



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

EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DEL LAGO TANGANICA EN EL PUERTO DE KALUNDU (CONGO)

Trabajo realizado por:
María Teresa Tisaire Puerto

Dirigido por:
Gabriel Díaz Hernández

Titulación:
Máster Universitario
en Costas y Puertos

TRABAJO FIN DE MASTER

Santander, Septiembre de 2024

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos tutores, el Dr. Gabriel Díaz Hernández y el Dr. Antonio Tomás Sampedro, pertenecientes al Grupo de Puertos e Infraestructuras Costeras del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). Bajo su atenta supervisión he llevado a cabo este trabajo, y sin su apoyo y orientación no habría sido posible completarlo. Quisiera también agradecer al Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria) por la beca de estudios que me brindó la oportunidad de colaborar con su equipo, gracias a la cual el desarrollo de este trabajo ha sido posible.

First of all, I would like to express my sincere gratitude to my two supervisors, Dr. Gabriel Díaz Hernández and Dr. Antonio Tomás Sampedro, from the Ports and Coastal Infrastructure Group at the Environmental Hydraulics Institute of the University of Cantabria (IHCantabria). Under their attentive guidance, I have carried out this work, and without their support and advice, it would not have been possible to complete it. I would also like to thank the Environmental Hydraulics Institute of Cantabria (IHCantabria) for the scholarship that allowed me to collaborate with their team, through which the development of this work has been made possible.

Resumen

Evaluación de la dinámica del Lago Tanganica en el puerto de Kalundu (Congo)

Este trabajo presenta un estudio exhaustivo para evaluar la operatividad del puerto de Kalundu, ubicado en la República Democrática del Congo, a partir del estudio de la agitación en su futura ampliación. Dado que el puerto se sitúa en un entorno lacustre, no se dispone de una base de datos existente sobre el oleaje en la zona. Por lo tanto, fue necesario desarrollar una base de datos específica para este proyecto. Para ello, se utilizó la serie de reanálisis ERA5 de vientos a escala global como entrada para forzar el modelo SWAN (Simulating WAves Nearshore), que simula la transmisión de energía a través de las olas. Este modelo es adecuado para áreas de grandes dimensiones, aunque presenta ciertas limitaciones al resolver fenómenos locales como la rotura y difracción de las olas.

Como parte del estudio, se llevó a cabo una caracterización climática del viento en puntos clave a lo largo del lago Tanganica, con el fin de obtener un conocimiento más profundo del comportamiento de los vientos en el área. El forzamiento del modelo se realizó a través de un enfoque híbrido, que combina la propagación dinámica con un análisis estadístico. Para identificar los casos estadísticos más representativos, se empleó el algoritmo de máxima disimilitud, el cual permitió seleccionar las situaciones que, al ser propagadas, facilitaron la reconstrucción, mediante funciones RBF (Radial Basis Functions), de un conjunto completo de condiciones de oleaje. A partir de esta reconstrucción, se generaron series continuas de olas en los puntos de interés establecidos dentro de la malla numérica.

Una vez obtenidas estas series, se procedió a realizar una caracterización detallada del oleaje en dichos puntos con el objetivo de definir con precisión el clima de oleaje de la zona. Tras completar esta fase, se pasó a la propagación y análisis de la agitación en la nueva geometría de la ampliación del puerto. Para esta etapa, se volvió a utilizar el enfoque híbrido, seleccionando nuevamente los casos de oleaje que pudieran representar de forma adecuada las condiciones reales. Estos casos fueron propagados utilizando el modelo MSP (Mild Slope), que permite resolver la fase de las ondas y proporciona información detallada sobre procesos locales como la reflexión, refracción, difracción y rotura de las olas.

Finalmente, una vez obtenidas las nuevas series de agitación dentro del área definida para el modelo MSP, se realizó un análisis de operatividad para evaluar el comportamiento del puerto ante estas condiciones. Los resultados de dicho análisis fueron satisfactorios, demostrando que la nueva configuración geométrica del puerto garantiza su operatividad durante todo el año, lo que implica que la ampliación propuesta es adecuada desde el punto de vista de la agitación.

Abstract

Kalundu port lake dynamincs assessment (Congo)

This work presents a comprehensive study to evaluate the operability of the Kalundu port, located in the Democratic Republic of the Congo, based on the analysis of wave agitation for its planned expansion. Since the port is situated in a lacustrine environment, no existing wave database is available for the area. Therefore, it was necessary to develop a specific database for this project. To this end, the ERA5 global wind reanalysis dataset was used as input to force the SWAN model (Simulating WAVes Nearshore), which simulates the energy transmission through waves. This model is suitable for large domains, although it presents certain limitations when resolving local phenomena such as wave breaking and diffraction.

As part of the study, a wind climate characterization was carried out at key points along Lake Tanganyika to gain a deeper understanding of wind behavior in the area. The model forcing was performed through a hybrid approach, combining dynamic propagation with statistical analysis. To identify the most representative statistical cases, the maximum dissimilarity algorithm was employed, which allowed for the selection of situations that, once propagated, facilitated the reconstruction—using Radial Basis Functions (RBF)—of a complete set of wave conditions. Based on this reconstruction, continuous wave series were generated at the points of interest established within the numerical grid.

Once these series were obtained, a detailed characterization of the wave conditions at these points was conducted to accurately define the wave climate in the area. After completing this phase, the propagation and agitation analysis for the new geometry of the port expansion was undertaken. For this stage, the hybrid propagation method was used again, selecting wave cases that could adequately represent real conditions. These cases were propagated using the MSP (Mild Slope) model, which solves the wave phase and provides detailed information on local processes such as reflection, refraction, diffraction, and wave breaking.

Finally, after obtaining the new agitation series within the domain defined for the MSP model, an operability analysis was conducted to assess the port's performance under these conditions. The results of this analysis were satisfactory, showing that the new geometric configuration of the port ensures operability throughout the year, indicating that the proposed expansion is suitable in terms of wave agitation.

Índice general

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	6
1.1. Zona de estudio	6
1.1.1. Definición de las características macroclimáticas de la zona de estudio	9
2. Objetivo del proyecto	11
3. Datos de partida	12
3.1. Datos de batimetría	12
3.2. Datos de viento	12
3.3. Antecedentes	15
4. Metodología general	19
4.1. Análisis climático en la zona de estudio	19
4.2. Creación de la base de datos de oleaje generado localmente por viento	20
4.3. Asimilación del clima de oleaje en la zona de estudio	21
4.4. Propuesta de alternativas geométricas para el nuevo puerto	22
4.5. Aproximación numérica de agitación portuaria	23
4.6. Post-proceso de resultados y análisis operatividad	23
5. Aplicación metodología al lago Tanganica	25
5.1. Análisis climático preliminar de los viento en el área de estudio	25
5.2. Estadística descriptiva del viento	29
5.3. Generación del oleaje de viento	35
5.4. Caracterización del clima del oleaje en la zona de estudio	41
5.5. Caracterización conjunta del clima del viento y el oleaje	46
5.6. Alternativas geométricas para el diseño de la ampliación del puerto	52
5.7. Simulación numérica de la agitación portuaria	54
5.7.1. Bases y criterios de diseño	59
5.8. Post-procesamiento de los resultados y análisis de operatividad	60
6. Conclusiones generales	71
A. Análisis de afección variabilidad viento sobre punto de control	72
A.0.1. Tabla de ocurrencia	72
A.0.2. Estacionalidad	77
A.0.3. Rosas direccionales	85

A.0.4. Análisis persistencias estacional y direccional	89
A.0.5. Régimen medio y extremal mensual	97
A.0.6. Régimen medio y extremal direccional	105
A.0.7. Régimen medio y extremal	113
Bibliografía	121

1. Introducción

El lago Tanganica, uno de los más grandes y profundos del mundo, desempeña un papel crucial en el transporte y comercio de África Central. Su significancia económica y estratégica ha destacado la necesidad de mejorar la infraestructura portuaria, particularmente en el puerto de Kalundu [13]. Para llevar a cabo esta expansión de manera eficiente y segura, es esencial comprender y prever el comportamiento del oleaje en el lago.

Este proyecto se enfoca en la generación y análisis del oleaje en el lago Tanganica utilizando el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [39] para la evaluación de la agitación en la ampliación del puerto de Kalundu. Implementar el modelo SWAN permitirá simular diversas condiciones de oleaje y evaluar su impacto en el puerto de Kalundu, proporcionando datos precisos para la planificación y ejecución de la ampliación portuaria. Este enfoque metodológico asegura que el diseño del puerto no solo se adapte a las condiciones actuales, sino que también pueda anticipar y mitigar problemas futuros relacionados con el oleaje y la sedimentación.

La selección del puerto de Kalundu para este estudio se debe a su importancia estratégica como punto de conexión clave entre el lago Tanganica y otras rutas comerciales vitales, incluyendo la conexión con Bukavu a través de un camino parcialmente pavimentado que sigue el curso del río Ruzizi [25, 35]. Además, las características hidrográficas y sedimentológicas del lago Tanganica, influenciadas por los vientos predominantes del sureste y la dinámica de transporte de sedimentos, hacen de Kalundu un caso ideal para entender y mitigar los efectos de la sedimentación y la agitación [33, 35].

La ampliación de dicho puerto se puede ver en la figura adjunta a continuación (ver fig.1.1). Como se aprecia en la misma, esta consta de dos dragados, el primero realizado en la zona protegida por el dique exterior, mientras que el segundo se realiza frente al muelle, en la zona no protegida. Se propone la creación de dos terminales para portacontenedores en el muelle y la zona de atraque para ferrys en el interior del área protegida por el dique exterior. Se plantea recrear las cotas de las estructuras de protección con el fin de limitar los rebases. La estructura del dique exterior se trata de una estructura pilotada apantallada, la cuál bloquea la transmisión del oleaje. El perímetro del puerto no se ve afectado por las modificaciones realizadas.

1.1. Zona de estudio

El lago Tanganica es un lago de agua dulce situado en el brazo occidental del Valle del Rift de África Oriental, a $3^{\circ}20'-8^{\circ}48'$ S y $29^{\circ}03'-31^{\circ}12'$ E (Fig. 1.2).

Es el segundo lago más profundo del mundo, después del lago Baikal en Siberia (Plisnier et al., 1999) [32], con una profundidad máxima de 1470 m y una profundidad media de 570 m. El lago Tanganica es un lago alargado con una longitud de 670 km y una anchura media de 50 km. El litoral del lago tiene una longitud aproximada de 1900 km (Coulter,



Figura 1.1: Ampliación de la dársena portuaria del puerto de Kalundu

1992) [9], que se compone de rocas (43 %), mezcla de rocas y arena (21 %), arena (31 %) y marisma (10 %) (Kelly, Mtiti, McIntyre y Vadeboncoeur, 2017) [18]. El lago Tanganica, que tiene una superficie de 32.600 km^2 , es compartido por cuatro países, a saber, Burundi (que posee el 8 % de la superficie total del lago), la RD del Congo (que posee el 45 %), Tanzania (que posee el 41 %) y Zambia (que posee el 6 %) (Nkotagu, 2008) [28]. Los cuatro países ribereños del lago se enfrentan a la doble presión de la expansión demográfica y la escasez de recursos, con un nivel de desarrollo económico relativamente bajo. La cuenca del lago tiene una superficie aproximada de 231.000 km^2 , que acoge a unos 10 millones de personas, con una densidad de población relativamente baja, de unas 43 personas/ km^2 . Sin embargo, la región lacustre, como zona de recursos clave (Odongo et al., 2014) [29], concentra obviamente más actividades humanas, y las cinco principales ciudades se concentran en la zona tampón de 10 km, incluidas Bujumbura (Burundi), Kigoma (Tanzania), Mpulungu (Zambia), Kalemie (RD Congo) y Uvira (RD Congo). Según los estudios, el tamaño de la población de esta

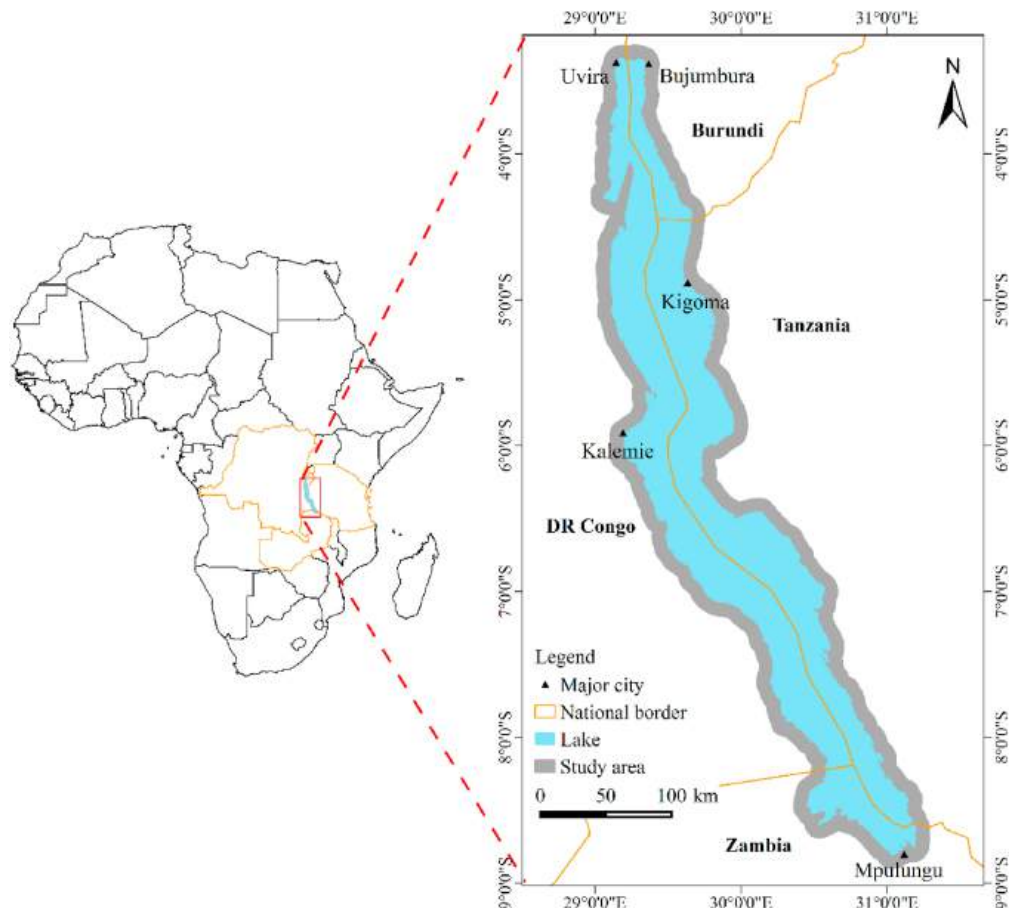


Figura 1.2: Localización del área de estudio. Tomado de Liting et al., (2020) [22]

zona crítica era de 1.48 millones en 2010, lo que supone un aumento de 1.5 veces respecto a 2000, de los cuales más del 90 % eran población agrícola. En consecuencia, las actividades económicas de la zona estaban dominadas por la agricultura, seguidas por el comercio y la pesca, y un pequeño número de industrias ligeras, como la de procesamiento de alimentos (Gao, Chen y Yu, 2015) [11].

Cada vez más investigaciones revelan graves problemas ecológicos acuáticos en relación con los efectos del cambio de uso del suelo provocado por las actividades humanas alrededor del lago (Alin et al., 2002) [1], y la zona tampón de 10 km con la gran mayoría de actividades humanas es claramente el área clave de actuación (Liting et al. , 2020) [22].

El lago se emplaza en una situación geográfica compleja, emplazándose entre dos sistemas montañosos de elevada altura, que afectan al comportamiento del régimen de vientos en la zona. En la figura 1.3 se muestra un mapa físico de la zona de estudio para ofrecer más claridad sobre la topografía de la zona.

En la figura 1.3 se ilustra esta complicada geografía que determina en gran medida las condiciones macro climáticas del lago. Además, la situación del lago es un lugar de una gran actividad tectónica teniendo en cuenta, además, la profundidad total de la falla en este lugar, que se eleva alrededor de unos 7000 metros de nivel de agua a la parte inferior del sedimento. El proceso de sedimentación que se ha producido durante millones de años ha creado un enorme demasiado de interés económico, y se han descubierto yacimientos de petróleo que es explotado por el Congo (Liting et al. , 2020) [22].



