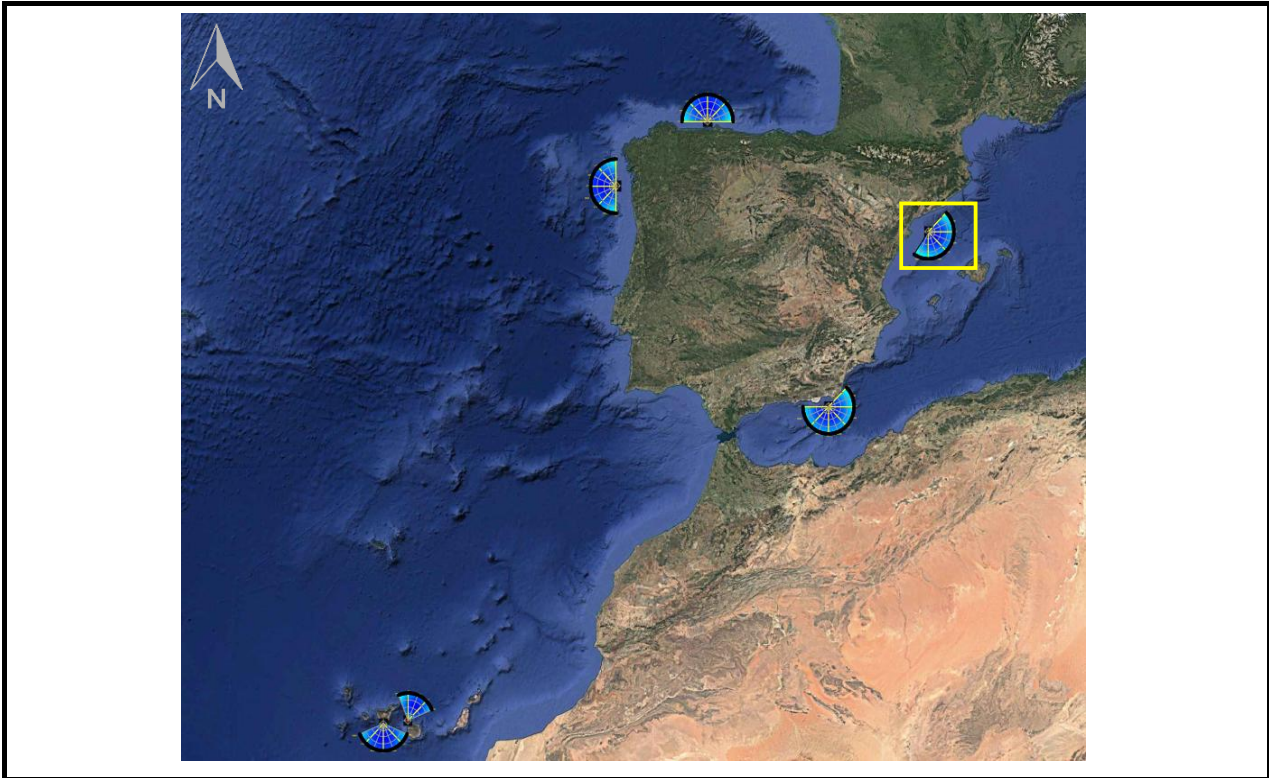
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

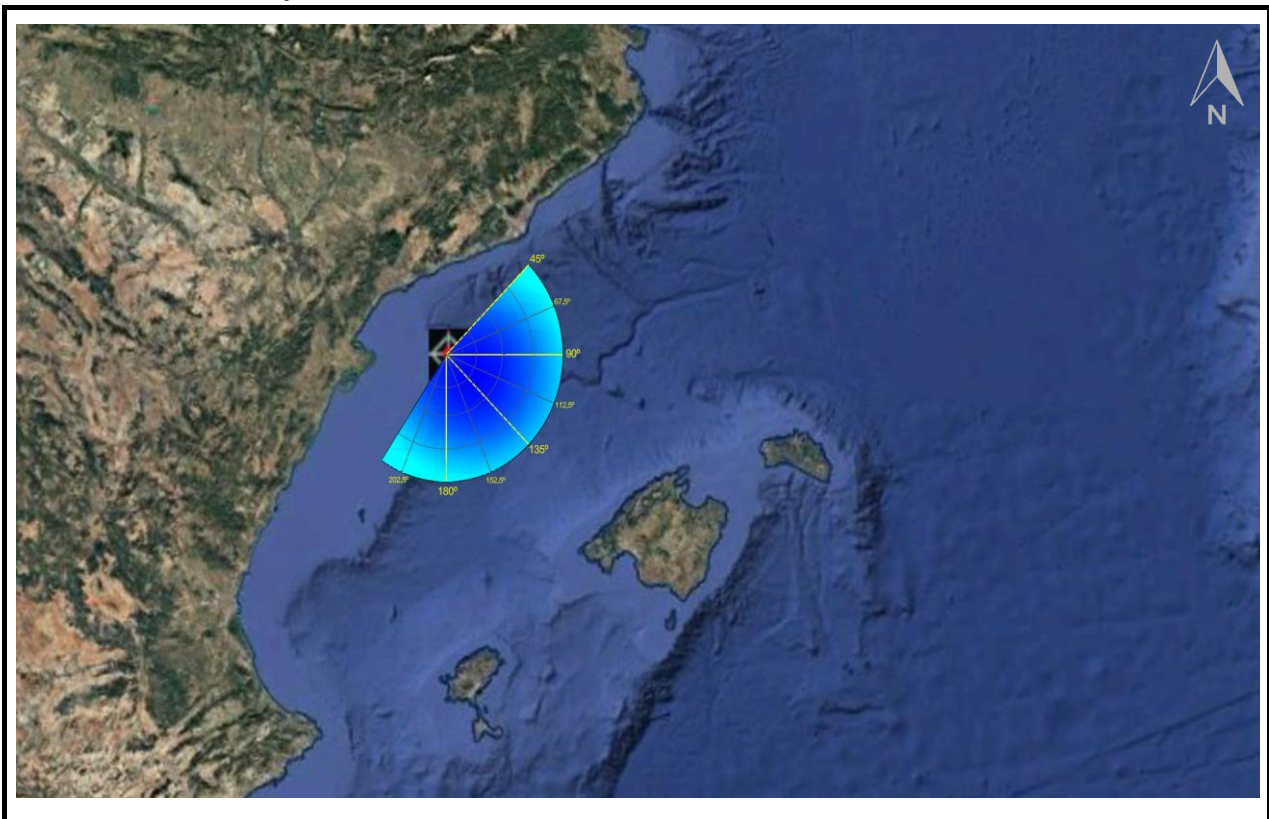
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

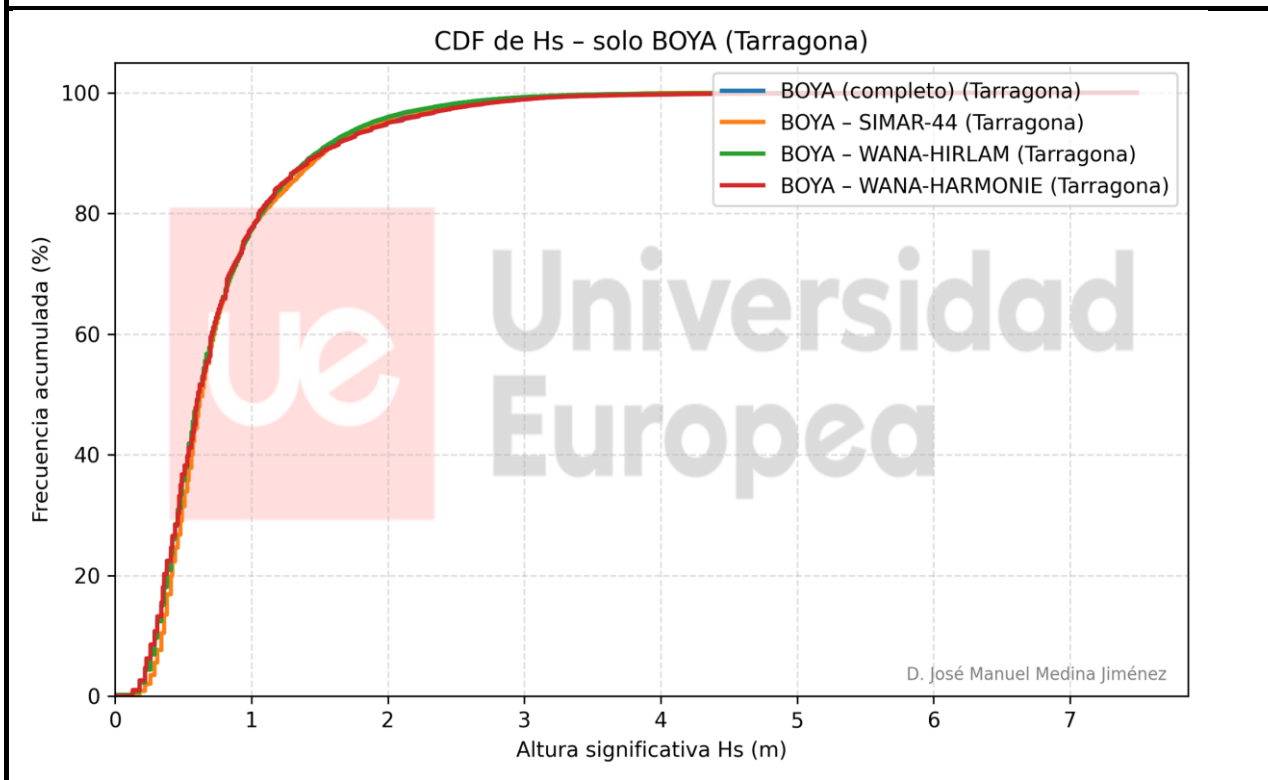
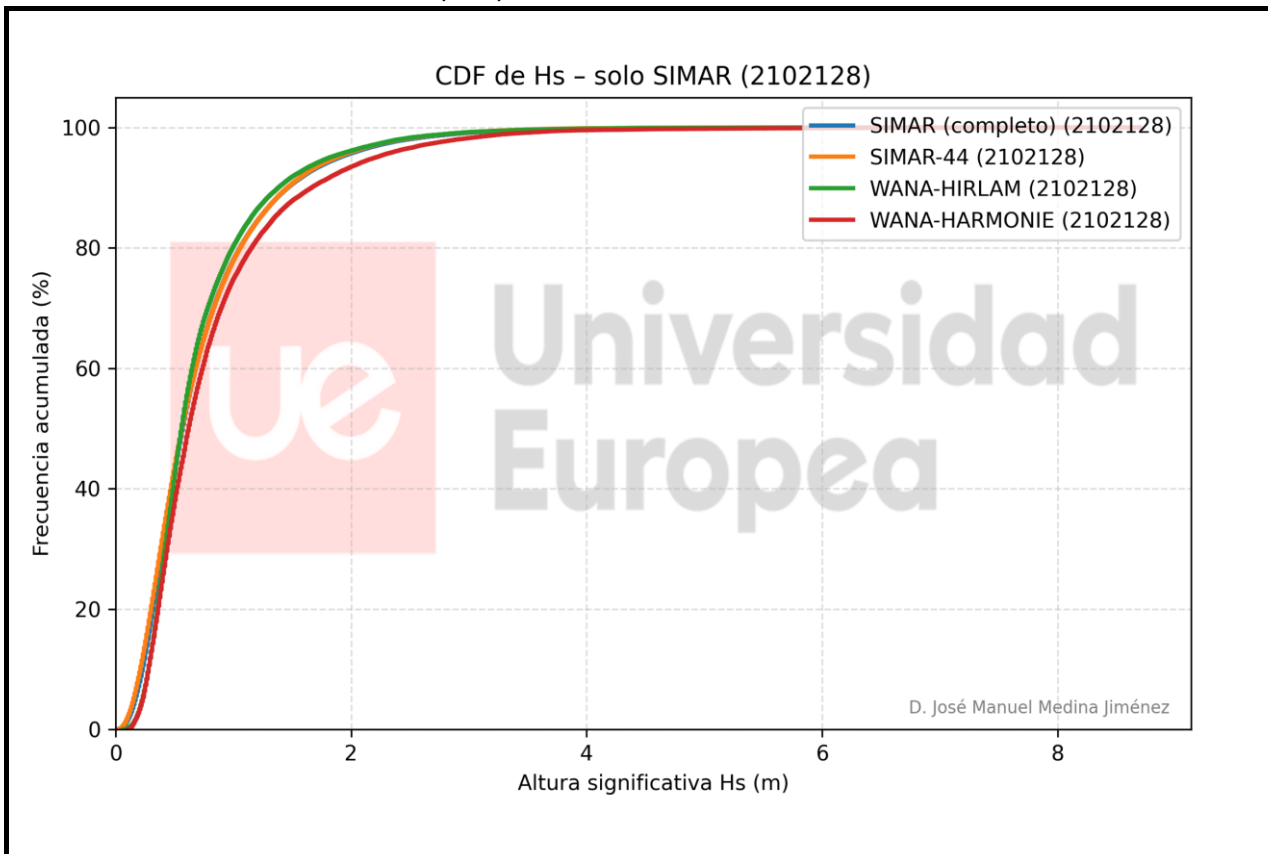


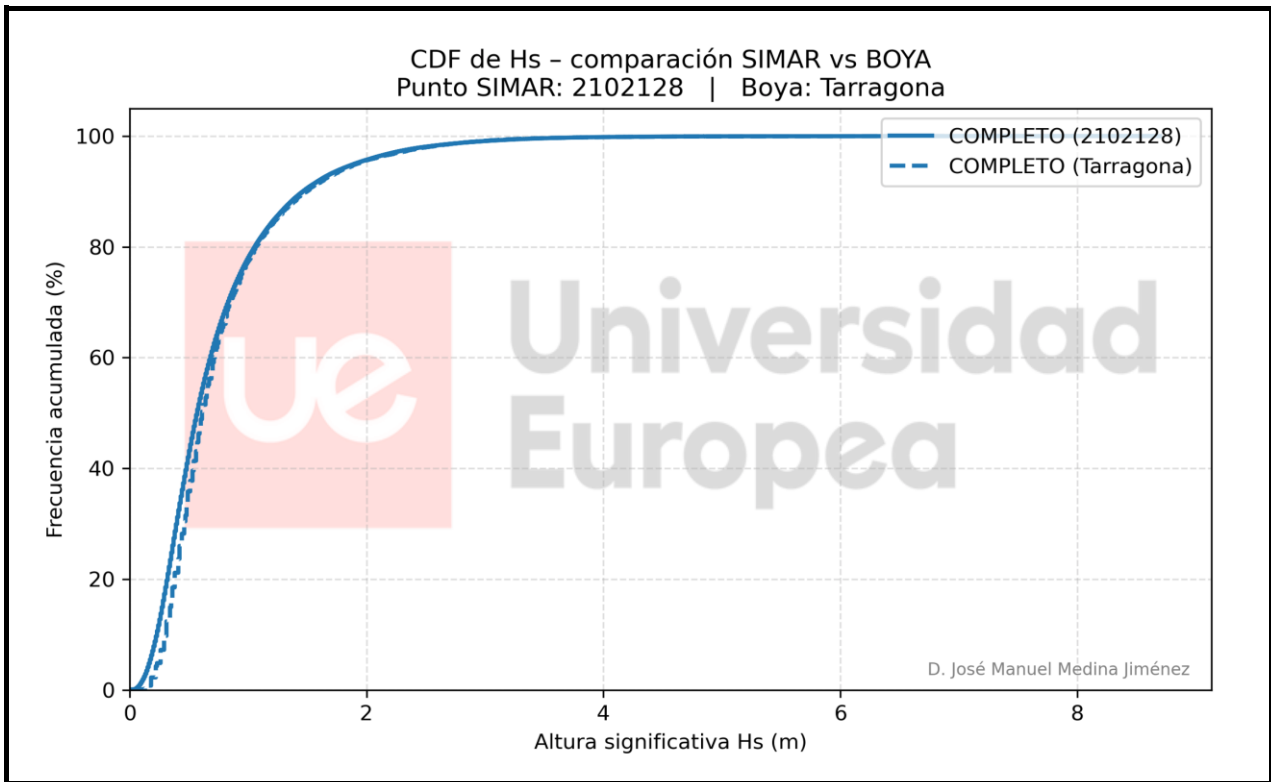
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



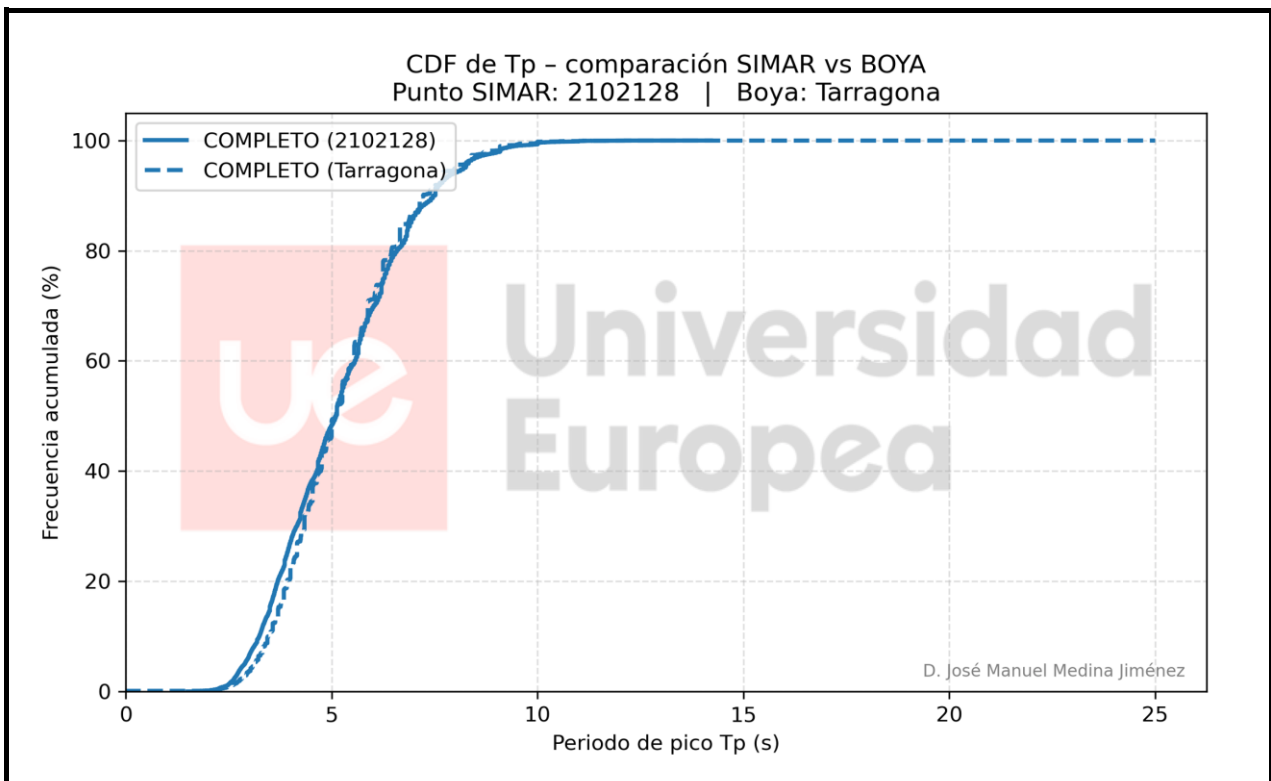
### 4. Análisis Homogeneidad modelos

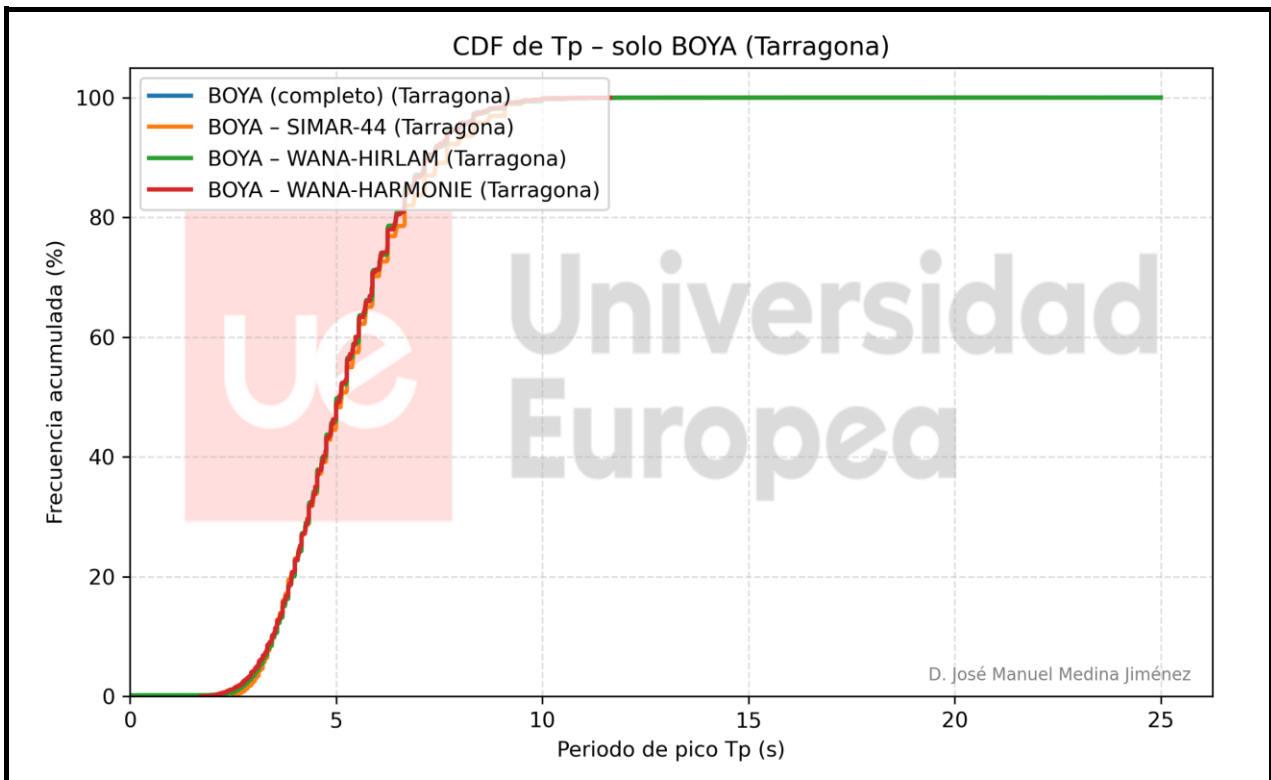
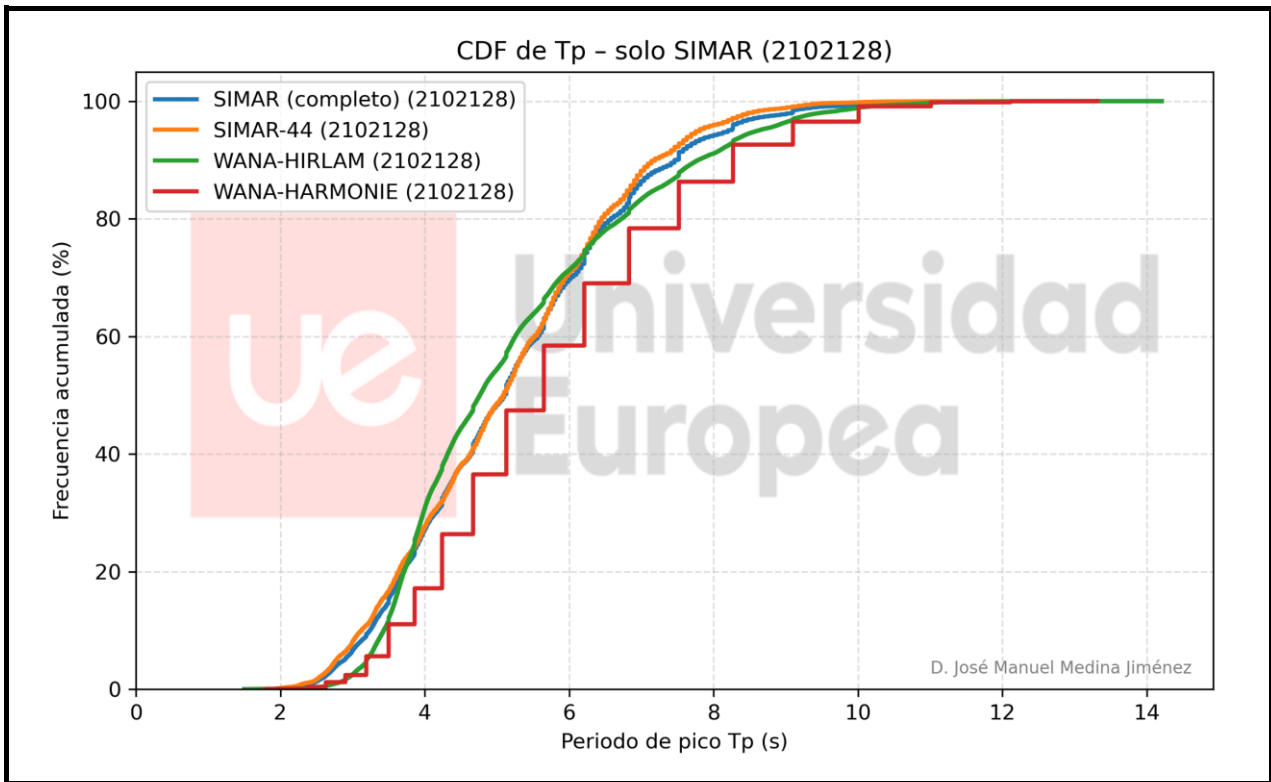
#### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



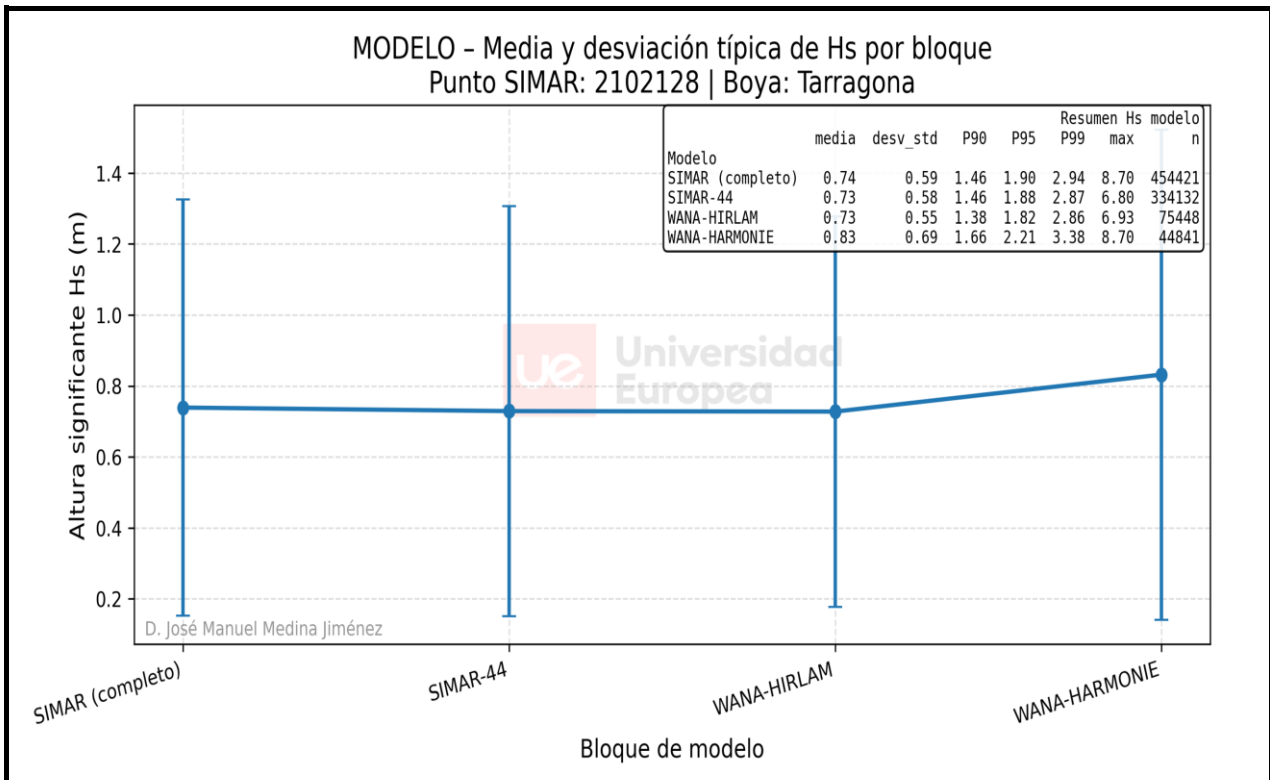
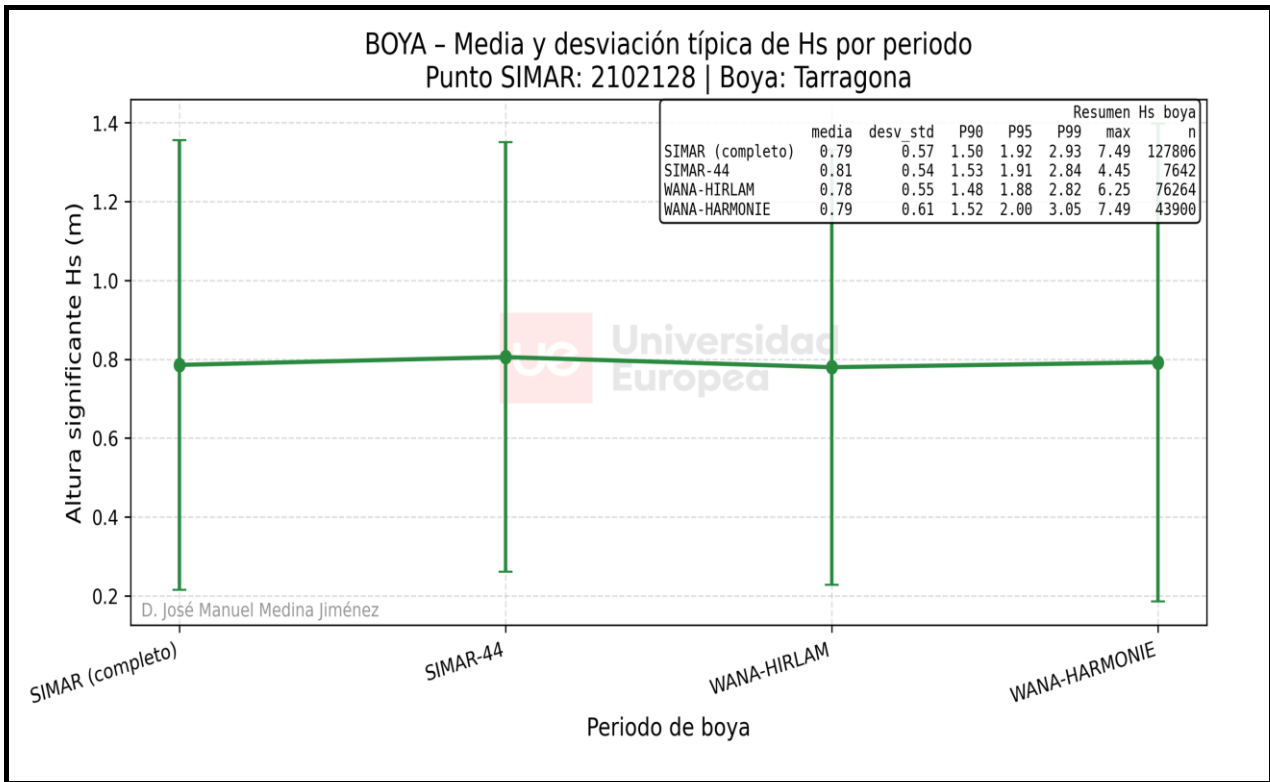


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

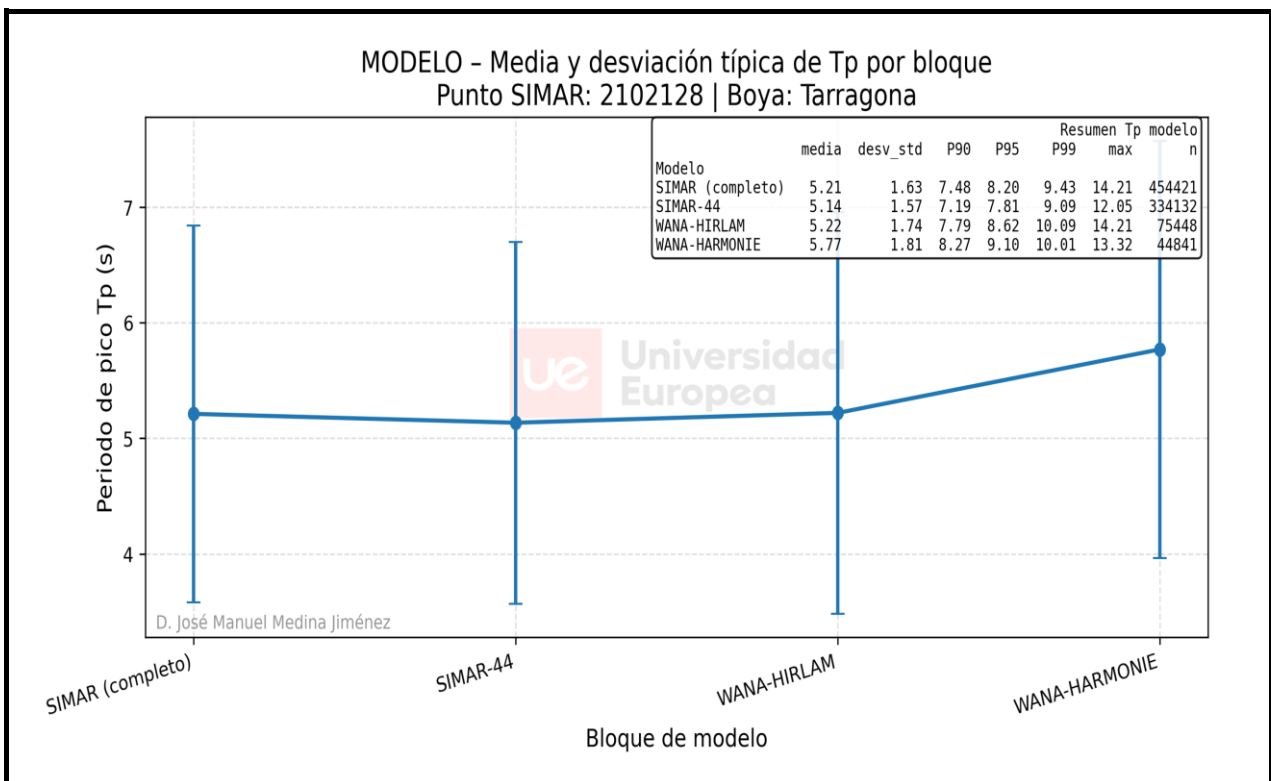
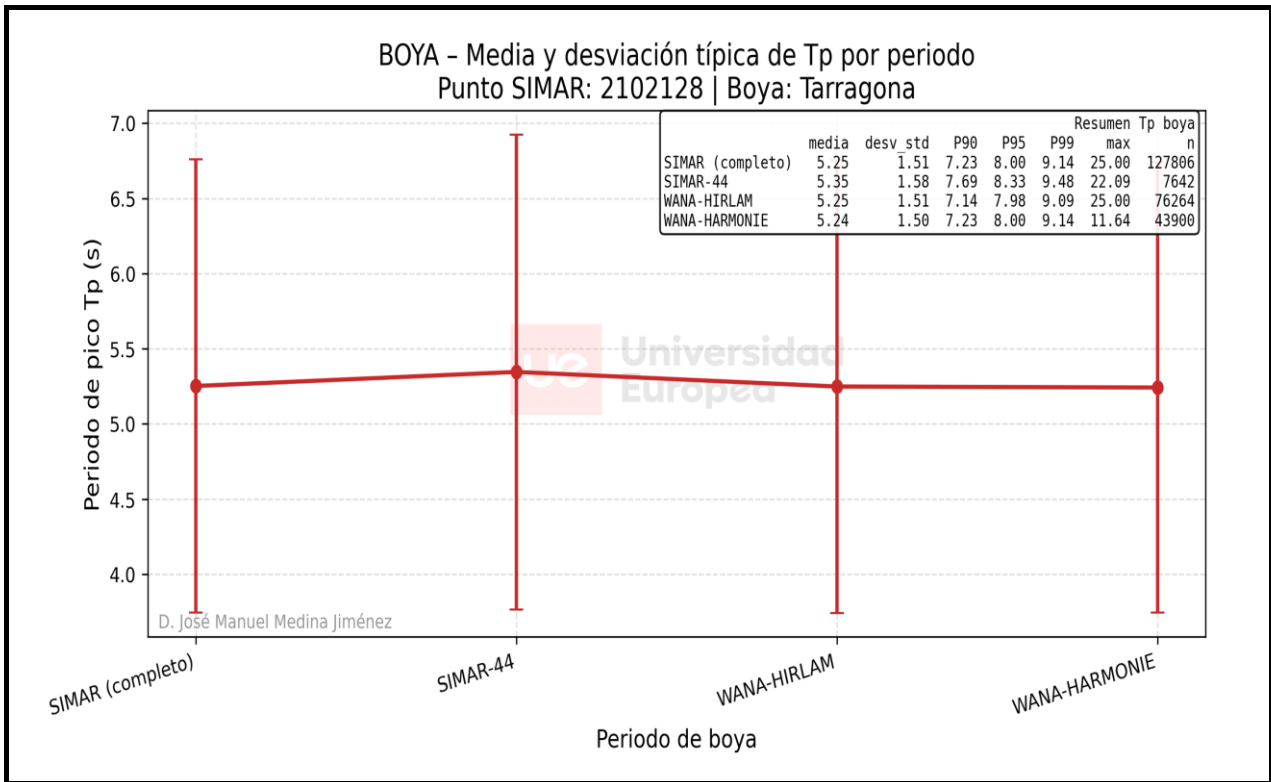




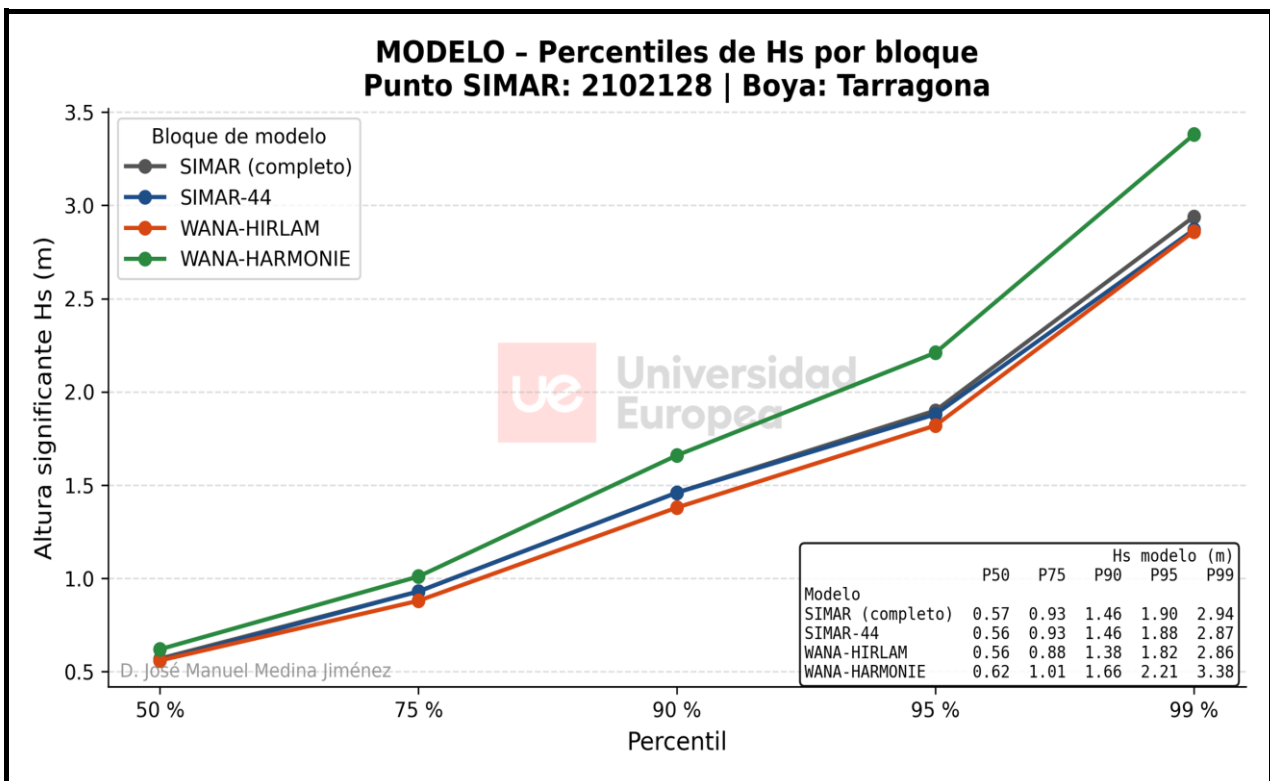
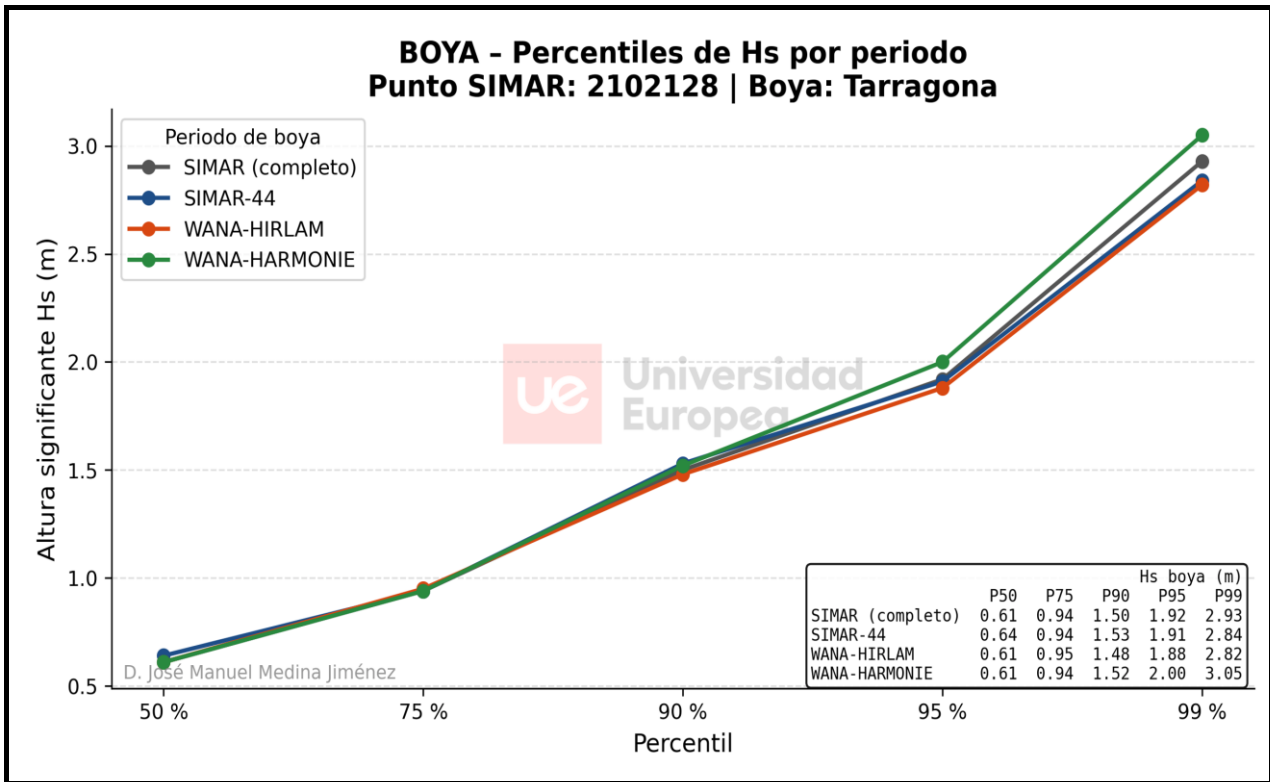
### 5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



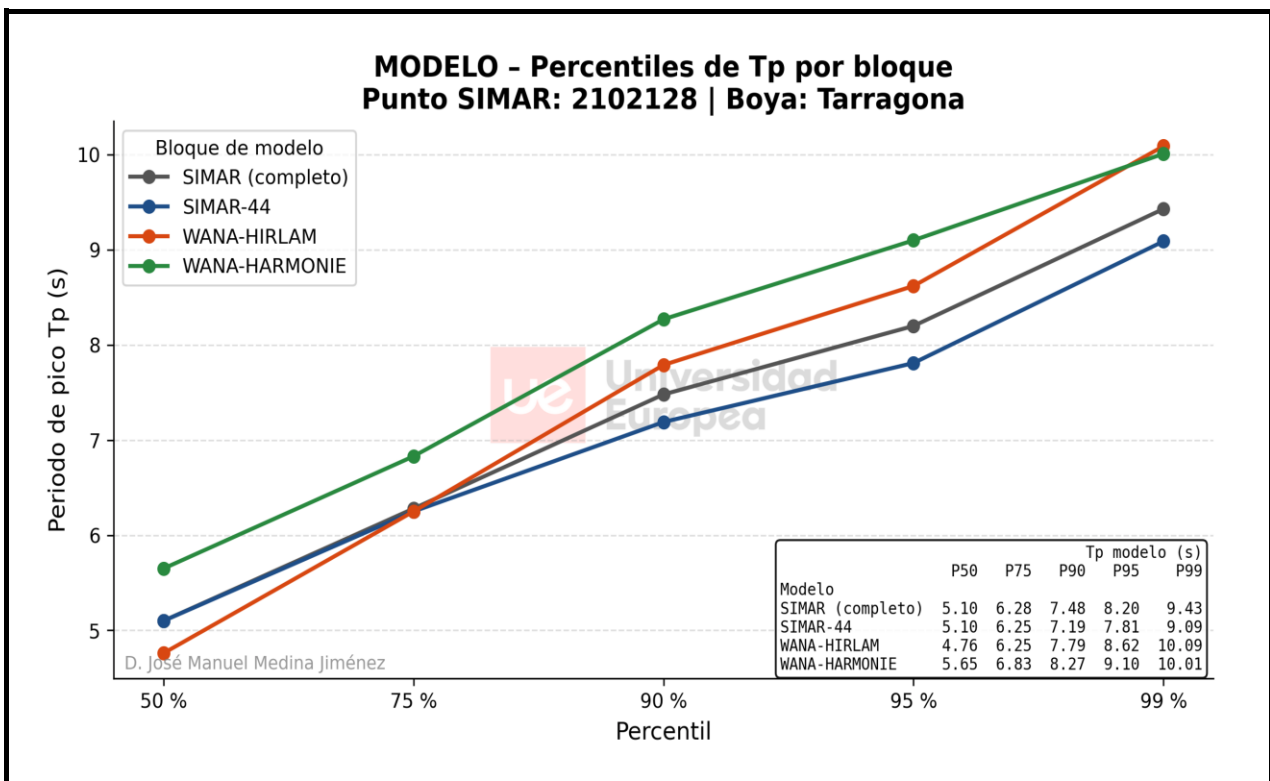
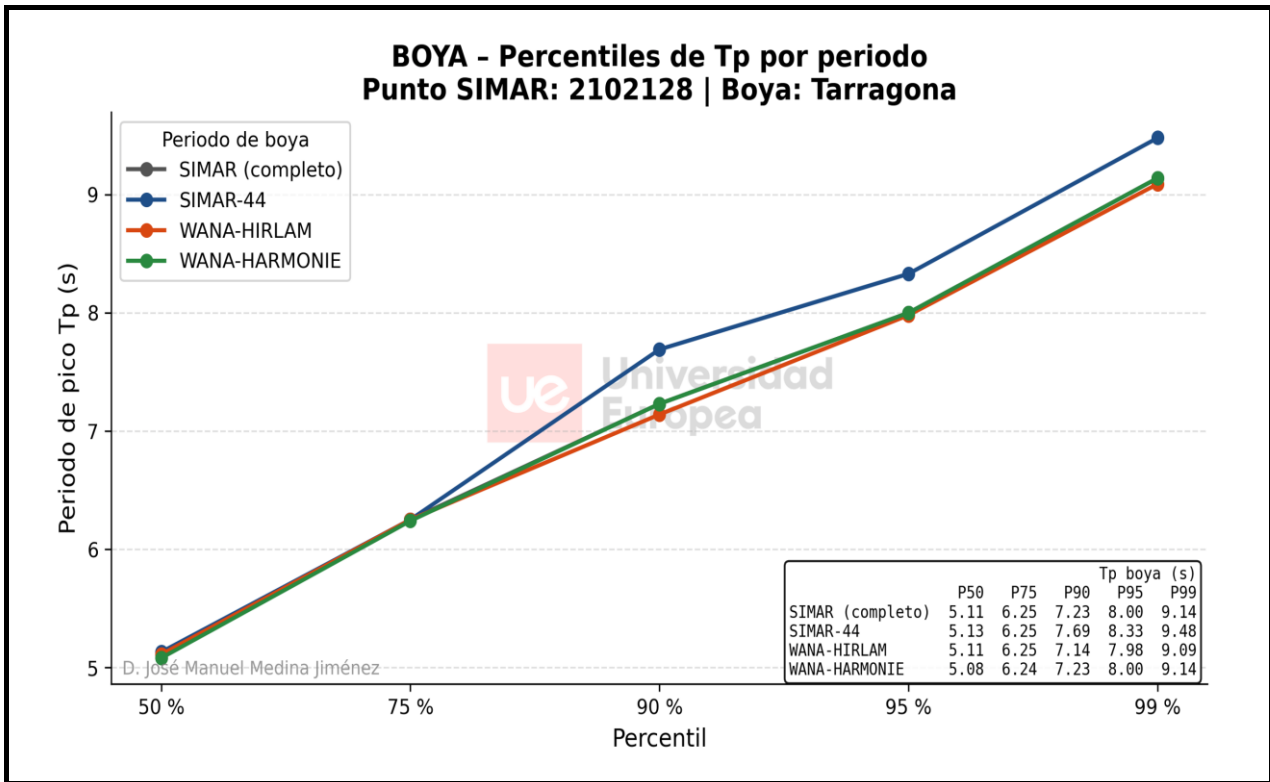
### 6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



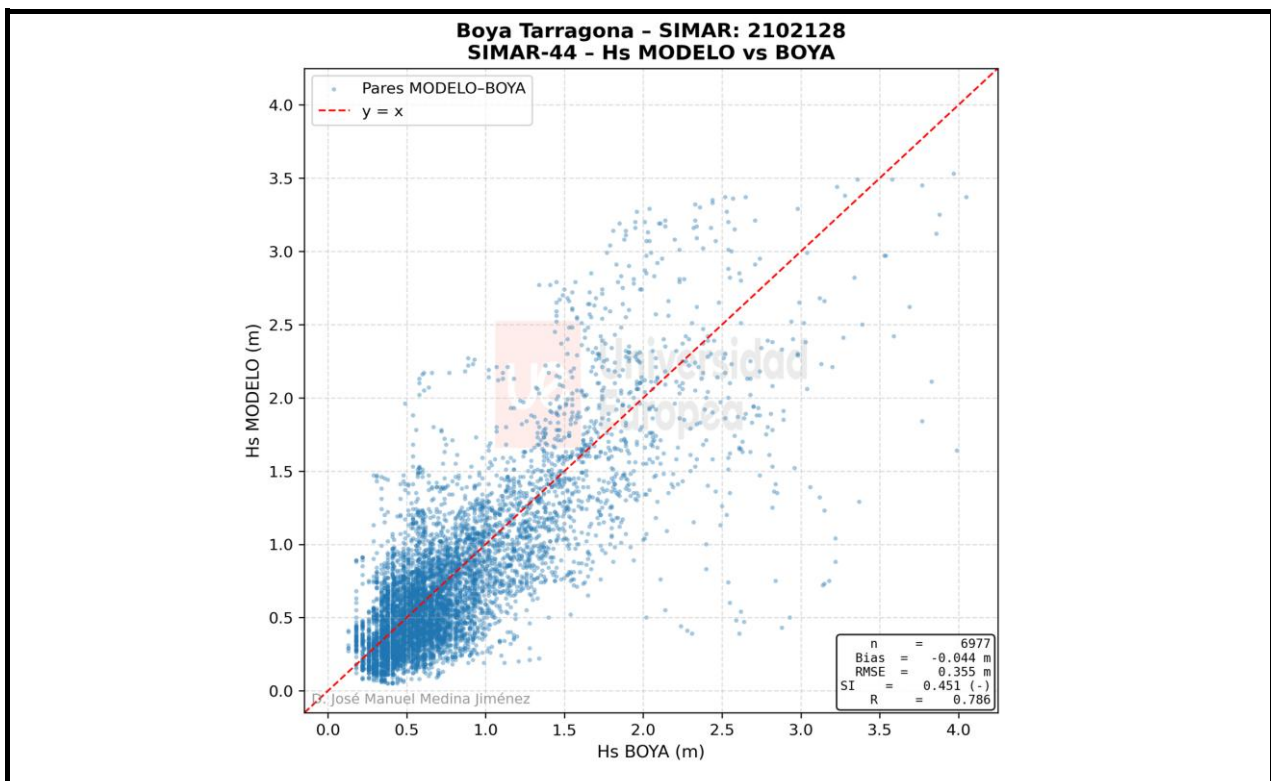
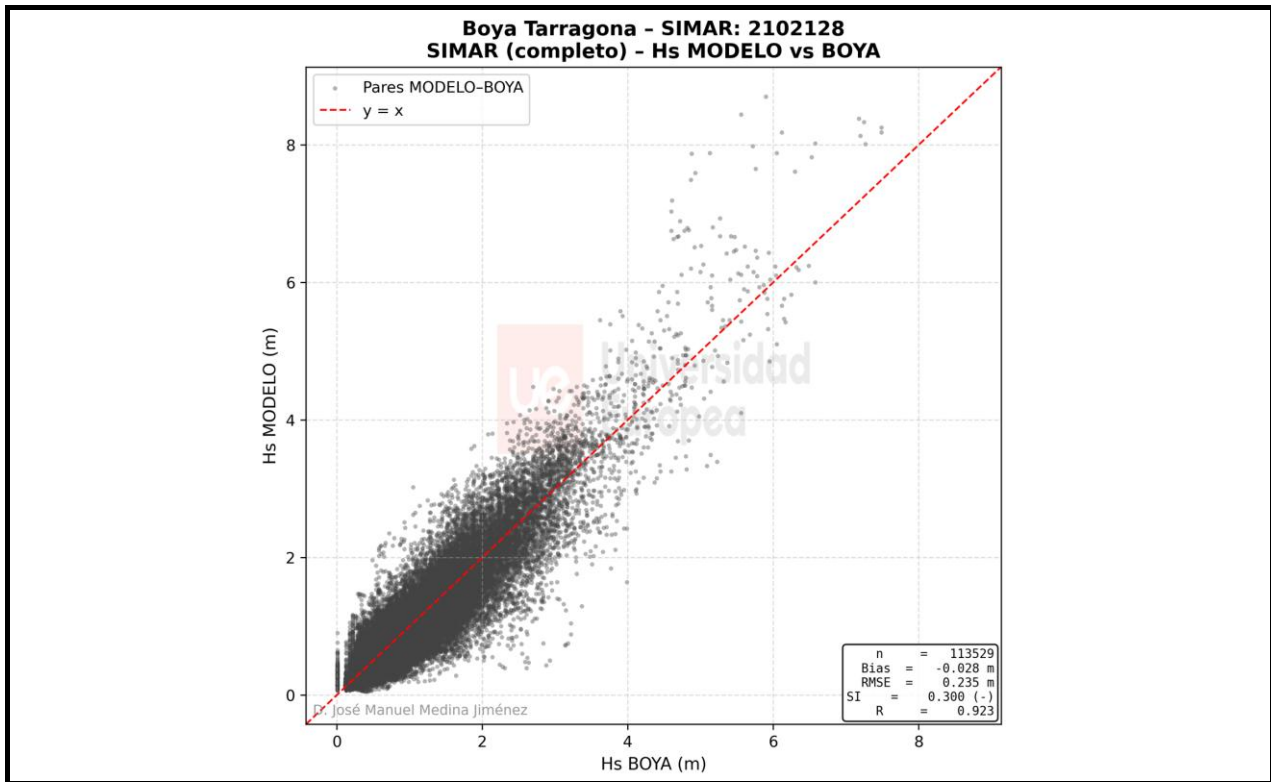
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

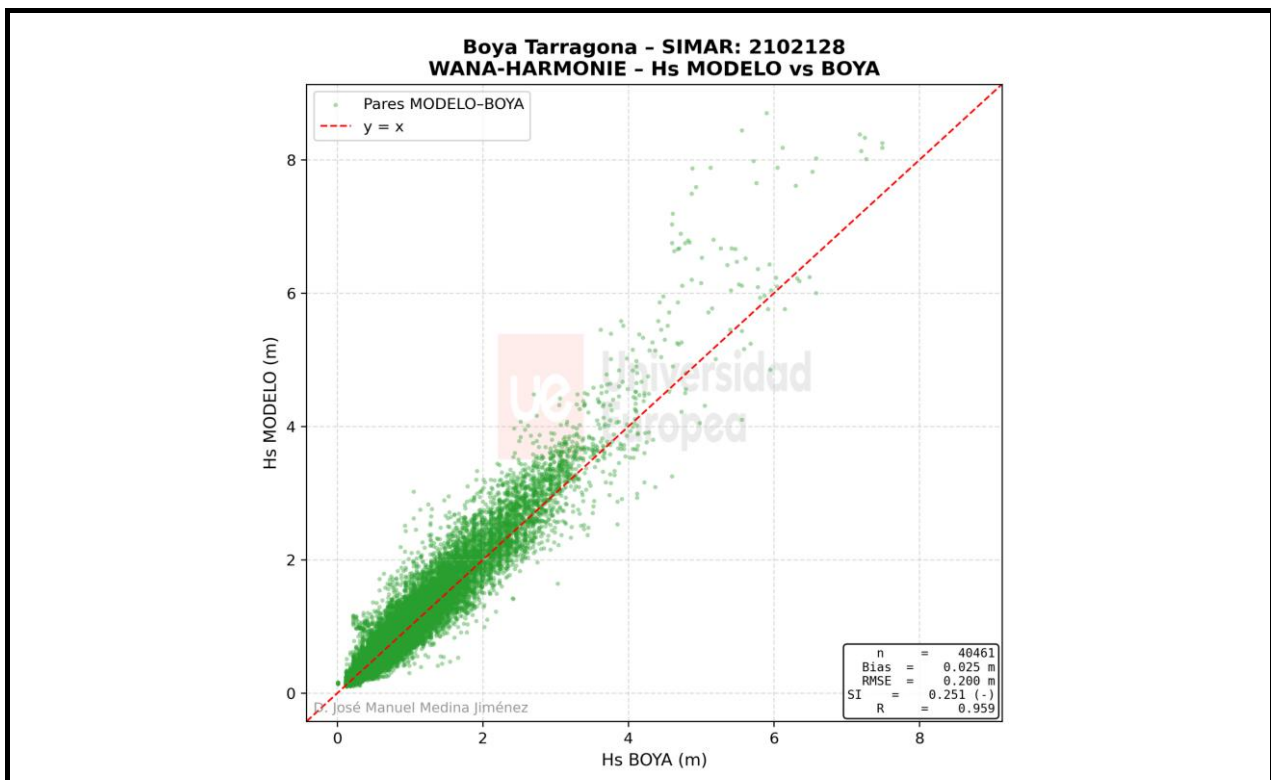
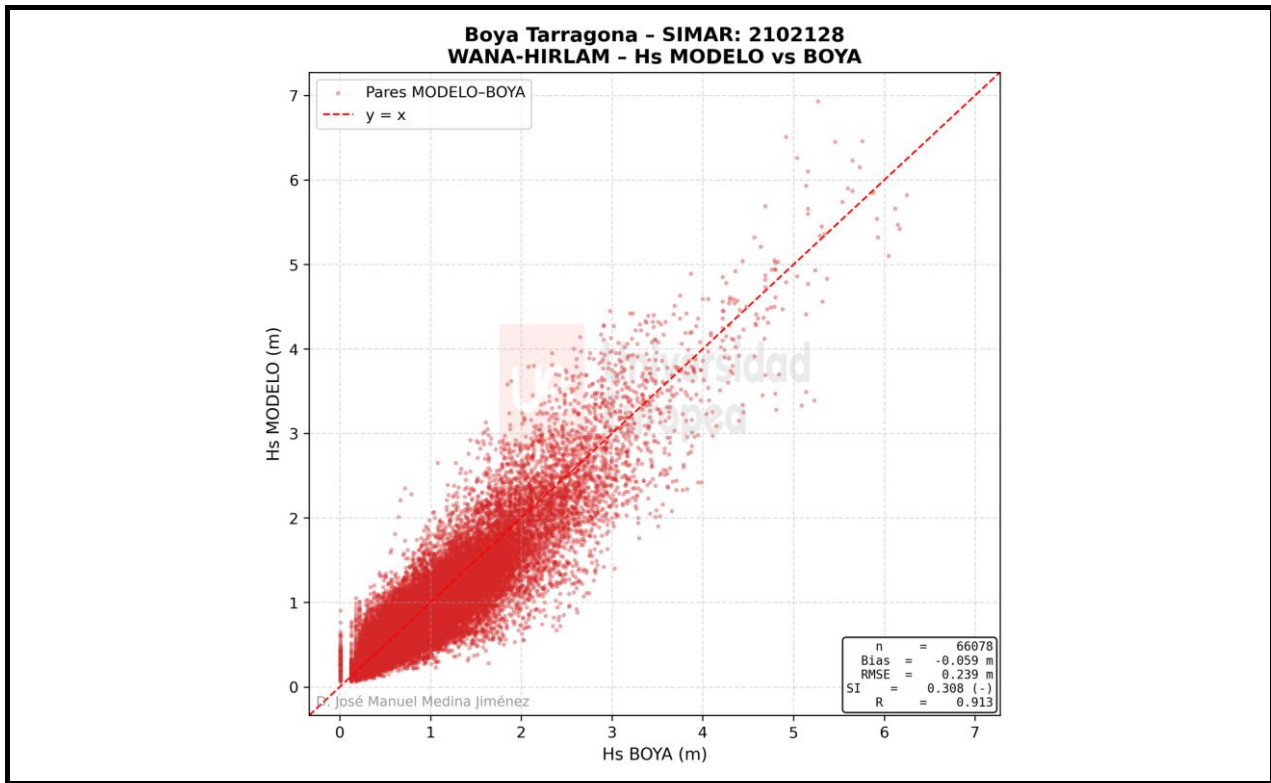


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

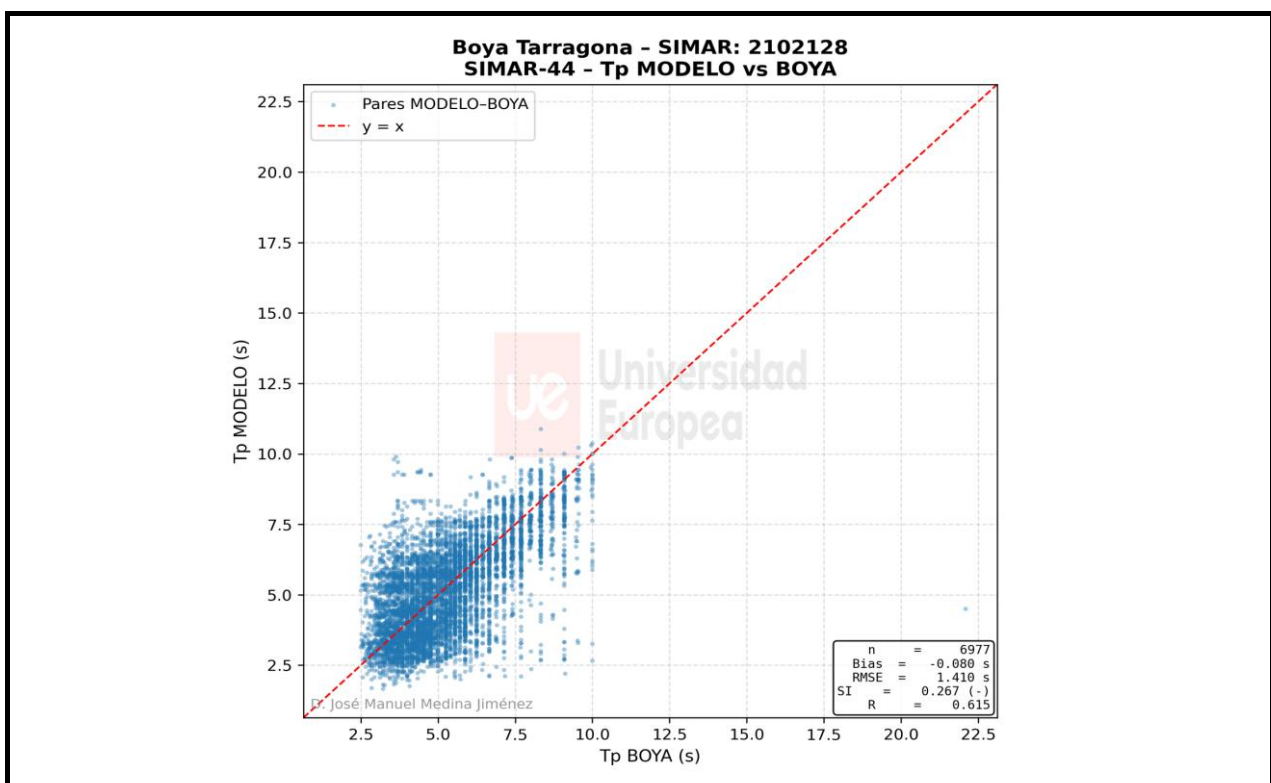
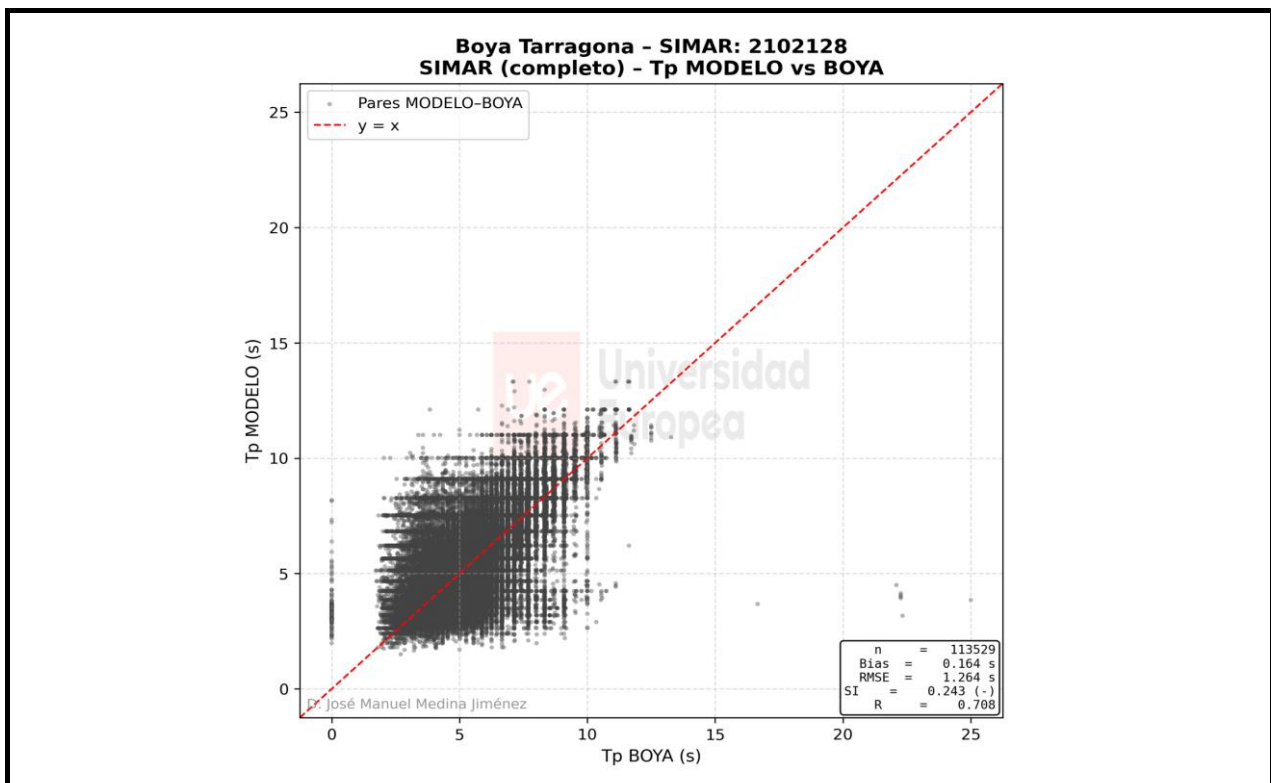


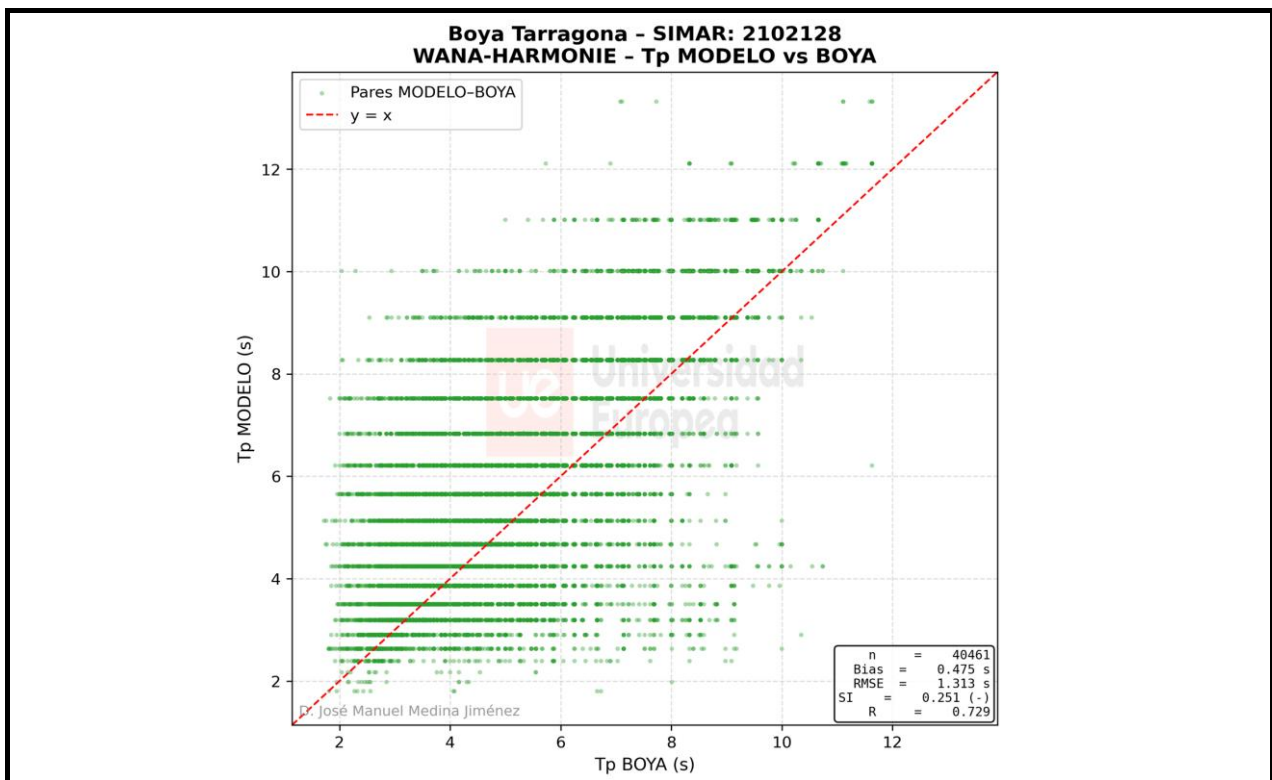
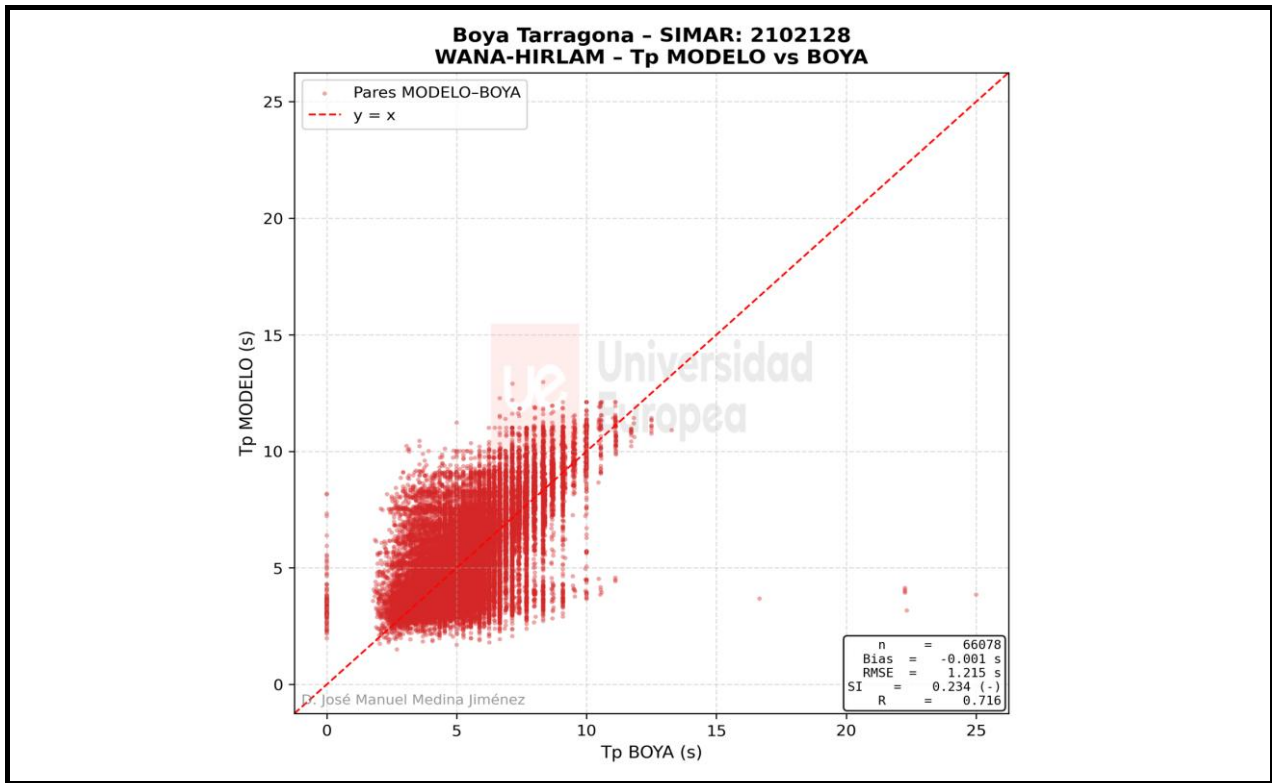
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs



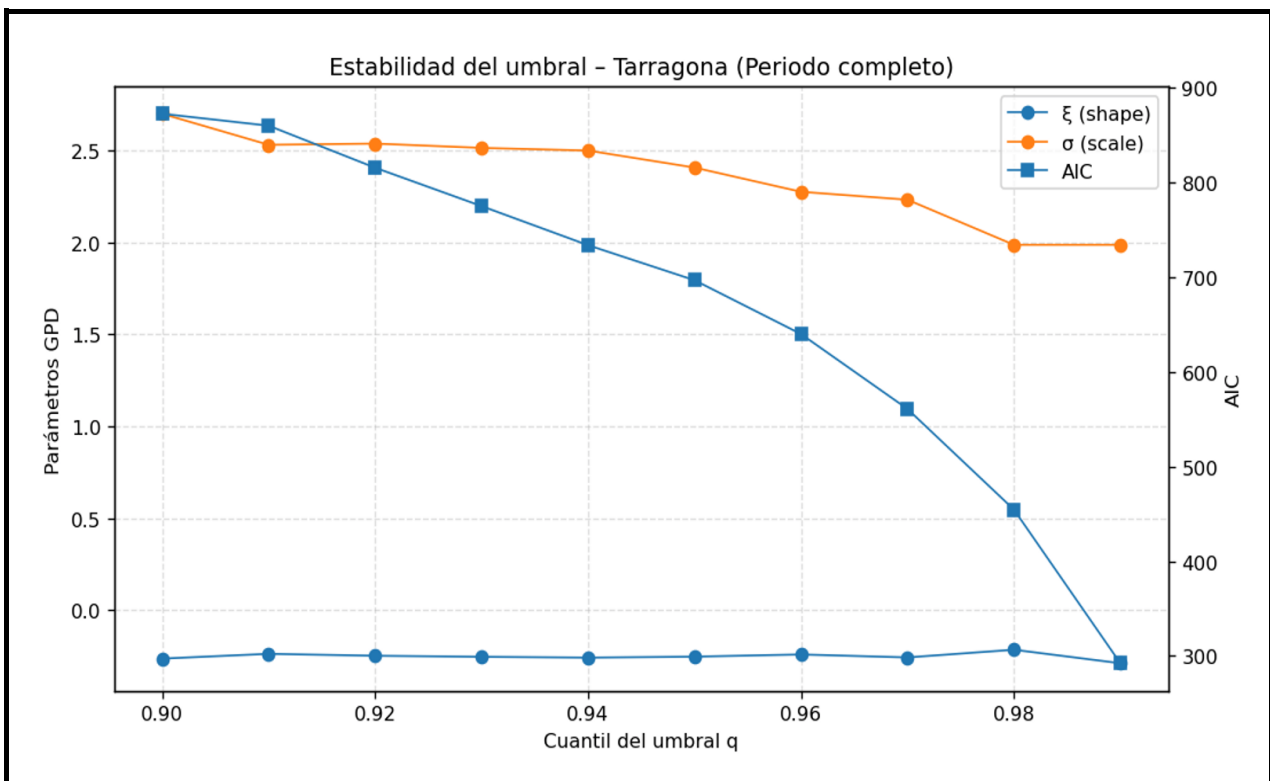
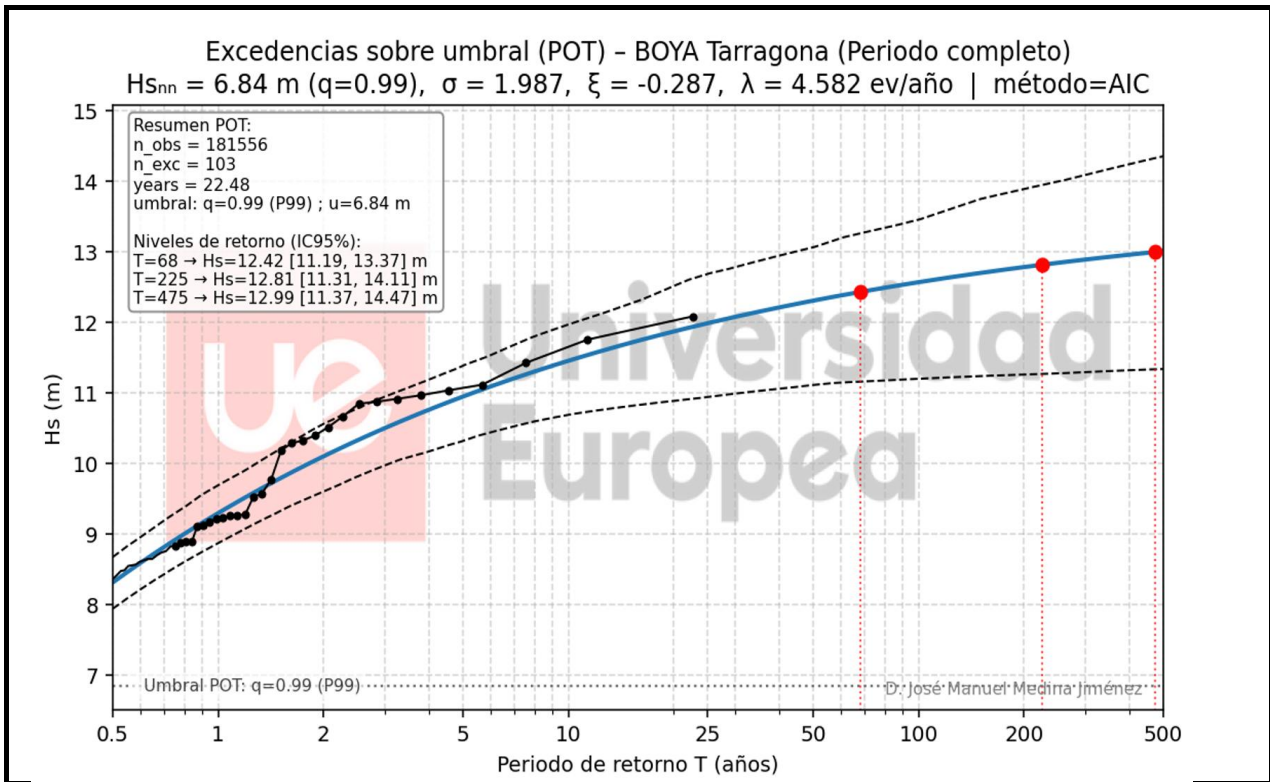