Figura 1.3: Mapa físico del entorno de Kalundu

1.1.1. Definición de las características macroclimáticas de la zona de estudio

La cuenca del lago Tanganica, situada en la región de los Grandes Lagos de África, presenta características macroclimáticas únicas que influyen significativamente en sus ecosistemas acuáticos y terrestres.

La cuenca del lago Tanganica experimenta un clima tropical con importantes variaciones debidas a la altitud y a la proximidad del ecuador. Este clima puede clasificarse en dos estaciones principales: la estación lluviosa y la estación seca. La temporada de lluvias, posee una duración de octubre a mayo, con precipitaciones considerablemente variables dentro de la cuenca, oscilando entre 800 mm y 1.600 mm anuales. Las zonas montañosas suelen recibir más precipitaciones que las zonas bajas. Durante esta estación, los vientos predominantes del suroeste traen humedad del océano Atlántico y del Congo, lo que provoca fuertes lluvias y frecuentes tormentas. La nubosidad es alta y la humedad relativa se mantiene elevada. En la denominada estación seca de duración de junio a septiembre las precipitaciones se caracterizan por su escasez, y muchas zonas experimentan pocos días de lluvia o ninguno. Las características predominantes son los vientos alisios del este y noreste, que traen aire seco del continente. La nubosidad disminuye significativamente y los días son soleados y con menor humedad relativa.

Con respecto a las temperaturas, en el rango anual las temperaturas medias anuales oscilan entre 24 °C y 27 °C al nivel del lago. Sin embargo, las temperaturas pueden variar mucho en función de la altitud. Las zonas más altas de la cuenca pueden experimentar temperaturas más frescas, especialmente por la noche. Durante la temporada de lluvias las temperaturas son más moderadas debido a la elevada nubosidad y humedad, mientras que en la estación seca, las temperaturas pueden ser más extremas, con días calurosos y noches más frescas.

Los vientos predominantes varían con las estaciones. Durante la estación lluviosa son comunes los vientos del suroeste, mientras que en la estación seca predominan los vientos del noreste. Existen efectos locales provocados por la topografía montañosa alrededor del lago puede influir en los patrones locales del viento, creando microclimas específicos en diferentes partes de la cuenca.

La humedad relativa es generalmente alta durante todo el año, especialmente en la estación lluviosa. La proximidad del lago también contribuye a mantener altos niveles de humedad. A su vez, la tasa de evaporación también es considerablemente alta debido a las temperaturas cálidas y a la exposición solar, lo que afecta al balance hídrico del lago.

Se pueden apreciar influencias climáticas externas, como las provocadas por los fenómenos de El Niño y La Niña, fenómenos climáticos globales pueden tener impactos significativos en la cuenca del lago Tanganica, alterando considerablemente los patrones de precipitación y temperatura.

Atendiendo al Cambio climático, las tendencias al calentamiento global están provocando cambios en la variabilidad climática de la región, afectando a las precipitaciones, la temperatura del agua y la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. Esto supone impactos en los ecosistemas. Las condiciones climáticas de la cuenca sustentan una rica biodiversidad, tanto acuática como terrestre. El lago alberga numerosas especies endémicas. Por otro lado, la agricultura y recursos hídricos se ven influidos por la variabilidad climática y que influye en las prácticas agrícolas locales y en la disponibilidad de recursos hídricos, que son cruciales para las comunidades que dependen del lago.

2. Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la agitación portuaria en el contexto de la ampliación del puerto de Kalundu. Para alcanzar este objetivo, se realizarán las siguientes tareas.

En primer lugar, desarrollo de una Base de Datos del Oleaje: Se creará una base de datos exhaustiva del oleaje en el lago Tanganica, utilizando datos de modelos globales de viento y simulaciones numéricas de olas. Esta base de datos será fundamental para evaluar la capacidad de las nuevas estructuras del puerto para resistir las condiciones de oleaje previstas. Posteriormente, el análisis de la Agitación Interna del Puerto: Se llevará a cabo un estudio detallado sobre la agitación de olas dentro del puerto, considerando la geometría y batimetría futura del puerto tras la ampliación. Este análisis ayudará a garantizar un entorno seguro y eficiente para las operaciones portuarias.

Seguidamente, la optimización del Diseño del Puerto: Mediante simulaciones y análisis del oleaje, se buscará optimizar el diseño del puerto para mejorar su capacidad operativa y resiliencia frente a condiciones adversas.

Este enfoque tiene como finalidad no solo fortalecer la infraestructura portuaria, sino también promover el desarrollo económico y la seguridad marítima en la región [24].

3. Datos de partida

Los dos puntos de partida del estudio son: a) análisis de datos numéricos provenientes de bases de datos de viento y batimetría, y b) análisis de la información proporcionada por informes anteriores.

3.1. Datos de batimetría

En primer lugar, se ha descargado la batimetría general del lago desde el ArcGIS Story Map de TNC [40], donde la profundidad máxima en el lago es de 1400 m, mientras que la profundidad mínima es de 2 m. La profundidad media se sitúa en 24.1 m, con una mediana de 10 m y una desviación estándar de 93.6 m. La distribución presenta una asimetría y una curtosis de -10.7 y 127.8, respectivamente. Además, se dispone de una batimetría detallada en el área de interés.

La batimetría general se muestra en la Figura 3.1, donde las coordenadas geográficas están representadas en coordenadas UTM. La línea negra gruesa está trazada cada 500 m. Hay dos áreas principales con profundidades significativas, en el centro-norte y en el centro-sur del lago. La zona norte presenta profundidades menores a 400 m.

En la Figura 3.2, se muestra la batimetría detallada, donde las líneas azules gruesas representan los niveles batimétricos cada 5 m, referidos al cero local (765 m sobre el nivel del mar).

3.2. Datos de viento

En cuanto a los datos de viento, se han descargado del Copernicus Climate Data Store, específicamente de los datos horarios ERA5 a nivel único desde 1940 hasta el presente, proporcionando 60 años de datos de viento. ERA5 es el reanálisis de quinta generación del ECMWF para el clima y el tiempo global de las últimas 8 décadas [10], reemplazando al reanálisis ERA-Interim. Este reanálisis combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y consistente utilizando las leyes de la física. Este proceso, conocido como asimilación de datos, se basa en el método utilizado por los centros de predicción numérica del tiempo. ERA5 proporciona estimaciones horarias para una amplia gama de cantidades atmosféricas, de olas oceánicas y de superficie terrestre, con una estimación de incertidumbre muestreada por un conjunto subyacente de 10 miembros a intervalos de tres horas. ERA5 se actualiza diariamente con una latencia de aproximadamente 5 días. Para proporcionar una visión integral de la base de datos ERA5, se muestra una serie temporal de esta (ver Figura 3.3) en 5 ubicaciones representativas de la base de datos de viento, que son los nodos 6, 16, 20, 28 y 44, representados en la siguiente Figura 5.1. También se proporcionaron datos instrumentales de viento. En un intento de comprender/validar los datos proporcionados, las series temporales de las dos bases de datos

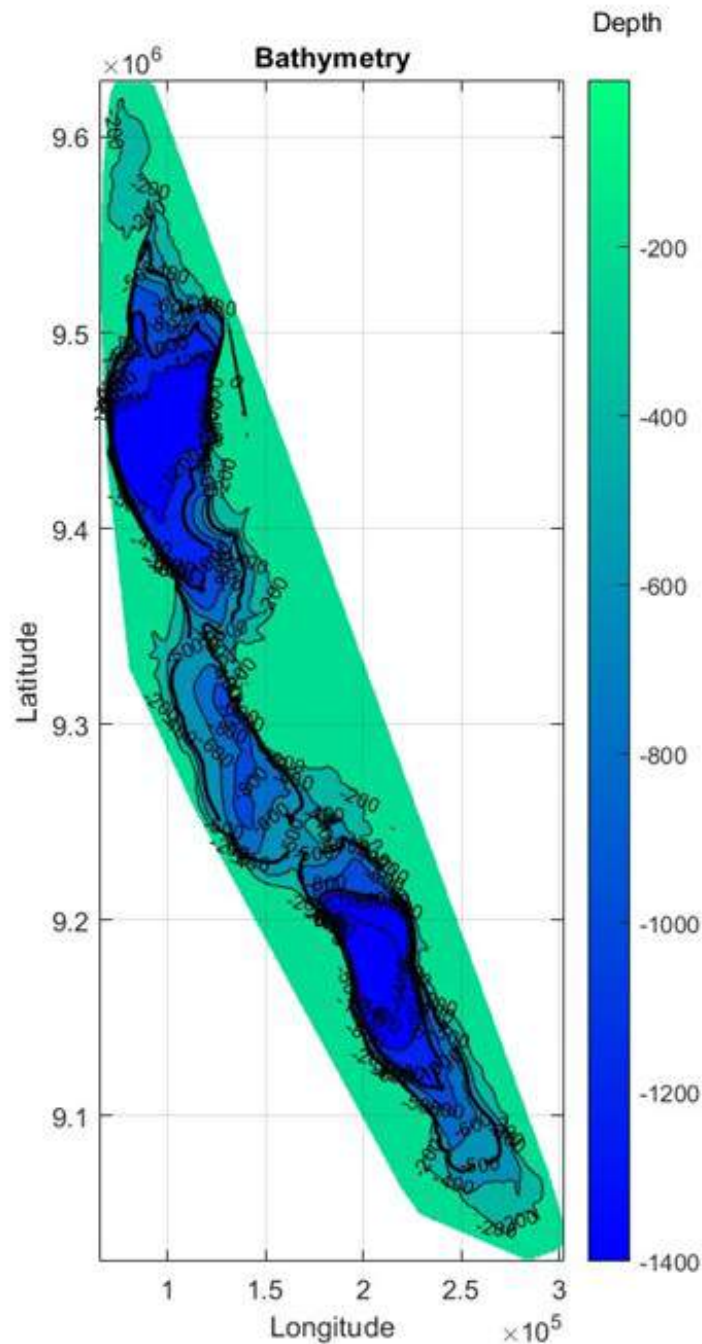


Figura 3.1: Batimetría general del lago Tanganica

instrumentales se muestran en la Figura 3.4.

Ambas se midieron en el aeropuerto de Bujumbura (sin información proporcionada sobre la altitud de medición sobre el suelo). La primera es un valor diario interanual que proporciona información desde 2013 hasta 2024, mientras que la segunda es un registro de 12 horas por día desde enero hasta abril del año en curso. En resumen, están disponibles tres bases de datos de viento. Primero, la base de datos de reanálisis ERA5 es la quinta generación del ECMWF para el clima y el tiempo global de las últimas 8 décadas; esta base de datos de viento es horaria desde las 00:00 del 1/1/1979 hasta las 23:00 del 31/8/2023.

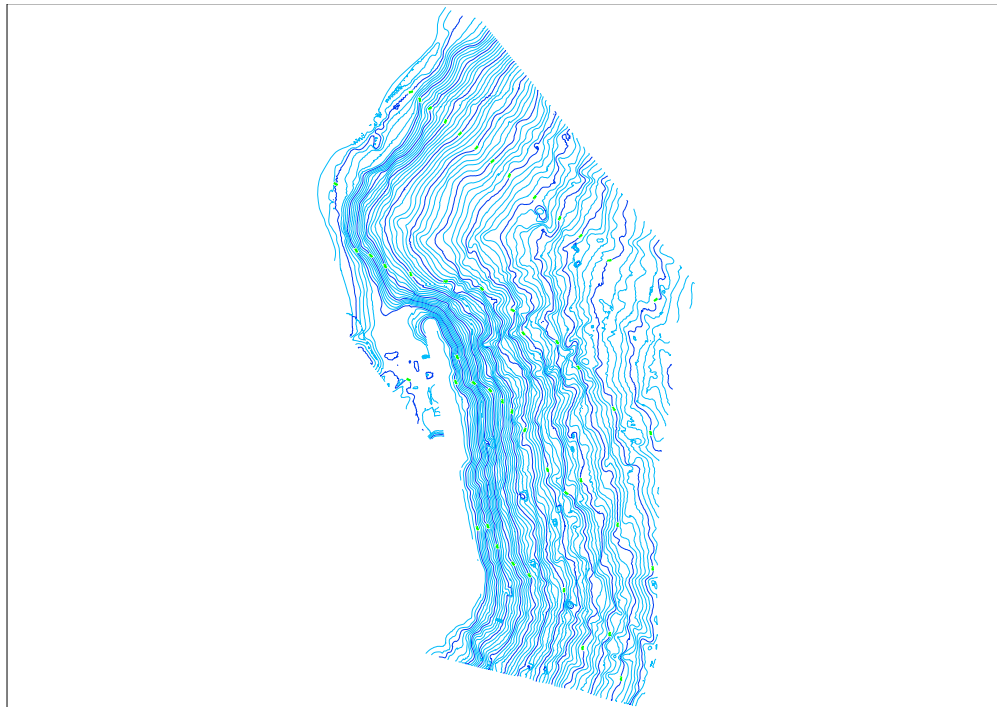


Figura 3.2: Batimetría de detalle del área de estudio (Puerto Kalundu)

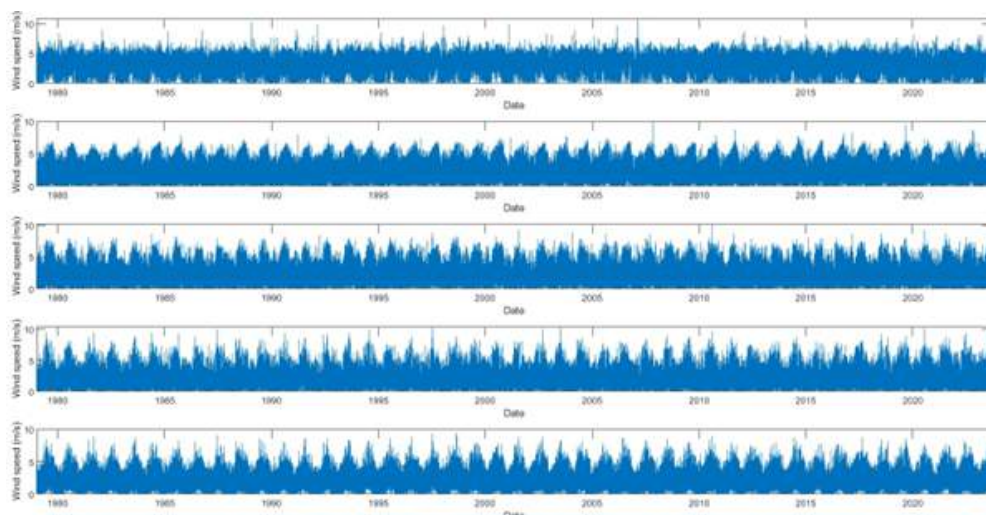


Figura 3.3: Series temporales de las localizaciones representativas de la base de datos ERA5 [10]

La segunda y la tercera son bases de datos instrumentales registradas en el aeropuerto de Bujumbura:

- Datos diarios desde el 1/1/2013 hasta el 30/12/2023. No se especificó qué significa "diario", por lo que se asume que los datos diarios proporcionados corresponden a un promedio diario.
- Datos horarios para 12 horas por día (solo de 6:00 a 18:00), entre el 1/1/2024 y el 8/4/2024.

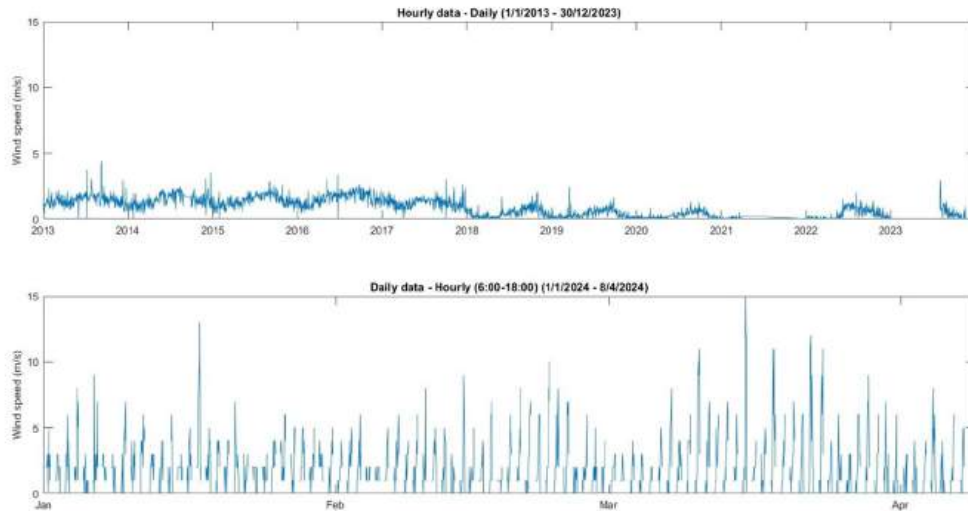


Figura 3.4: Series temporales de los dos registros instrumentales

3.3. Antecedentes

En este apartado se enumeran los documentos aportados para la contextualización de este estudio. Se adjunta además un breve resumen del contenido de cada uno de ellos. La información se extrae de informes anteriores en el área de estudio. Hay 9 documentos enumerados en el siguiente párrafo. El primero, "Historical and Modern Fluctuations of Lakes Tanganyika and Rukwa and Their Relationship to Rainfall Variability" de Sharon E. Nicholson [27], examina las fluctuaciones de los lagos Tanganica y Rukwa durante los últimos dos siglos. Utilizando relatos históricos de exploradores y colonos europeos, así como historias orales de poblaciones locales, el estudio reconstruye los niveles de los lagos desde finales del siglo XVIII hasta el siglo XX. La investigación encuentra que ambos lagos experimentaron fluctuaciones significativas, con niveles bajos a principios del siglo XIX, niveles altos a finales del siglo XIX y una rápida disminución alrededor del cambio al siglo XX. Estos patrones son consistentes con otros lagos de África Oriental, lo que indica cambios climáticos generalizados. El estudio también analiza la variabilidad de la lluvia y su impacto en los niveles de los lagos, señalando que, aunque la lluvia generalmente explica estas tendencias, las respuestas de los lagos pueden diferir debido a la naturaleza de cuenca cerrada del Lago Rukwa. Los hallazgos destacan la complejidad de la relación entre la lluvia y los niveles de los lagos, sugiriendo que los modelos de balance hídrico son necesarios para interpretaciones precisas de las fluctuaciones históricas de los lagos en términos de lluvia (Nicholson, 2020) [27].

El segundo, "Lake Tanganyika Basin Water Storage Variations from 2003–2021 for Water Balance and Flood Monitoring" de Paul Gérard Gbetkom [12], se centra en las variaciones en el almacenamiento de agua en la cuenca del Lago Tanganica desde 2003 hasta 2021, utilizando datos de teledetección para monitorear el balance hídrico y eventos de inundación. El estudio utiliza datos satelitales para evaluar los cambios espaciotemporales en el almacenamiento de agua, destacando fluctuaciones significativas durante el período de estudio. Estos cambios están vinculados a los patrones de lluvia y sus implicaciones para la gestión de los recursos hídricos y la evaluación del riesgo de inundaciones en la región. La investigación enfatiza la importancia de la monitorización continua del almacenamiento de agua para gestionar eficazmente los recursos hídricos de la cuenca y mitigar el impacto de las inundaciones. El estudio proporciona valiosas perspectivas sobre la dinámica del almacenamiento de agua en grandes cuencas lacustres y subraya el papel de la teledetección en la monitorización

ambiental (Gbetkom, 2024) [12].

El tercero, "The Study of Master Plan for the Port Sector in the Republic of Burundi" de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón [16], estudia el Puerto de Bujumbura en Burundi, abordando sus características, instalaciones de reparación de barcos, previsión de demanda, estrategias de desarrollo y consideraciones ambientales, con énfasis en las condiciones climáticas. El puerto tiene un muelle de 20 metros de largo y tres almacenes para carga. No tiene instalaciones de reparación de barcos. Se prevé un aumento en el tráfico de carga en el futuro, especialmente en el comercio con países vecinos. Se propone desarrollar el puerto como un centro de transporte confiable, y se sugiere la creación de un puerto interior en las afueras de la ciudad. Se identifican preocupaciones ambientales como la sedimentación y la contaminación, así como las condiciones climáticas tropicales que pueden afectar las operaciones portuarias. Se destaca la importancia de abordar estas preocupaciones para garantizar un desarrollo sostenible y eficiente del puerto.

El cuarto, "Port Access in the Lake Tanganyika: Key Challenges and Recommendations" [38] explora los desafíos y posibles soluciones para mejorar el acceso portuario en el Lago Tanganica. Comienza contextualizando el Lago Tanganica dentro del corredor de comercio y transporte regional. Las secciones clave incluyen la evaluación de las dificultades que enfrentan los barcos para acceder a los principales puertos, la discusión sobre la relevancia de una presa propuesta en el río Lukuga y la presentación de medidas para asegurar un mejor acceso para los barcos. El informe enfatiza la importancia del lago para el comercio regional, la biodiversidad y la seguridad alimentaria, señalando que es crucial para los medios de vida de millones de personas en los países circundantes (Serrat-Capdevila et al., 2016) [38].

El quinto, "Project Information Document (2018)" describe el Programa de Transporte del Lago Tanganica - SOP2 - Burundi (P165119) [44]. Incluye datos básicos del proyecto, objetivos de desarrollo para facilitar el movimiento sostenible de bienes y personas, y el contexto económico de los países miembros de la Comunidad de África Oriental (EAC). El documento discute el potencial significativo del sistema de transporte del lago para mejorar las condiciones económicas en la región, a pesar de los desafíos actuales de infraestructura y operativos (World Bank, 2018) [44].

El sexto, "Lake Tanganyika Research: Summary of the Scientific Programme (1992-1998)" resume la investigación científica realizada en el Lago Tanganica bajo el proyecto FAO/FIN-NIDA. Incluye una visión general de las características generales del lago, su ecosistema y sus pesquerías, así como hallazgos sobre los niveles de agua, el régimen térmico, la circulación del agua y el análisis de datos de teledetección. Este documento proporciona conocimientos completos sobre la dinámica ambiental del lago y el impacto de varios factores en su ecosistema y pesquerías, contribuyendo a prácticas de gestión sostenible (O.V. Lindquist, H. Mölsa & J. Sarvala, 1999) [21].

El séptimo documento, "Lake Tanganyika Hydrodynamics (Results of March 1993 – December 1994)" explora que en 1993, la estación seca en Bujumbura se extendió desde finales de mayo hasta finales de octubre, lo cual es característico de la región del lago y de Burundi en general. La temporada de lluvias de 1993-94 en Bujumbura comenzó a finales de octubre y duró hasta mayo, con un pico de lluvias intensas en enero de 1994. En Kigoma, ubicada en la cuenca principal del norte del lago, los vientos predominantes a través del lago provienen del este o del oeste, con vientos más fuertes durante la estación seca debido a mayores diferencias diarias de temperatura. En Kipili, en la parte media-sur del lago, también se observan patrones de viento estacionales, siendo más fuertes durante la estación seca. En conclusión, la Zona de Convergencia Intertropical desempeña un papel crucial en la determinación de las dos estaciones en la región del Lago Tanganica. Los cambios en los niveles de agua están

relacionados principalmente con la evaporación y la precipitación, mientras que las entradas y salidas de los ríos son de menor importancia (Kotilainen, Huttula, & Peltonen, 1995) [20].

Los octavo y noveno documentos pertenecen a los mismos autores, Verburg et al. "Hydrodynamics of Lake Tanganyika 1993-1996: Synopsis and interannual comparison" proporciona información detallada sobre el comportamiento del Lago Tanganica en relación con varios parámetros climáticos y físicos. Primero, se presentan los números de Wedderburn estacionales y los valores de g' , que indican el salto de densidad a través de la termoclina en las estaciones de Mpulungu, Kigoma y Bujumbura. Estos números y valores muestran variaciones significativas entre estaciones y períodos estacionales, lo que sugiere diferencias en el comportamiento térmico y la estratificación del agua en el lago. Además, se discute el contenido máximo de calor, calculado como el calor total por unidad de superficie que ingresa al lago entre los meses de menor y mayor contenido promedio mensual de calor del agua. Se destaca que el lago gana calor principalmente al comienzo de la temporada de lluvias, con una mayor absorción de calor en la superficie que en capas más profundas. Se proporcionan detalles sobre la ganancia y pérdida de calor en diferentes momentos y profundidades, así como sobre la tasa mensual de almacenamiento de calor en la columna de agua. Se observa que el Lago Tanganica experimenta variaciones estacionales significativas en parámetros como la evaporación, la radiación solar, la humedad relativa, la presión del aire, la temperatura del aire y la velocidad y dirección del viento. Estos factores, junto con la dinámica del viento y la estratificación del agua, juegan un papel crucial en la introducción de nutrientes en el ecosistema epilimnético y la intensidad de la mezcla en el lago. En conclusión, este estudio proporciona una visión detallada del comportamiento climático y físico del Lago Tanganica, destacando la importancia de factores como el viento, la radiación solar y la temperatura del aire en la dinámica del lago y su influencia en la productividad biológica y la circulación del agua (Verburg et al., 1998a) [42].

El último documento, "Hydrodynamics of Lake Tanganyika: Results for 1996" discute la influencia del viento en la introducción de nutrientes en el ecosistema epilimnético y la intensidad de la mezcla en el Lago Tanganica. Se destaca la importancia del afloramiento de nutrientes para sostener las cadenas alimentarias del lago. La productividad del lago depende en gran medida de la intensidad y dirección de las corrientes de agua, influenciadas por la velocidad del viento y las diferencias de densidad. Las diferencias de densidad están afectadas por el intercambio de calor entre masas de agua y entre el agua del lago y su entorno. Se discuten los patrones anuales y diarios en estos parámetros. Durante la estación seca, la mezcla de las aguas epilimnética e hipolimnética y el afloramiento son impulsados principalmente por fuertes vientos del sureste. Se observa que la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante la estación seca está al norte del Lago Tanganica. Durante esta estación, se observa un sistema intensificado de brisa diurna costera del lago, mientras que los vientos alisios del sureste proporcionan la energía principal al centro del lago. Se discuten las variaciones en la intensidad del viento y las temperaturas del agua, así como sus efectos en la mezcla y el afloramiento en diferentes partes del lago durante las estaciones seca y húmeda. Se menciona la importancia de los números de Wedderburn como indicadores de la mezcla del lago, comparándolos con estudios anteriores en el Lago Malawi. El estudio también examina la variabilidad interanual en las condiciones meteorológicas y sus efectos en la temperatura del agua, la evaporación, la mezcla y el afloramiento. Se discuten las posibles repercusiones de estas variaciones en la productividad primaria y secundaria del lago y en las capturas de peces. Además, se analiza la evolución del nivel del agua del Lago Tanganica a lo largo de los años, enfatizando las fluctuaciones estacionales y a largo plazo, así como su relación con la precipitación y la evaporación en la cuenca. Se concluye que, aunque hay variaciones interanuales en las condiciones meteorológicas y la dinámica del

lago, puede haber tendencias a largo plazo en el aumento de las temperaturas del agua y la variabilidad en los niveles del lago (Verburg et al., 1998b) [43].

Además, los estudios sobre la hidrodinámica del Lago Tanganica proporcionan información sobre su comportamiento en relación con varios parámetros climáticos y físicos. Las variaciones en factores como la evaporación, la radiación solar y la dinámica del viento influyen significativamente en la hidrodinámica del lago, impactando la introducción de nutrientes y la circulación del agua. Estos estudios subrayan la complejidad de la dinámica del Lago Tanganica, enfatizando la interacción de factores como el viento, la radiación solar y la temperatura del aire en su productividad ecológica y la circulación del agua, como se muestra en (Lindqvist, Mölsä, & Sarvala, 1999) [21], (Kotilainen, Huttula, & Peltonen, 1995) [20], (Verburg et al., 1998a) [42] y (Verburg et al., 1998b) [43].

En conclusión, la información proporcionada ofrece una comprensión integral del sector portuario en Burundi y de la hidrodinámica del Lago Tanganica. Se destacan los desafíos y las soluciones propuestas para el desarrollo sostenible, subrayando la importancia de las consideraciones ambientales y la cooperación regional para fomentar el crecimiento económico y la sostenibilidad ecológica.

4. Metodología general

En el siguiente capítulo se presenta la metodología seguida a lo largo de este informe para la obtención de los resultados presentados en el mismo. Esta se divide a su vez en distintas subsecciones que aportan un procedimiento detallado sobre las actividades realizadas. En primer lugar se presentan los métodos para el análisis climático de la zona de estudio. Seguidamente, las herramientas y pasos para la creación de la base de datos de oleaje generado localmente por viento y posteriormente para la asimilación del clima de oleaje en la zona de estudio. Tras esto, se muestra la propuesta de alternativas geométricas para el nuevo puerto y los métodos para la aproximación numérica de agitación portuaria, así como el post-proceso de dichos resultados y los análisis de operatividad.

4.1. Análisis climático en la zona de estudio

Para llevar a cabo un análisis climático de la zona de estudio, se realizó un análisis estadístico descriptivo que incluye la visualización de los datos mediante boxplots y rosas de probabilidad, así como la evaluación del régimen medio y extremal.

Los boxplots se construyeron calculando los percentiles 25 ($Q1$), 50 (mediana) y 75 ($Q3$), y utilizando el rango intercuartílico (IQR) para identificar valores atípicos, donde $IQR = Q3 - Q1$ y los límites inferior y superior se definen como $Q1 - 1,5 \times IQR$ y $Q3 + 1,5 \times IQR$, respectivamente.

Las rosas de probabilidad se crearon clasificando los datos direccionales en intervalos, calculando las frecuencias relativas y representándolas en un gráfico polar.

El régimen medio se evaluó ajustando un modelo a las estadísticas descriptivas, incluyendo la media $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ y la desviación estándar $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$.

Para el régimen extremal, se utilizaron máximos anuales ajustados a las distribuciones de valores extremos generalizada (GEV) y Gumbel, así como el método de picos sobre umbral (POT) para identificar y modelar los valores extremos. El ajuste a la distribución GEV se realizó utilizando la fórmula

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right] \quad (4.1)$$

, donde ξ es el parámetro de forma, μ es la media y σ es la escala. Para la distribución de Gumbel, se utilizó la fórmula

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - \mu}{\beta} \right) \right] \quad (4.2)$$

donde μ es la ubicación y β es la escala. En el método POT, se seleccionaron los valores que exceden el umbral del percentil 99.5 y se ajustó la distribución de Pareto generalizada

(GPD) con la fórmula

$$F(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\sigma}\right)^{-1/\xi} \quad (4.3)$$

, donde $y = x - u$, u es el umbral, ξ es el parámetro de forma y σ es el parámetro de escala [8, 19].

Para llevar a cabo un análisis climático de la zona de estudio, se realizó un análisis estadístico descriptivo que incluye la visualización de los datos mediante boxplots y rosas de probabilidad, así como la evaluación del régimen medio y extremal.

Los boxplots se construyeron calculando los percentiles 25 ($Q1$), 50 (mediana) y 75 ($Q3$), y utilizando el rango intercuartílico (IQR) para identificar valores atípicos, donde $IQR = Q3 - Q1$ y los límites inferior y superior se definen como $Q1 - 1,5 \times IQR$ y $Q3 + 1,5 \times IQR$, respectivamente.

Las rosas de probabilidad se crearon clasificando los datos direccionales en intervalos, calculando las frecuencias relativas y representándolas en un gráfico polar.

El régimen medio se evaluó ajustando un modelo a las estadísticas descriptivas, incluyendo la media $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ y la desviación estándar $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$.

Para el régimen extremal, se utilizaron máximos anuales ajustados a las distribuciones de valores extremos generalizada (GEV) y Gumbel, así como el método de picos sobre umbral (POT) para identificar y modelar los valores extremos. El ajuste a la distribución GEV se realizó utilizando la fórmula

$$(4.4)$$

donde ξ es el parámetro de forma, μ es la media y σ es la escala [8, 19].