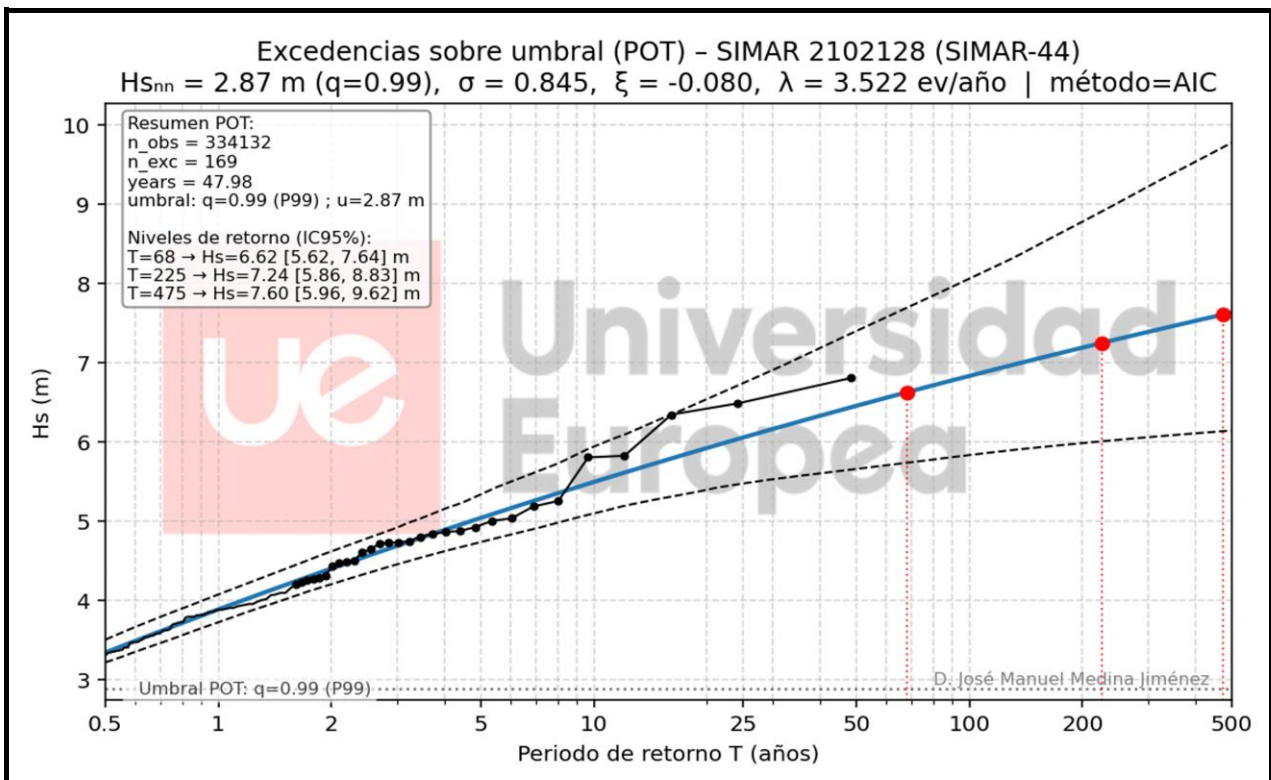
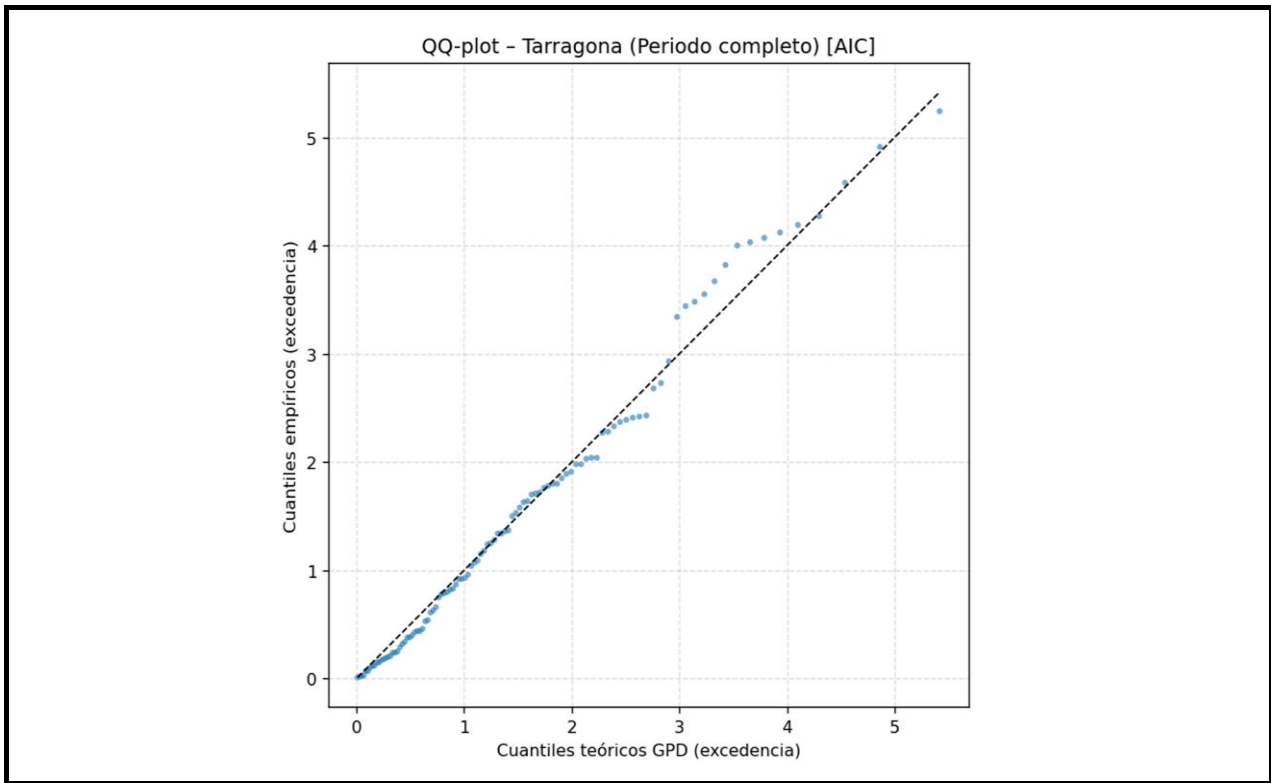
10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp

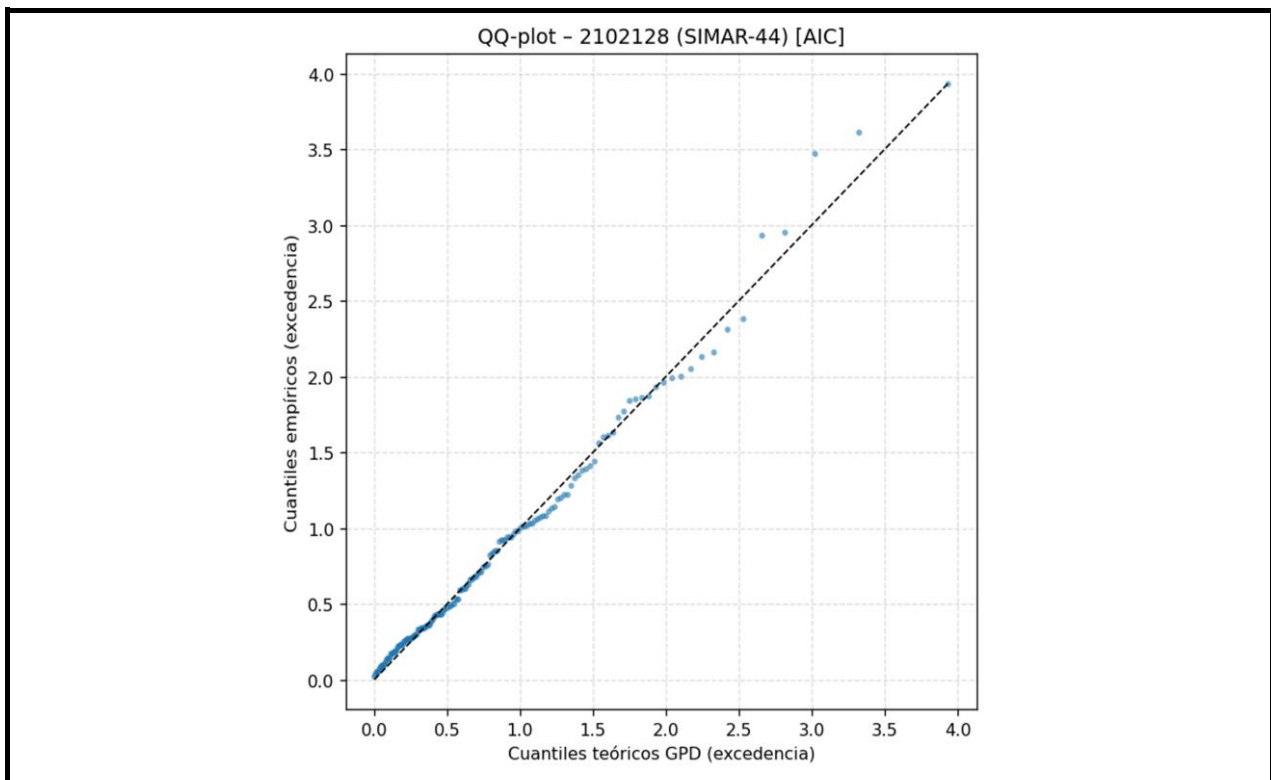
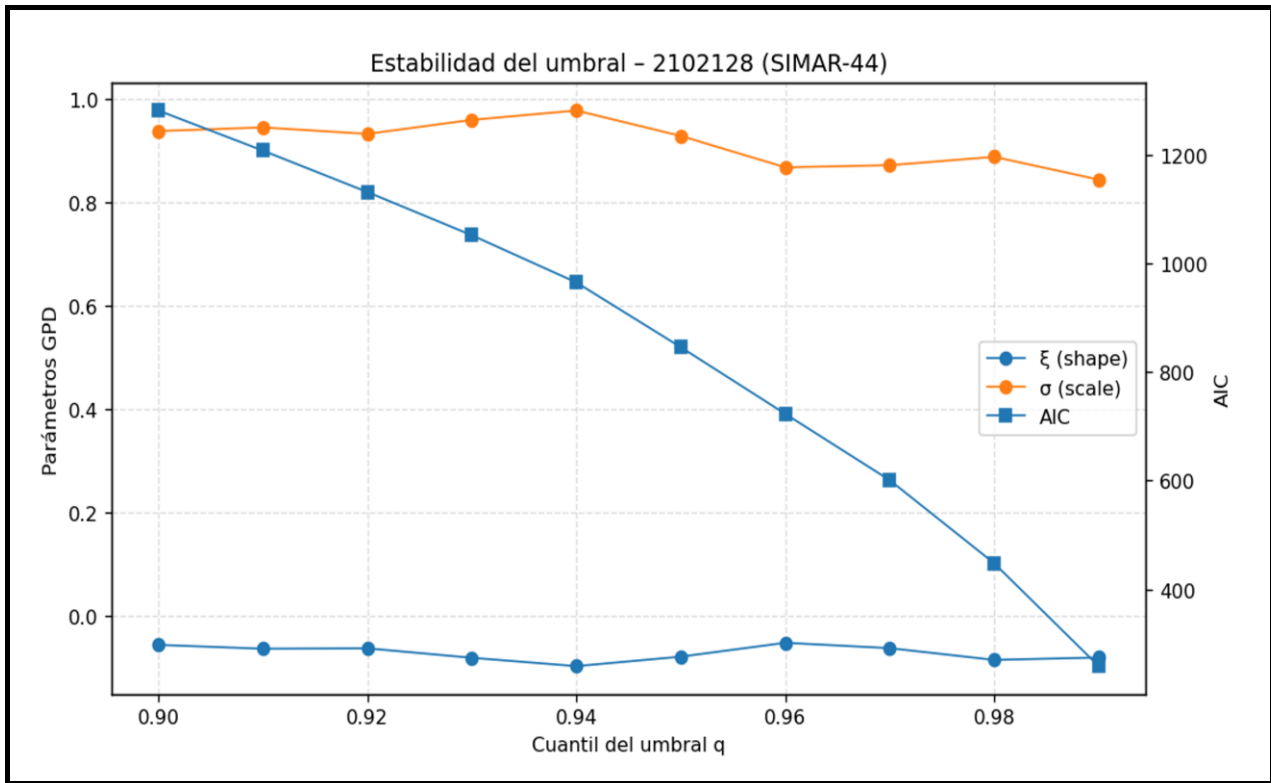


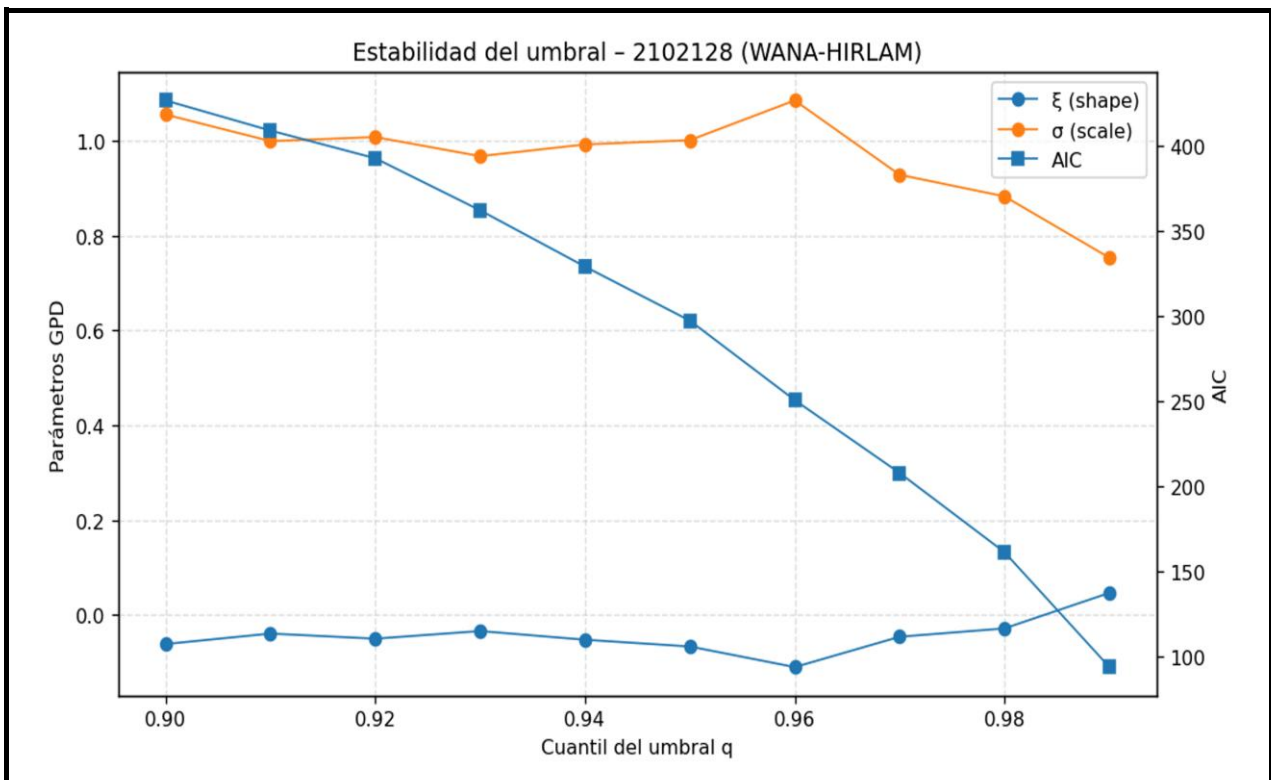
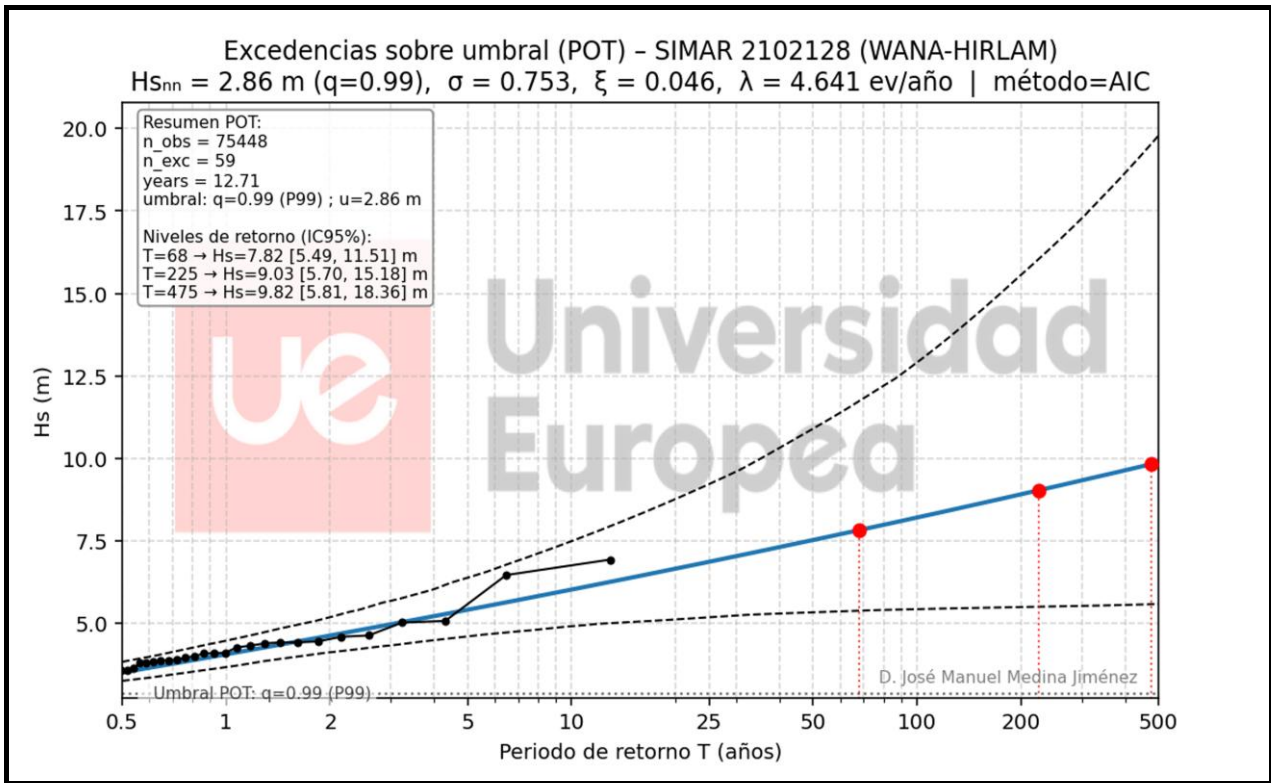


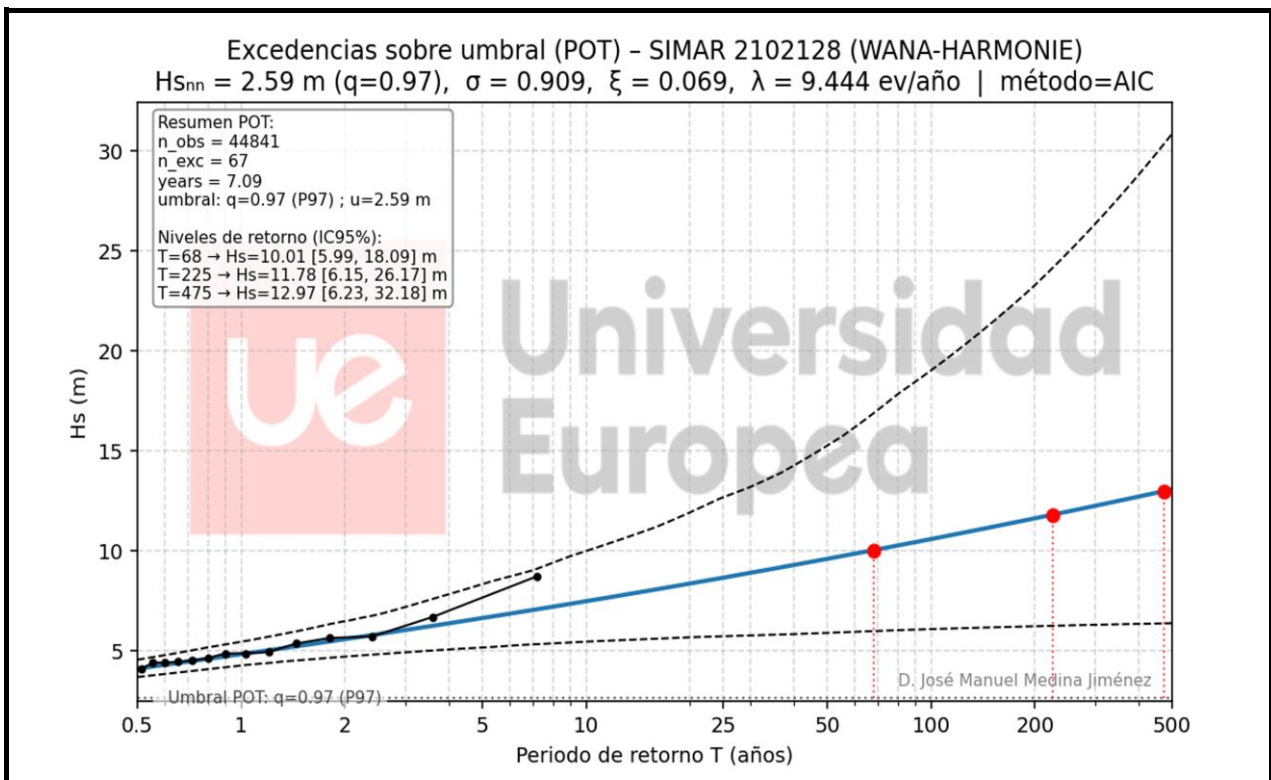
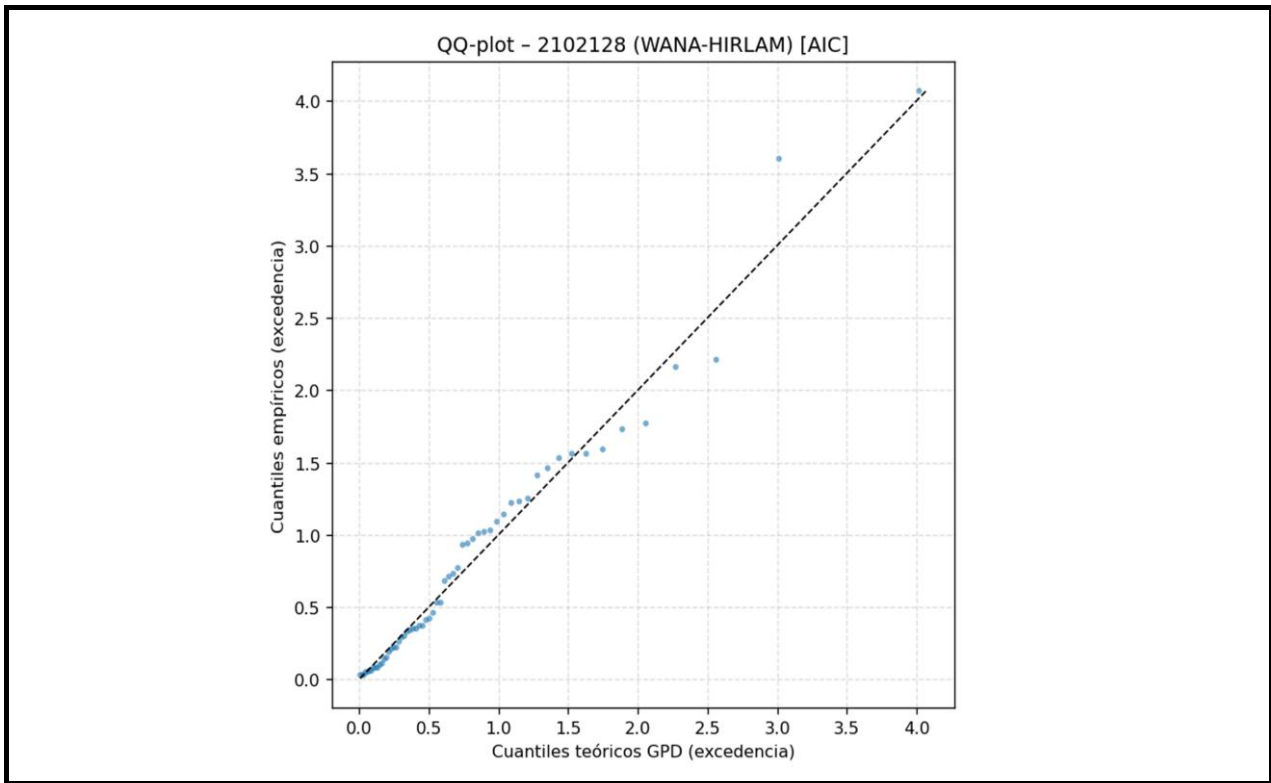
### 11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

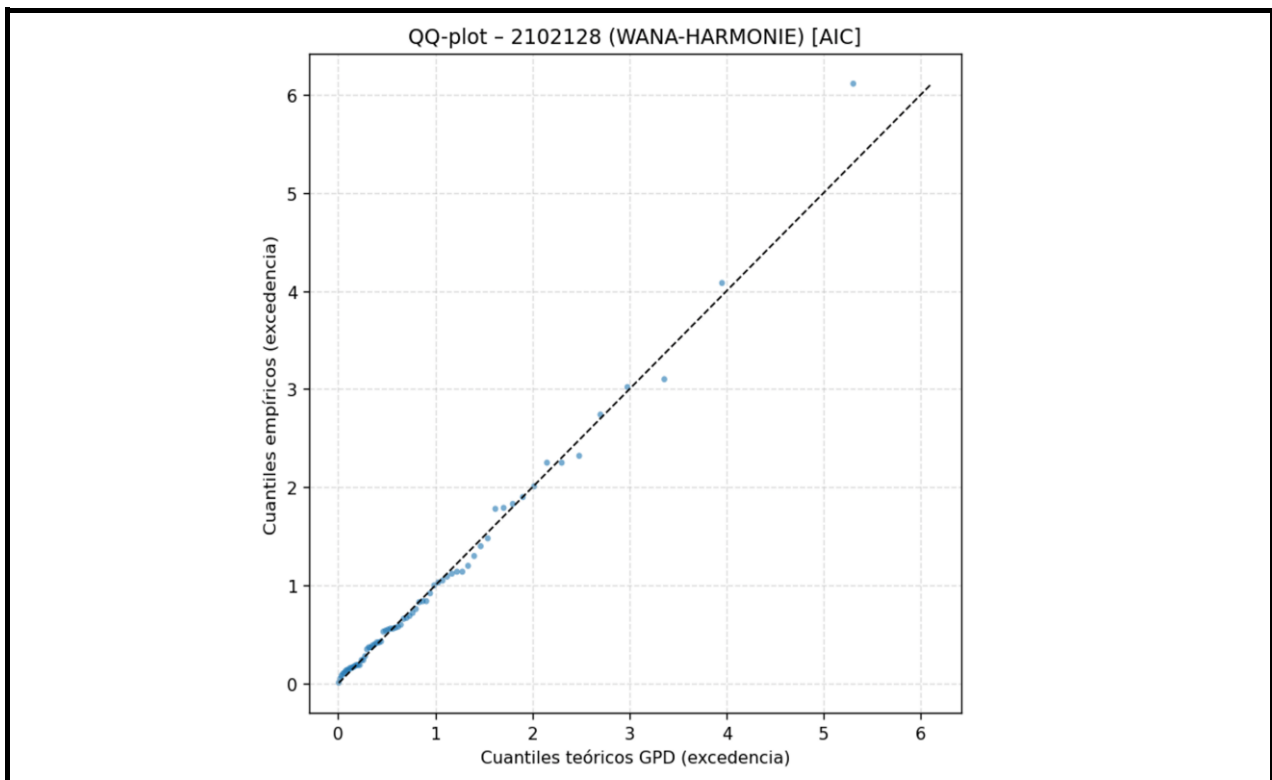
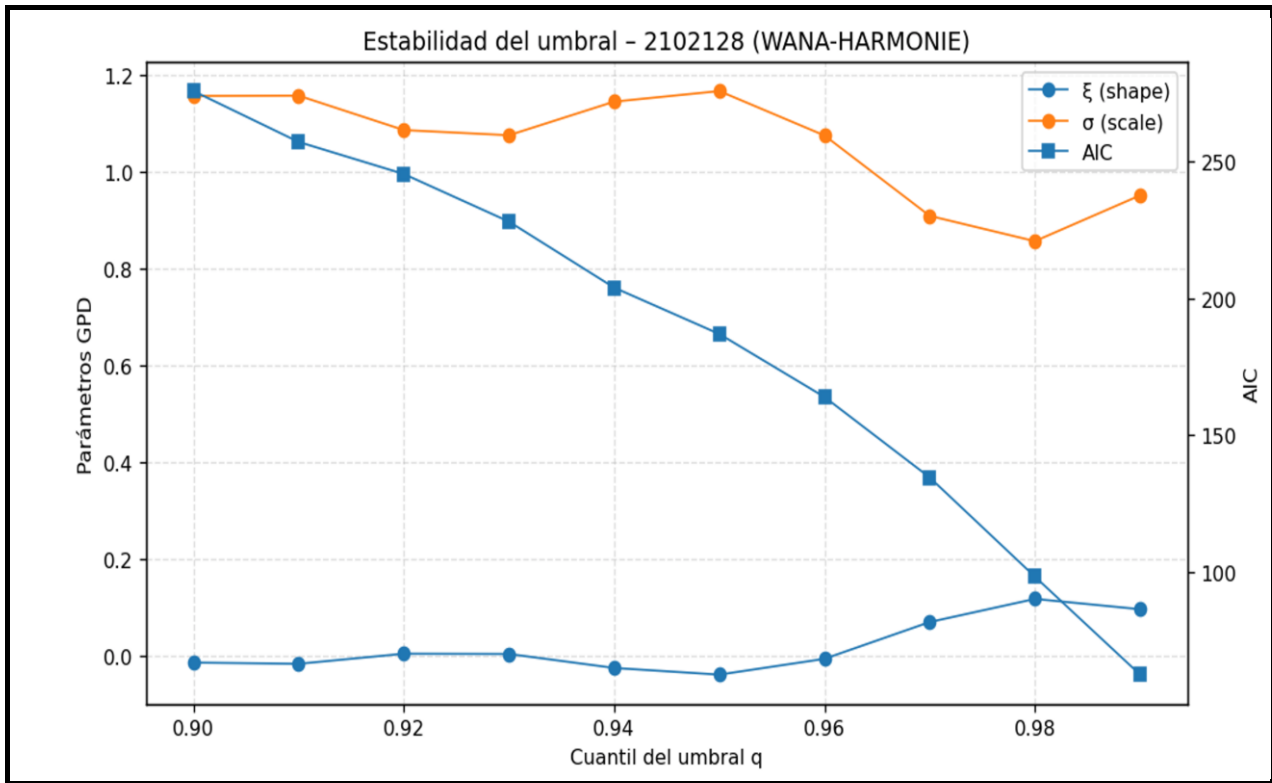


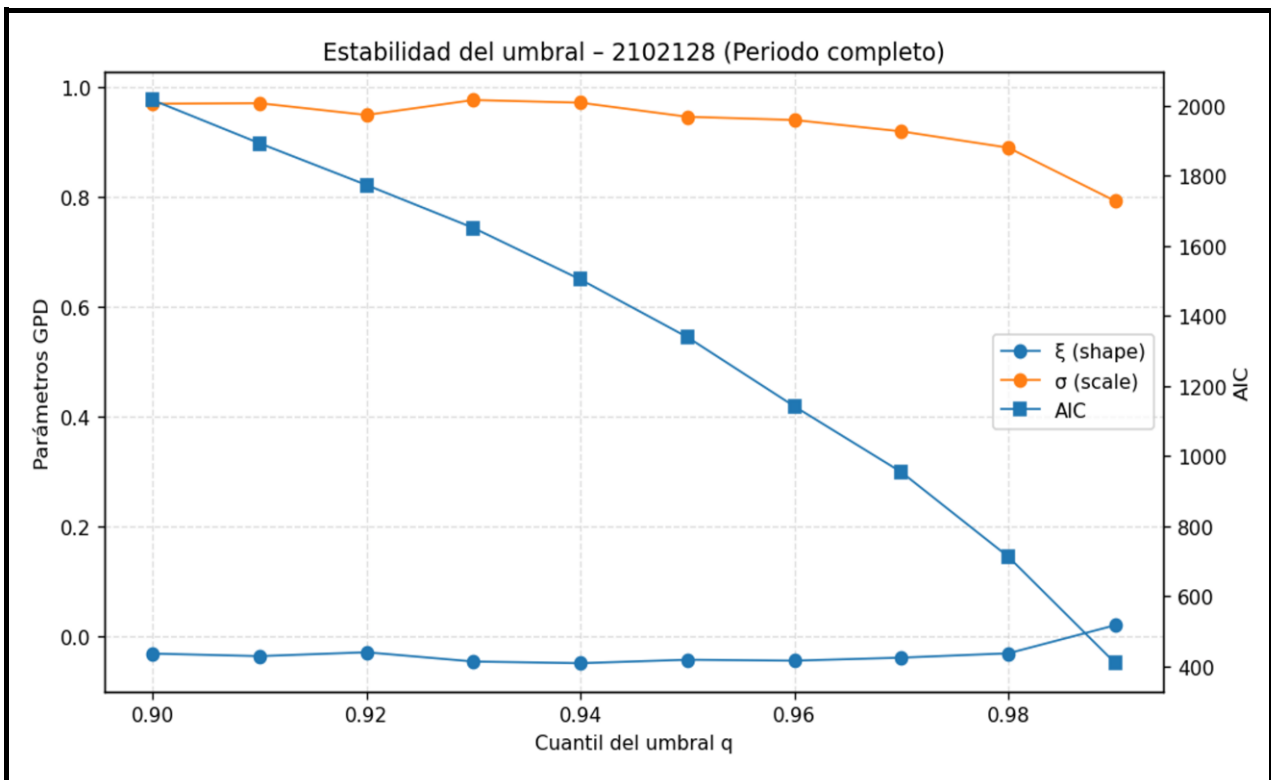
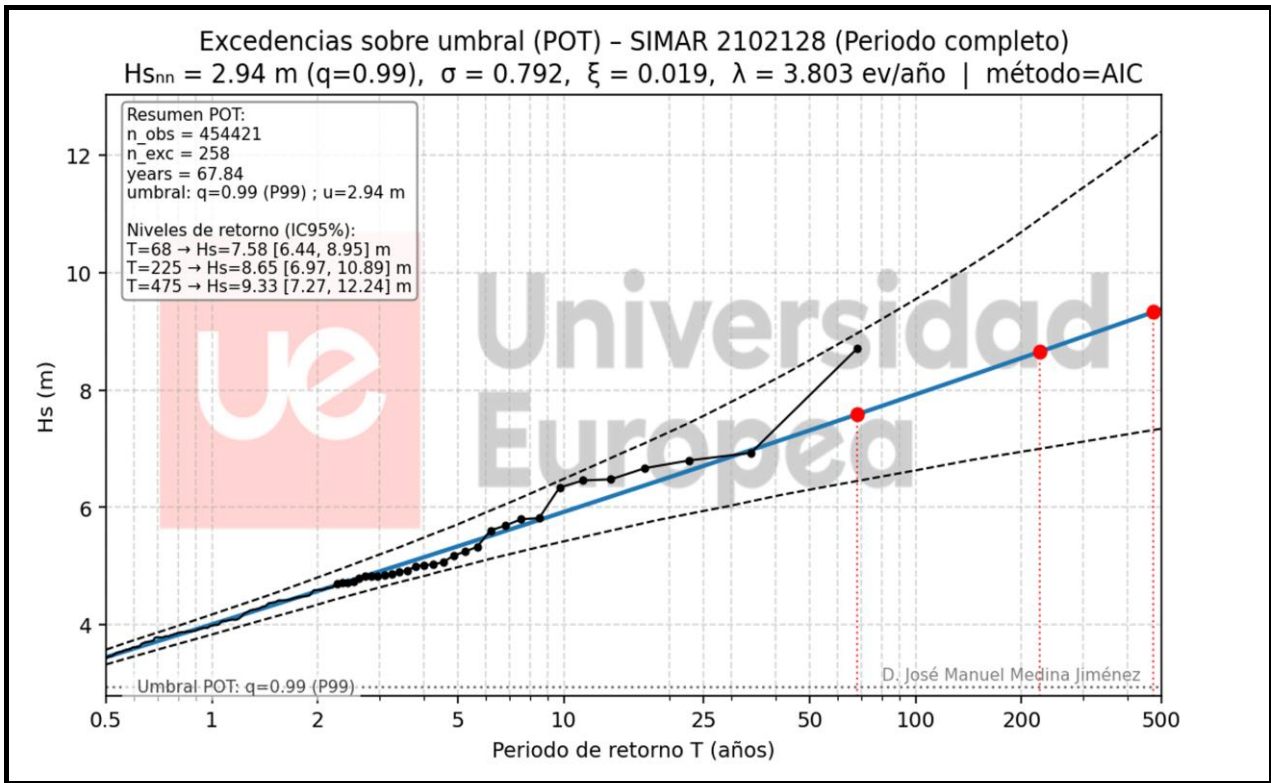


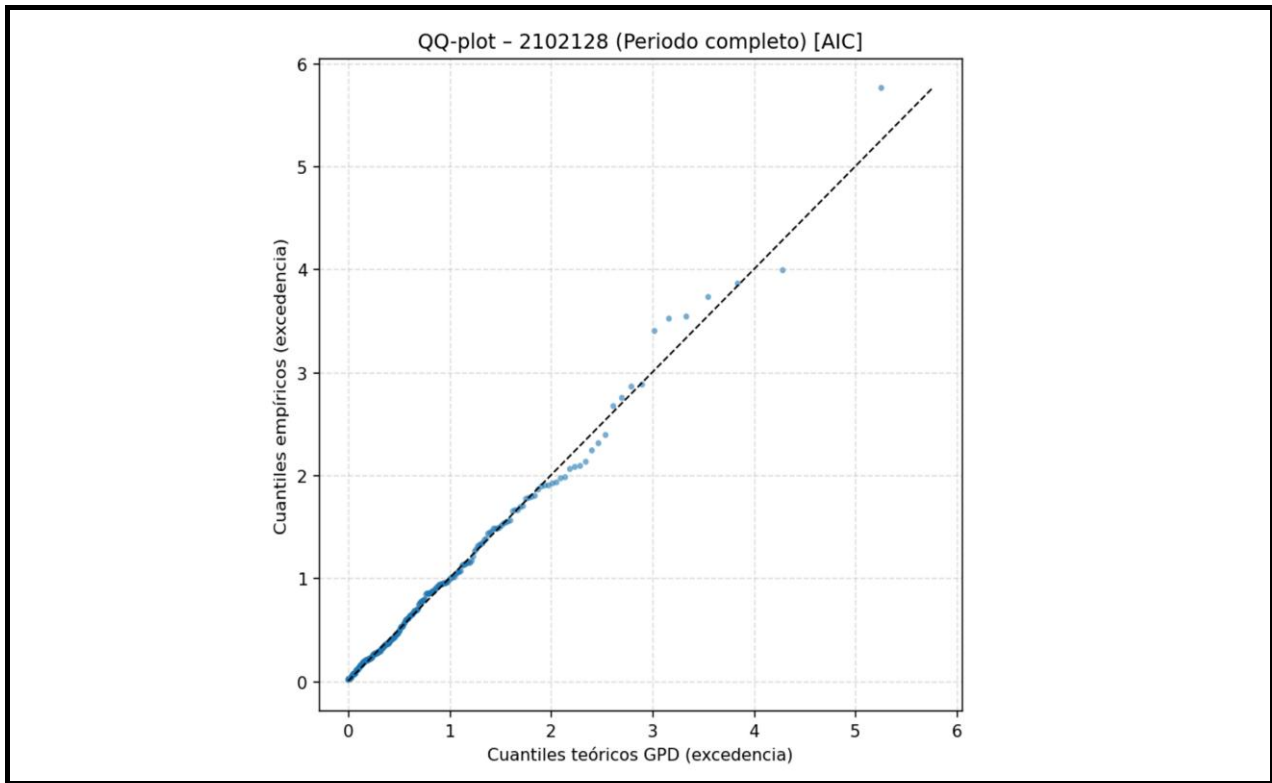













 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA Nº5 : PUNTO SIMAR 1017013 - BOYA GRAN CANARIA</b>	
<b>Identificación del punto</b>		<b>Localización y referencia</b>	
<b>Boya:</b>	Gran Canaria	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (Zona 28 R)
<b>Nodo SIMAR:</b>	1017013	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	28 R 421486.27 3119616.75
<b>Fachada marítima:</b>	Norte Canarias	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	28 R 421486.27 3119616.75
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	710 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Gran Canaria / Punto SIMAR 1017013.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 1997-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1$  h)