4.2. Creación de la base de datos de oleaje generado localmente por viento

Para crear una base de datos de oleaje generado por viento, se utilizó el modelo *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) [39], una herramienta de simulación numérica para la generación y propagación de olas en aguas someras y costeras, que considera los efectos de viento, corrientes y mareas (Booij et al., 1999) [2]. Es importante señalar que SWAN no resuelve la fase de las olas, sino que propaga la energía de las mismas a través del dominio de simulación. La superficie del lago, obtenida a partir de datos topográficos y batimétricos, fue esencial para forzar el modelo SWAN adecuadamente y proporcionar una base precisa para la simulación del oleaje.

Para optimizar la simulación y reducir el tiempo computacional, se realizó un *downscaling* híbrido. En este proceso, se seleccionaron 400 casos representativos estadísticamente mediante el algoritmo *maxdiss*, que maximiza la disimilitud entre los casos seleccionados, asegurando así una cobertura amplia de las condiciones posibles (Camus et al., 2011) [6]. Estos casos fueron luego propagados dinámicamente a través del modelo SWAN, simulando las condiciones de oleaje bajo diferentes escenarios de viento con alta precisión.

Posteriormente, las series temporales en los puntos de control se reconstruyeron utilizando funciones de base radial (RBF). Las RBF permiten interpolar los resultados de las simulaciones para generar series temporales continuas de oleaje en los puntos de interés (Powell et al., 2001) [34], proporcionando una representación detallada y precisa de las condiciones de oleaje a lo largo del tiempo. La base de datos resultante contiene información detallada de olas generadas por viento para diferentes condiciones representativas, siendo esencial para

futuros análisis y estudios relacionados con la dinámica del lago y la gestión de recursos hídricos.

4.3. Asimilación del clima de oleaje en la zona de estudio

Para realizar la asimilación climática del oleaje en la zona de estudio, se partió de la reconstrucción de series temporales de altura significativa de ola (H_s) y periodo de pico (T_p), obtenidas mediante funciones de base radial (RBF) para la interpolación de datos simulados por el modelo *Simulating WAves Nearshore* (SWAN) [39]. Esta reconstrucción fue esencial para asegurar una cobertura continua y precisa de las condiciones de oleaje a lo largo del tiempo.

Se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo detallado, comenzando con la visualización de gráficos de ocurrencia conjunta entre H_s y T_p , los cuales permiten examinar la distribución conjunta de estas variables y identificar patrones recurrentes y extremos en el oleaje [2]. Posteriormente, se construyeron boxplots estacionales y direccionales para analizar la variabilidad temporal y direccional del oleaje. Los boxplots estacionales muestran la distribución de H_s y T_p para cada estación del año, mientras que los direccionales revelan cómo varía el oleaje según la dirección del viento dominante en la zona [15].

Para caracterizar el régimen medio del oleaje, se ajustó una función a las estadísticas descriptivas de H_s y T_p . Esto implicó calcular la media $\bar{X}$ y la desviación estándar σ de las series temporales reconstruidas, y ajustar una función que representara de manera precisa el comportamiento promedio del oleaje en la zona de estudio [31].

El análisis del régimen extremal escalar se llevó a cabo mediante la aplicación de tres métodos principales: la distribución de valores extremos generalizada (GEV), la distribución de Gumbel y el método de picos sobre umbral (POT). La distribución GEV se ajustó utilizando la fórmula:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right], \quad (4.5)$$

donde ξ es el parámetro de forma, μ es la media y σ es la escala [8]. La distribución de Gumbel se ajustó con la fórmula:

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - \mu}{\beta} \right) \right], \quad (4.6)$$

donde μ es el parámetro de ubicación y β es el de escala. El método POT seleccionó los valores que exceden un umbral (percentil 99.5) y ajustó la distribución de Pareto generalizada (GPD):

$$F(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\sigma} \right)^{-1/\xi}, \quad (4.7)$$

donde $y = x - u$, u es el umbral, ξ es el parámetro de forma y σ es el de escala [8].

El régimen extremal direccional se abordó ajustando las distribuciones GEV, Gumbel y POT a los datos de H_s y T_p categorizados por dirección de oleaje. Este enfoque permitió identificar las direcciones dominantes asociadas con los eventos extremos de oleaje, proporcionando perspectivas sobre cómo diferentes direcciones de viento influyen en la ocurrencia de condiciones extremas en la zona de estudio [14]. Se realizaron análisis específicos para cada dirección relevante, aplicando los mismos métodos de ajuste de distribuciones utilizados

en el régimen extremal escalar.

Esta metodología integral no solo proporciona una comprensión detallada del comportamiento climático del oleaje en la zona de estudio, sino que también constituye una base sólida para futuros estudios de gestión de riesgos costeros y planificación de infraestructuras marítimas.

4.4. Propuesta de alternativas geométricas para el nuevo puerto

El diseño de las alternativas geométricas para el nuevo puerto se llevó a cabo siguiendo un enfoque meticuloso que consideró la flota de diseño, los requerimientos operativos y las limitaciones específicas del emplazamiento. Las alternativas fueron desarrolladas utilizando AutoCAD, una herramienta de diseño asistido por computadora ampliamente reconocida en el campo de la ingeniería civil y marítima.

El proceso comenzó con la recopilación exhaustiva de información sobre la flota de diseño, que incluye las dimensiones y características operativas de los buques que utilizarán el puerto. Este análisis consideró tanto los buques actuales como los proyectados para el futuro, asegurando que el diseño propuesto sea viable a largo plazo. Se revisaron especificaciones técnicas de los buques, como eslora, manga, calado y tipo de carga, así como las normativas y estándares internacionales pertinentes [30].

Posteriormente, se definieron los requerimientos operativos del puerto, considerando aspectos como el número de muelles necesarios, el tipo y capacidad de las grúas, la infraestructura de almacenamiento y las facilidades para el manejo de diferentes tipos de carga. Además, se identificaron las limitaciones físicas y ambientales del sitio, tales como la topografía, la batimetría, las condiciones climáticas y de oleaje, así como las restricciones impuestas por las infraestructuras existentes y las áreas protegidas [3] [37].

Con la información previa, se procedió a desarrollar las alternativas geométricas utilizando AutoCAD. Cada alternativa se diseñó teniendo en cuenta la disposición óptima de los muelles, las áreas de maniobra y las zonas de almacenamiento. Se prestó especial atención a garantizar que los buques pudieran acceder y maniobrar de manera segura y eficiente dentro del puerto, evitando posibles conflictos operativos y maximizando la capacidad de manejo de carga [41].

Una vez diseñadas las alternativas geométricas, se evaluaron en términos de viabilidad técnica, económica y ambiental. Se realizaron simulaciones operativas para verificar la funcionalidad y eficiencia de cada diseño, considerando escenarios de tráfico y condiciones extremas de oleaje. También se llevaron a cabo análisis de costos para estimar las inversiones requeridas para la construcción y operación de cada alternativa, y se evaluaron los impactos ambientales potenciales de acuerdo con las normativas vigentes [5].

Finalmente, se seleccionó la alternativa óptima mediante un proceso de toma de decisiones multicriterio, que ponderó los factores técnicos, económicos y ambientales. Se presentaron las alternativas a las partes interesadas, incluyendo autoridades portuarias, operadores y la comunidad local, para asegurar que la alternativa seleccionada contara con un amplio consenso y cumpliera con las expectativas y requerimientos de todos los involucrados.

Esta metodología estructurada y detallada garantiza que el diseño del nuevo puerto sea robusto, eficiente y sostenible, alineándose con las mejores prácticas de ingeniería portuaria y los estándares internacionales.

4.5. Aproximación numérica de agitación portuaria

La aproximación numérica de la agitación portuaria se llevó a cabo utilizando un enfoque detallado basado en mallas y el modelo MSP (Mild Slope Equation), capaz de resolver la fase de las olas. El proceso se dividió en varias etapas fundamentales para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados.

Se diseñaron mallas adaptativas utilizando técnicas avanzadas de discretización espacial para cada tipo de oleaje relevante en el área del puerto. La adaptabilidad de las mallas permitió la propagación precisa de olas incidentes con diferentes características de frecuencia y amplitud alrededor de la estructura portuaria [7].

Previo a la generación de mallas, se definió el contorno detallado de la estructura portuaria en AutoCAD. Este contorno incluyó la especificación de las condiciones de contorno basadas en el coeficiente de reflexión de las olas en cada sección de la estructura portuaria. La correcta definición de estos parámetros fue crucial para simular adecuadamente la interacción entre las olas y las instalaciones portuarias [4].

El modelo MSP (Mild Slope Equation) fue implementado para realizar la aproximación numérica de la agitación portuaria. Este modelo es particularmente adecuado para aguas poco profundas y costeras, y permite calcular el campo de agitación resultante considerando la topografía submarina y las condiciones de oleaje incidente [23].

En lugar de reconstruir la agitación en puntos de control individuales, se utilizó el método de funciones de base radial (RBF) para reconstruir la altura de ola en áreas delimitadas predefinidas en AutoCAD. Estos polígonos definieron las áreas de interés donde se evaluaron las alturas medias y máximas de las olas. Las funciones RBF permitieron una interpolación precisa y eficiente de los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas [34].

Los resultados obtenidos proporcionaron información detallada sobre la altura media y máxima de las olas en las áreas específicas del puerto. Esta información fue fundamental para evaluar la seguridad estructural y operativa del diseño portuario, así como para optimizar las medidas de mitigación de agitación durante las operaciones portuarias [5].

La metodología utilizada aseguró una aproximación exhaustiva y rigurosa de la agitación portuaria, integrando tanto aspectos numéricos como geométricos de manera coordinada. Esto permitió generar resultados confiables que fueron fundamentales para la toma de decisiones en el diseño y operación del nuevo puerto, garantizando su eficiencia y seguridad a largo plazo.

4.6. Post-proceso de resultados y análisis operatividad

Una vez obtenidos los resultados de la aproximación numérica de la agitación portuaria, se procedió al post proceso de los datos para evaluar la operatividad del área portuaria. Este proceso se dividió en varias etapas detalladas, que incluyen el análisis estadístico de los valores obtenidos y la aplicación de criterios de diseño específicos para determinar la capacidad operativa del puerto respecto a diferentes tipos de buques.

Primero, se extrajeron los valores medios, la desviación estándar y los valores máximos de la altura de ola obtenidos para cada área delimitada durante la aproximación numérica. Esto se realizó para proporcionar una descripción detallada de las condiciones de agitación en el área del puerto. El análisis estadístico permitió identificar las condiciones promedio y extremas de agitación, esenciales para evaluar la seguridad y eficiencia operativa del puerto [15].

Con base en los valores estadísticos obtenidos, se aplicaron las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) 1.0-09 de Puertos del Estado para evaluar la operatividad del área portua-

ria en función del tipo de buque que se espera que opere en el puerto. Las ROM proporcionan criterios específicos para dimensionar estructuras portuarias y definir condiciones operativas seguras en relación con la agitación del mar, considerando parámetros como la altura significativa de ola y el periodo de pico dominante [36].

Para cada tipo de buque contemplado en el diseño del puerto, se evaluó su capacidad para operar de manera segura y eficiente bajo las condiciones de agitación estimadas. Se consideraron aspectos como la capacidad de maniobra, el tiempo de carga y descarga, y la seguridad durante el atraque y desatraque. Se realizaron simulaciones adicionales utilizando modelos específicos de comportamiento de buques para verificar la viabilidad operativa bajo diferentes escenarios de agitación [3].

La metodología implementada proporcionó una evaluación integral de la operatividad del área portuaria, asegurando que el diseño final del puerto cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia requeridos para la navegación marítima. Los resultados obtenidos fueron fundamentales para la toma de decisiones en la fase de diseño y permitieron optimizar las medidas de mitigación de riesgos y mejorar la capacidad operativa del nuevo puerto.

5. Aplicación metodología al lago Tanganica

La metodología principal comprende varias etapas clave. En primer lugar, se realiza un análisis climático preliminar de los vientos en la zona de estudio. Posteriormente, se establece una base de datos para las olas generadas por el viento utilizando técnicas híbridas de downscaling con el modelo SWAN [39]. A continuación, se asimilan los datos climáticos del oleaje en la zona de estudio. A continuación, se proponen alternativas geométricas para el diseño del nuevo puerto. A continuación, se lleva a cabo una simulación numérica de la agitación del puerto. Por último, se lleva a cabo un postprocesado de los resultados y un análisis operativo para evaluar la viabilidad y eficacia de las soluciones propuestas.

5.1. Análisis climático preliminar de los viento en el área de estudio

El análisis de los regímenes de viento en la zona de estudio implicó un trabajo en tres pasos: estadística descriptiva y validación de la base de datos ERA5r con datos instrumentales, análisis del régimen medio y caracterización del régimen extremo. Para garantizar una comprensión completa del comportamiento del viento, estos pasos se aplicaron a diez puntos representativos seleccionados de entre las cuarenta y cinco localizaciones de datos de viento proporcionadas por la base de datos ERA-5, garantizando una caracterización precisa de la dinámica del viento en la zona de estudio. La Figura 5.1 muestra las ubicaciones de los nodos de reanálisis de la base de datos ERA 5 (puntos rojos) y la ubicación del aeropuerto de Bujumbura (un punto azul). Como puede observarse, el nodo de reanálisis más cercano es el número 6, por lo que este nodo de reanálisis se utiliza para realizar todas las comparaciones entre los datos medidos y la base de datos ERA5. En cuanto al entorno geográfico, es importante señalar que el nodo de reanálisis está situado en la superficie de un lago, mientras que los registros instrumentales están situados en la superficie terrestre. El aeropuerto de Bujumbura está situado entre las montañas que se extienden entre la República de Burundi y la República Democrática del Congo, a unos 10 km de Bujumbura, a orillas del lago Tanganica. En cuanto a la altitud relacionada con los datos eólicos, la base de datos ERA5 proporciona datos a 10 m por encima de la superficie, mientras que no se dispone de esa información para los registros medidos.

La siguiente tabla 5.1 muestra un resumen de las principales características de cada base de datos de viento empleada.

La sección de figuras muestra los gráficos temporales de las distintas bases de datos (véase la figura 5.2). El eje x representa la fecha de cada serie de viento y el eje y la velocidad del viento (todos los gráficos tienen los mismos límites máximos). En la figura 5.2 se observa que la base de datos ERA5 (panel superior) alcanza una velocidad máxima de 10.82 m/s,



Figura 5.1: Localizaciones de los 45 nodos de reanálisis de la base de datos ERA5 [10]

Cuadro 5.1: Características principales de cada base de datos.

Base de datos	ERA5 – nodo 6	Datos horarios (solo 12 horas/- día)	Datos diarios
Fuente	Numérica	Instrumental	Instrumental
Fecha de inicio	1/1/1979	1/1/2024	1/1/2013
Hora de inicio	0:00	6:00	Desconocida
Fecha de fin	31/8/2023	8/4/2024	30/12/2023
Hora de fin	23:00	18:00	Desconocida
Frecuencia	1 hora	1 hora (12 horas por día)	1 día
Ubicación	-3.5N, 29.25 E	-3.317 N, 29.321 E (aeropuerto de Bu- jumbura)	-3.317 N, 29.321 E (aeropuerto de Bu- jumbura)
Altitud	Desconocida	787 m	787 m
Altitud registrada	10 m sobre la super- ficie	Desconocida	Desconocida
Entorno geográfi- co	Superficie del lago	Superficie terrestre	Superficie terrestre

mientras que los datos diarios (panel medio) sólo alcanzan un máximo de 4.43 m/s. Esta discrepancia puede deberse a las diferentes altitudes a las que se han medido los vientos y/o a las diferencias horarias frente a las diarias en el postprocesado entre ambas bases de datos. Además, la velocidad del viento medida (datos diarios en la parte central del panel) presenta una tendencia a desvanecerse desde 2018 hasta finales de 2023, que podría ser una anomalía instrumental ya que ningún proceso físico puede relacionarse con este comportamiento. El máximo de los datos horarios (registros de 12 horas) de velocidad del viento alcanza un valor de 15 m/s.