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

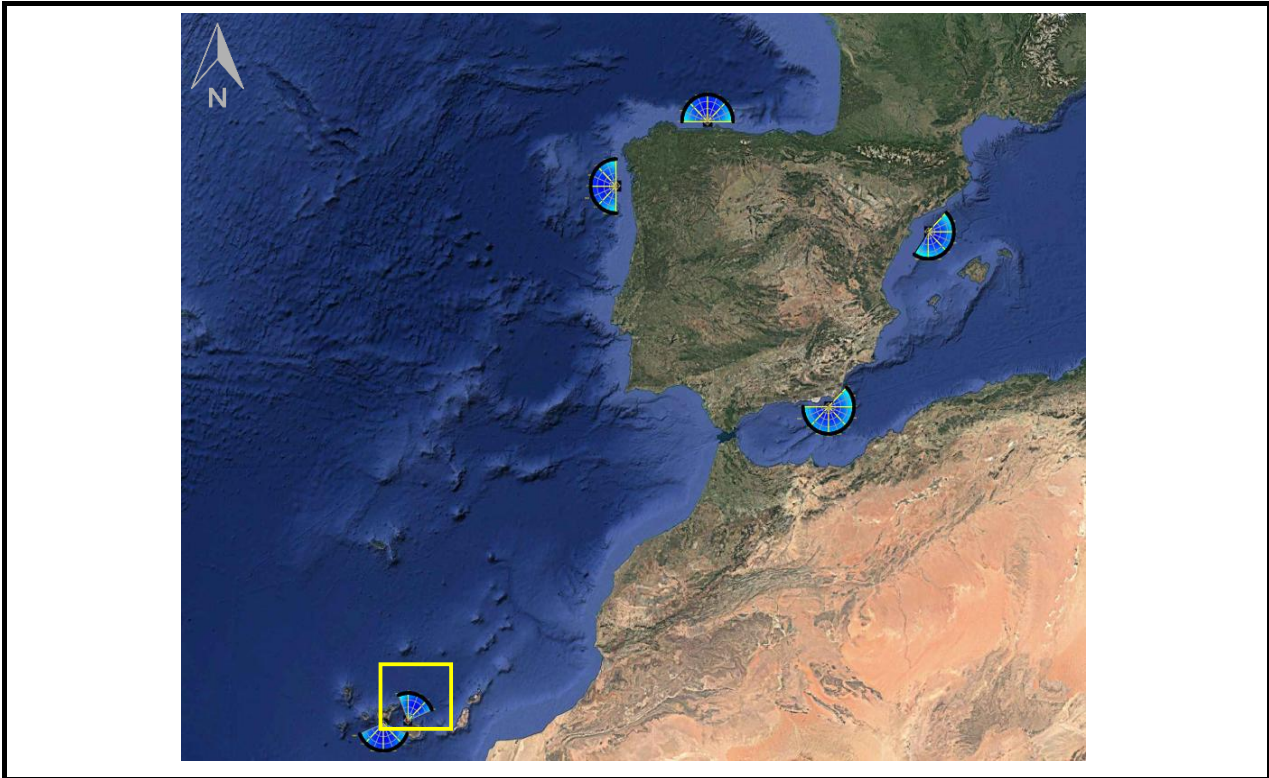
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

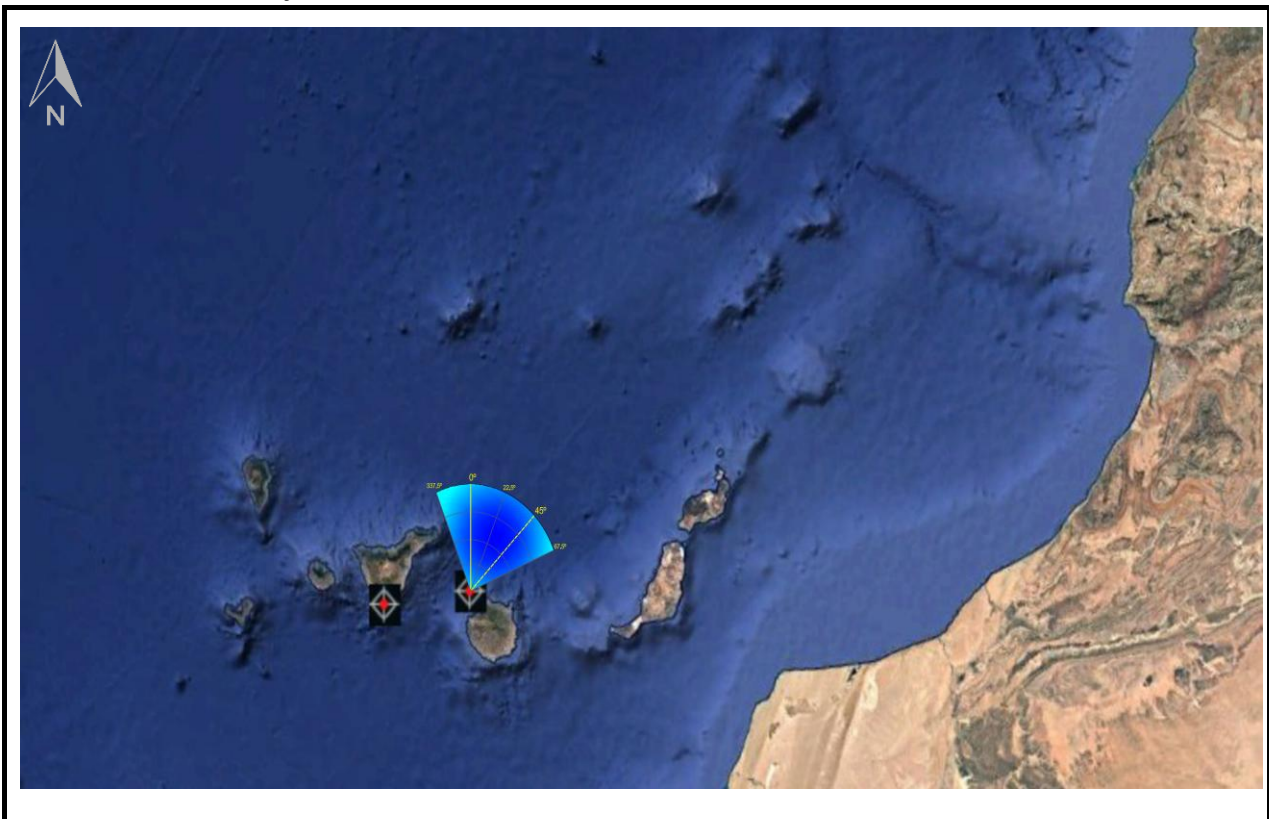
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

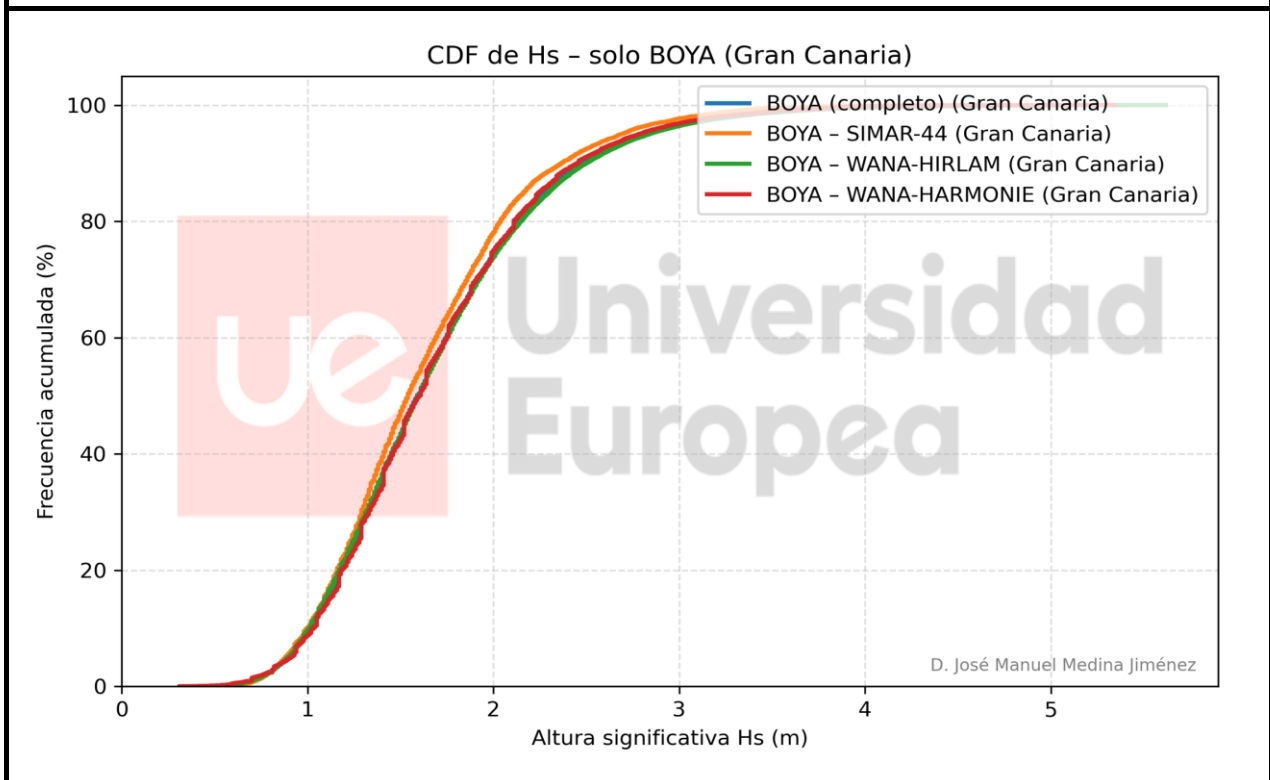
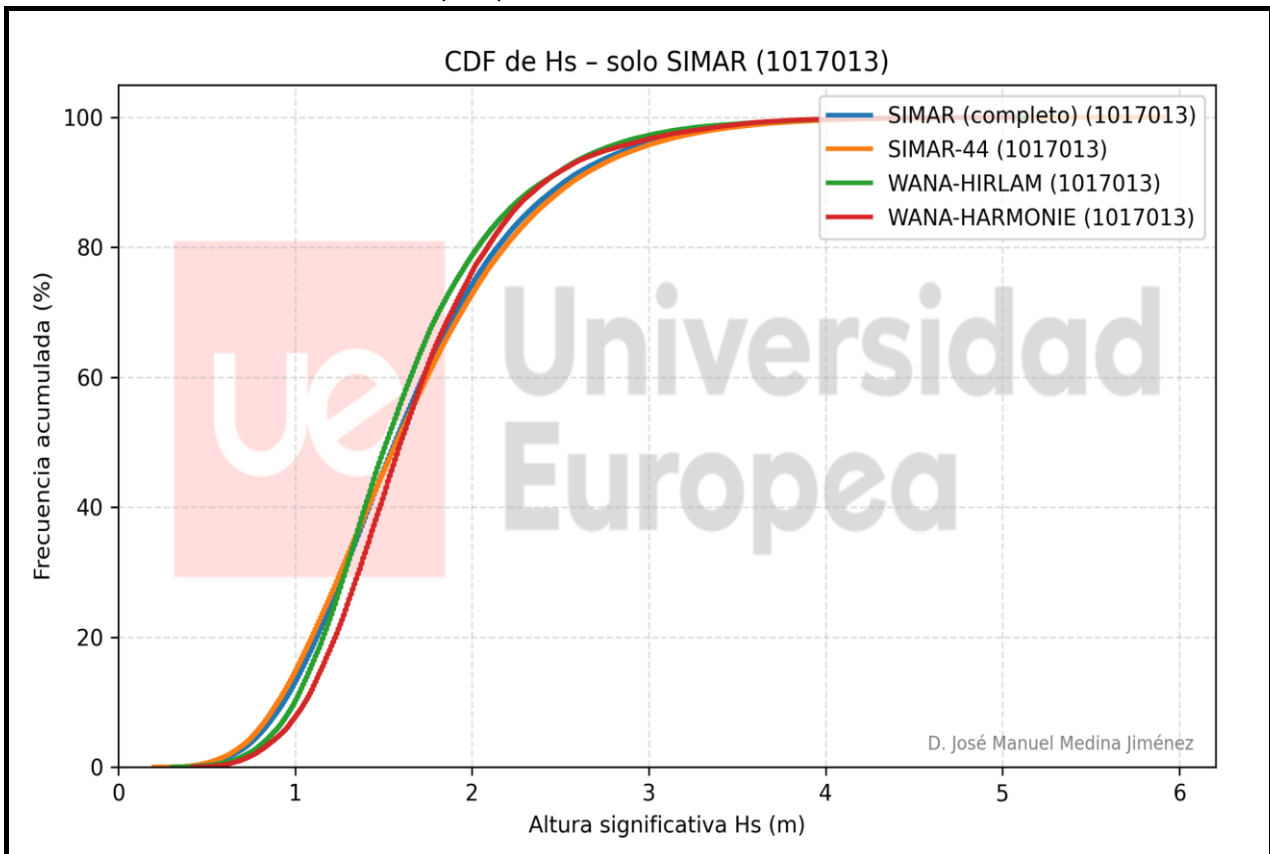


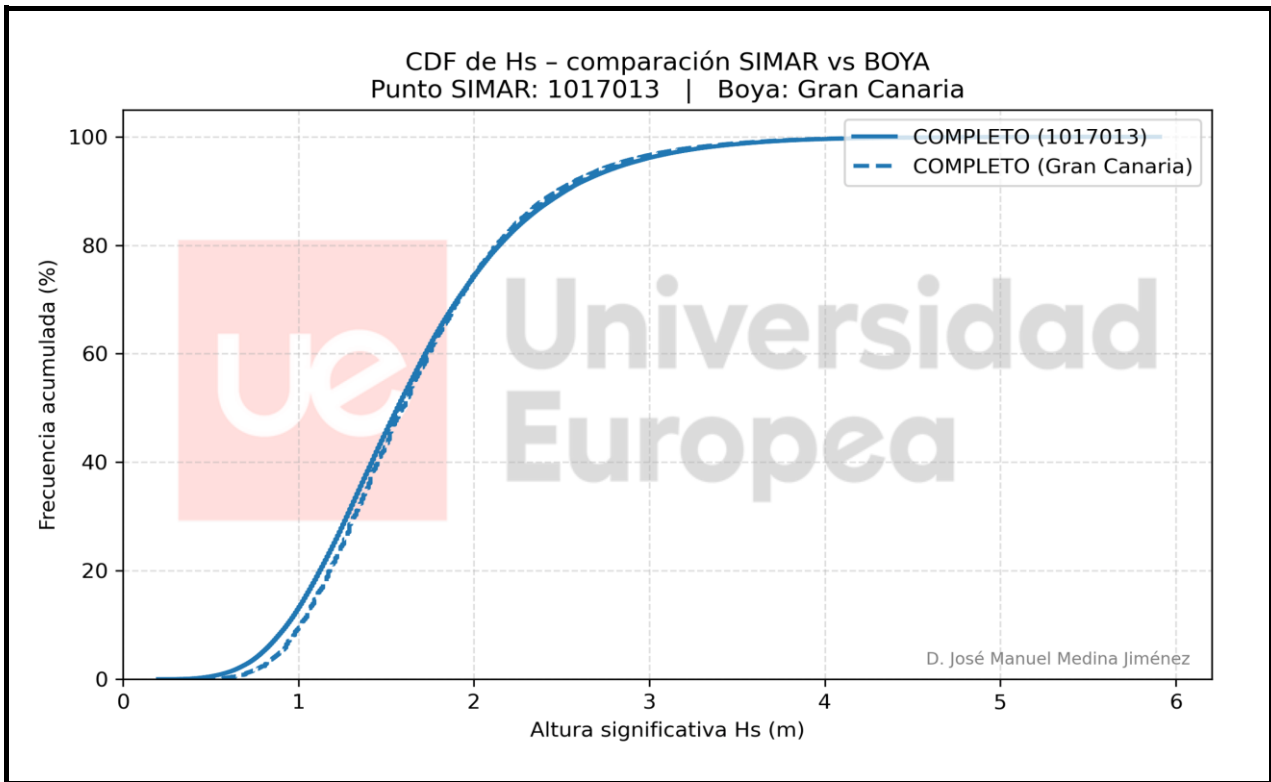
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



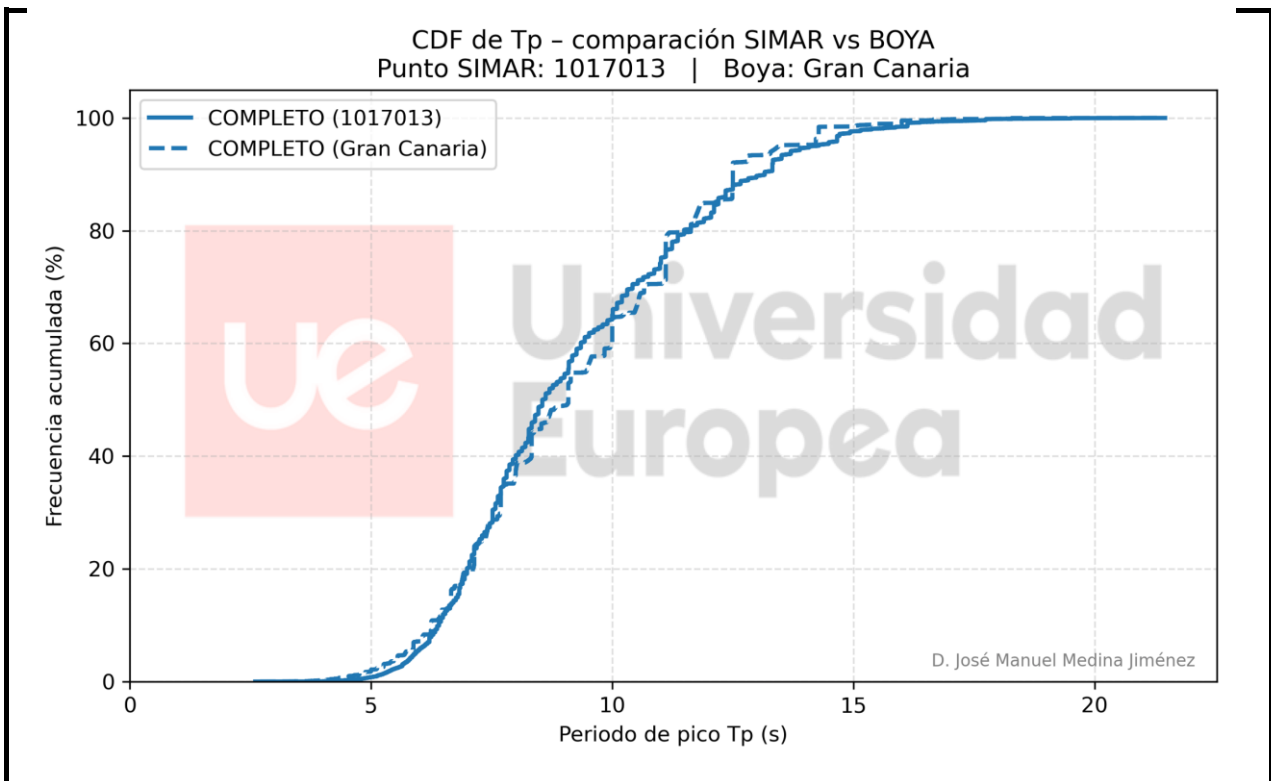
#### 4. Análisis Homogeneidad modelos

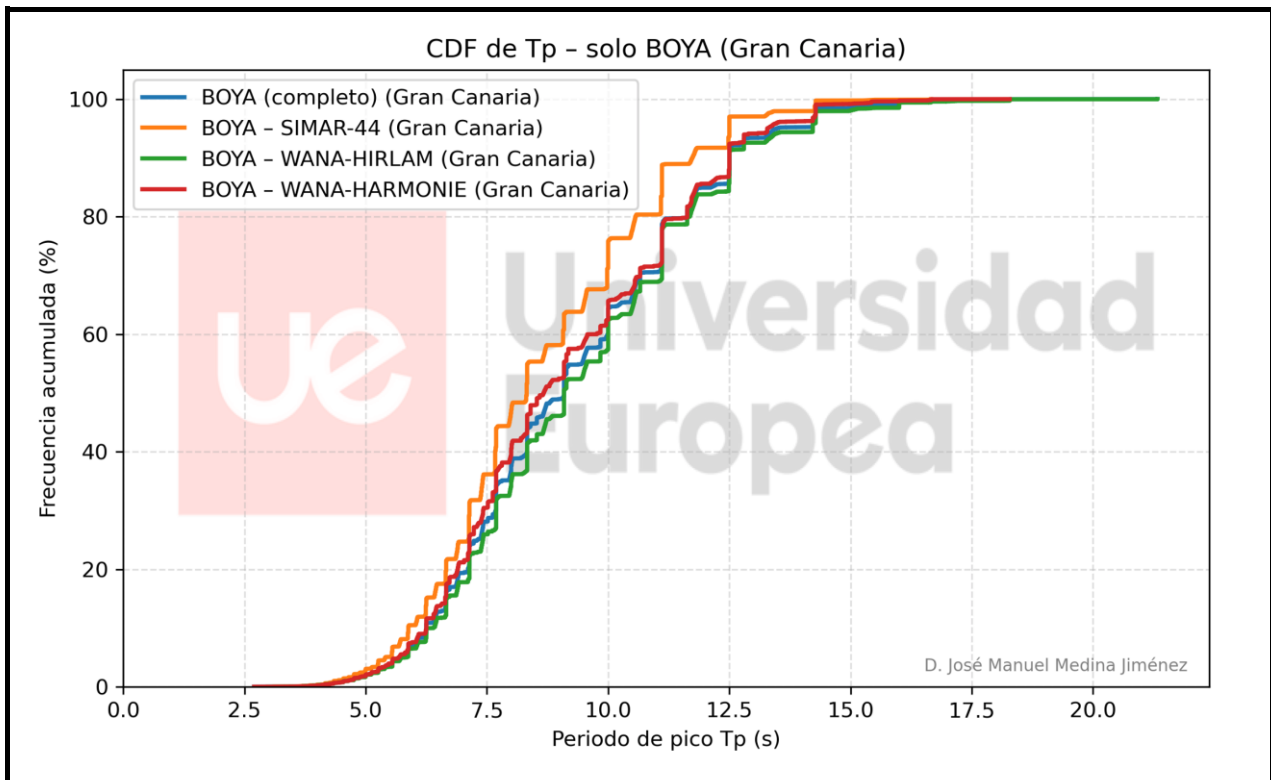
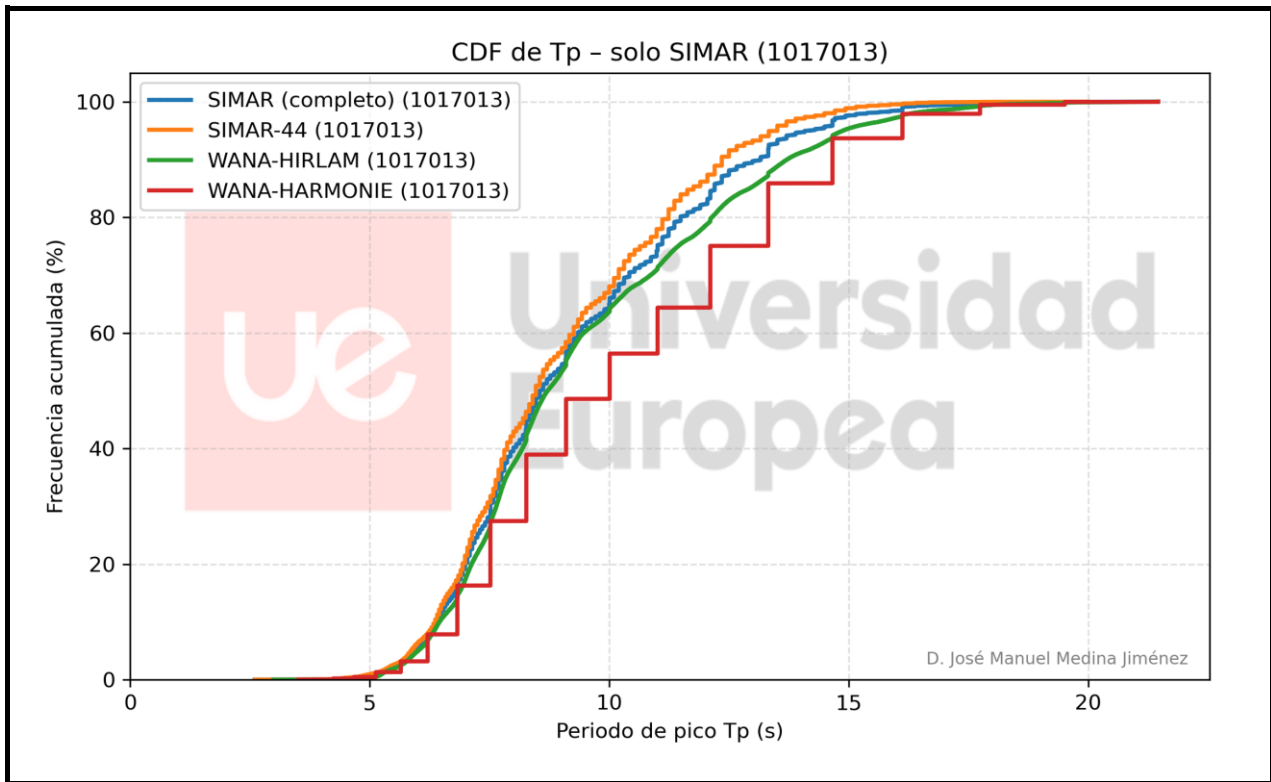
##### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



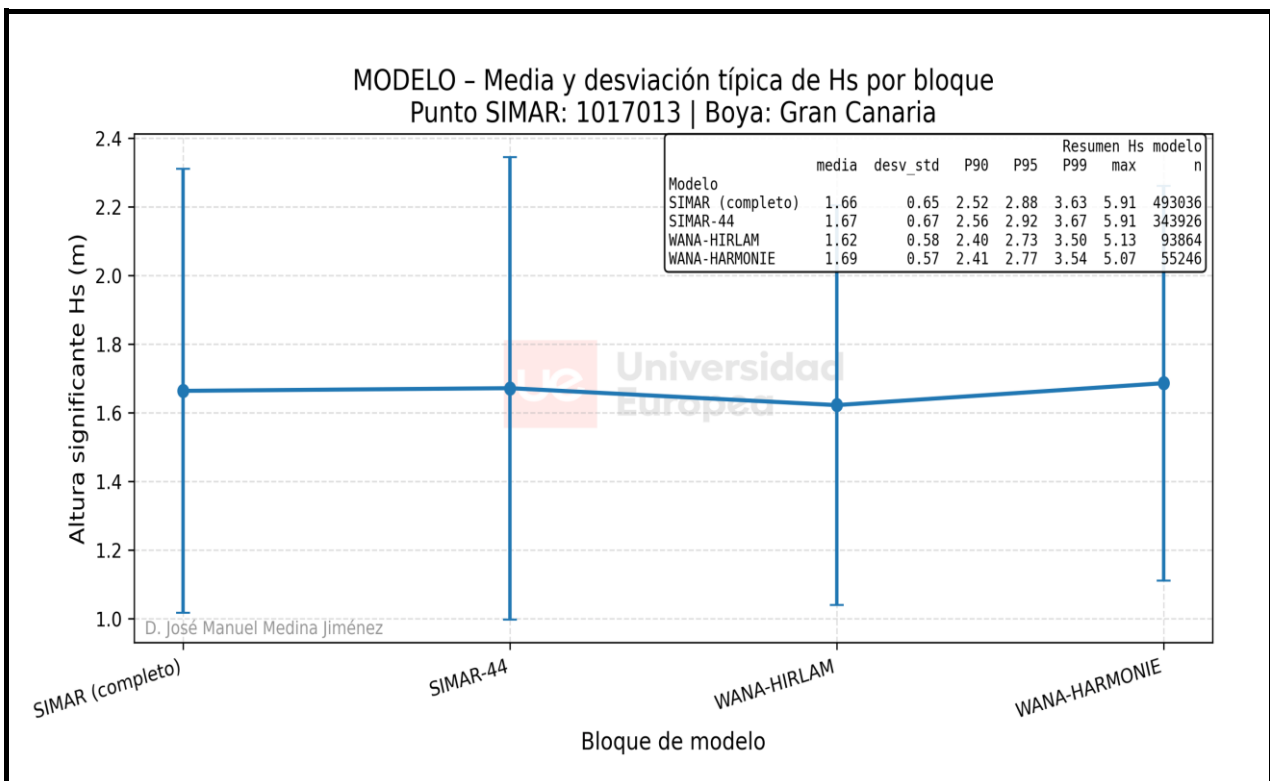
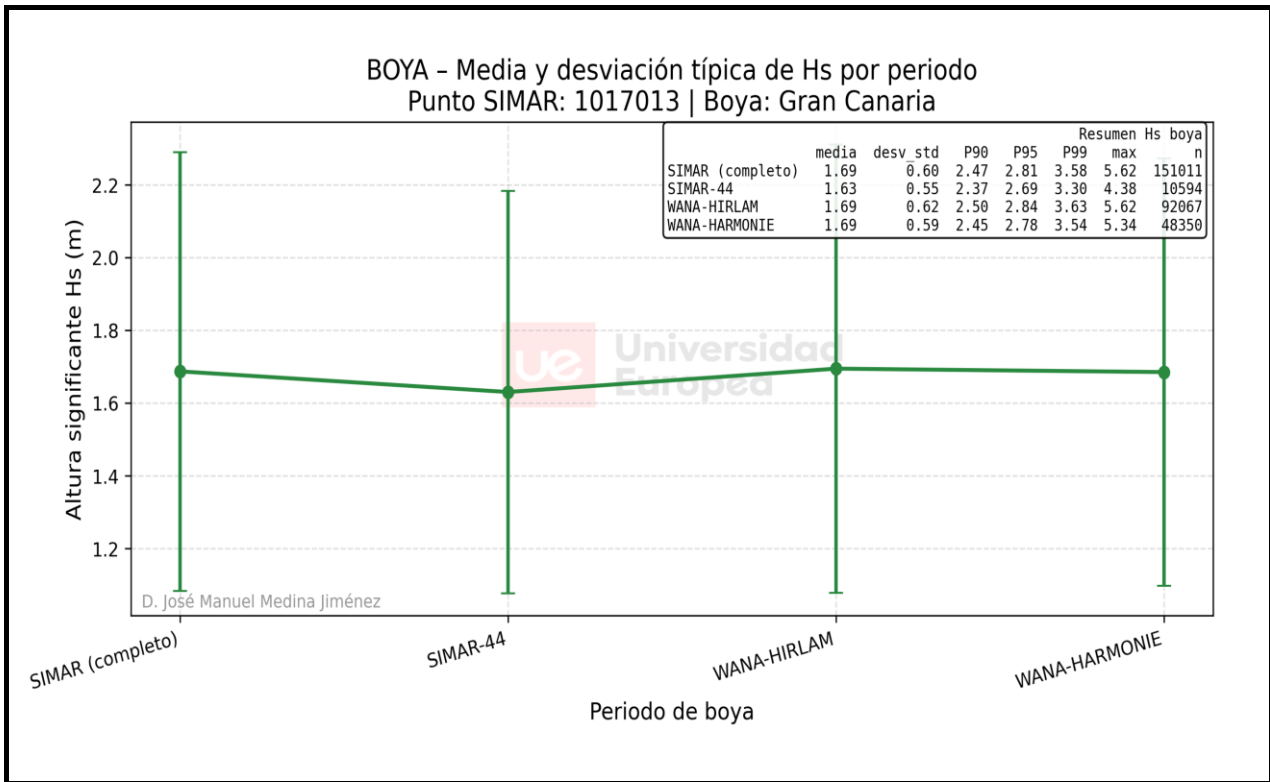


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

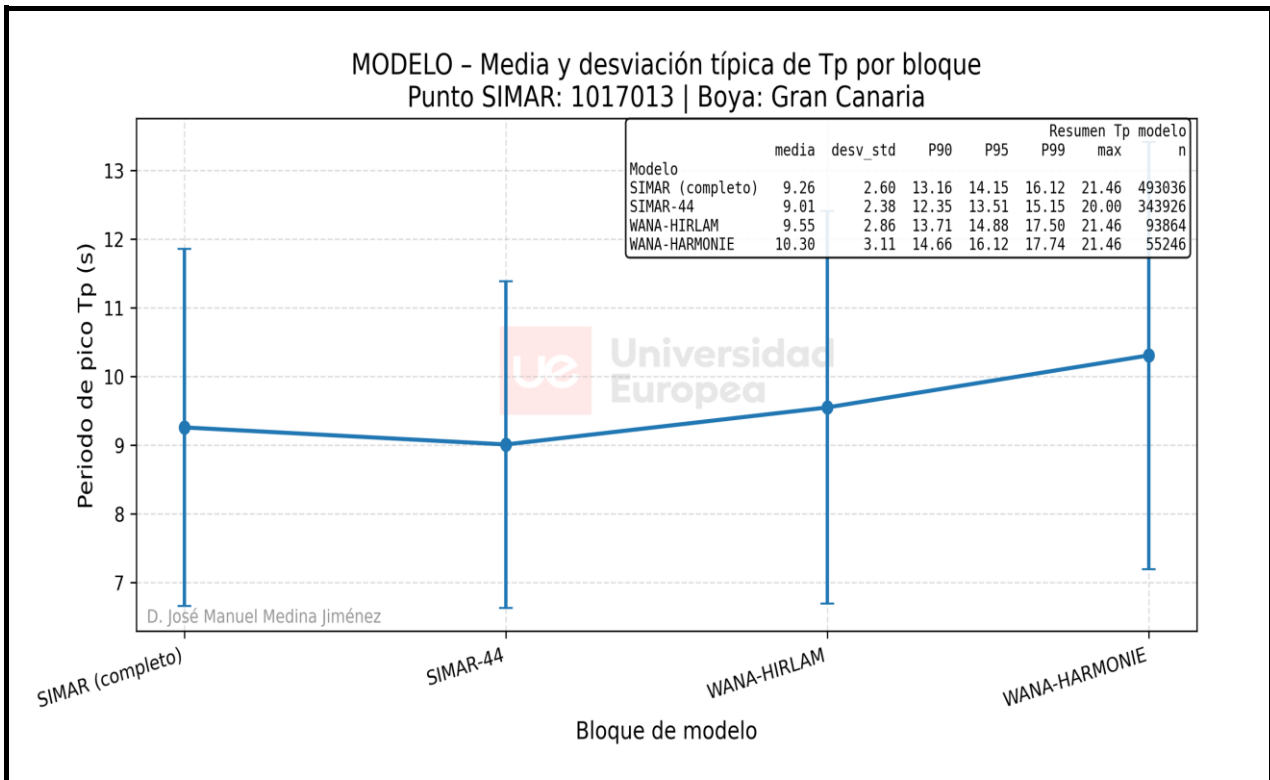
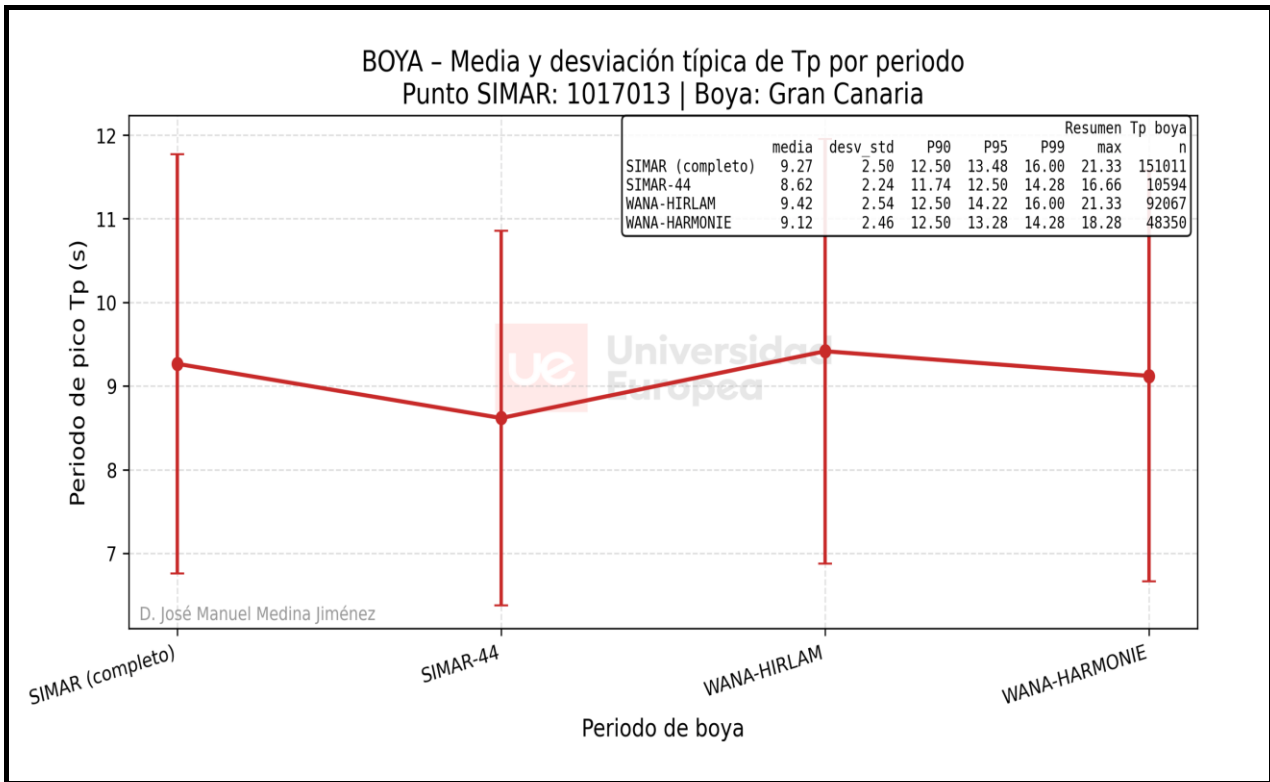