En la figura 5.3 se superponen las series para mostrarlas todas con la misma marca temporal. El conjunto de datos diarios (medios) presenta valores muy inferiores respecto al conjunto de datos ERA5, mientras que el conjunto de datos ERA5 parece ser ligeramente

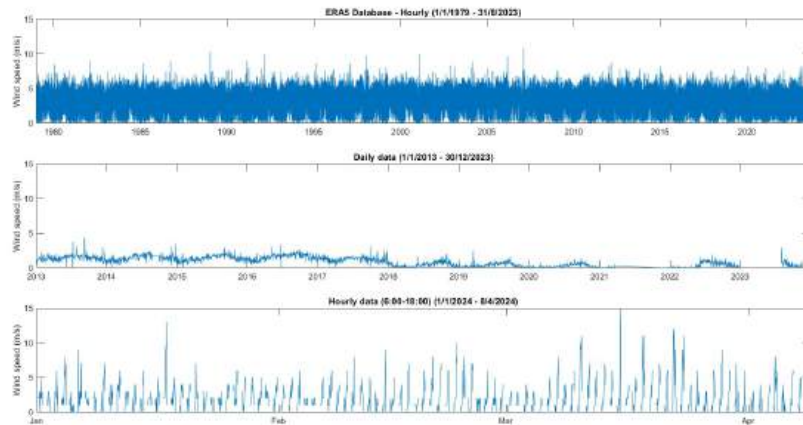


Figura 5.2: Series temporales con sus intervalos de tiempo

inferior a los registros horarios de 2024. El registro horario no puede compararse directamente con los demás de la base de datos porque el periodo de tiempo no se solapa, pero el registro ERA5 puede adaptarse para compararlo con la base de datos de reanálisis diaria (media).

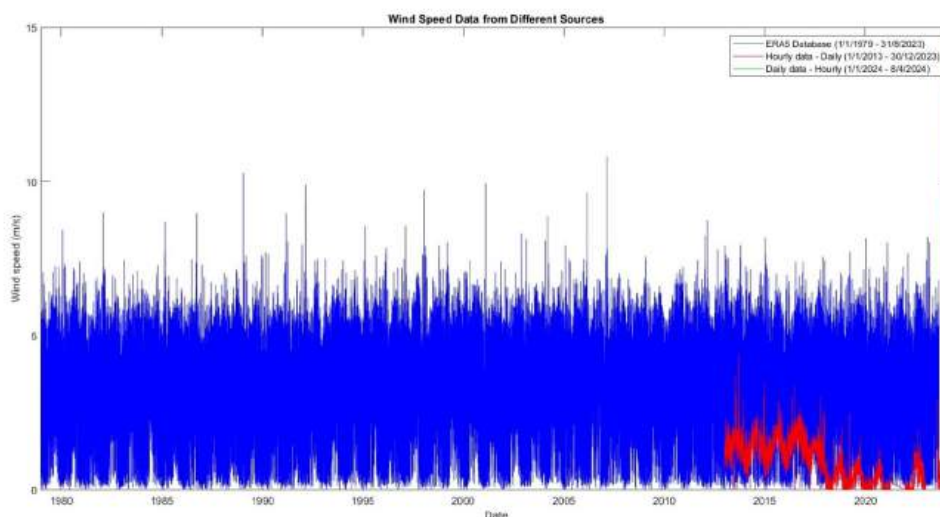


Figura 5.3: Series temporales solapadas

En el apartado siguiente se presenta el procedimiento de adaptación para ambas bases de datos instrumentales. En primer lugar, para comparar ERA5 con la base de datos diaria (media), se calculó una media diaria para las series de viento de ERA5 que coincidía con el periodo de tiempo de los datos diarios. Aquí se hace la primera suposición, en la que se supone que este registro pertenece a las medias diarias como se ha comentado anteriormente. Las medias diarias de la base de datos ERA5 se han calculado atendiendo al criterio de las 24 horas del día comenzando a las 0:00 hasta las 23:00 del mismo día base.

En la figura 5.4 se muestran las medias diarias calculadas para la base de datos ERA5 a lo largo del registrador de datos diarios del aeropuerto de Bujumbura. Como puede observarse, ambas series presentan las tendencias estacionales, pero las magnitudes de la velocidad del viento siguen siendo diferentes con respecto a las mediciones, siempre por debajo de la base de datos ERA5. Dado que la base de datos ERA5 siempre presenta valores superiores en comparación con la base de datos instrumental, se presenta a continuación un análisis alter-

nativo para justificar el origen de estas diferencias. Las principales diferencias entre ambas bases de datos podrían deberse a la altura de medición de la velocidad del viento. ERA5 considera un viento de 10 m por encima de la superficie, pero no dispone de información sobre el registro instrumental, en lo que se refiere a la altura de medición. Por ello, se realiza una corrección iterativa de la velocidad del viento medida, aplicando las siguientes fórmulas.

$$V_2 = V_1(h_2/h_1)^\alpha \quad (5.1)$$

Donde V_2 y V_1 son la velocidad del viento a dos alturas diferentes h_2 y h_1 , respectivamente, y α es un factor que es 0.143 para condiciones neutras (John S.,1967) [17]. Los datos medidos diariamente convertidos a la referencia de 10 m de altura pueden verse en la figura 5.4 (suponiendo que la altura inicial medida fuera de 0.5 m).

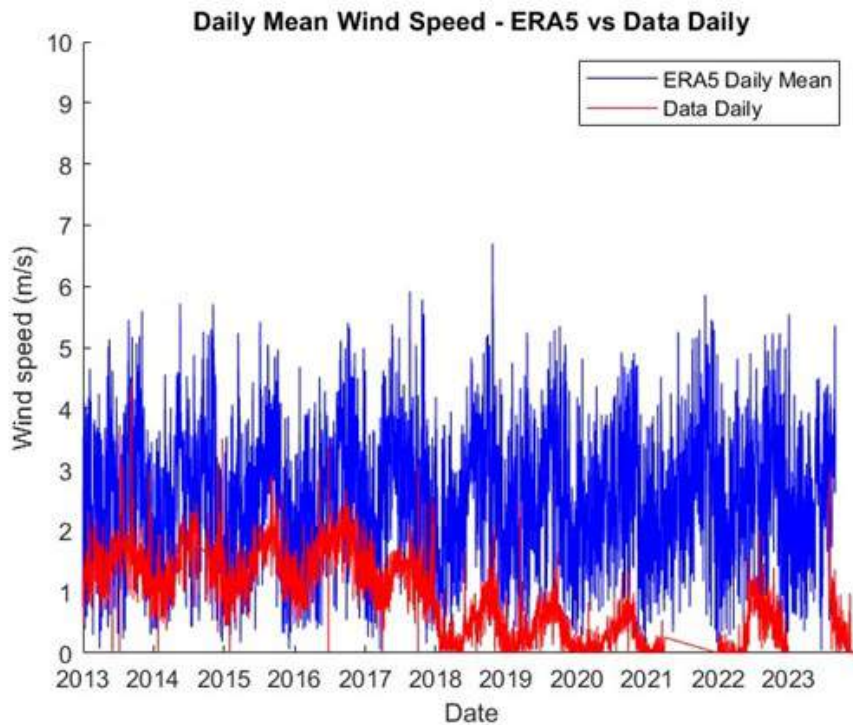


Figura 5.4: Series temporales de medias diarias solapadas

Con este tratamiento, la base de datos medida (línea roja en la figura 5.5) presenta una mejora, especialmente para los datos anteriores al año 2018. No se trata de una validación directa, sino únicamente de una estrategia alternativa para justificar/comprender mejor las drásticas variaciones entre ambas bases de datos. Dado que no ha sido posible una comparación directa y justa entre las series ERA5 y los datos instrumentales, no se puede hacer una conclusión o validación cualitativa. No obstante, las magnitudes de las series ERA5 parecen aproximarse al orden de magnitud de ambas series instrumentales. Junto con la continuidad horaria y el carácter plurianual de la serie ERA5, se emplea para la caracterización climática en la zona de estudio y para la generación numérica de oleaje en el interior del lago. Disponer de una serie de viento estadísticamente robusta redundará en una serie de oleaje igualmente robusta, necesaria para el correcto diseño de las infraestructuras portuarias y estudios posteriores.

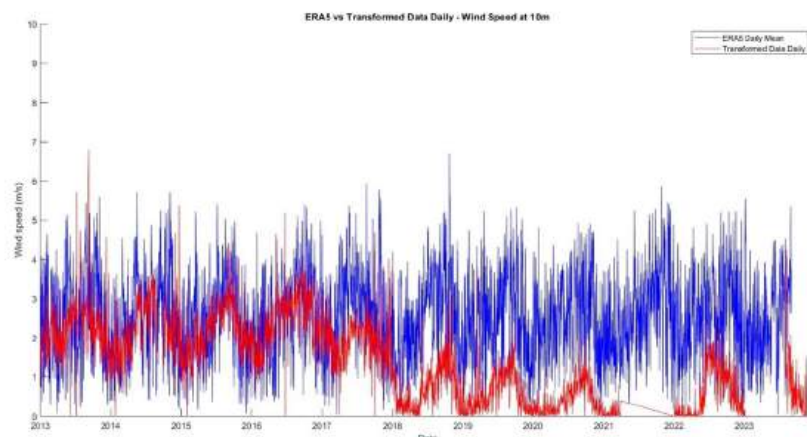


Figura 5.5: Series temporales de medias diarias solapadas 10 m sobre el suelo

5.2. Estadística descriptiva del viento

Esta sección presenta una estadística descriptiva completa de las series de viento del ERA5, empleando un conjunto de técnicas matemáticas para describir las características de las series de datos de viento. Esto incluye la generación de gráficos de dispersión (véanse las figuras 5.6 y 5.7), que representan la relación entre la intensidad y la dirección del viento, ofreciendo una visión de las direcciones predominantes del viento y sus intensidades asociadas (véanse las figuras 5.10 y 5.11). Además, se realizaron rosas de viento para ilustrar la frecuencia, intensidad y distribución direccional de los patrones de viento (véase la figura 5.9), proporcionando información valiosa para comprender el comportamiento del viento. Se utilizaron diagramas de caja para visualizar la variabilidad de la intensidad y dirección del viento a lo largo de diferentes periodos de tiempo, lo que permitió identificar las variaciones y tendencias anuales (véase la figura 5.8). La etapa siguiente, el análisis del régimen medio, consistió en ajustar funciones de distribución de probabilidad conocidas a la distribución de los datos eólicos. Las funciones de densidad de probabilidad y las funciones de probabilidad acumulada se ajustaron en consecuencia para representar con precisión el régimen medio del viento (véanse las figuras 5.12 y 5.13). Por último, la caracterización del régimen extremo se centró en la identificación y el análisis de los fenómenos eólicos extremos. Esto se consiguió mediante la aplicación de técnicas avanzadas de ajuste, como el ajuste máximo anual a una distribución de Valores Extremos Generalizados (GEV) o a una función de Gumbel, y el método de Picos sobre Umbral (POT). Mediante el establecimiento de umbrales apropiados basados en valores o percentiles específicos, se identificaron y analizaron los fenómenos eólicos extremos, lo que permitió comprender mejor el impacto potencial de las condiciones meteorológicas extremas en la zona de estudio. Gracias a esta metodología global, se obtuvo una comprensión detallada de los regímenes de viento en la zona de estudio, lo que facilitó la toma de decisiones informadas y la evaluación de riesgos para diversas aplicaciones y estudios (véanse las figuras 5.14 y 5.15). En las figuras 5.6 a 5.15 se muestran los archivos climáticos del viento para el nodo 6 seleccionado, con coordenadas 29.1°E y 3.4°S y un intervalo de datos horarios desde 1979 hasta 2023. El nodo 6 fue seleccionado debido a su relación directa con la generación local de oleaje cerca de la futura ubicación del puerto. En la figura 5.6 se muestra la tabla de ocurrencia para la velocidad y la dirección del viento, en azul el valor medio y en rojo la media más el valor de la desviación estándar. Como puede observarse, para velocidades de viento inferiores a 10 m/s la dirección principal es el NO, mientras que

para rachas de viento elevadas, con velocidades de viento superiores a 10 m/s la dirección principal es el NE. En las figuras 5.7 y 5.8 se muestra la estacionalidad, donde no hay una estacionalidad claramente definida, como era de esperar dada la cercanía al ecuador pero en los meses de verano (Julio, Agosto y Septiembre) se aprecia una mayor velocidad del viento, el viento durante estos meses cae mayoritariamente en dirección NO mientras que en Enero, Febrero y Diciembre la tasa de variación es mucho mayor, oscilando sobre casi todas las direcciones, excepto el N. En la figura 5.9 se muestran las rosas de viento probables, mientras que como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de los vientos proceden del NO, mientras que hubo grandes vientos del NE.

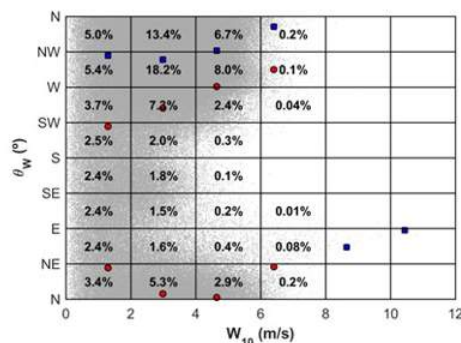


Figura 5.6: Tabla de ocurrencia

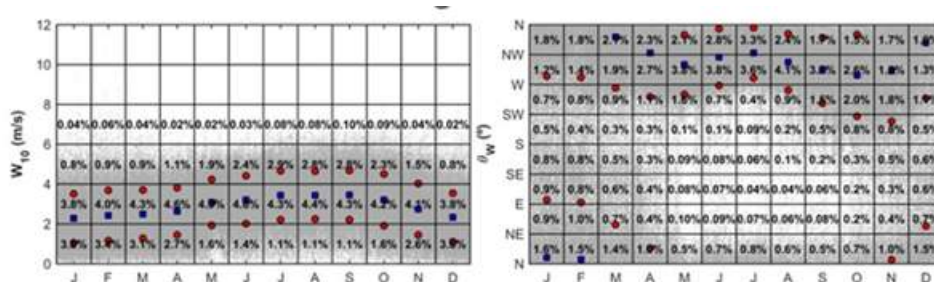


Figura 5.7: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia)

En la figura 5.10 se estudia la persistencia estacional, donde es apreciable lo que se había dicho antes, que no hay claramente estacionalidad. En el número de eventos por año, el número de ellos en verano es ligeramente menor, mientras que la duración de los mismos es mayor durante el otoño y la primavera.

En la figura 5.11 se ilustra el análisis de persistencia direccional, donde se muestra que las direcciones principales con la mayor parte del número de eventos y mayores duraciones son N, NNW y NW, pero las mayores velocidades de viento se alcanzan en el sector NE, lo que prueba de nuevo lo que se había observado, que existen algunos eventos NE con gran energía que conducen a una alta velocidad de viento que ocurren de forma aislada, con duraciones más cortas que los eventos medios. En las figuras 5.12 y 5.13 se definen el régimen medio mensual y direccional, respectivamente. En cuanto a la magnitud del régimen mensual los meses de verano presentan valores más altos mientras que los valores extremos se dan en enero. Atendiendo al régimen direccional se muestra que esos valores extremos provienen de las direcciones NE y NNE. Atendiendo a las figuras 5.14 y 5.15, donde se muestran el régimen extremo mensual y direccional, respectivamente, se observa que la dirección de los valores

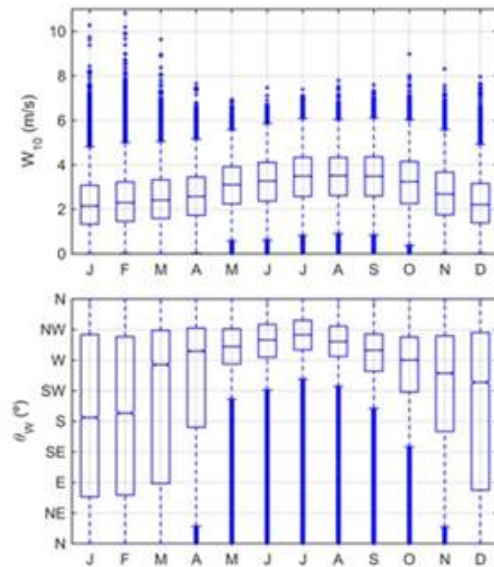


Figura 5.8: Gráfico de cajas

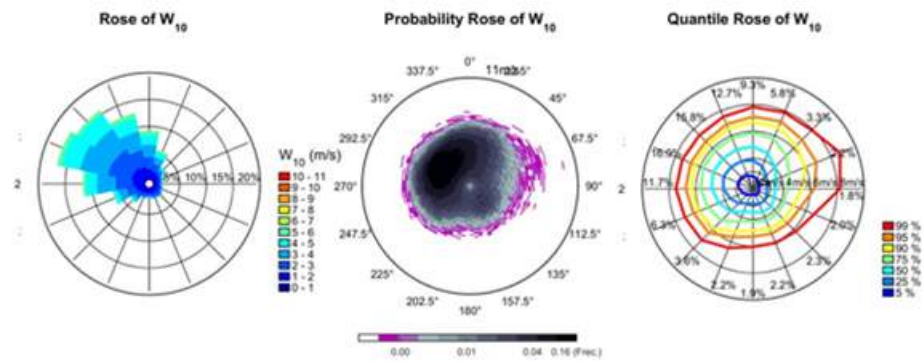


Figura 5.9: Rosas de viento

extremos coincide con los mostrados en el régimen medio. La dirección de donde proceden esos valores extremos es NE y se produce durante el mes de enero.