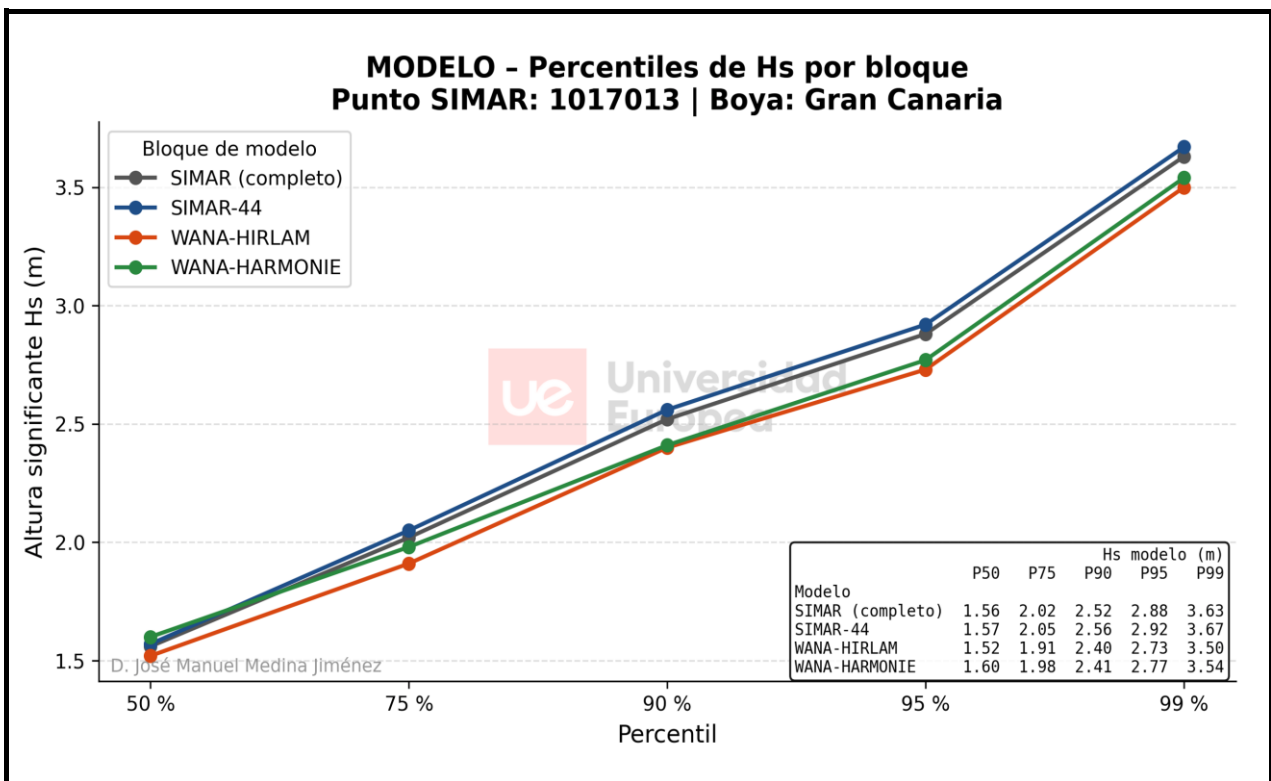
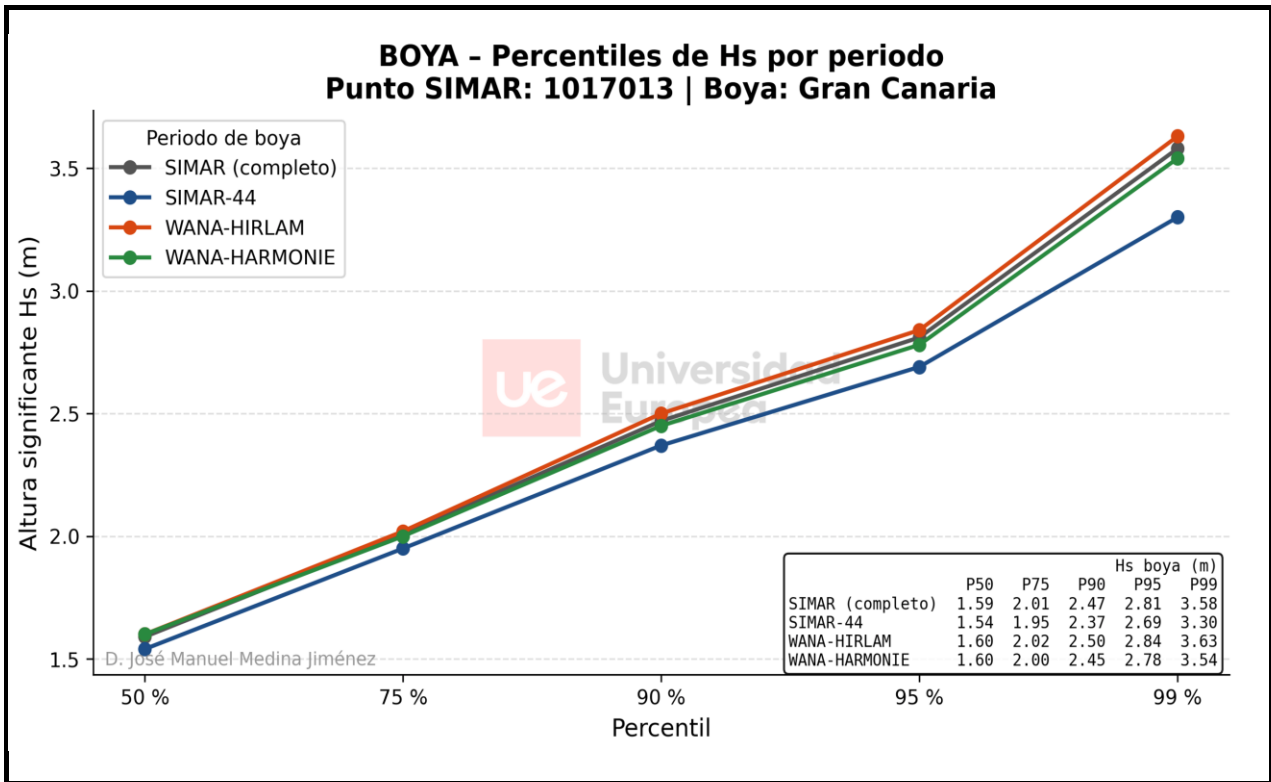
5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



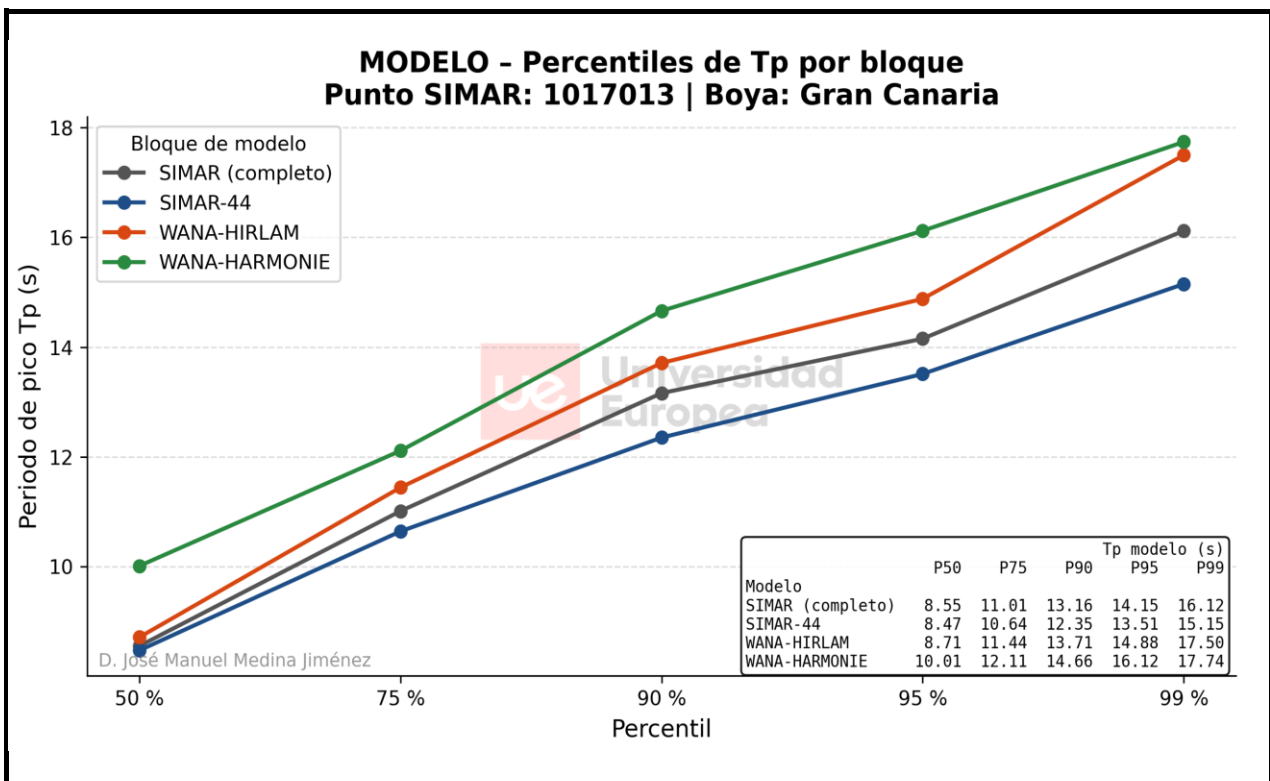
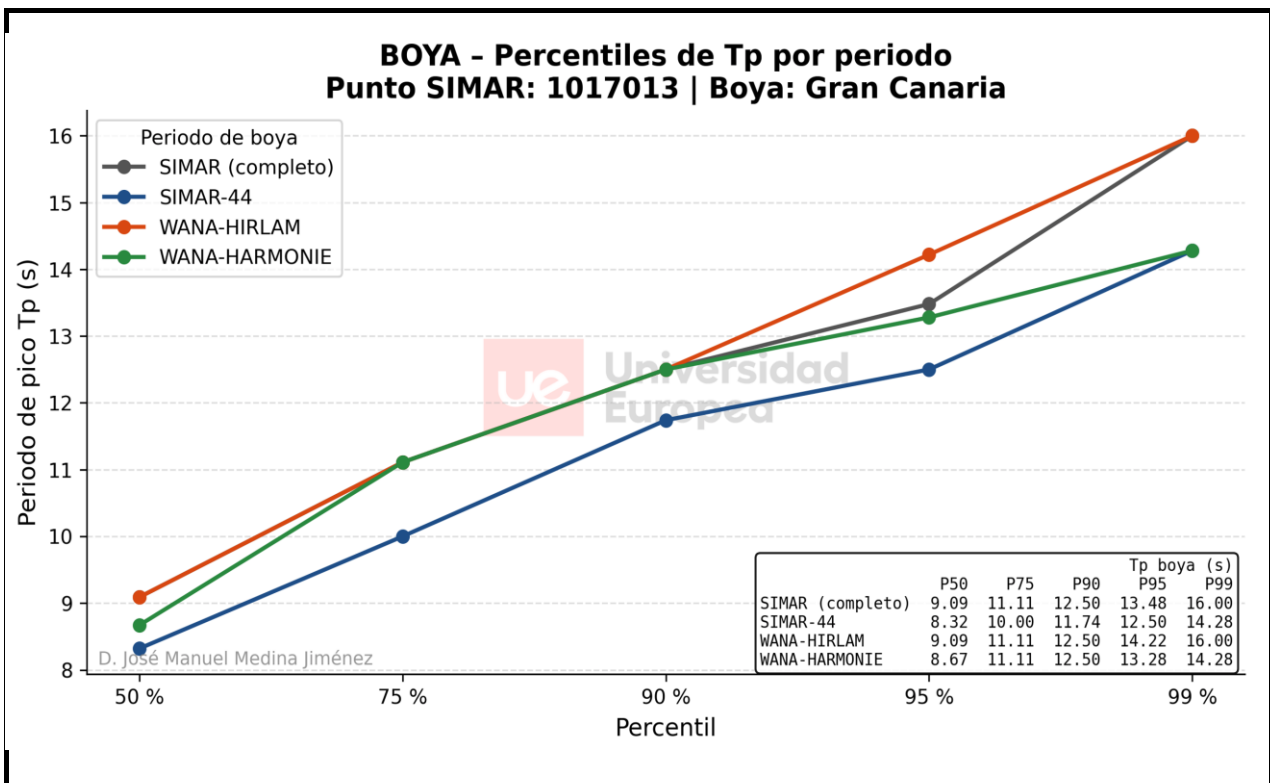
### 6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



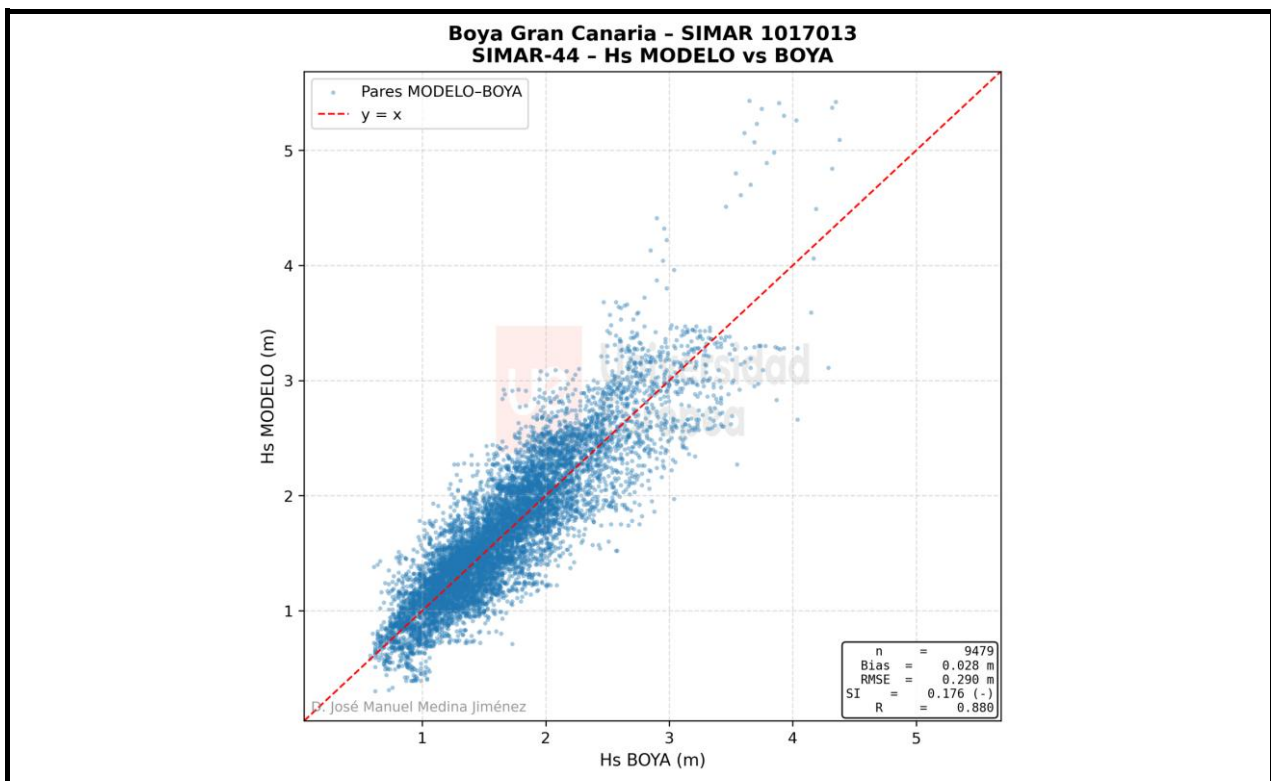
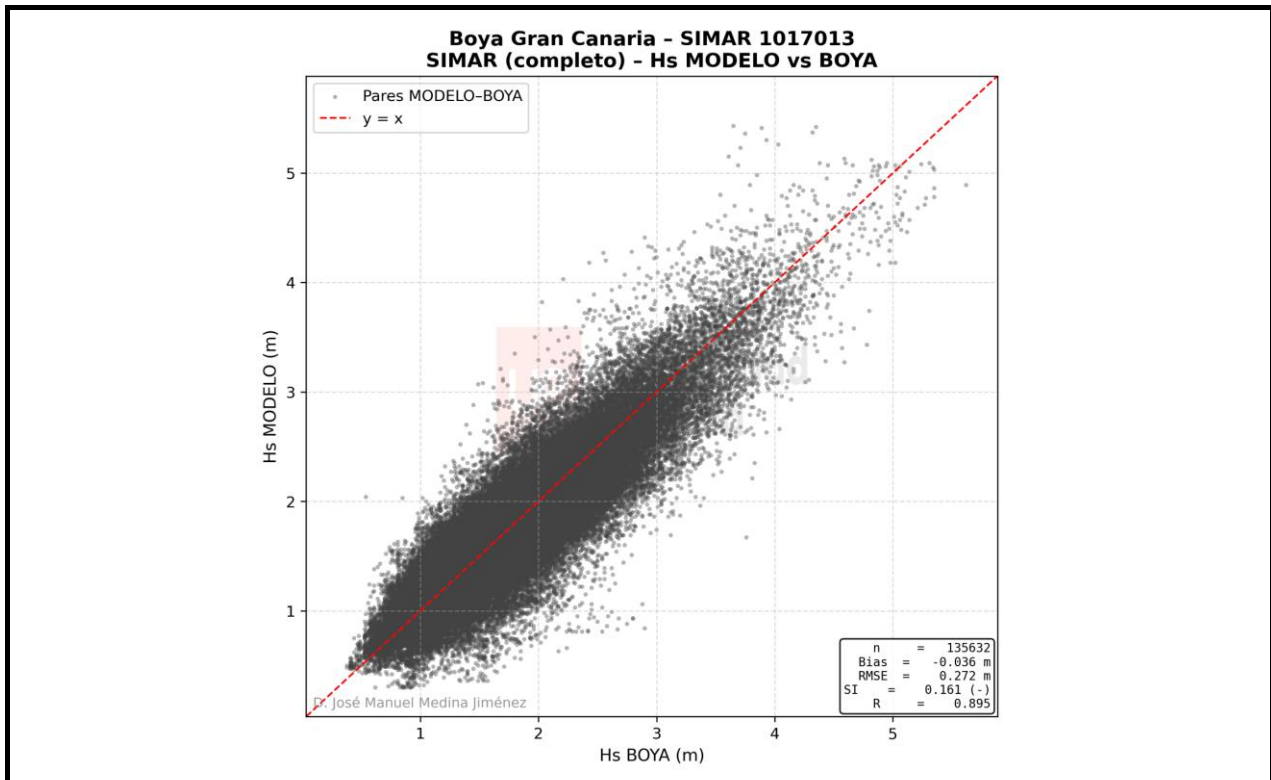
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

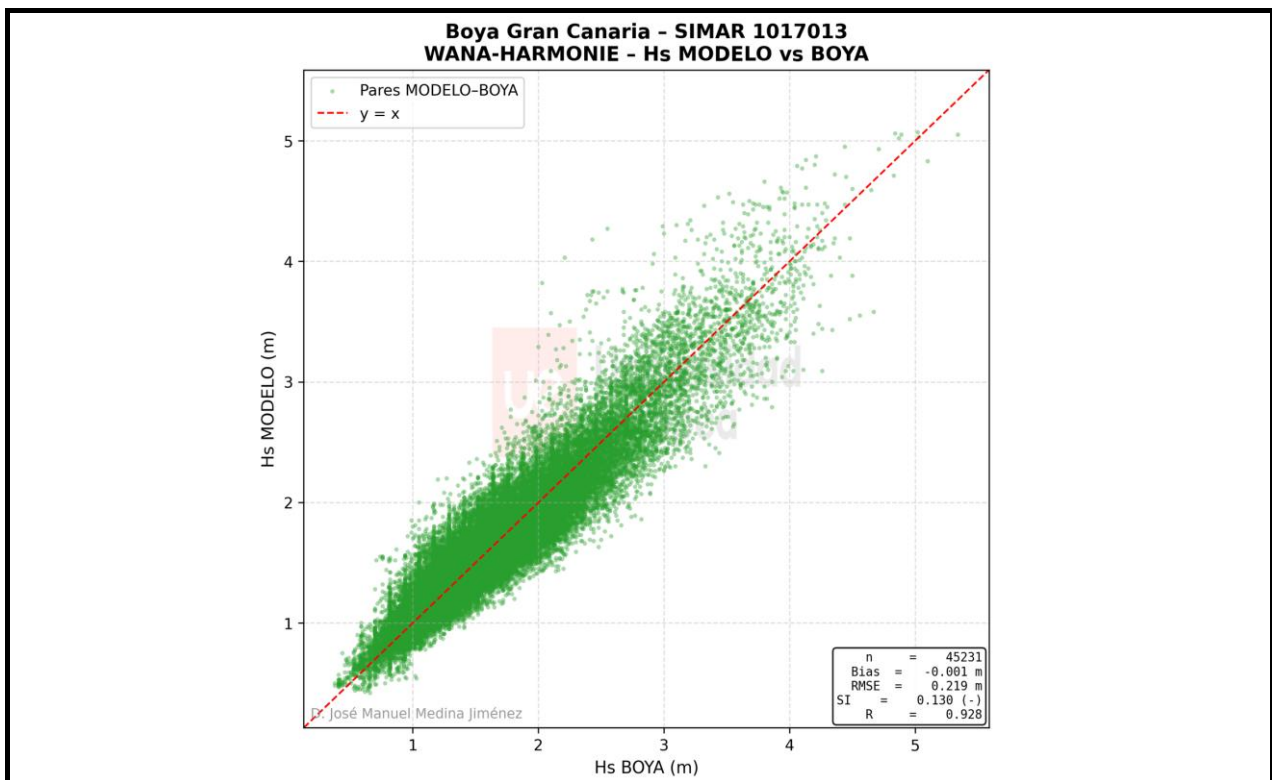
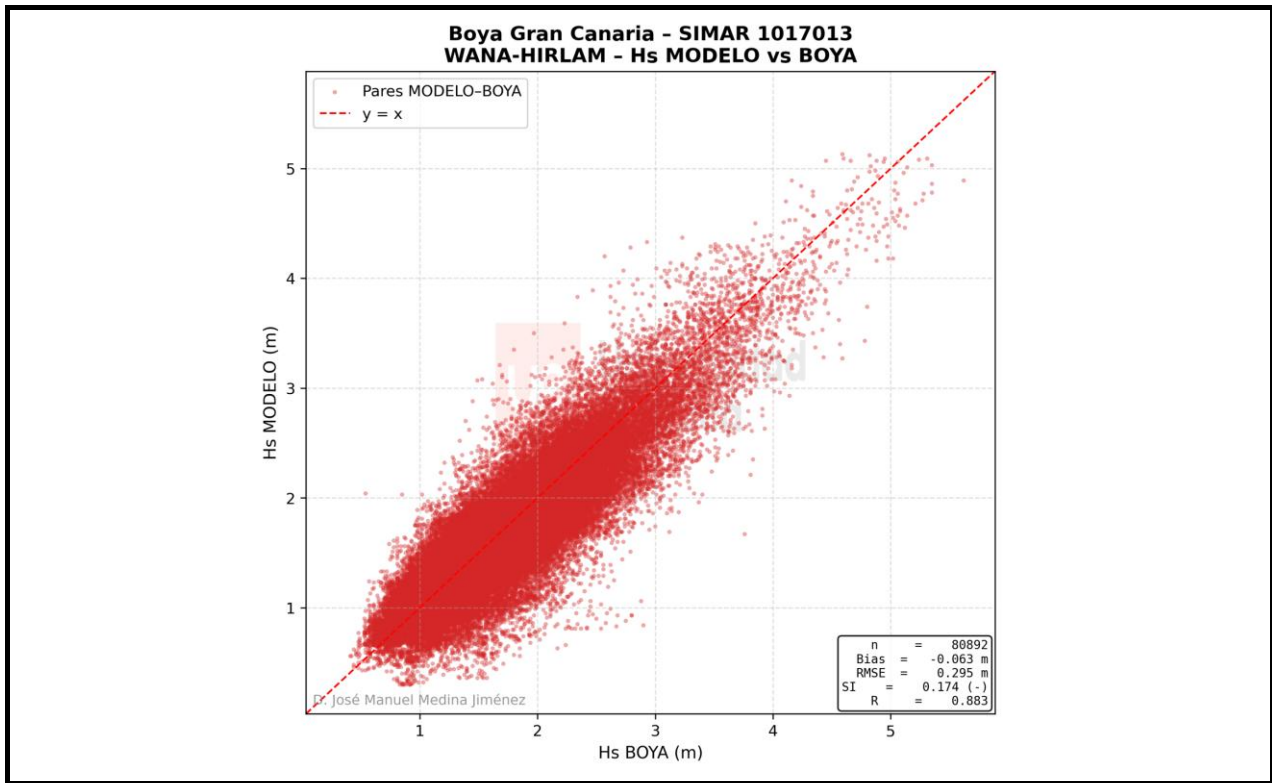


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

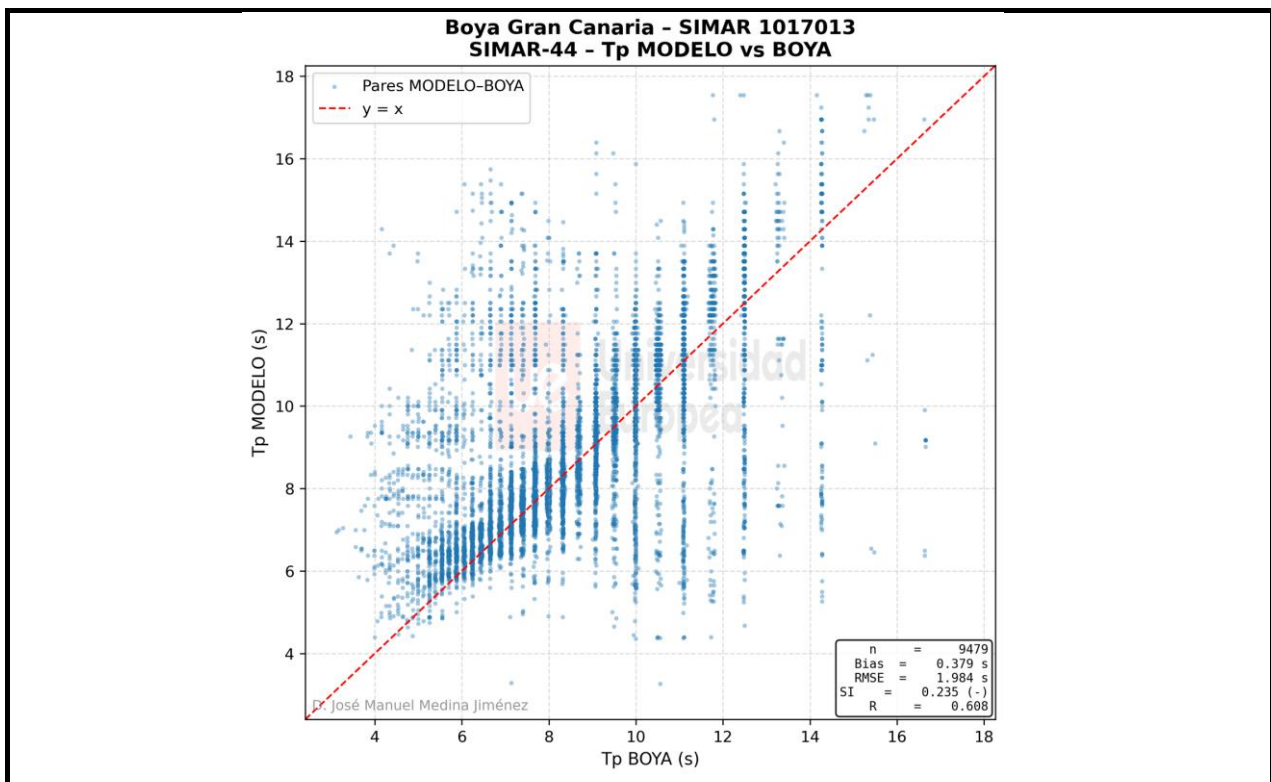
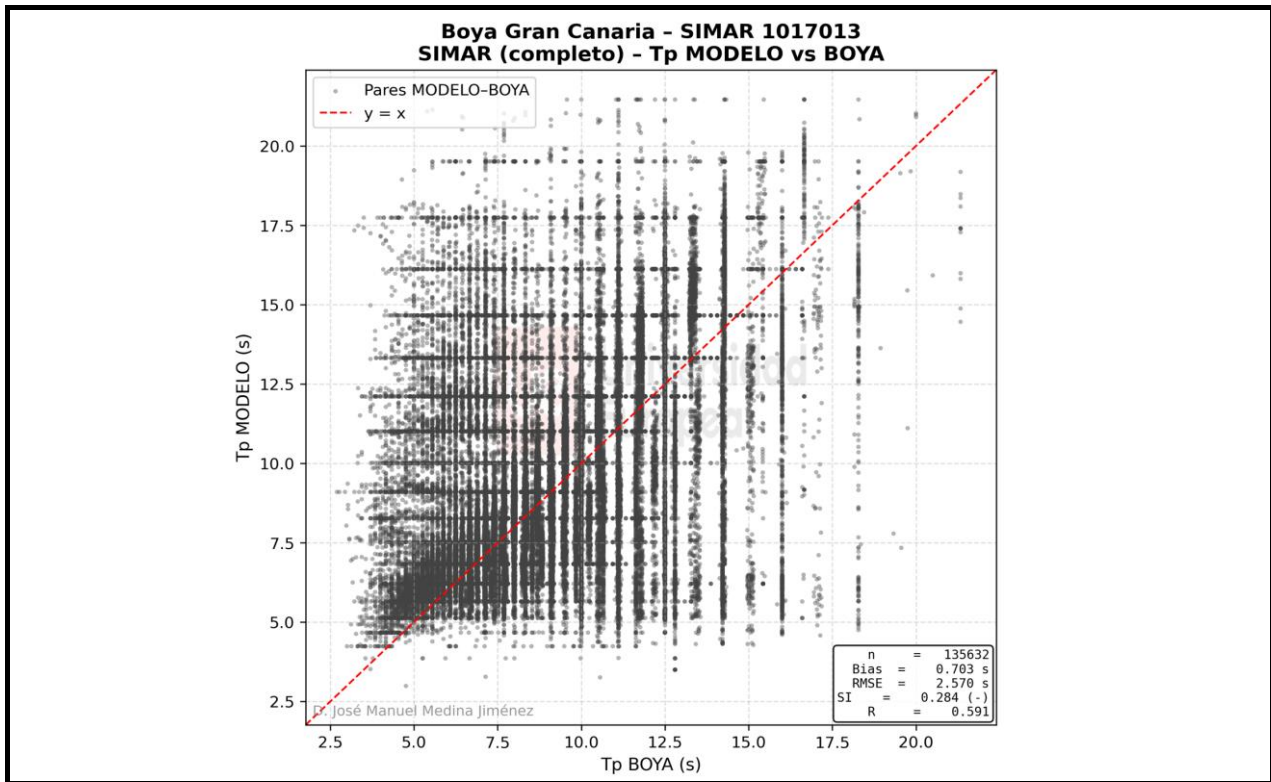


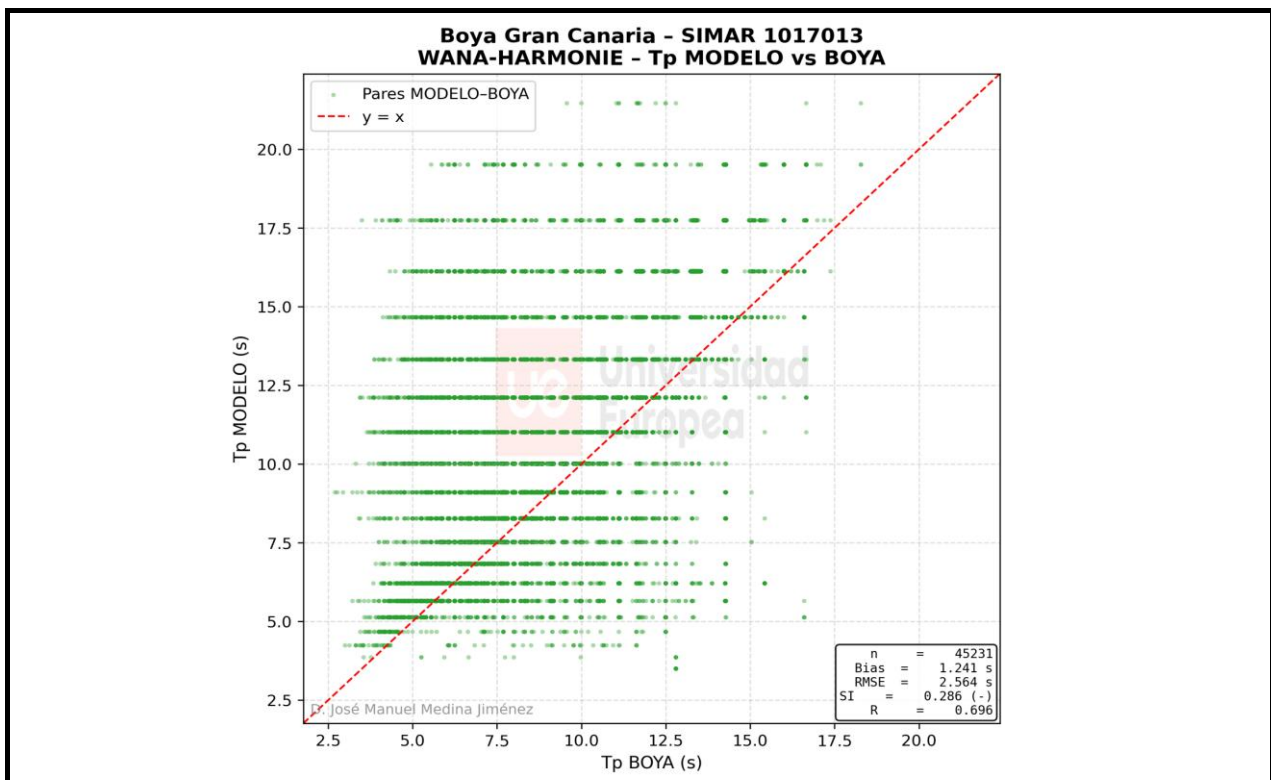
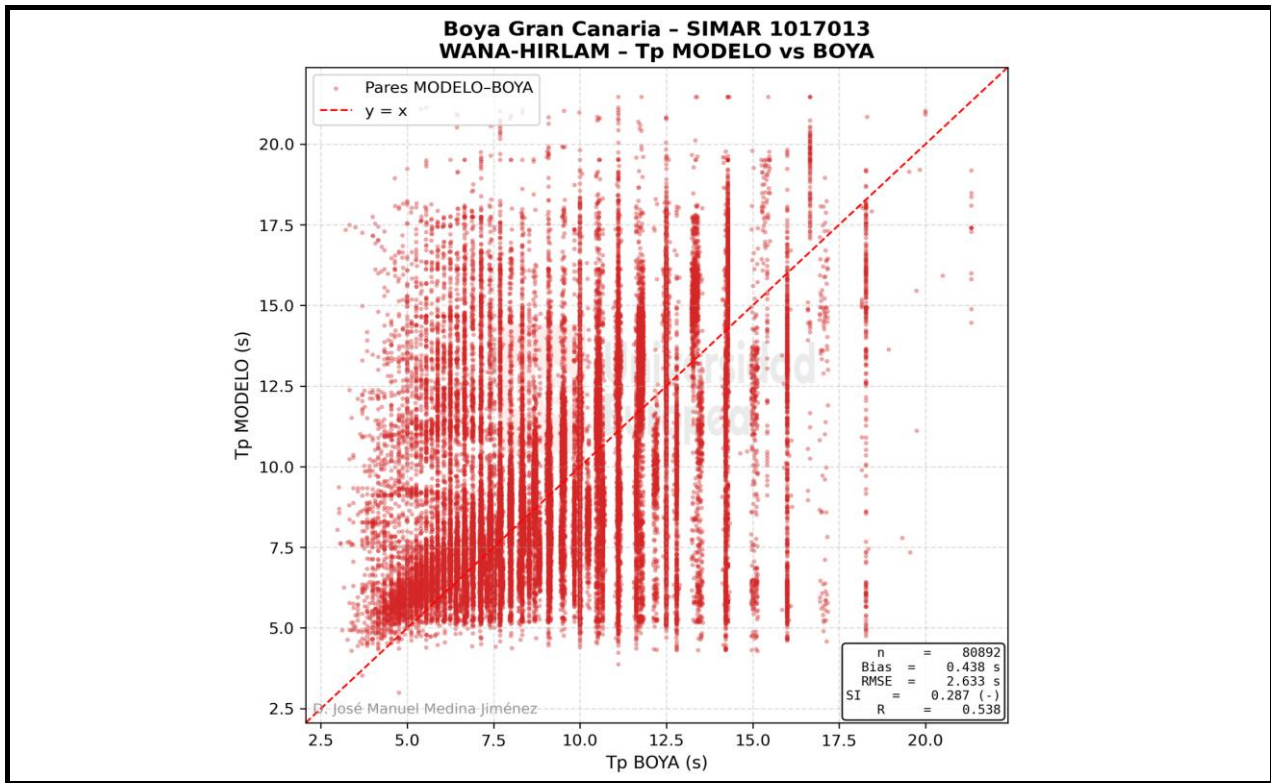
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs



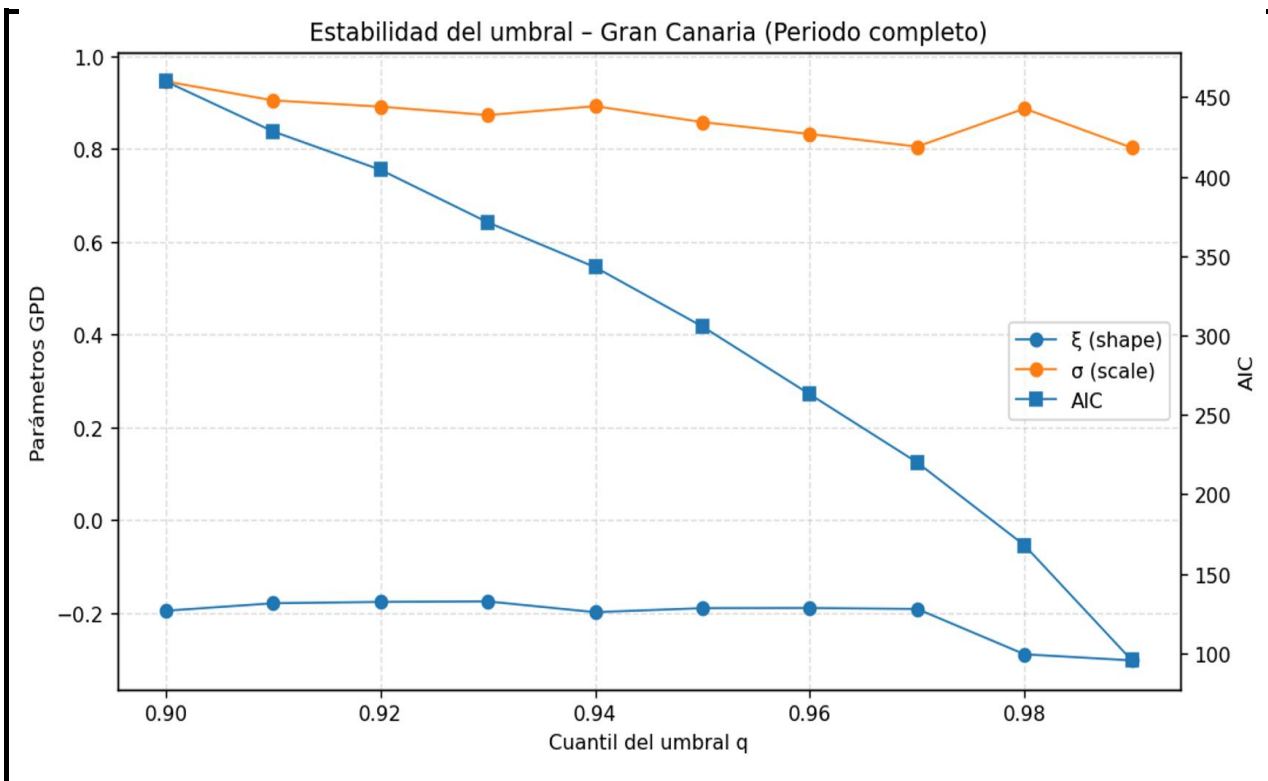
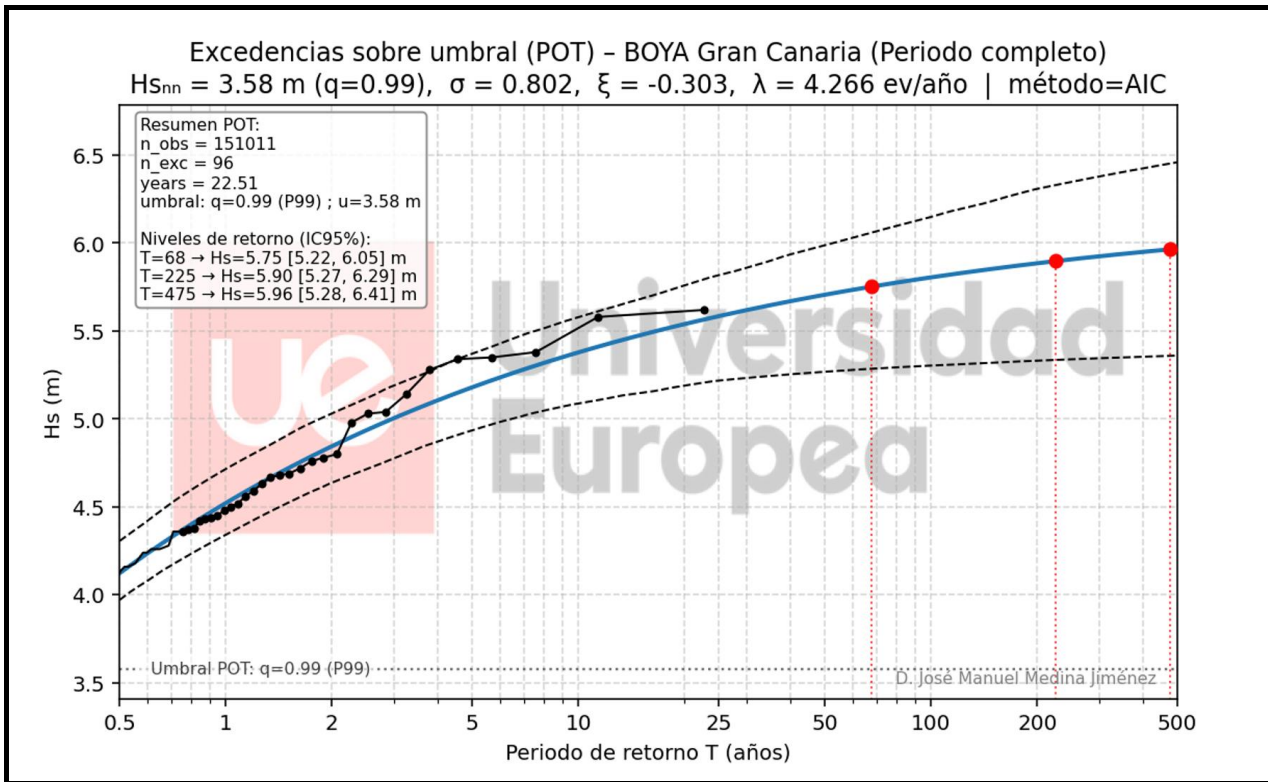