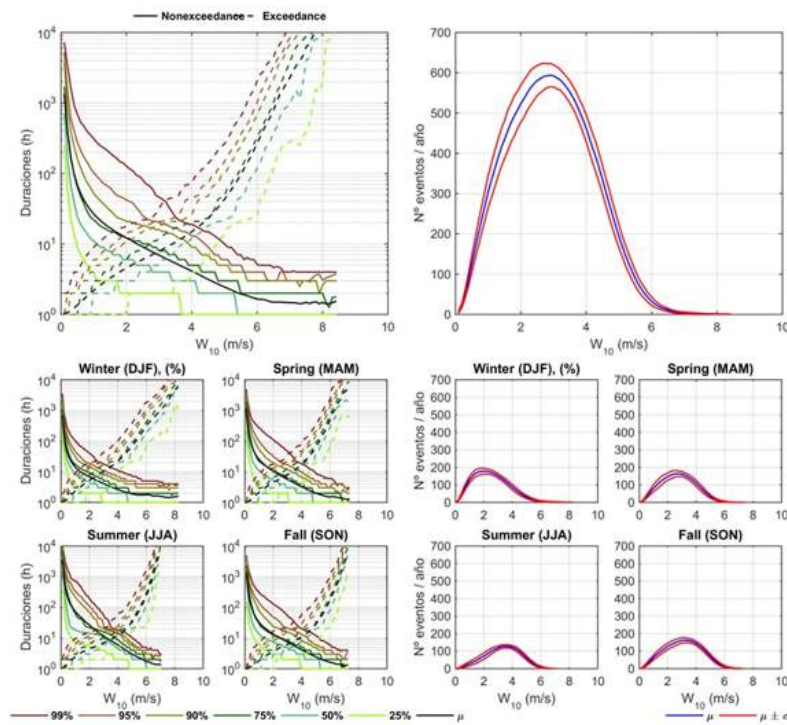


Figura 5.10: Análisis persistencias estacionales viento

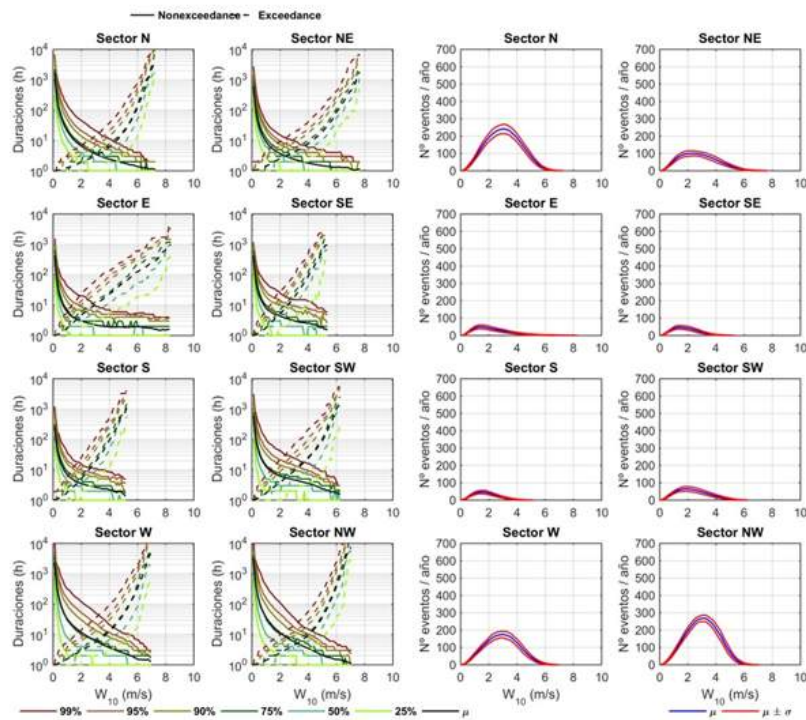


Figura 5.11: Análisis persistencias direccionales viento

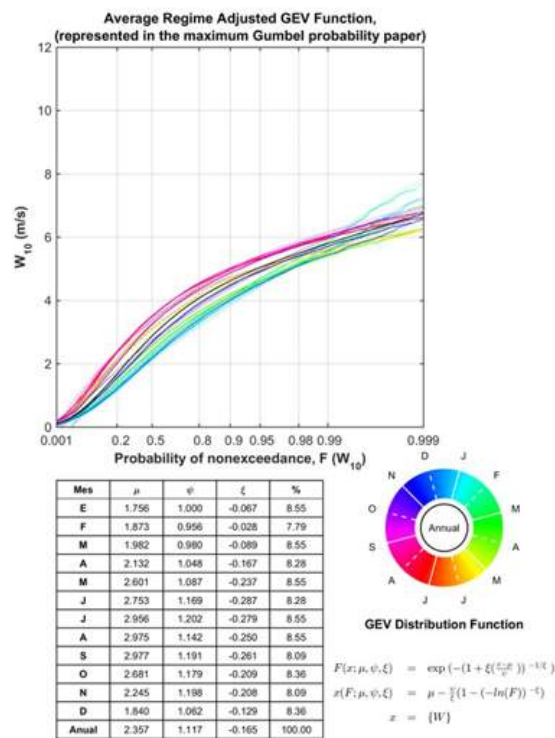


Figura 5.12: Régimen medio mensual viento

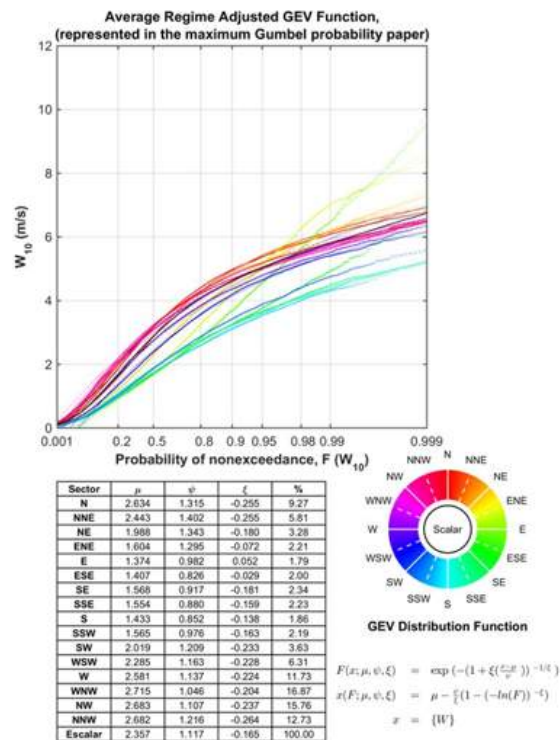


Figura 5.13: Régimen medio direccional viento

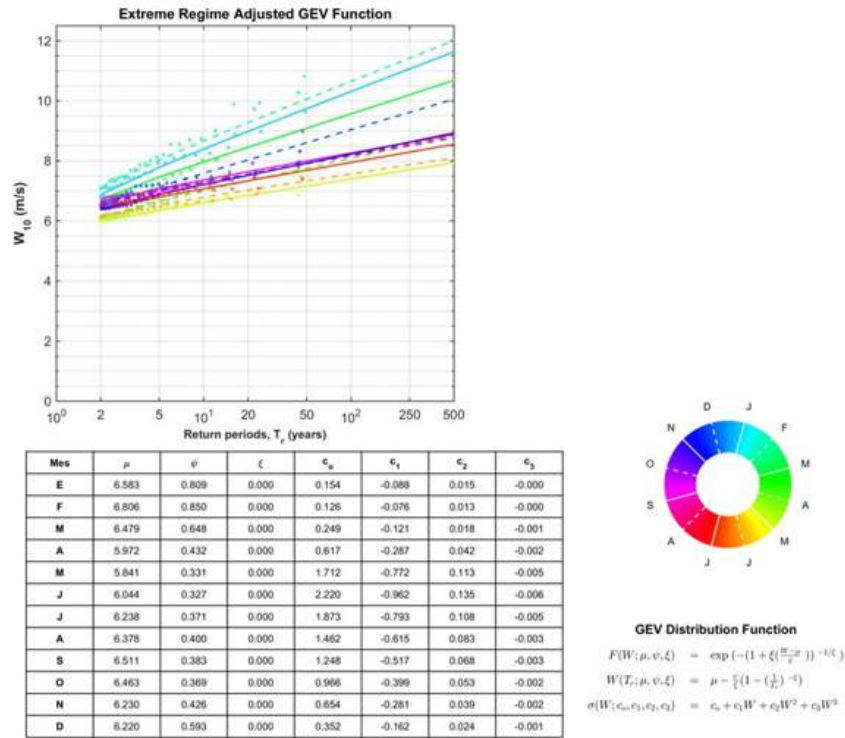


Figura 5.14: Régimen extremal mensual viento

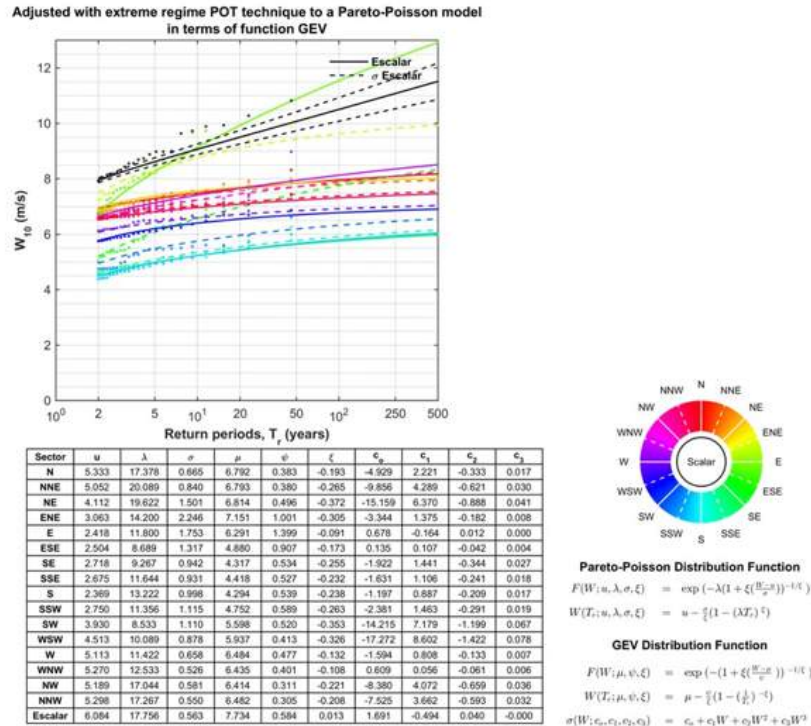
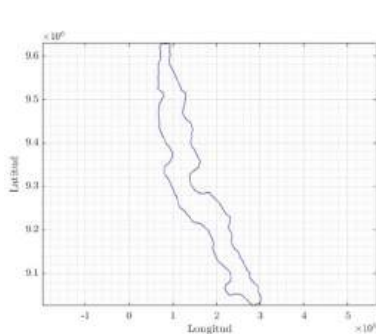


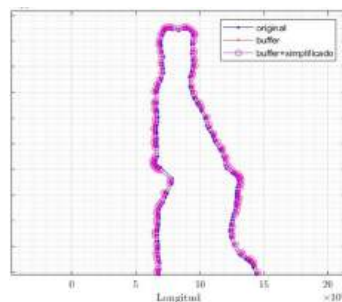
Figura 5.15: Régimen extremal direccional viento

5.3. Generación del oleaje de viento

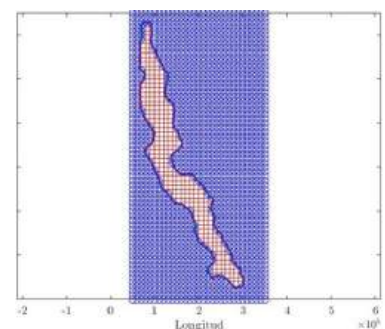
Para generar una base de datos exhaustiva de datos de olas generadas por el viento en la zona especificada, se llevó a cabo un proceso híbrido para generar y reducir la escala de las olas dentro del lago a partir de una identificación de los casos más representativos del amplio conjunto de datos disponible. Estos casos, que abarcan datos horarios desde 1940 hasta la actualidad, se seleccionaron utilizando el Algoritmo de Máxima Disimilitud (MDA), un sofisticado método desarrollado por Camus et al. en 2011 [6]. La técnica MDA agrupa un número fijo de casos que mejor representan la diversa gama de dinámicas de oleaje observadas en el conjunto de datos. Posteriormente, estos casos seleccionados se propagaron numéricamente utilizando el modelo numérico SWAN a lo largo de una malla adaptativa no estructurada, un modelo de olas de tercera generación de vanguardia desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft. Los avanzados algoritmos de SWAN están diseñados para simular con precisión la generación y propagación de olas aleatorias de cresta corta generadas por el viento, tanto en masas de agua costeras como interiores. Tras la propagación, la serie completa de olas se reconstruyó estadísticamente mediante la técnica de las funciones de base radial (RBF) en cinco puntos de interés elegidos estratégicamente dentro de la zona de estudio ([34]). Este proceso de reconstrucción implicó la interpolación de los puntos de datos de oleaje en las proximidades de cada ubicación, garantizando una representación sólida del comportamiento del oleaje en estos lugares específicos. A través de esta metodología, se obtiene un conjunto de datos exhaustivo que captura todo el rango de la dinámica del oleaje inducida por el viento, permitiendo un análisis detallado y un correcto diseño del puerto. En esta sección se resume la metodología desarrollada: en primer lugar, se llevó a cabo el preprocesamiento batimétrico. La integración de datos batimétricos en modelos numéricos como SWAN, especialmente cuando se trata de mallas no estructuradas, requiere varios ajustes y mejoras para obtener simulaciones precisas. Inicialmente, los datos batimétricos brutos se procesan para extraer el contorno del lago, proporcionando una delineación clara de sus límites, tal como se representa en la figura 5.16a. Posteriormente, se aplica una batimetría modificada para obtener el contorno del lago. A continuación, se crea un rectángulo batimétrico modificado incorporando los datos originales para ampliar el contorno del lago y conseguir transiciones más suaves, como se ilustra en la figura 5.16b. Este ajuste es esencial, ya que reduce el riesgo de que se produzcan transiciones más suaves. Este ajuste es esencial, ya que reduce el esfuerzo informático necesario para generar la malla no estructurada. Al ampliar y suavizar el contorno, optimizamos la precisión del modelo, como se muestra en la figura 5.16c. Se proporcionan representaciones visuales de la batimetría modificada, incluido el contorno del lago incorporado, para facilitar su comprensión. Estos archivos de batimetría modificada, junto con los datos de contorno, son entradas cruciales para el modelo numérico, garantizando simulaciones realistas del comportamiento del oleaje en la zona de estudio.