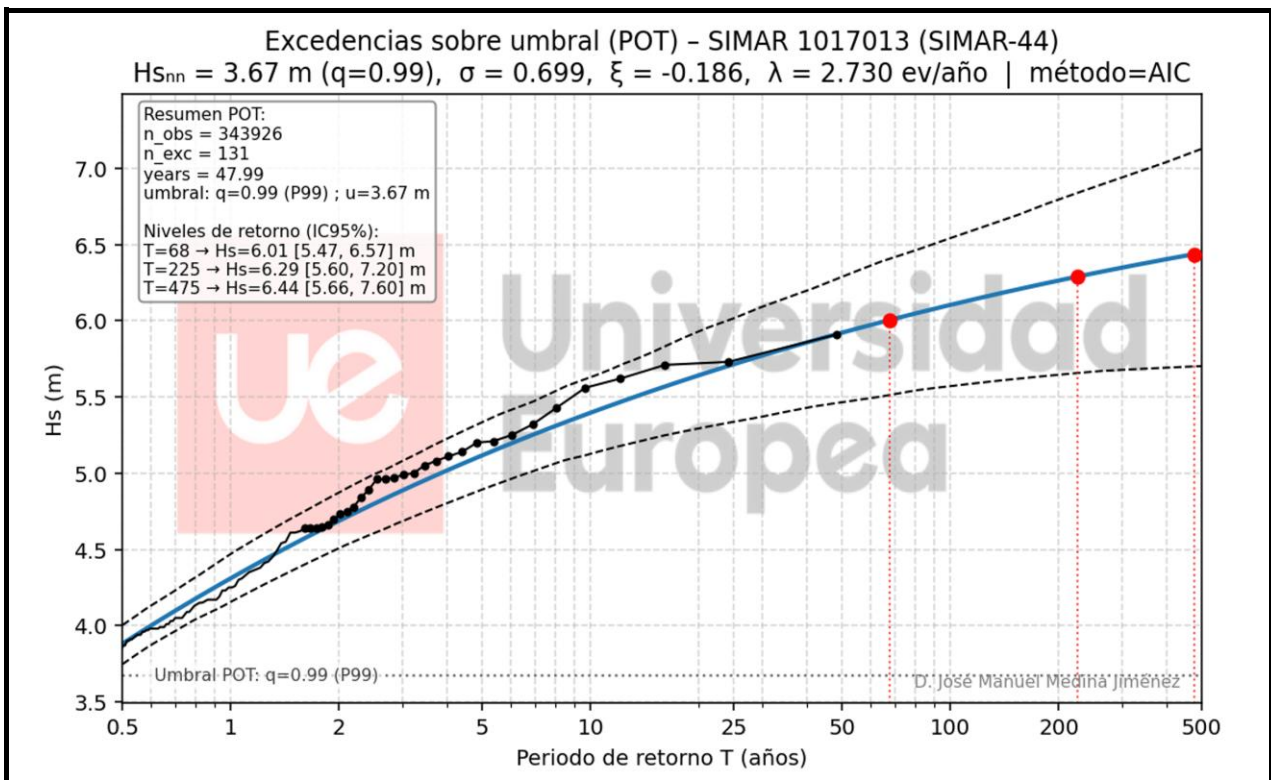
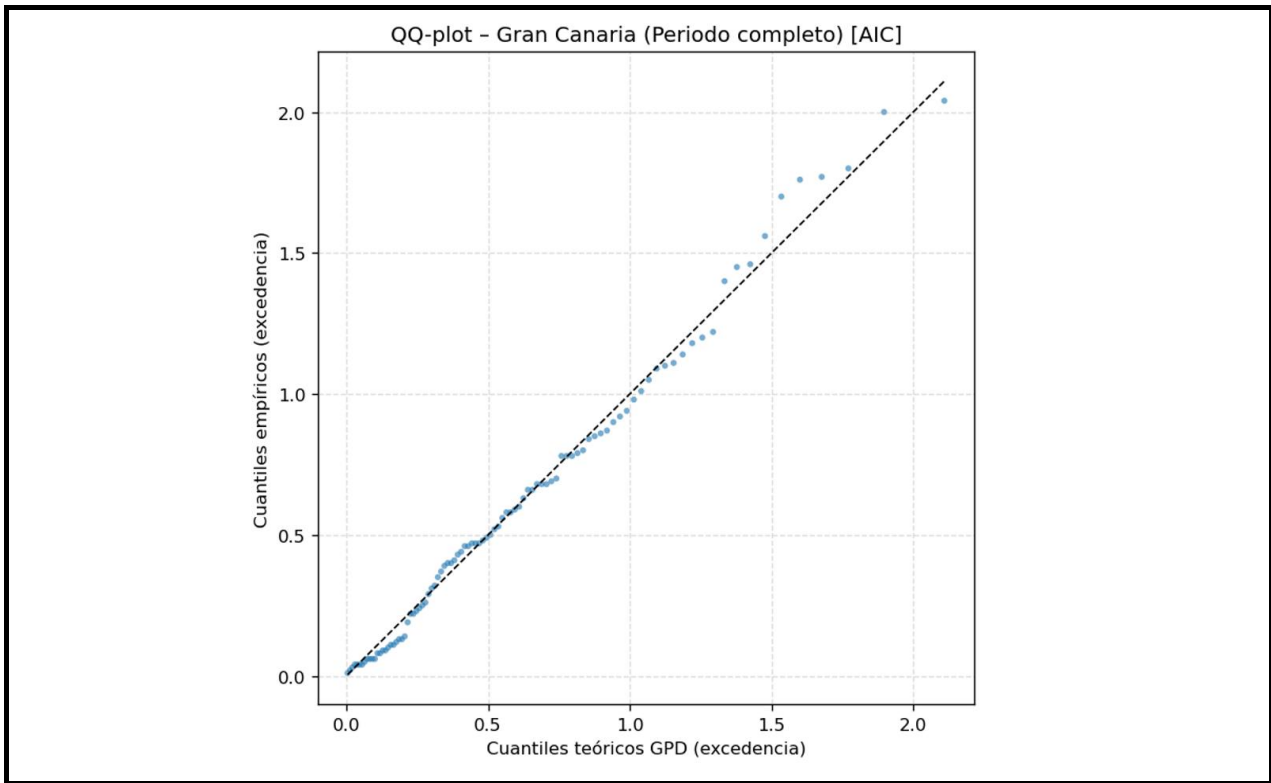
10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp

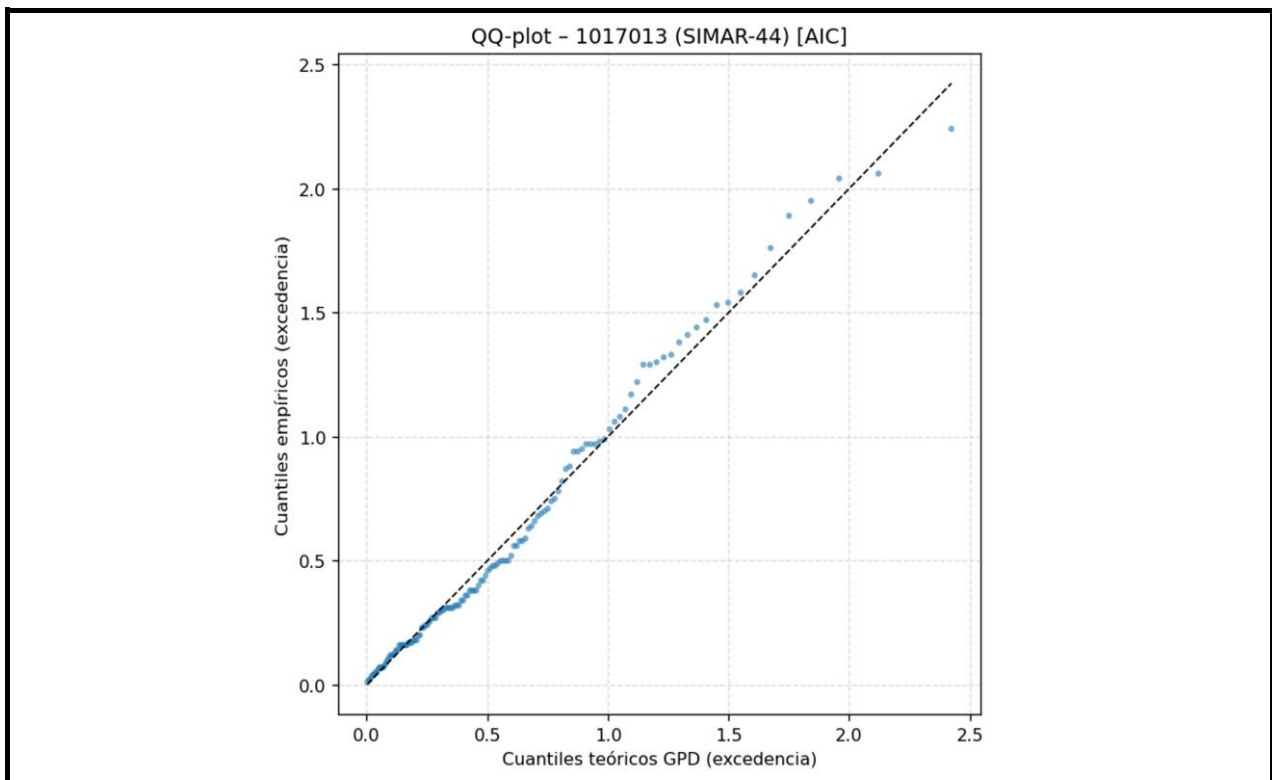
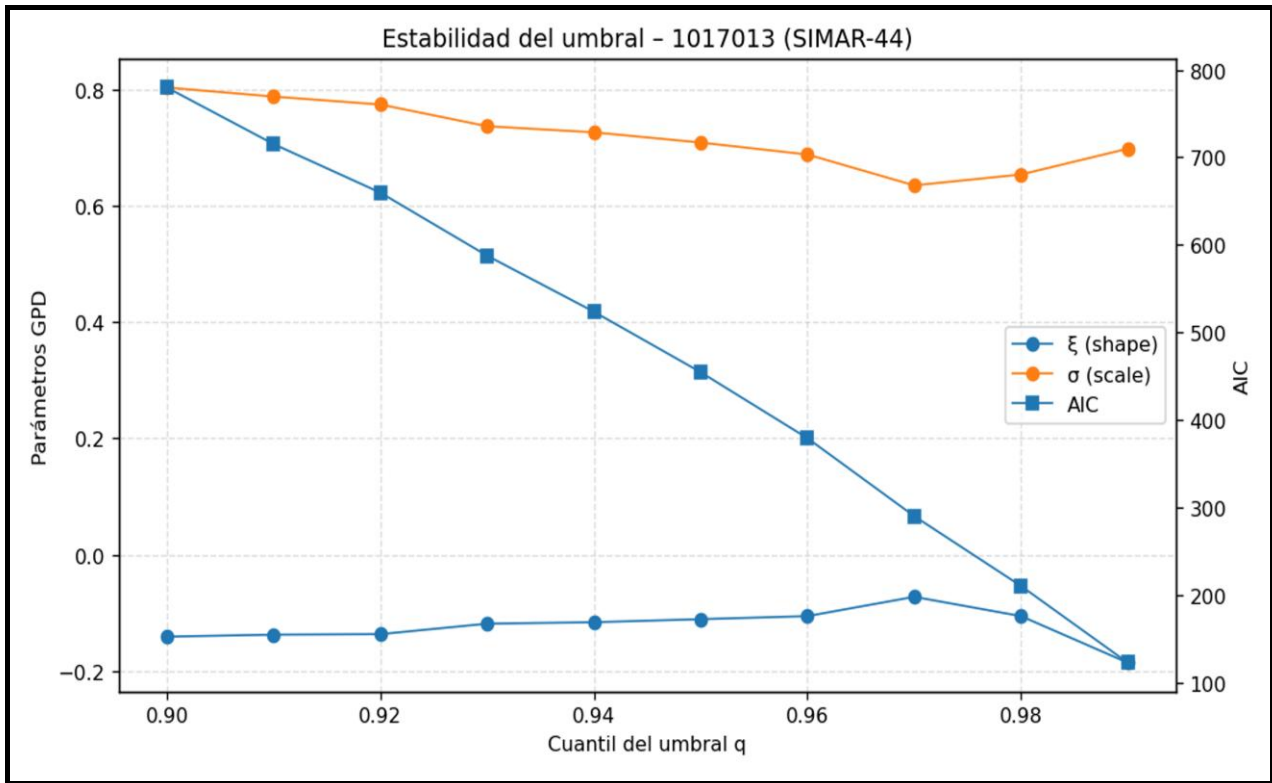


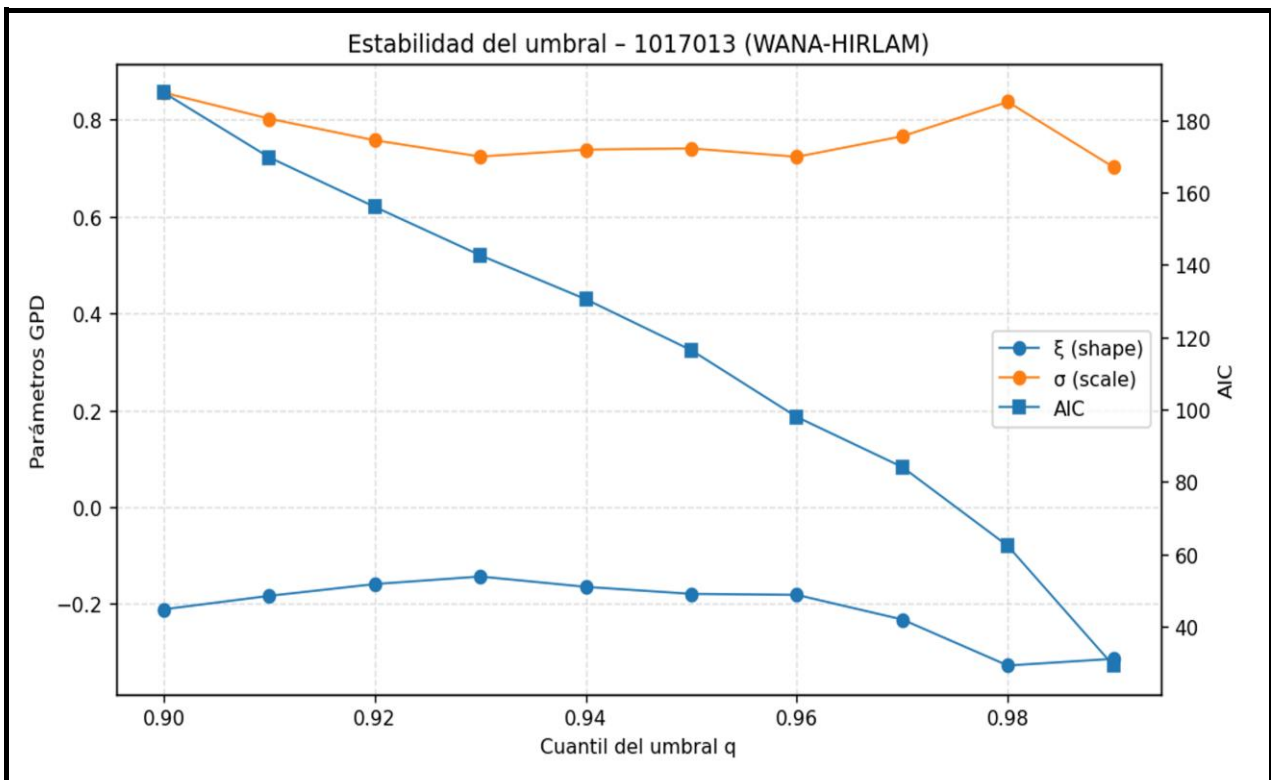
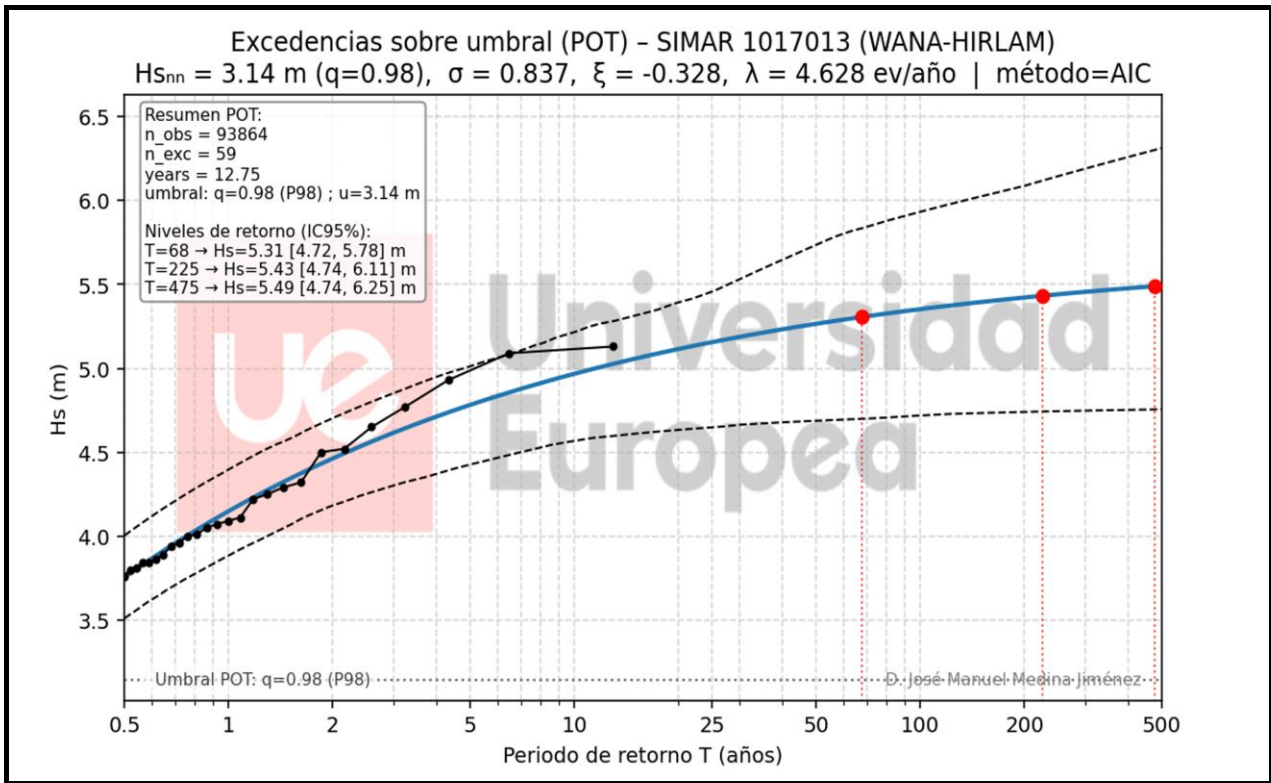


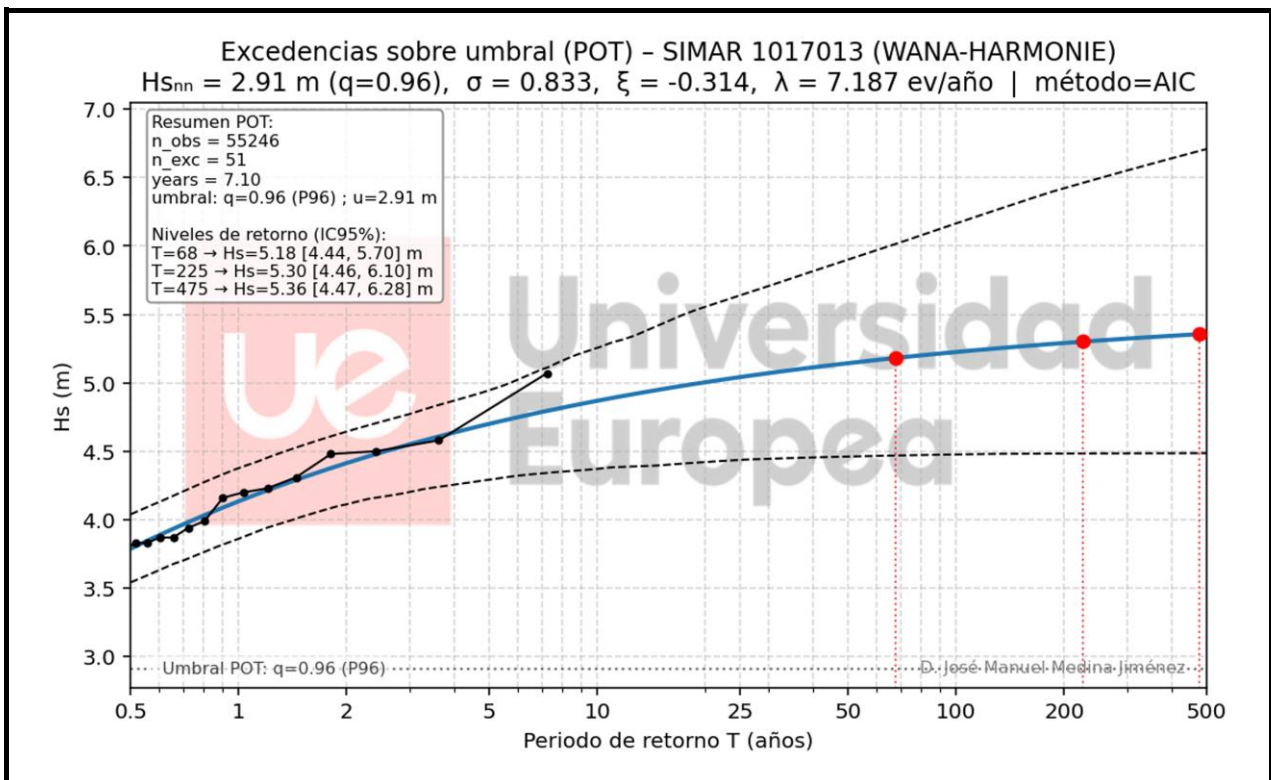
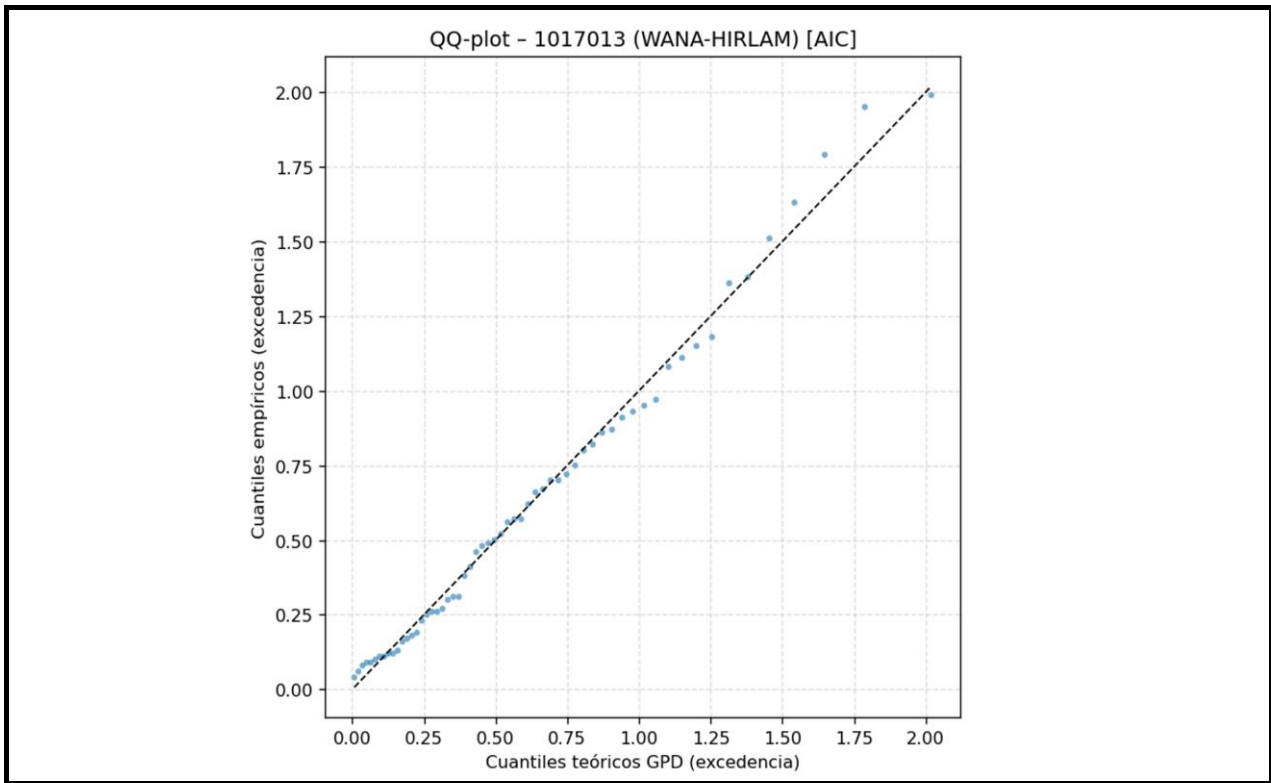
### 11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

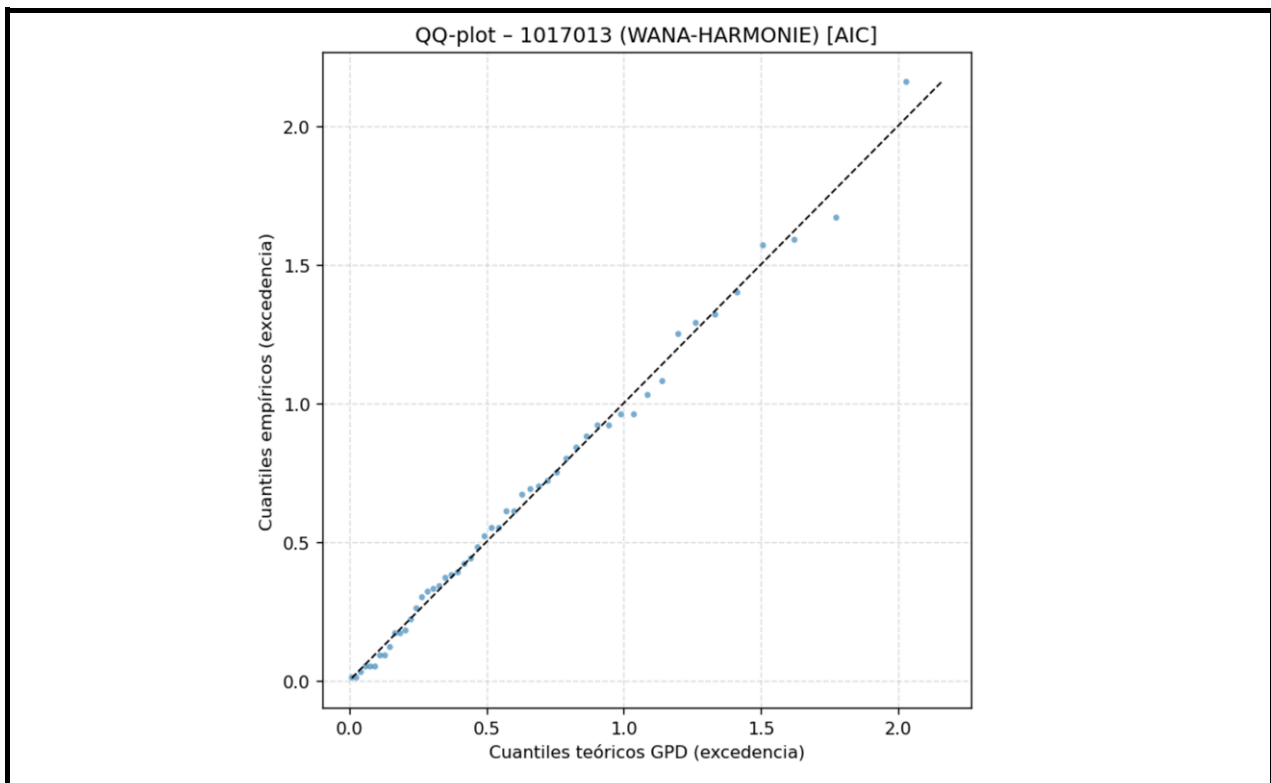
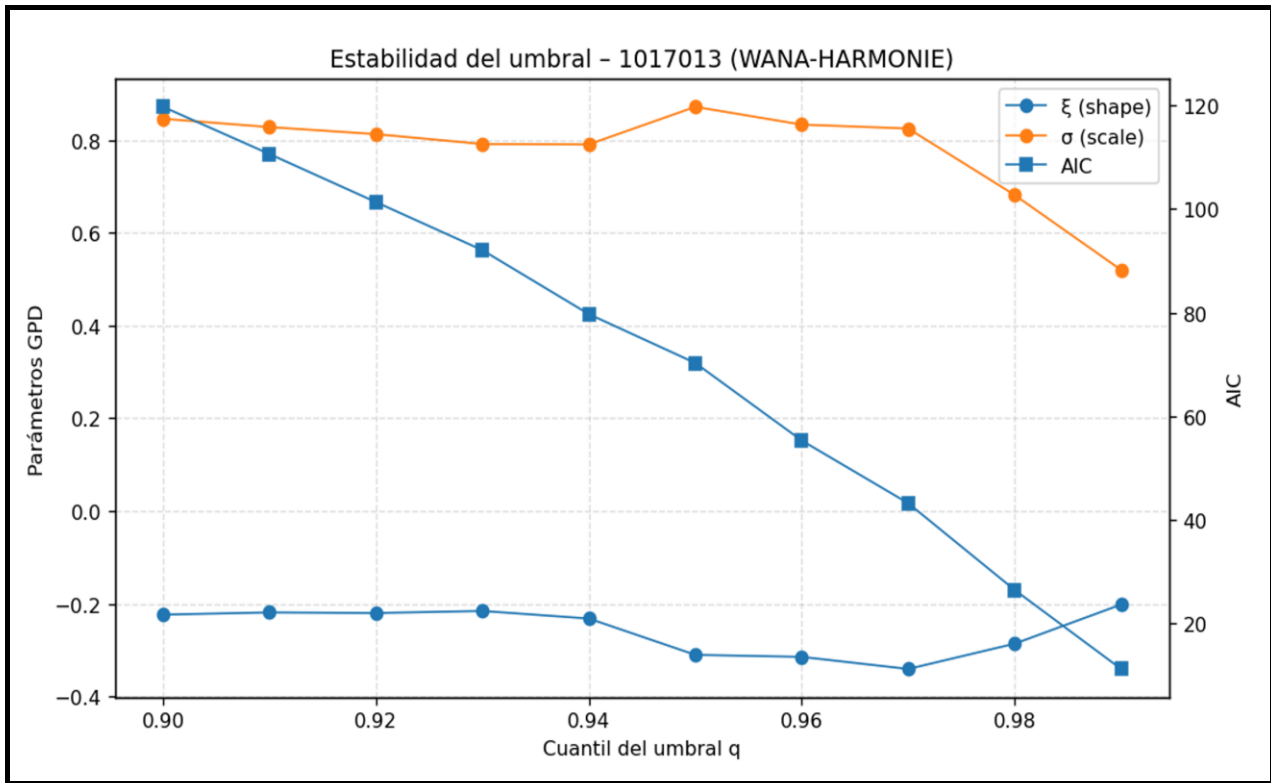


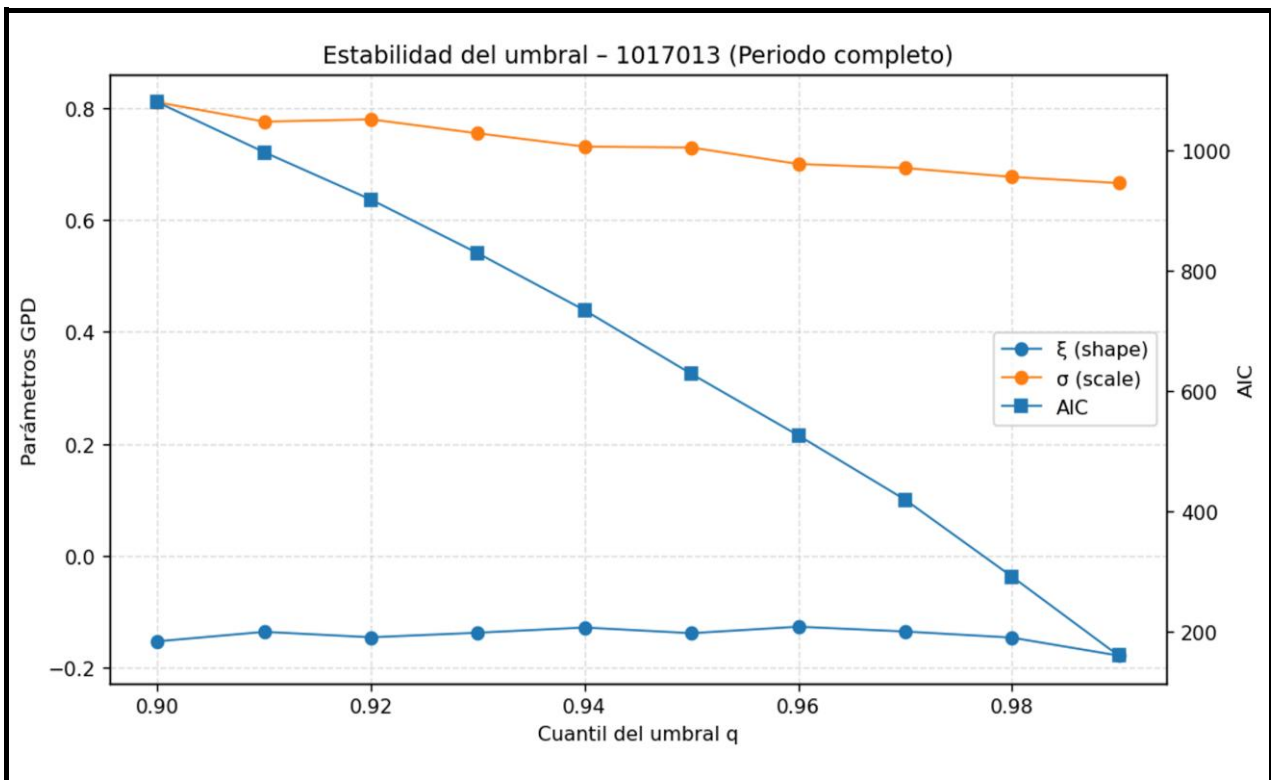
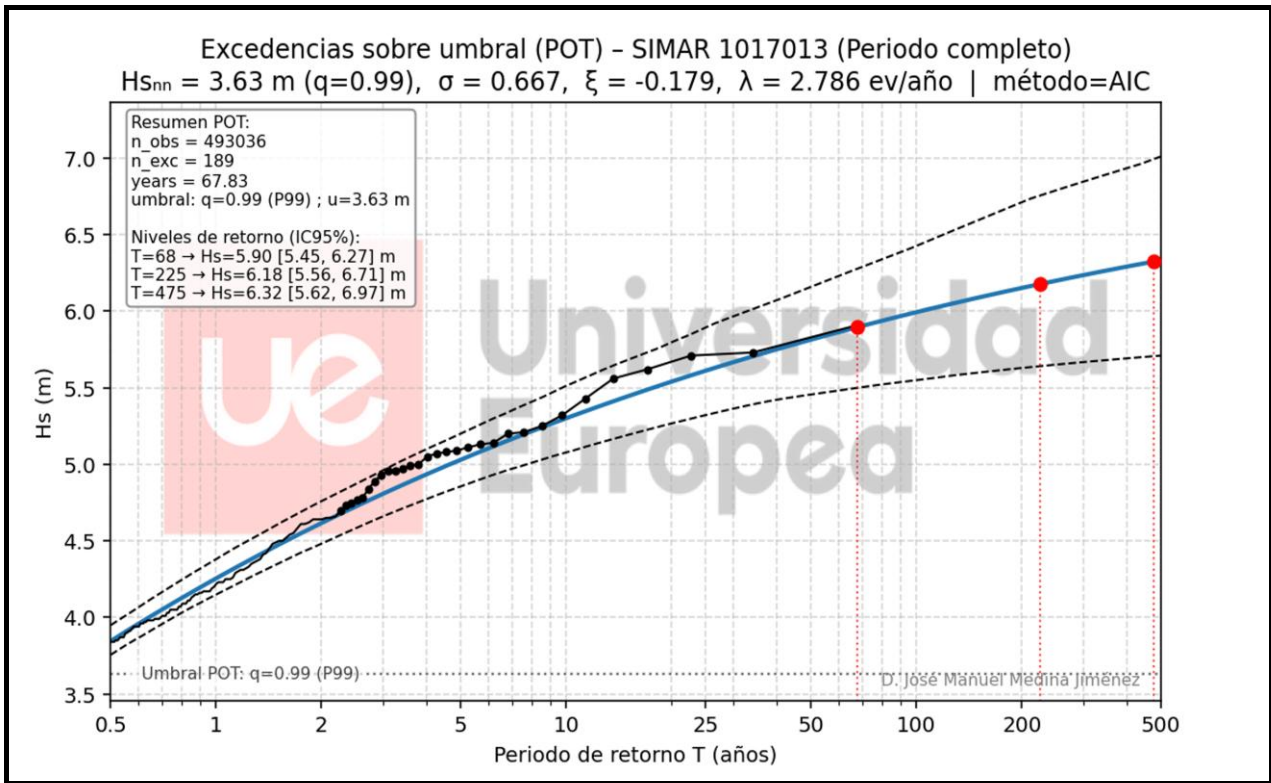


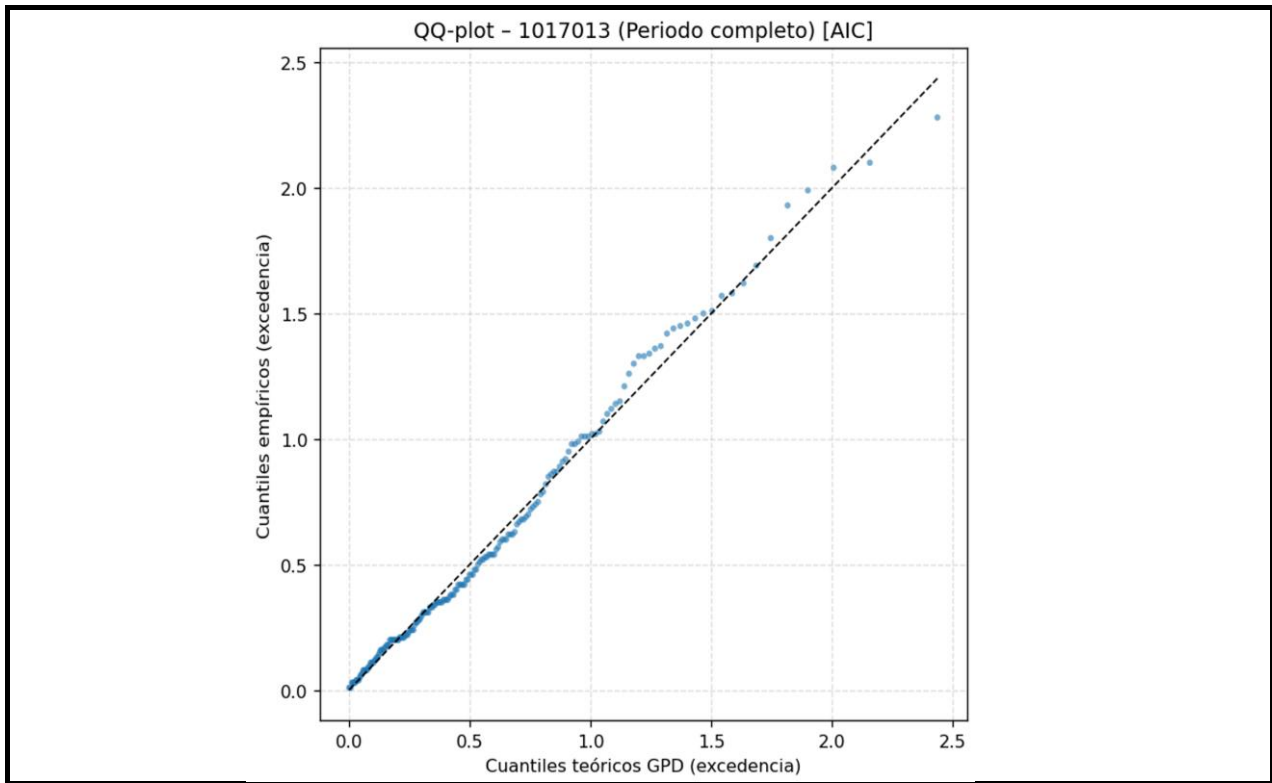













 <b>Universidad Europea</b>		<b>FICHA N°6 : PUNTO SIMAR 4023009 - BOYA TENERIFE SUR</b>	
<b>Identificación del punto</b>		<b>Localización y referencia</b>	
<b>Boya:</b>	Tenerife	<b>Sistema de referencia:</b>	UTM (Zona 28 R)
<b>Nodo SIMAR:</b>	4023009	<b>Coord. SIMAR (UTM X - Y):</b>	28 R 344639.32 3098208.20
<b>Fachada marítima:</b>	Norte Canarias	<b>Coord. Boya (UTM X - Y):</b>	28 R 341689 3098246.77
<b>Fuente de datos:</b>	Puertos del Estado	<b>Profundidad Boya (m):</b>	600 m

### 1. Metadatos del análisis

**Serie analizada:** Boya Tenerife Sur / Punto SIMAR 4023009.

**Fuente del dato:** Red de boyas de Puertos del Estado / Base de datos SIMAR–Puertos del Estado.

**Periodo temporal analizado:**

Boya\*: 1998-2025

Punto SIMAR: 1958-2025

\* Correspondiente a la cobertura de datos del oleaje direccional

**Frecuencia temporal registro:** horaria ( $\Delta t = 1$  h)

**Tratamiento de datos:** Eliminación de registros no válidos y depuración direccional de la serie. El análisis extremal se ha realizado sobre la serie ya filtrada, sin interpolación temporal ni relleno de vacíos.

**Metodología extremal aplicada:** Análisis de excedencias sobre umbral (POT, Peaks Over Threshold), mediante el ajuste de una distribución Generalizada de Pareto (GPD), conforme al marco teórico de la teoría de valores extremos.

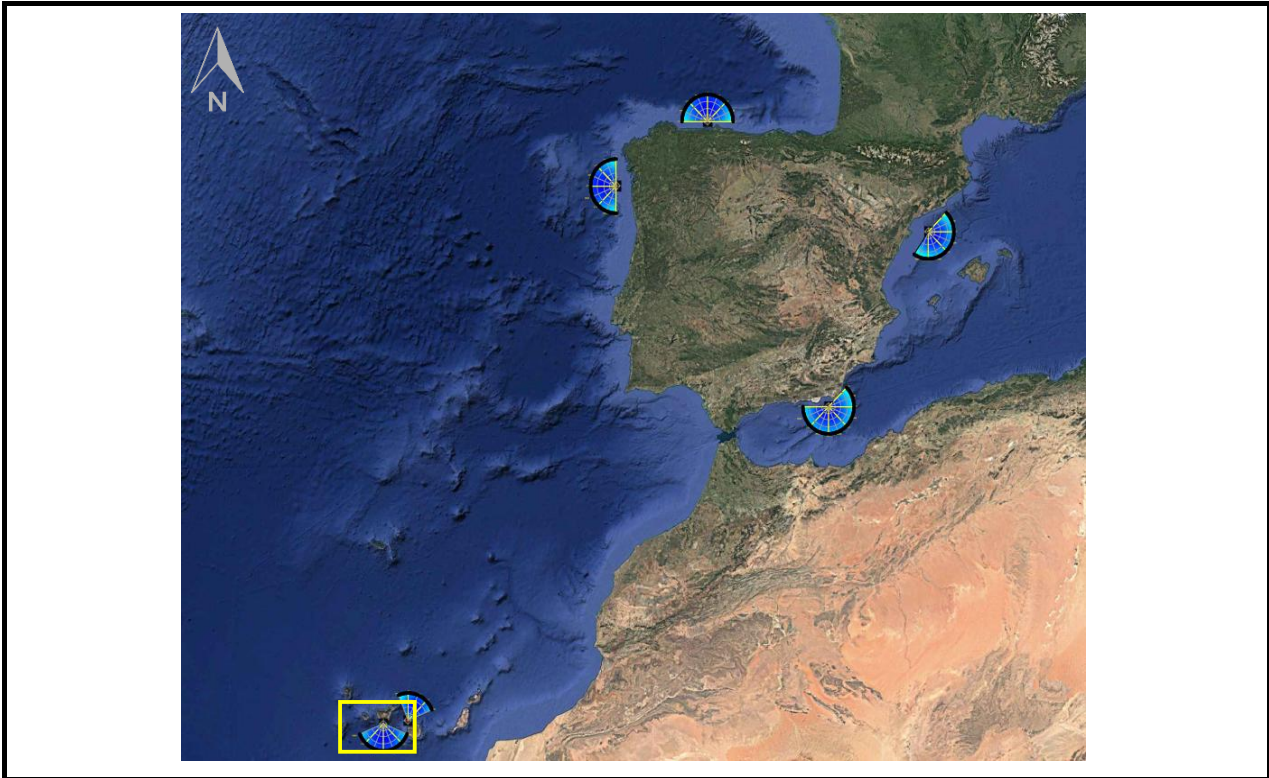
La selección del umbral se ha realizado de forma automática mediante la minimización del criterio de información de Akaike (AIC), evaluando un rango de cuantiles elevados de la serie. La idoneidad del umbral y la robustez del ajuste se han contrastado mediante diagnósticos estándar, consistentes en:

- Análisis de estabilidad de los parámetros de la GPD frente al umbral
- Gráficos cuantílico–cuantílico (QQ-plot) de las excedencias frente a la distribución teórica ajustada.

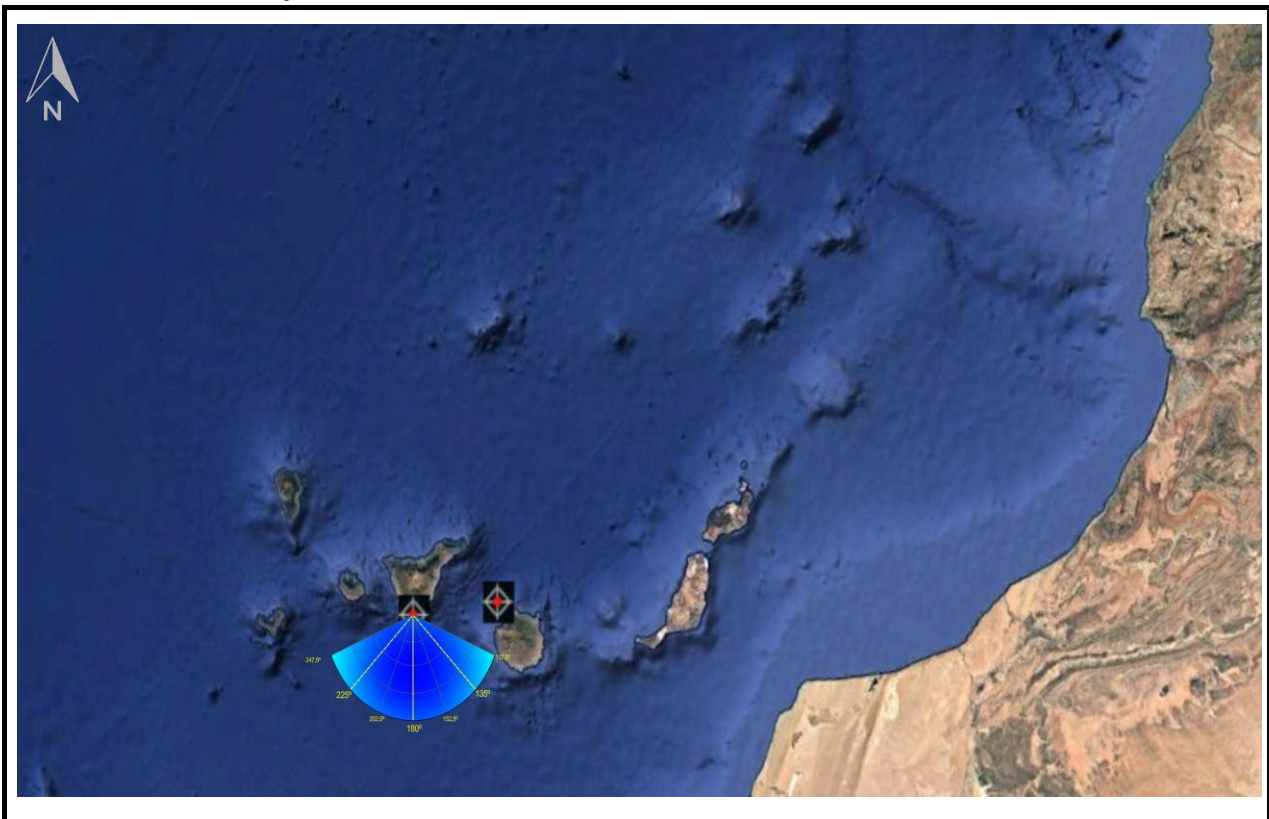
Estos procedimientos son ampliamente recomendados en la literatura científica especializada en análisis extremal, entre otros por Coles (2001), Davison y Smith (1990) y Beirlant et al. (2004), y constituyen la práctica habitual en estudios de ingeniería marítima y climatología del oleaje.

**Implementación computacional:** La metodología descrita se ha implementado mediante programación propia en lenguaje Python, garantizando la trazabilidad del proceso, la reproducibilidad de los resultados y la aplicación homogénea de los criterios de selección de umbral y diagnóstico en todas las series analizadas.

## 2. Localización geográfica

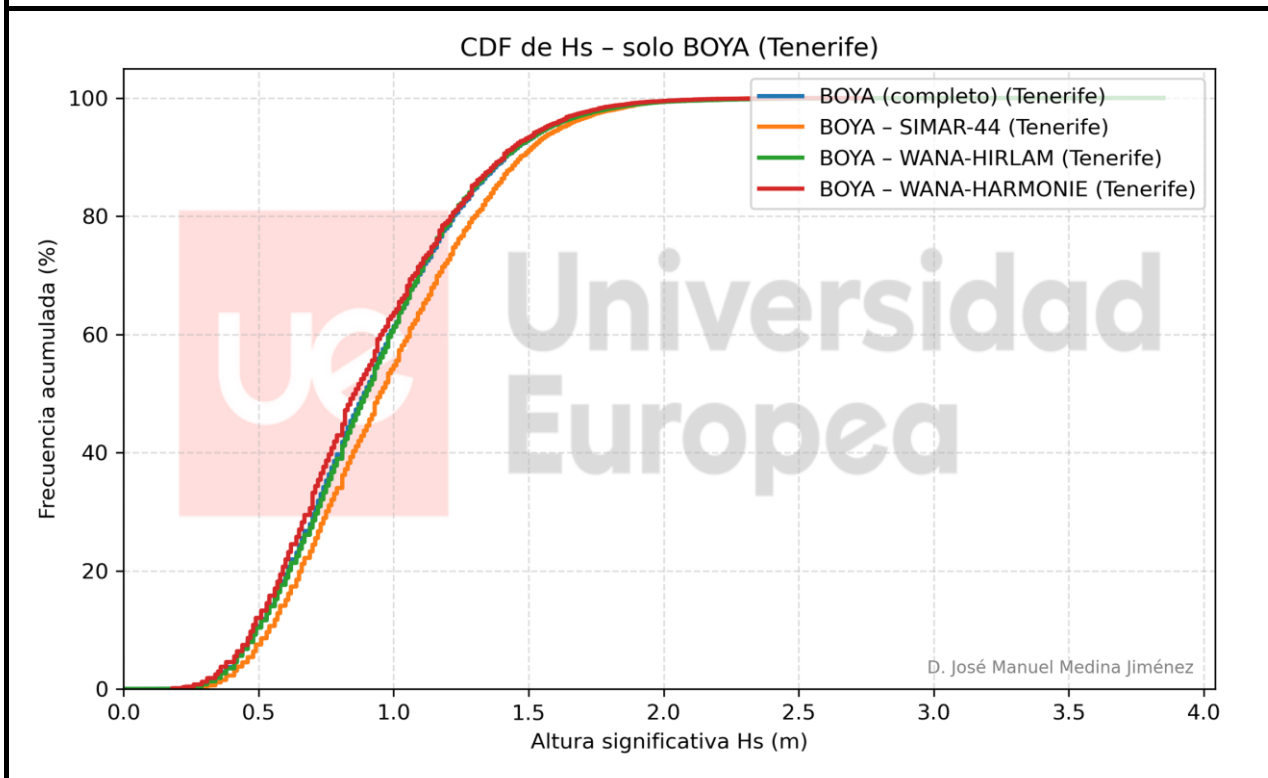
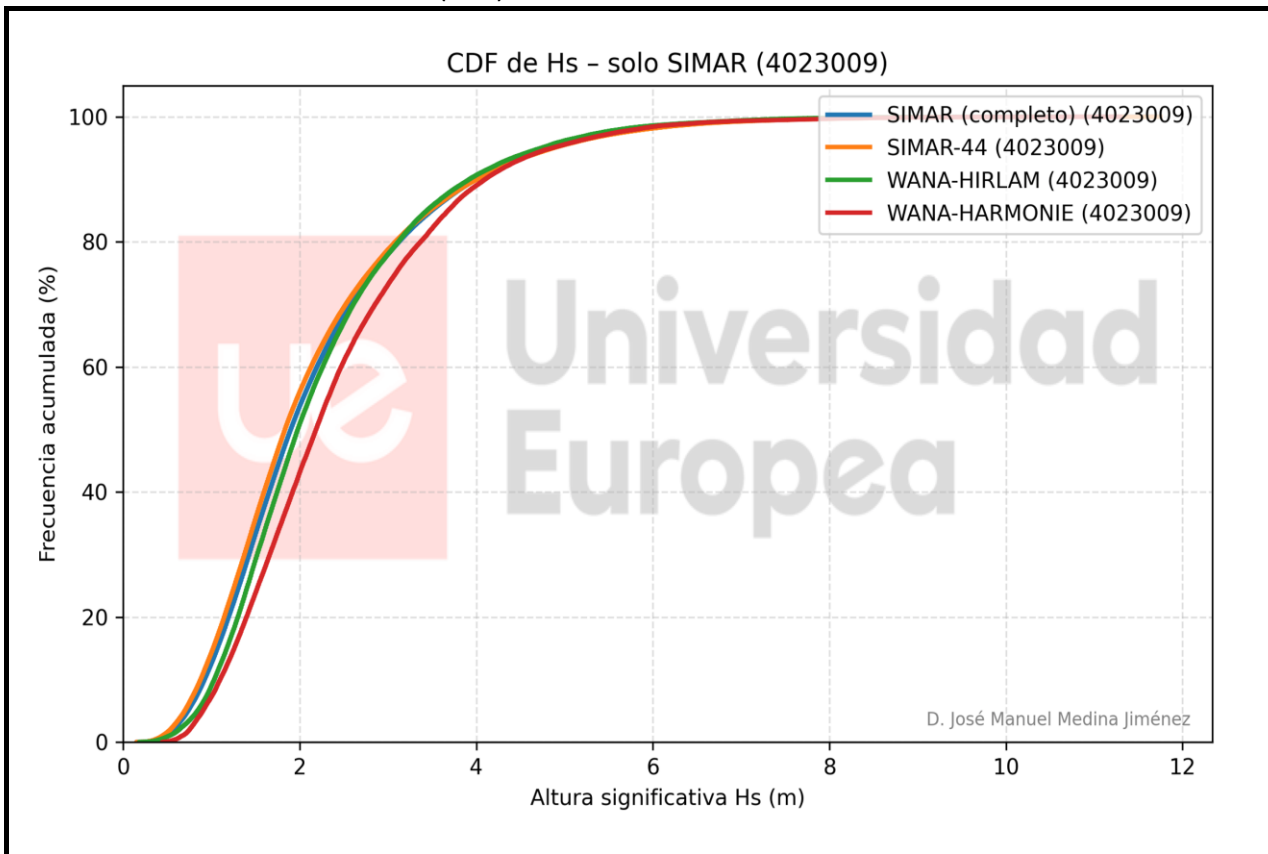


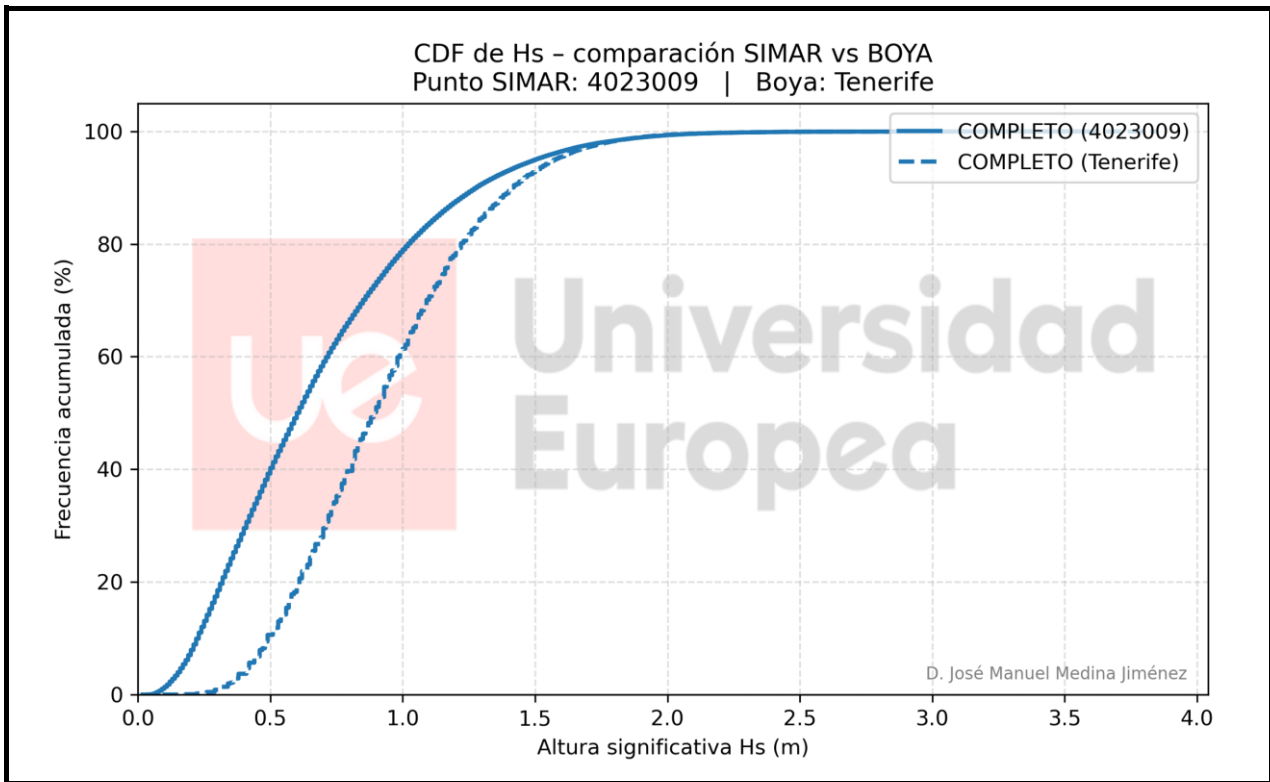
## 3. Direcciones de oleaje analizadas



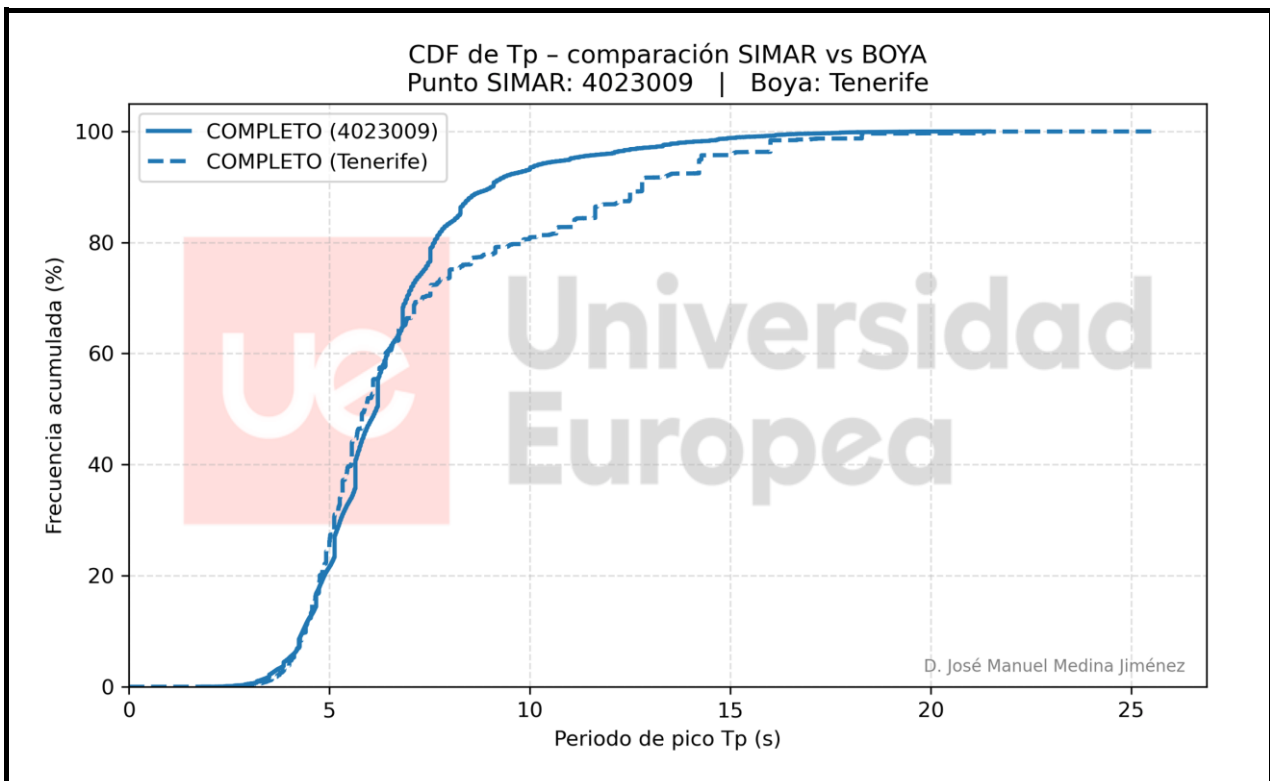
#### 4. Análisis Homogeneidad modelos

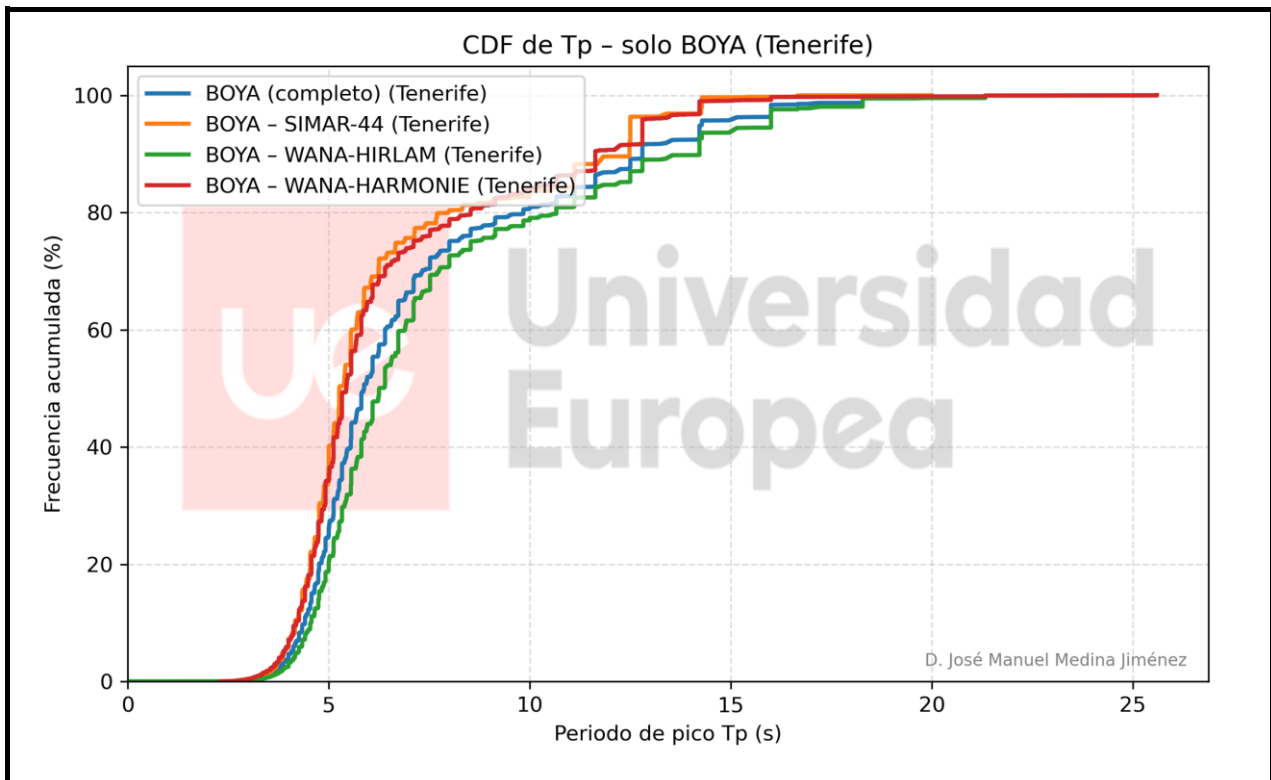
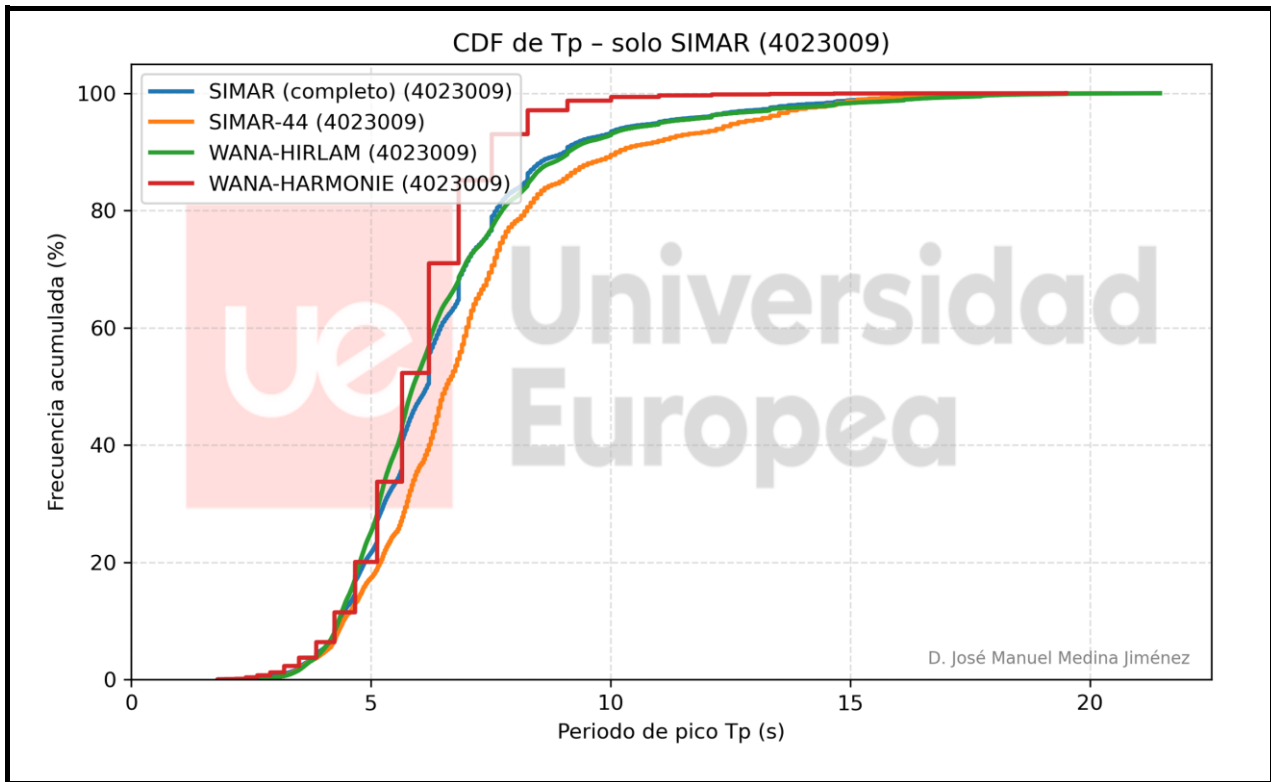
##### 4.1. Función disbución acumulada (CDF) de Hs



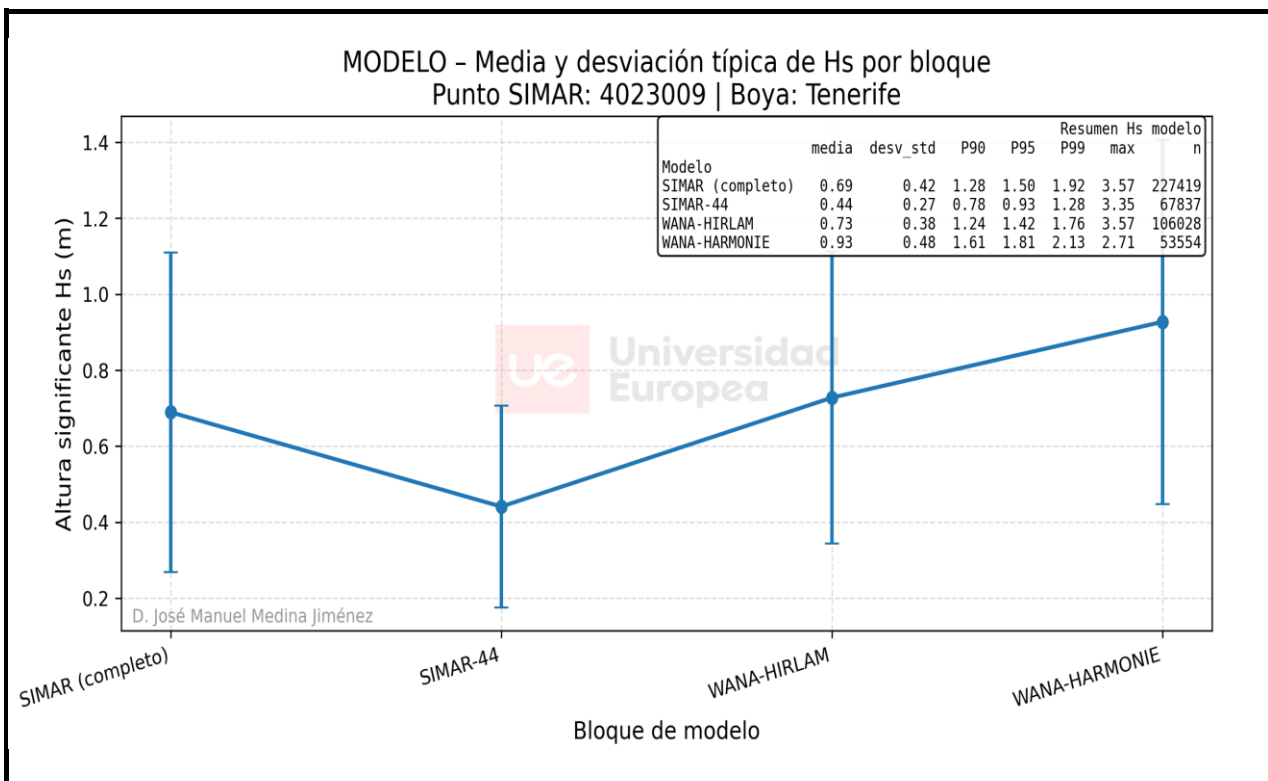
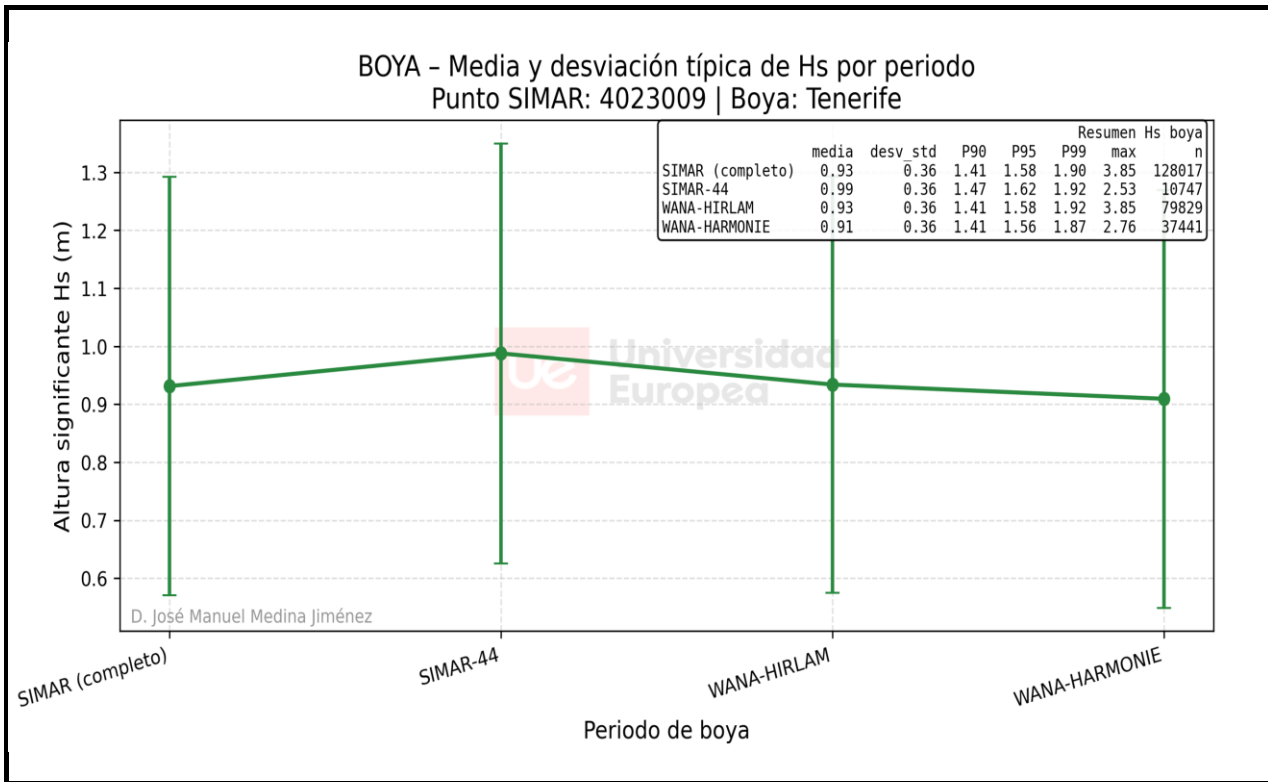


#### 4.2. Función distribución acumulada (CDF) de Tp

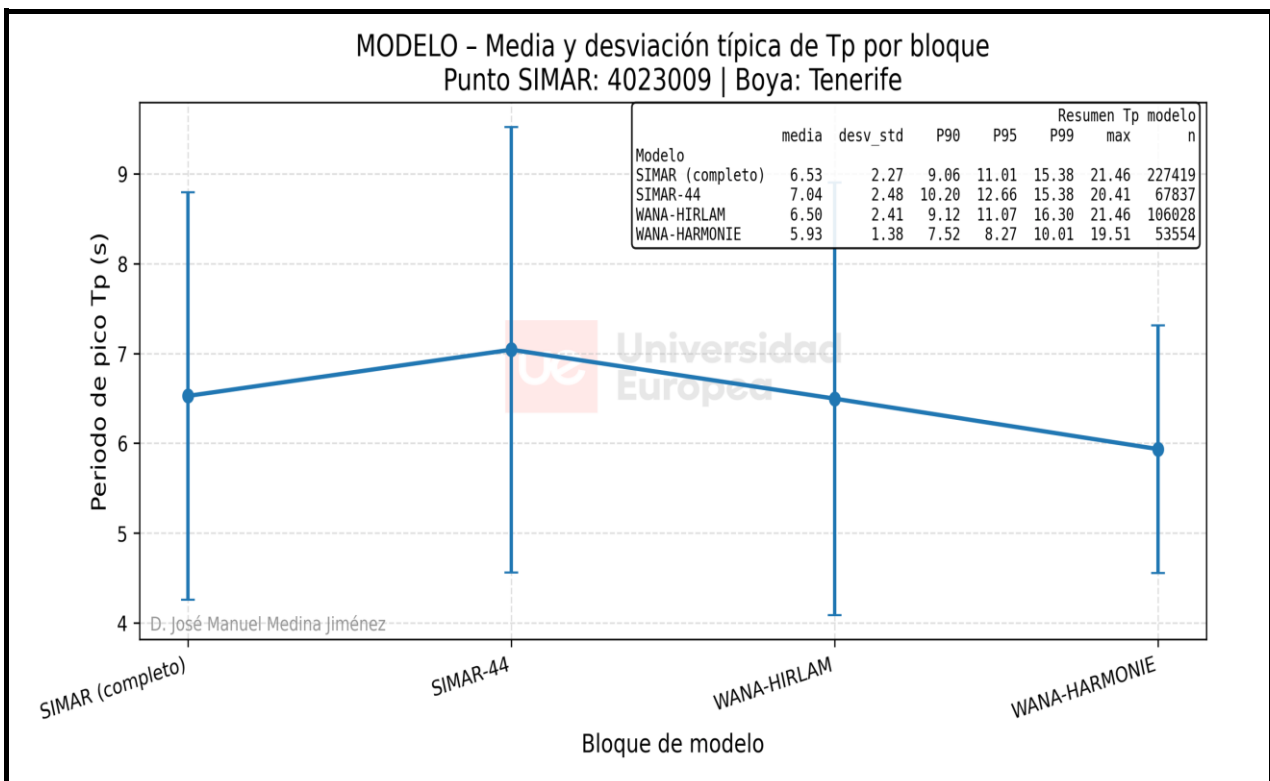
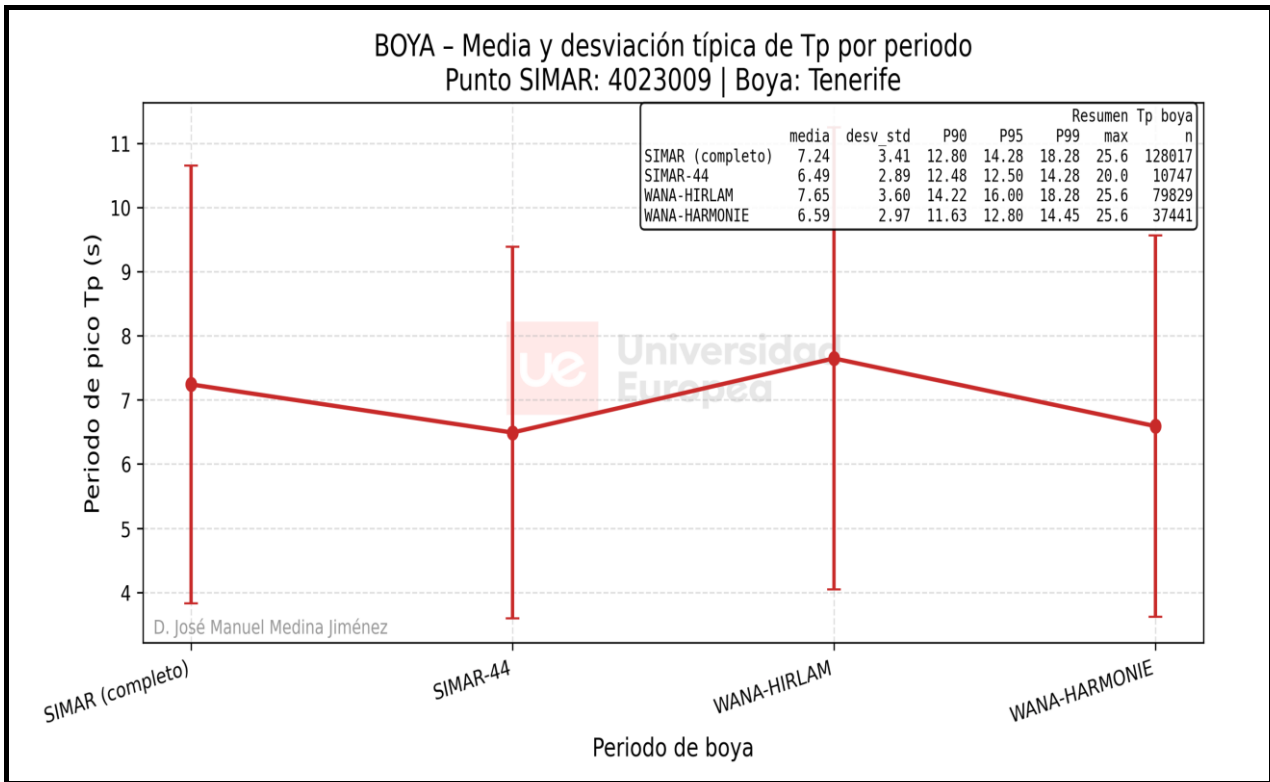