(a) Contorno del lago



(b) Contorno expandido y suavizado



(c) Batimetría ampliada

En segundo lugar, la definición del forzamiento del viento comenzó con la identificación de 45 localizaciones específicas proporcionadas por la base de datos ERA5. Se seleccionaron $N=400$ clusters utilizando el Algoritmo de Máxima Disimilitud (MDA), que identifica los casos más disímiles entre sí, garantizando una representación completa de las condiciones de viento. De la base de datos total de aproximadamente 560,000 datos horarios, se consideraron los $N=400$ casos (clusters) más representativos (ver Fig. ??). Estos casos seleccionados se utilizaron como entrada para el modelo numérico SWAN. SWAN es un modelo numérico que simula las olas generadas por el viento en regiones costeras y aguas interiores. Se toman los 400 campos de viento sobre el lago, representados por los 45 nodos en los que se encuentra el registro. Una vez seleccionados estos casos, se ejecutan en el modelo SWAN y se obtienen 400 mapas de oleaje sobre el lago mediante ejecución dinámica. La resolución de los mapas de oleaje es el número de nodos que tiene la malla no estructurada en el interior del lago. Esto muestra que hay un aumento en la resolución de los mapas de oleaje en comparación con los mapas de viento. y área.

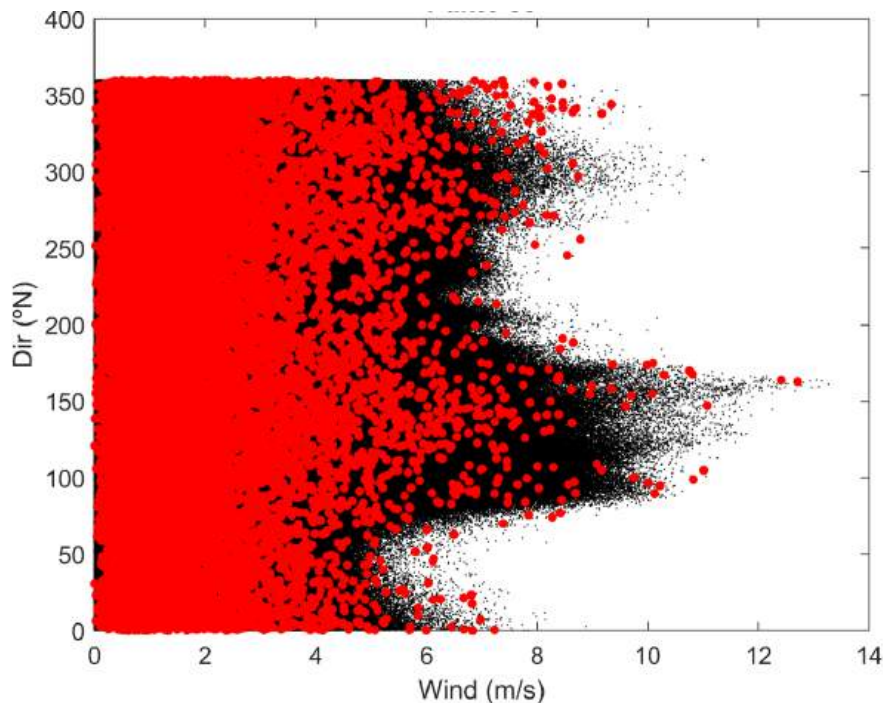


Figura 5.17: Selección de los 400 clusters (puntos rojos) sobre el conjunto de los datos de viento (puntos negros).

La razón de ser de este enfoque era doble. En primer lugar, al seleccionar sólo los casos más representativos, se optimizaban los recursos informáticos, ya que ejecutar el modelo SWAN para los 560,000 puntos de datos exigiría una gran cantidad de recursos. En segundo lugar, este método garantizaba que los resultados se basaban en una gama diversa de condiciones de viento, proporcionando así una representación completa del clima de olas en cada lugar. En tercer lugar, se presenta el proceso de definición de la malla numérica. Inicialmente, se realizaron una serie de iteraciones geométricas diversas para equilibrar la compensación entre la calidad de la malla resultante y el tiempo necesario para su ejecución. El criterio adoptado para esta evaluación fue el gradiente de crecimiento de elementos triangulares, que se consideró más adecuado que el periodo de diseño debido a su implementación relativamente sencilla tras el suavizado del contorno. Los resultados de estos experimentos iterativos se documentan en la Tabla 5.2, donde se muestran las distintas ejecuciones y sus correspondientes resultados. El punto de control para estas mediciones se encontraba en las coordenadas

$x_{UTM} = 80000$, $y_{UTM} = 9590000$, situado bajo una fuente de generación eólica. La malla final generada y utilizada en este estudio con el gradiente de crecimiento óptimo se presenta en las figuras 5.18 a 5.20.

Cuadro 5.2: Tabla con la duración de la ejecución y los valores obtenidos para diferentes valores del gradiente de crecimiento de la malla no estructurada.

Gradiente de crecimiento	Tiempo de ejecución	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
0.1	2 min 30 s	2.4632	7.4019	170.8432
0.05	4 min 43 s	2.4435	7.4019	170.5949
0.01	11 min 15 s	2.5615	8.1433	169.0066
0.005	32 min 54 s	2.6167	7.4019	168.6290

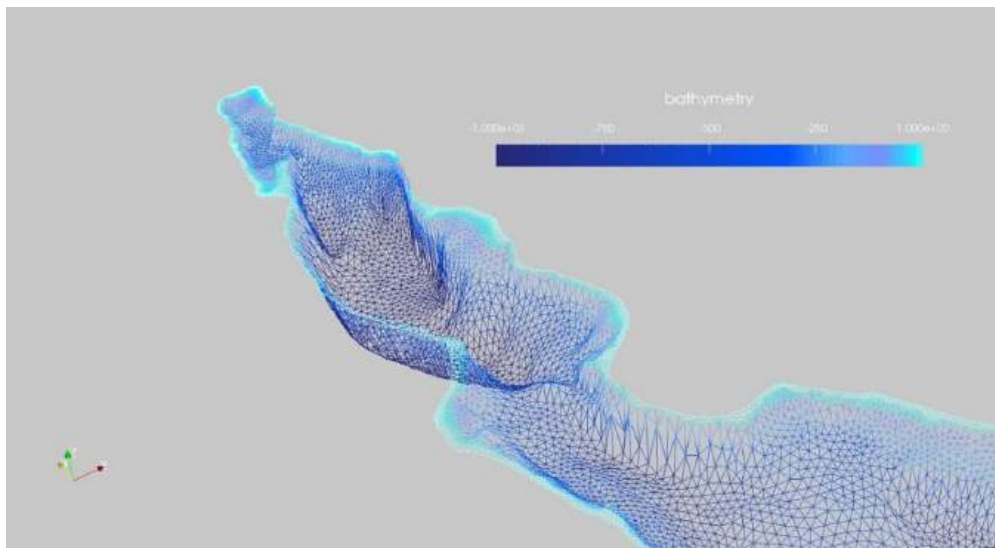


Figura 5.18: Malla no estructurada tridimensional del contorno norte del lago

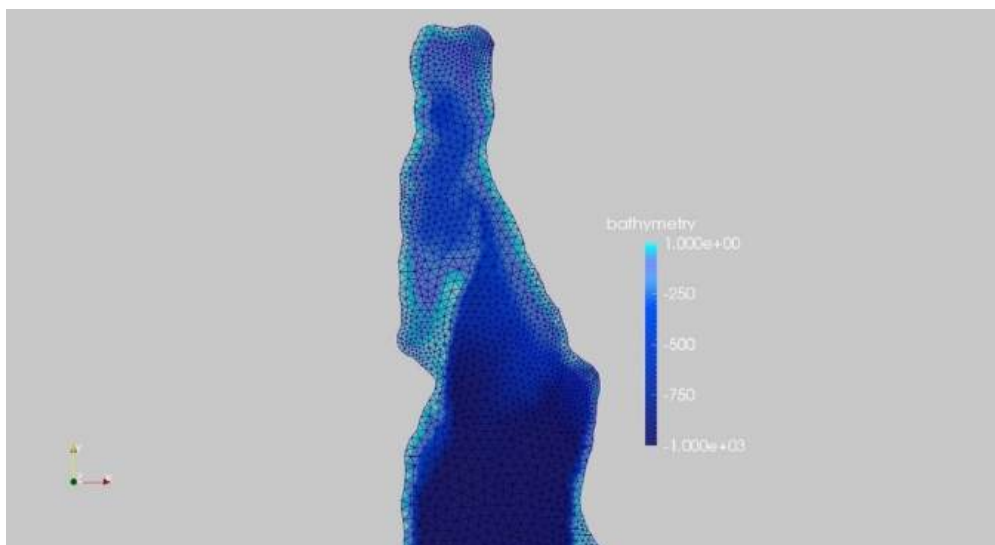


Figura 5.19: Malla no estructurada tridimensional del contorno norte del lago

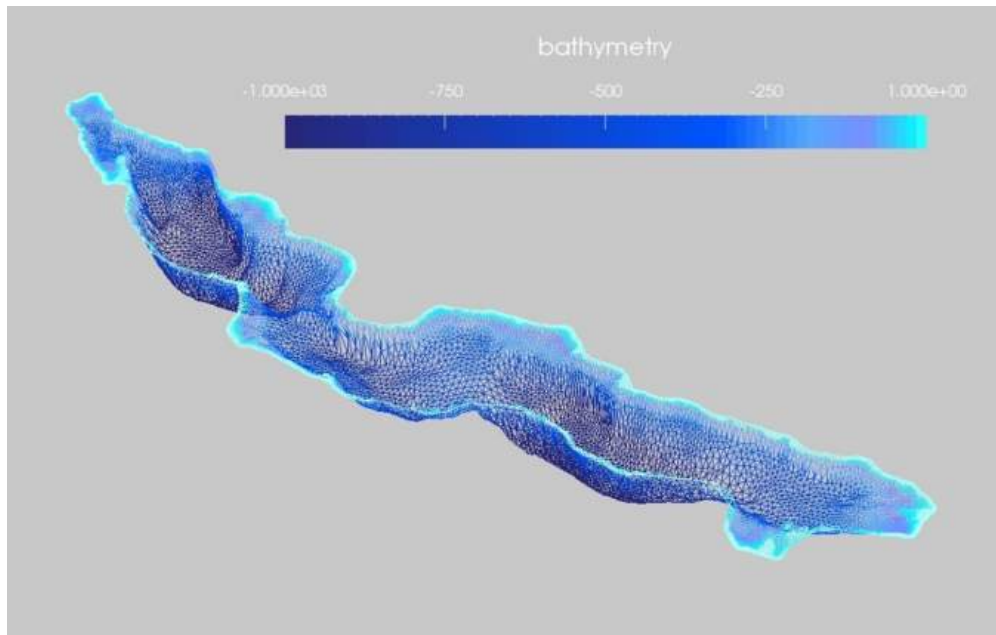


Figura 5.20: Malla no estructurada tridimensional de todo el lago

Además, para evaluar las posibles variaciones / influencia de los distintos niveles de los lagos en los resultados de las olas, se realizó un análisis de sensibilidad. Los niveles de los lagos se clasificaron de la siguiente manera: un valor nulo inicial que indicaba que no era necesaria ninguna corrección, seguido de un valor derivado de la media aritmética de la diferencia entre los niveles más alto y más bajo de la marea, el valor de la diferencia correspondiente y, por último, un valor dos veces mayor que esta diferencia. Posteriormente, estos valores se sometieron a rigurosas pruebas frente a distintas intensidades de viento (2, 5, 10 y 15 m/s), que culminaron en un total exhaustivo de 16 ejecuciones del modelo. Los niveles del lago y las intensidades del viento registrados se presentan en la Tabla 5.3, con la dirección del viento mantenida intencionadamente constante en 180° (Sur) para emular el peor escenario posible. Además, la Tabla 5.4 presenta los resultados obtenidos en relación con H_s , el periodo punta T_p y la dirección a través de diferentes niveles de lago e intensidades de viento, ofreciendo una visión detallada del impacto de estas variables en los resultados globales de la simulación. Puede observarse que, para la ubicación seleccionada dentro del lago, prácticamente no se registraron variaciones como cambios en el nivel del agua. En otras palabras, parece que el nivel del agua no es relevante para la generación local de olas en estos lugares, debido a que las profundidades del lago están por debajo de los límites teóricos de aguas profundas. En conclusión, las 400 simulaciones finales se realizaron considerando únicamente el nivel de agua original (nulo).

Cuadro 5.3: Valores de los diferentes niveles e intensidades del viento.

Niveles (m)	0	1.53	3.07	6.14
Magnitud del viento (m/s)	2	5	10	15

Finalmente, todas las $N=400$ simulaciones se ejecutaron con éxito, en la figura 5.21 se representan los mapas de magnitud H_s y las direcciones de las olas en la parte norte del lago para los diferentes clusters seleccionados. La cuadrícula es visible con una línea continua azul oscuro, mientras que la dirección se muestra con flechas que apuntan en la

Cuadro 5.4: Valores de altura significativa de la ola, período de pico y dirección para diferentes intensidades de viento.

Caso	Magnitud del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Nivel del agua (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)
1	2	180	0	0.035	1.464	169.814
2	2	180	1.53	0.037	1.464	170.919
3	2	180	3.07	0.035	1.464	169.044
4	2	180	6.14	0.028	1.464	165.931
5	5	180	0	0.276	2.853	172.597
6	5	180	1.53	0.280	2.853	172.458
7	5	180	3.07	0.284	3.138	173.163
8	5	180	6.14	0.291	3.138	172.258
9	10	180	0	1.166	5.558	171.652
10	10	180	1.53	1.184	5.055	171.868
11	10	180	3.07	1.195	5.558	172.182
12	10	180	6.14	1.219	5.558	171.751
13	15	180	0	2.455	7.402	170.658
14	15	180	1.53	2.497	7.402	171.002
15	15	180	3.07	2.542	7.402	170.933
16	15	180	6.14	2.580	7.402	171.466

dirección de las olas. La tabla 5.5 presenta la magnitud y la dirección del viento asociadas a cada ID en el nodo más cercano al punto donde se reconstruye la serie de olas. Tras la ejecución, la serie se reconstruye utilizando el método RBF (Radial Basis Function). Las RBF permiten interpolar los resultados de las simulaciones para generar series temporales continuas de olas en los puntos de interés (Powell et al., 2001) [34], proporcionando una representación detallada y precisa de las condiciones del oleaje a lo largo del tiempo. La base de datos resultante contiene información detallada sobre las olas generadas por el viento para diferentes condiciones representativas y es esencial para futuros análisis y estudios relacionados con la dinámica de los lagos y la gestión de los recursos hídricos. El objetivo de esta reconstrucción es disponer de series temporales continuas de oleaje desde 1979 hasta 2023, el mismo lapso de tiempo para el que se dispone de datos de viento. La figura 5.22 muestra la serie temporal del oleaje en el punto situado frente al puerto en las coordenadas 29.1°E, 3.4°S.

Cuadro 5.5: Valores de altura significativa de la ola, período de pico y dirección para diferentes intensidades de viento.