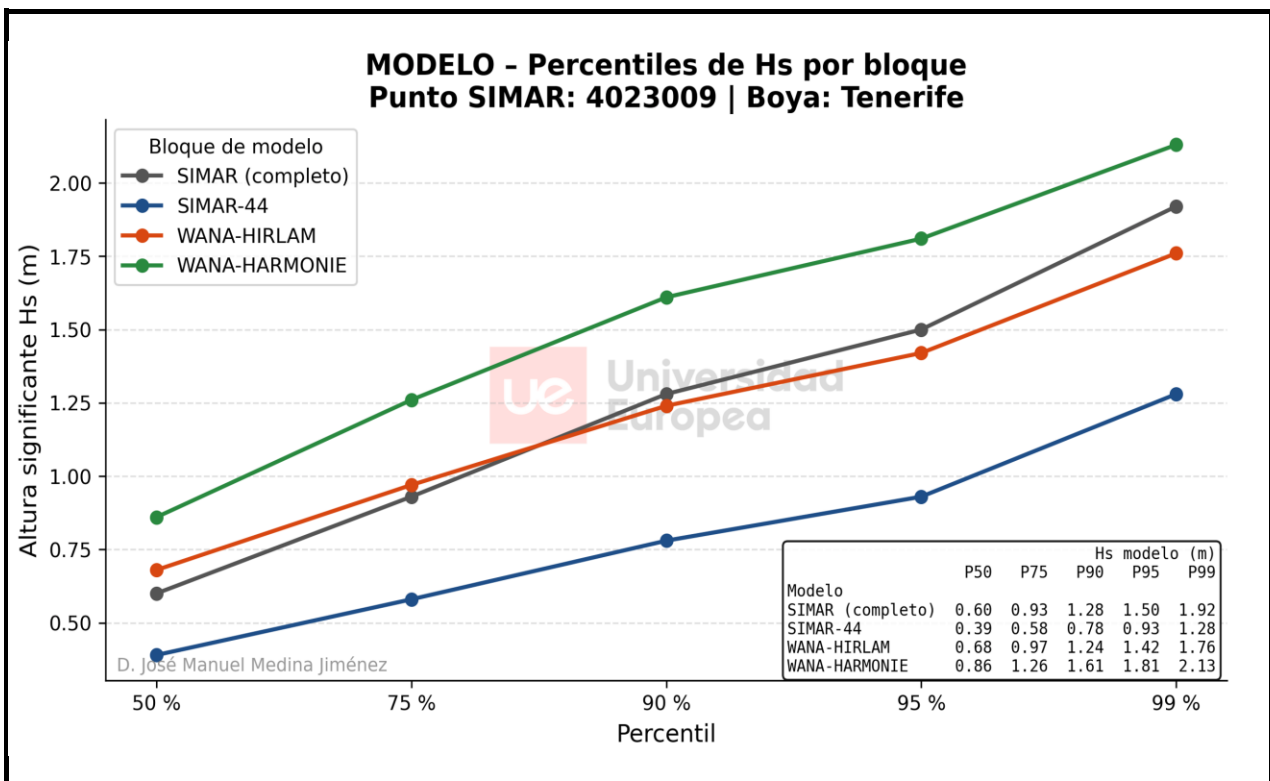
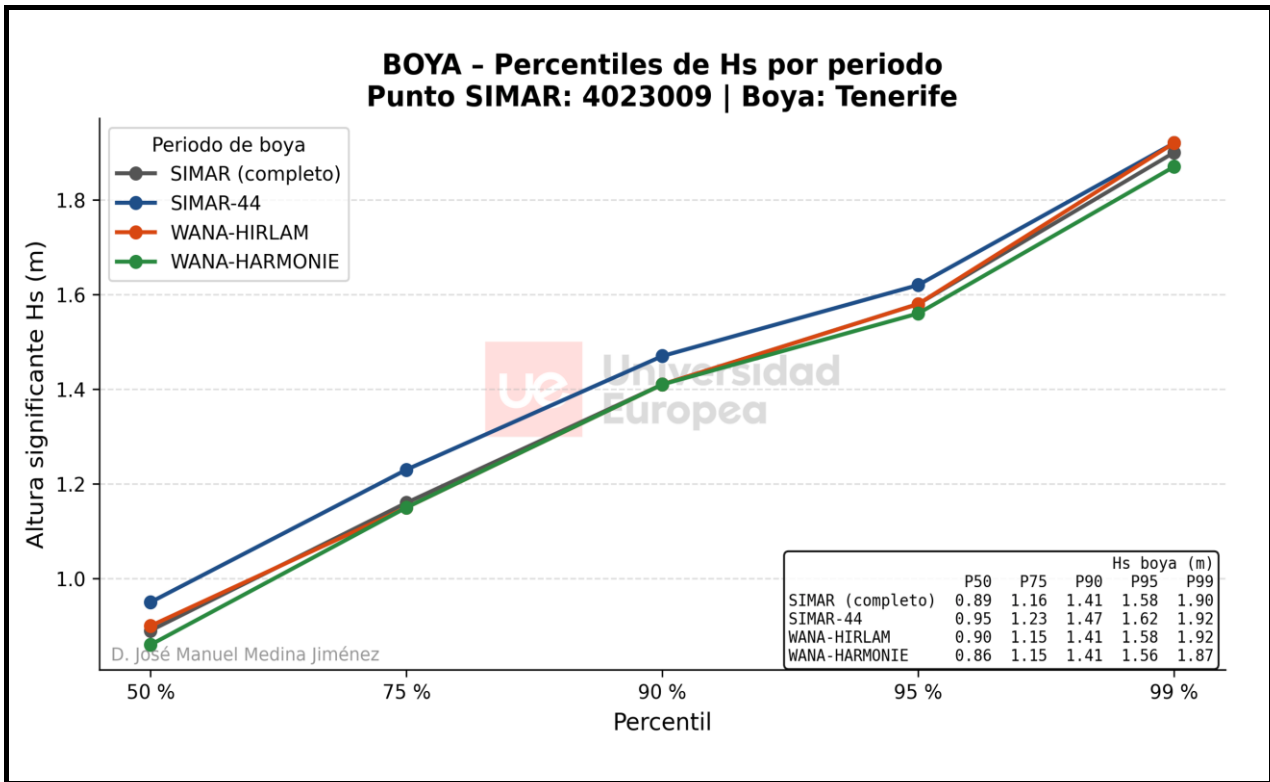
### 5. Comparación de estadísticos básicos de Hs por periodos de modelización SIMAR



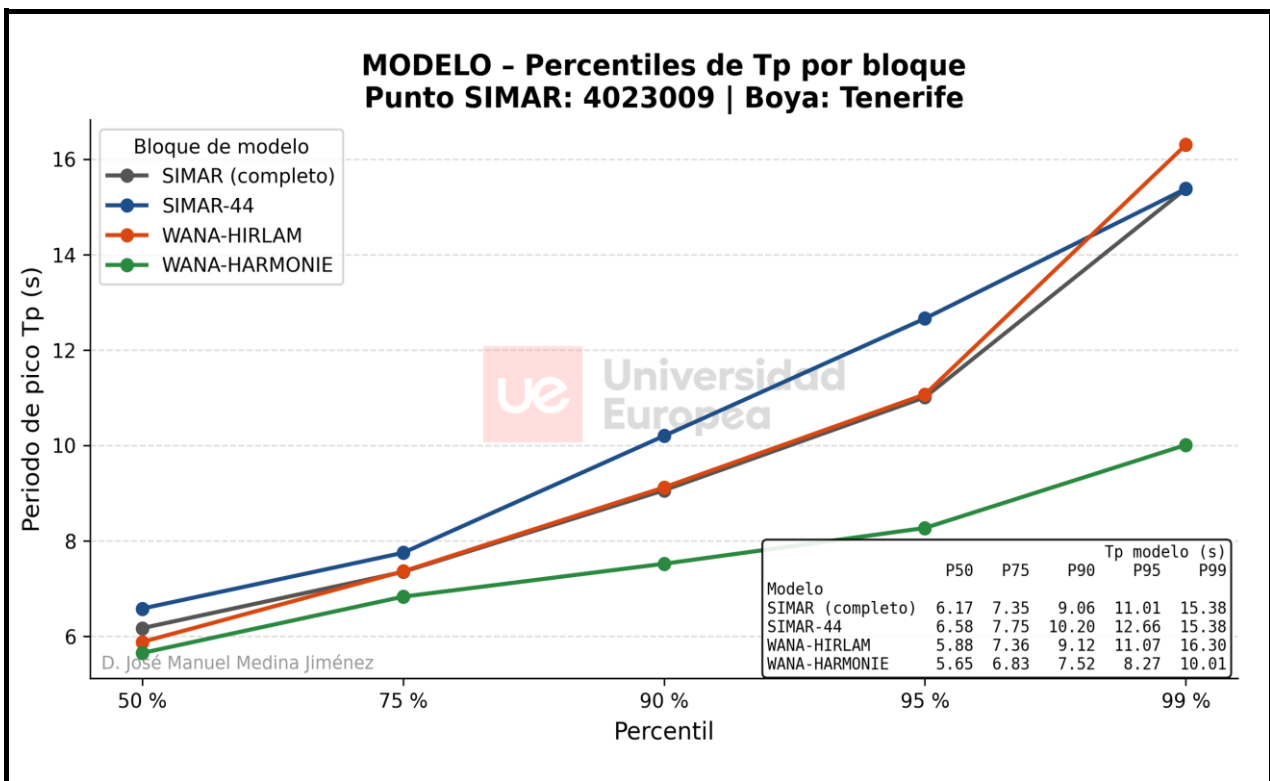
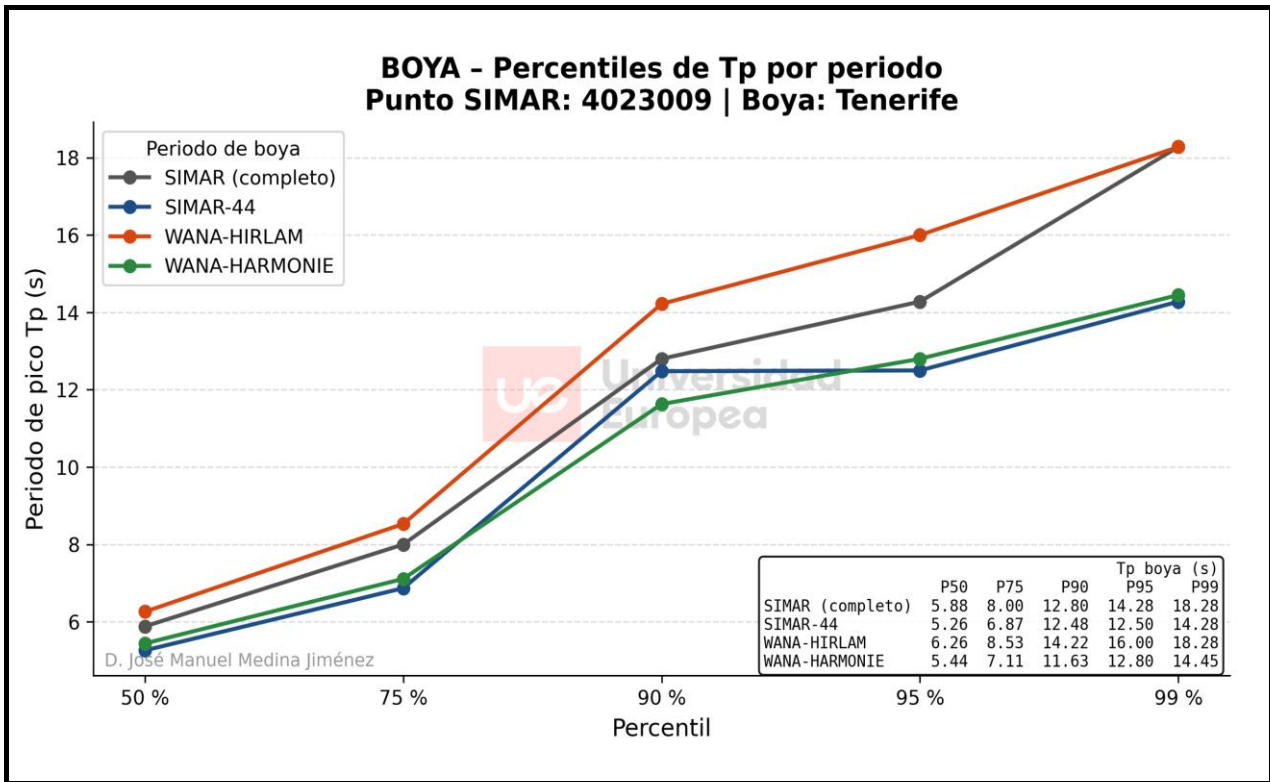
6. Comparación de estadísticos básicos de Tp por periodos de modelización SIMAR



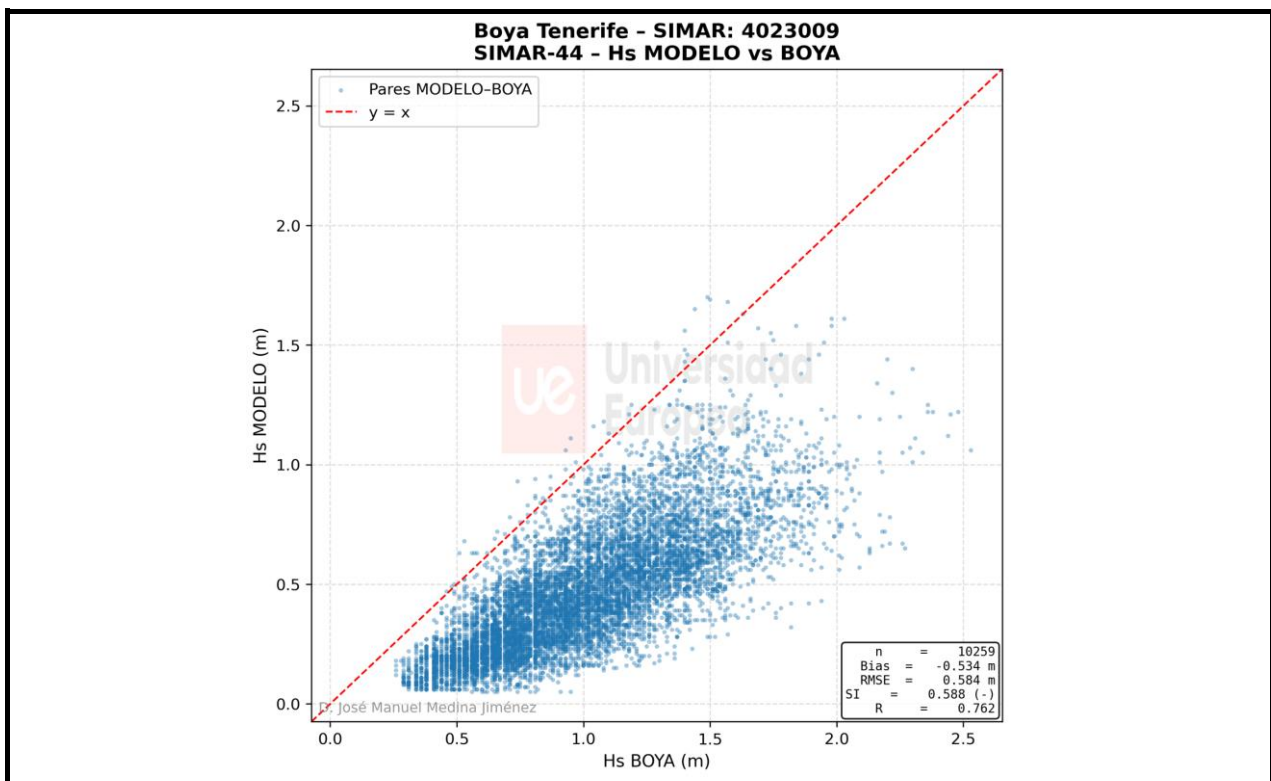
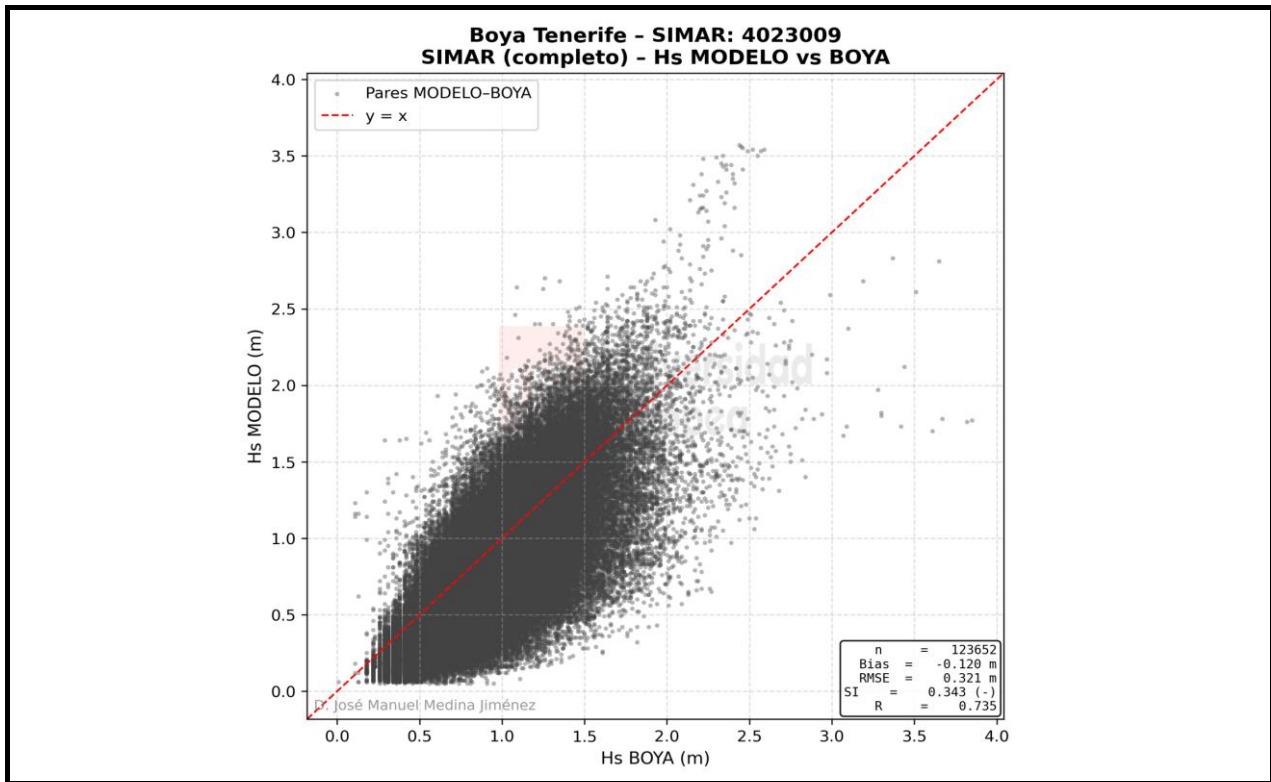
7. Percentiles de Hs por periodos de modelización SIMAR

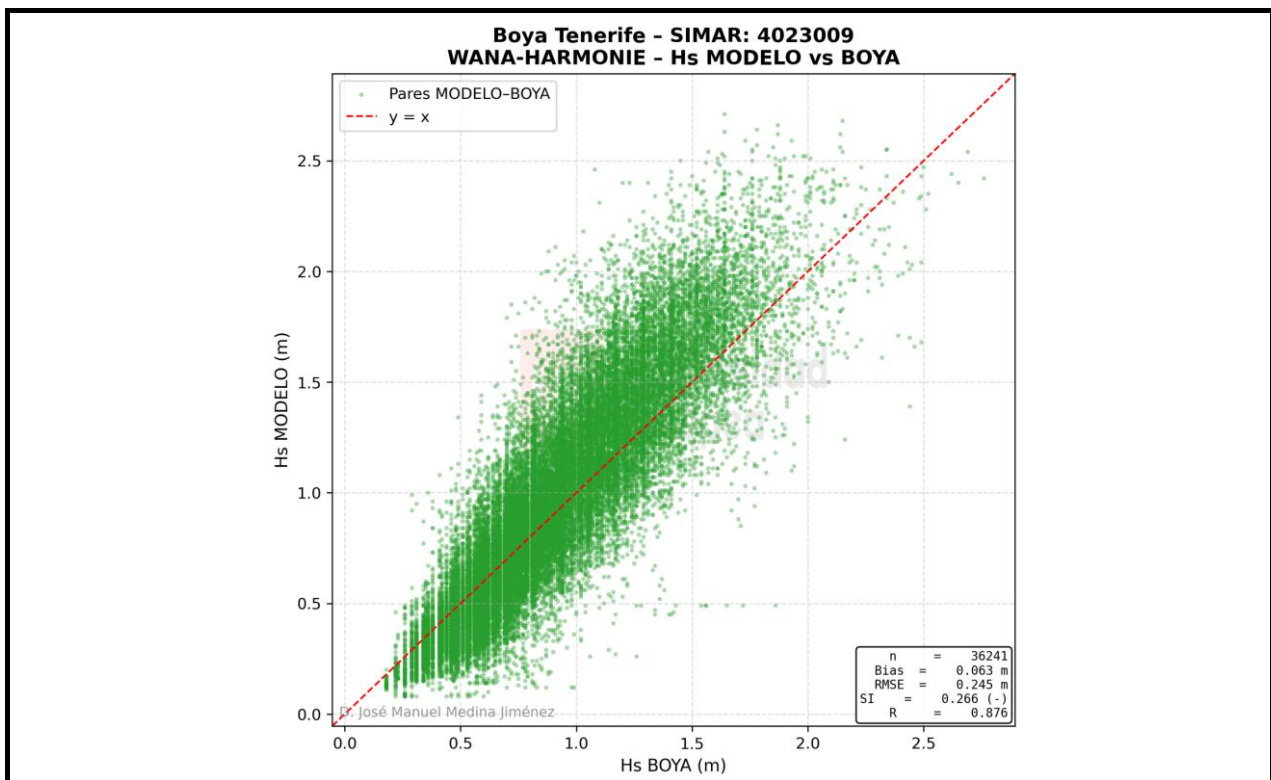
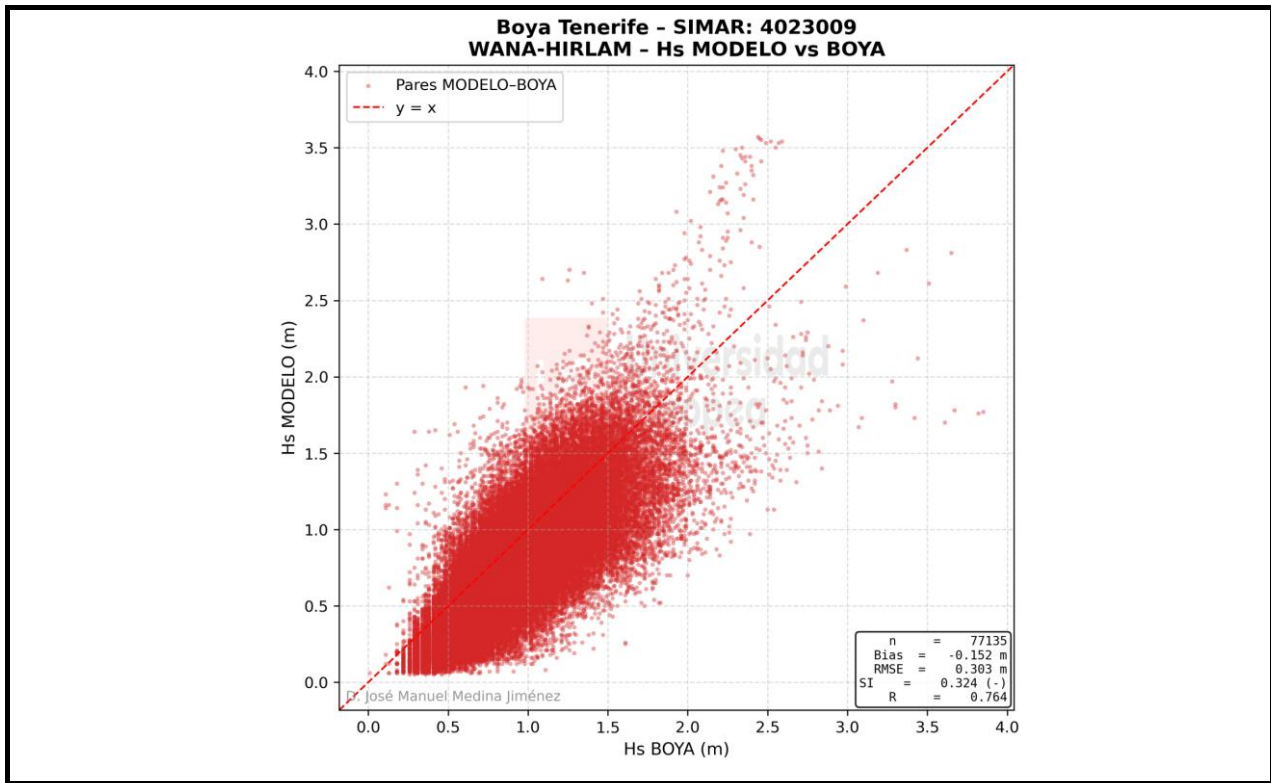


8. Percentiles de Tp por periodos de modelización SIMAR

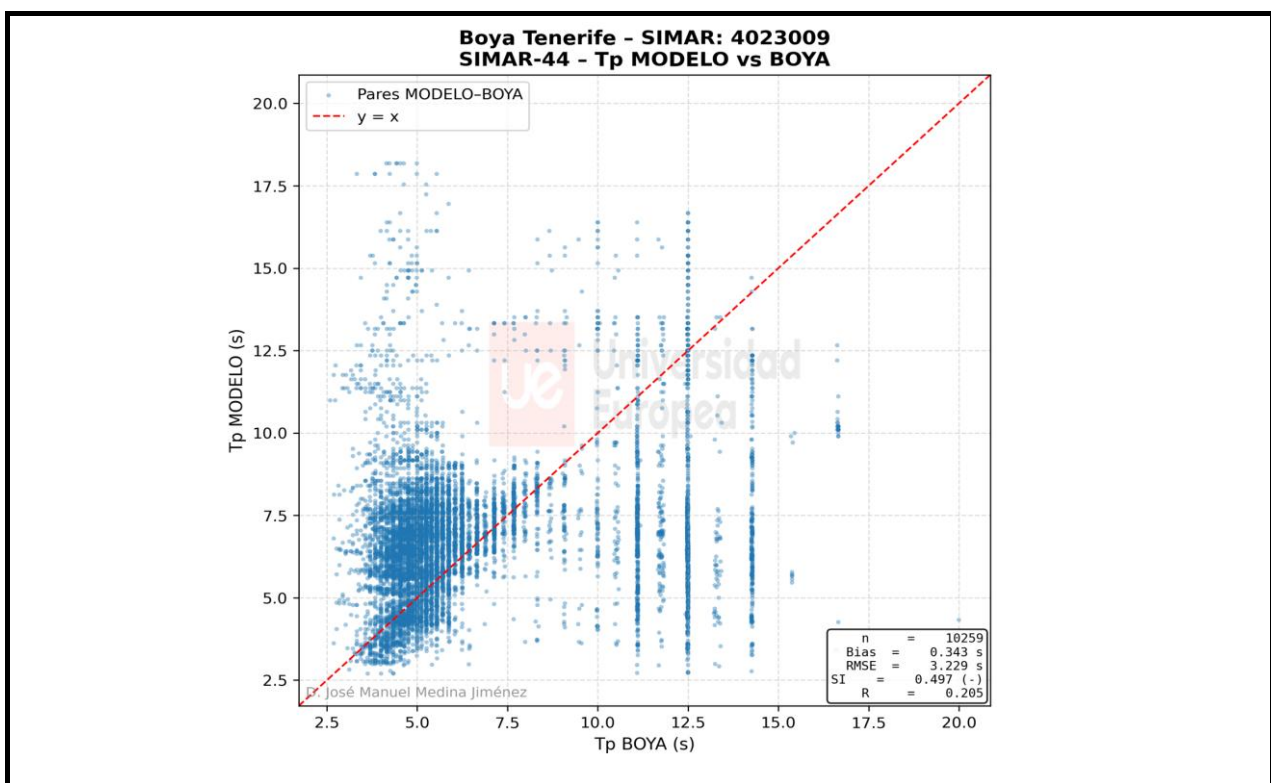
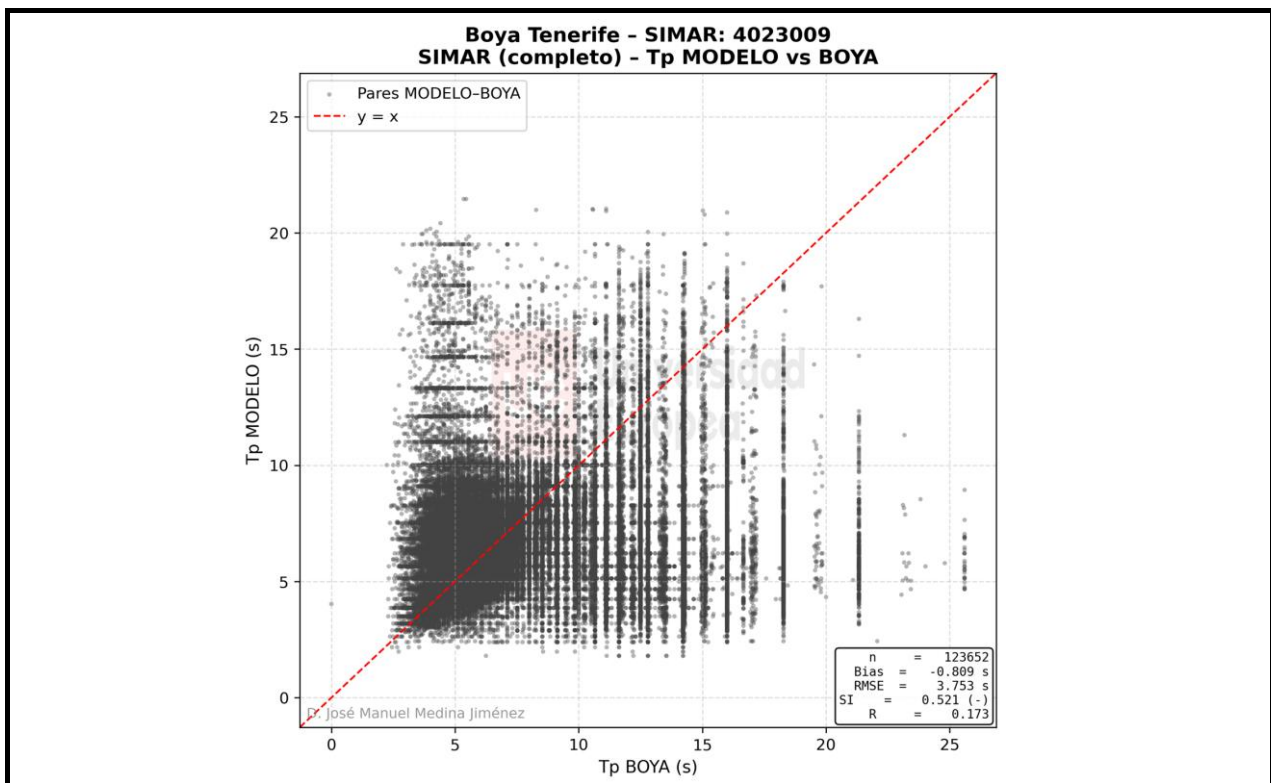


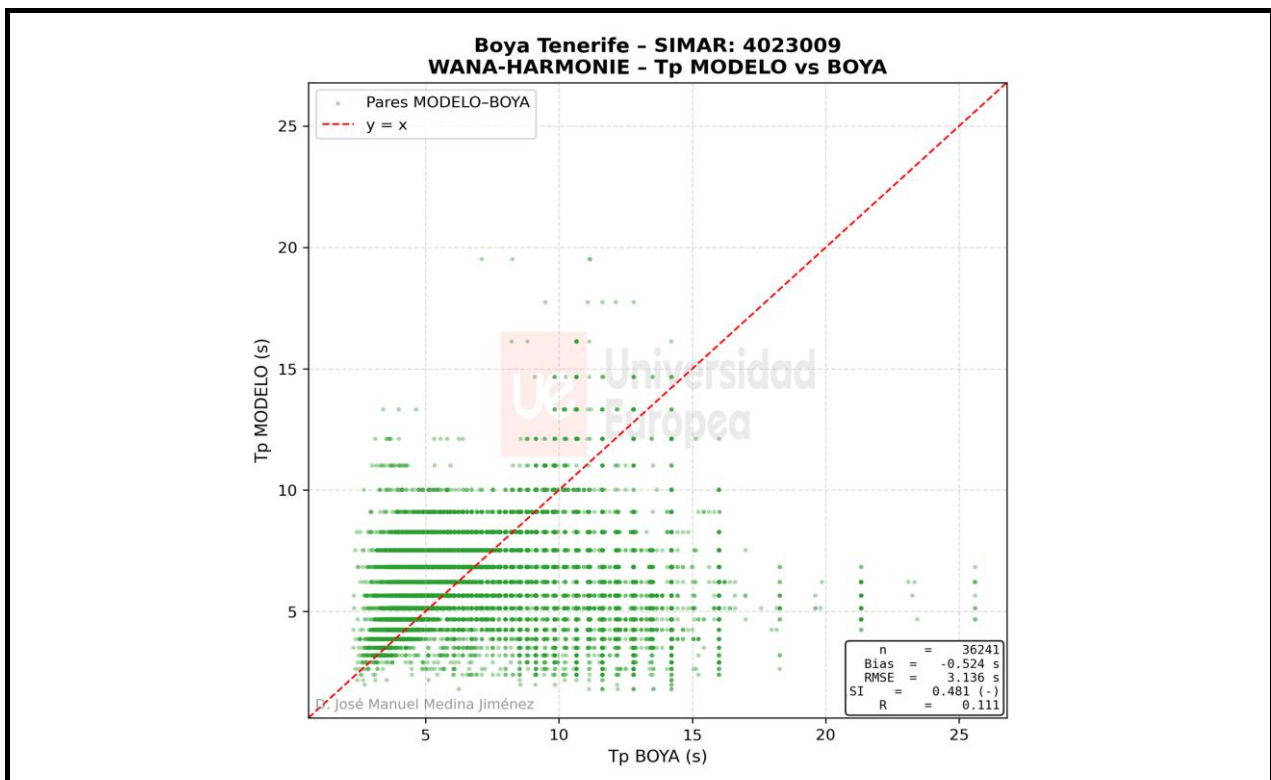
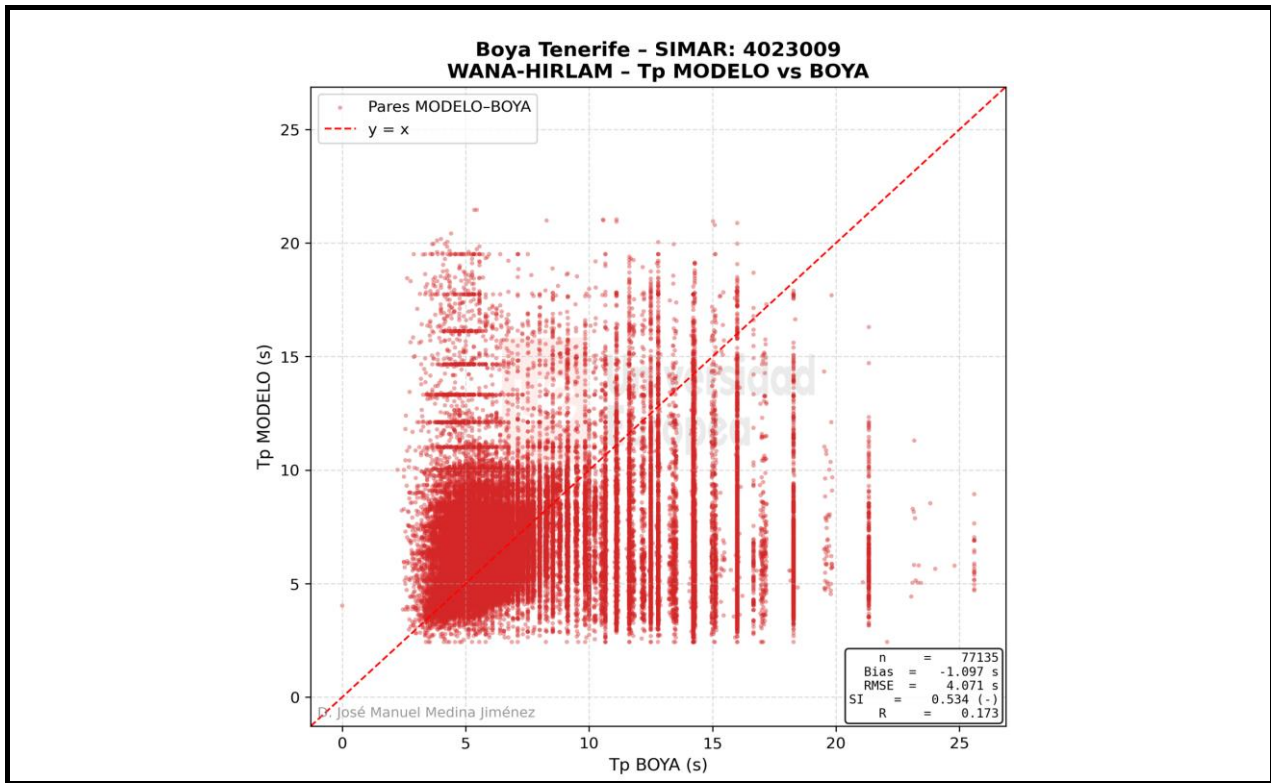
9. Diagrama de dispersión modelo-boya de Hs





### 10. Diagrama de dispersión modelo-boya de Tp





### 11. Análisis y validación del régimen extremal del oleaje (POT-GPD)