ID	Velocidad del viento (m/s)	Dirección (°)
1	2.7137	330.91
3	0.9856	347.57
13	2.1153	325.73
15	4.3021	266.05
24	0.6755	80.15
61	4.6399	348.36

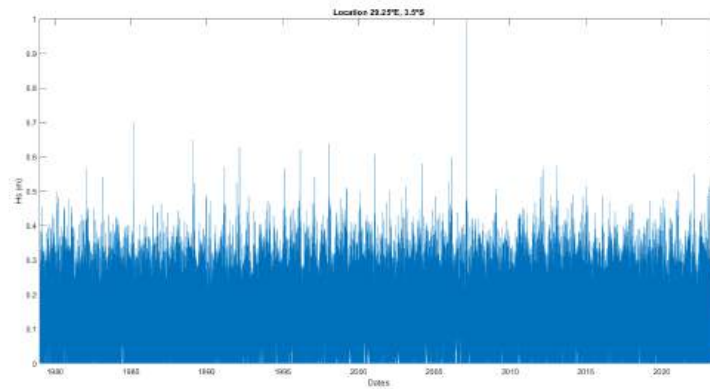


Figura 5.21: Serie temporal de las alturas de ola significantes (H_s)

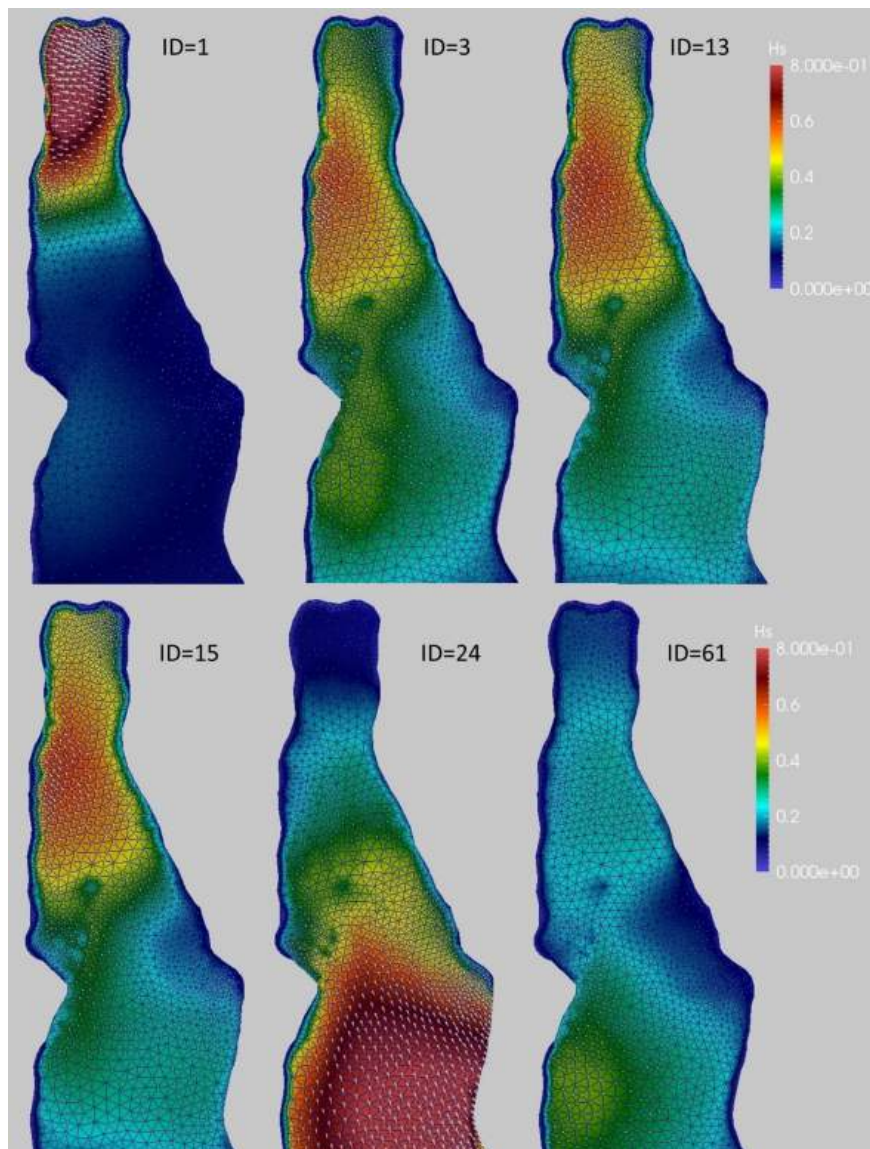


Figura 5.22: Mapas de H_s y dirección del olaje para 6 situaciones de las 400 representativas seleccionadas

5.4. Caracterización del clima del oleaje en la zona de estudio

Tras la simulación y reconstrucción de la estadística completa del oleaje en los puntos de control frente al futuro puerto, se presenta aquí una caracterización en profundidad del clima de oleaje, empleando una metodología coherente con el enfoque estadístico y el tratamiento de variables presentado en secciones anteriores (para los datos de viento).

Este enfoque metodológico se estructura en tres fases diferenciadas: estadística descriptiva, análisis del régimen medio y análisis del régimen extremo. La fase de estadística descriptiva implica una caracterización exhaustiva de las propiedades estadísticas de los datos de oleaje, incluyendo estadísticas como la media, la varianza y las características de distribución. Posteriormente, el análisis del régimen medio se centra en establecer patrones y tendencias en el comportamiento medio del oleaje a lo largo del tiempo, proporcionando información sobre las condiciones típicas del oleaje experimentadas en la zona de estudio. Paralelamente, el análisis del régimen extremo tiene como objetivo identificar y evaluar la ocurrencia de eventos de olas extremas, permitiendo una comprensión de los riesgos potenciales asociados a las condiciones de olas extremas. Además, es importante señalar que esta metodología se ha aplicado a una localización específica, situada en las coordenadas 29.1°E, 3.4°S, dentro del entorno del área de estudio, asegurando un análisis localizado y contextualmente relevante de la dinámica climática del oleaje. A través de este enfoque sistemático, los investigadores adquieren una comprensión global del clima de olas en la zona de estudio, lo que permite una toma de decisiones informada y una planificación eficaz para diversas aplicaciones e intervenciones.

La siguiente figura (ver figura 5.23) ilustra la tabla de ocurrencia para H_s (m), T_p (s) y T_m (s), donde T_m se ha definido como $T_p/1,2$. Como se muestra, el evento de ola más alta con 1 m de altura de ola significativa corresponde a un periodo pico de casi 4 s y un periodo medio de unos 3 s. Este evento tiene una dirección E-SE y es el más extremo.

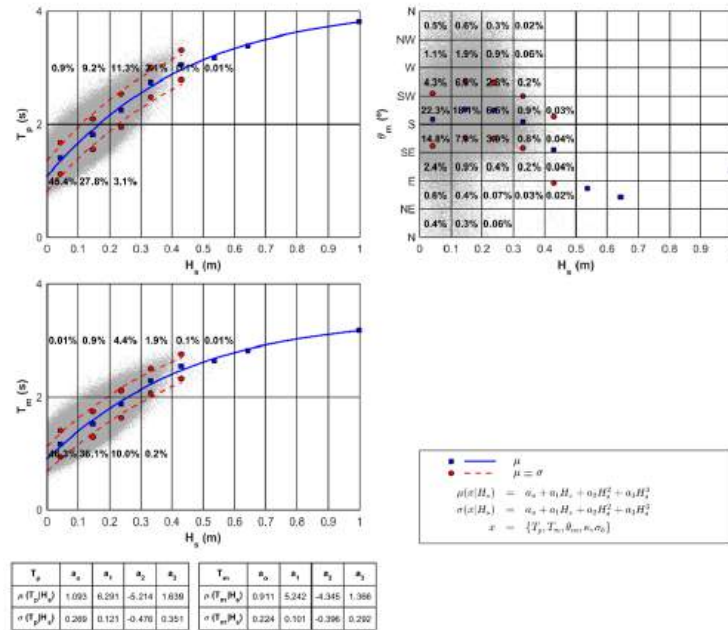


Figura 5.23: Tabla de ocurrencia

La siguiente (ver figura 5.24) muestra la estacionalidad en el régimen climático de olas. Se puede apreciar un ligero cambio a lo largo del año, no presentando cambios notables debido a la proximidad al ecuador, que conduce a un clima ecuatorial. En la figura 5.25, se introducen las rosas direccionales para las variables H_s y T_p . Es visible que la mayoría de los eventos de oleaje provienen del sur. Sin embargo, también hay algunos eventos extremos que provienen de la dirección Este. El siguiente archivo (ver figura 5.26) revela la persistencia estacional donde es visible que aunque no hay una variación tan clara entre las estaciones del año, en primavera, otoño e invierno el número de eventos es mayor.

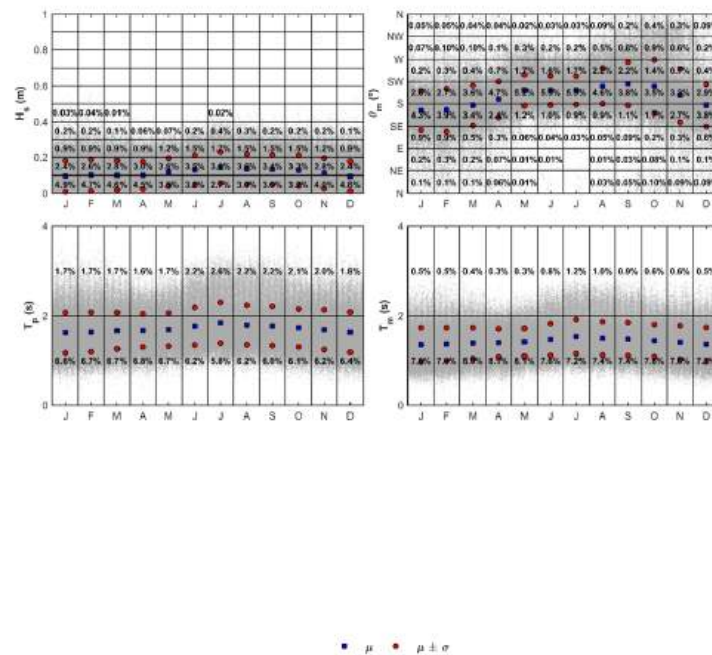


Figura 5.24: Estacionalidad oleaje

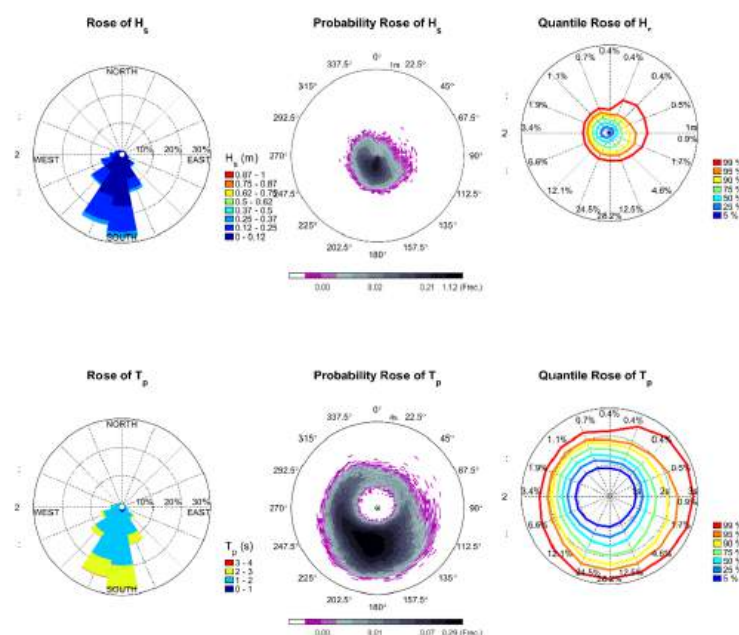


Figura 5.25: Rosas oleaje

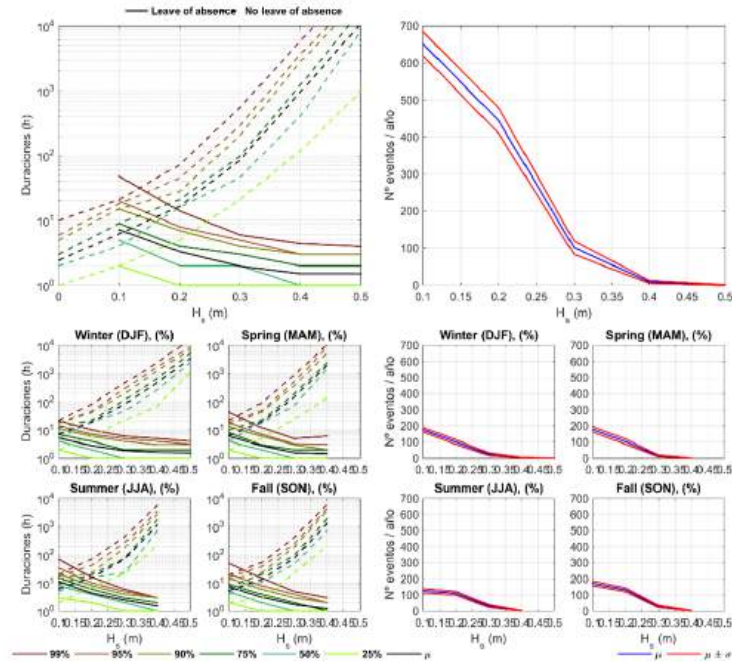


Figura 5.26: Análisis persistencias estacional

En la figura 5.27 se presenta un régimen medio mensual, donde es apreciable lo comentado anteriormente, que en invierno, más concretamente en enero y febrero, se producen los eventos climáticos más severos para la altura de ola significativa. En la figura 5.28 se muestra el régimen extremo mensual. Como era de esperar, los eventos de mayor magnitud se producen en enero y febrero, mientras que el periodo más tranquilo se da en mayo y junio. En la figura 5.29 se muestra el régimen direccional medio. Contrariamente a lo que podría deducirse de las rosas direccionales, los fenómenos de olas más extremos proceden principalmente de direcciones próximas al Este. Por el contrario, la mayoría de los eventos, menos extremos, proceden predominantemente del Sur. Las mayores alturas de ola se observan en dirección Este-Noreste (ENE). La figura 5.30 ilustra específicamente el régimen direccional extremo. Esta figura pone de relieve que los fenómenos más energéticos, que probablemente representan las olas de mayor intensidad, proceden predominantemente de la dirección Sureste (SE). Se trata de una distinción importante, ya que muestra una diferencia entre las direcciones de los fenómenos más frecuentes y las de los más potentes.

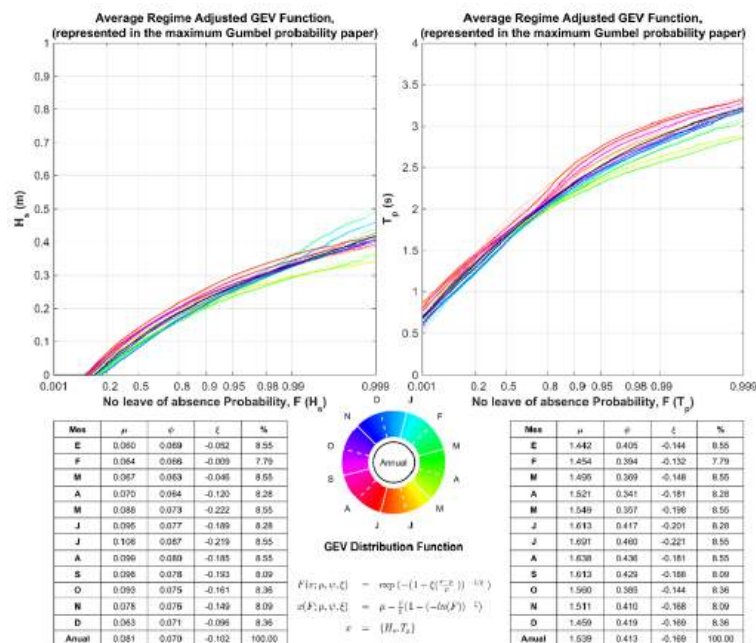


Figura 5.27: Régimen medio mensual

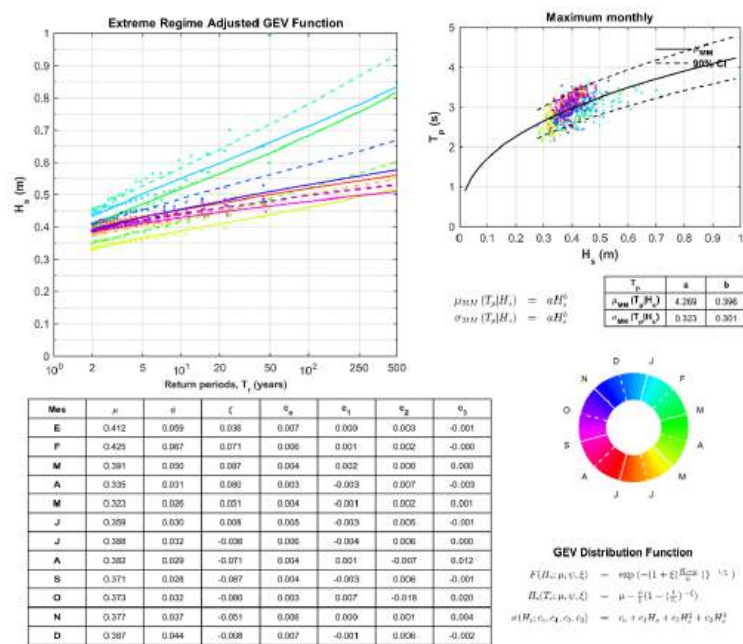


Figura 5.28: Régimen extremal mensual

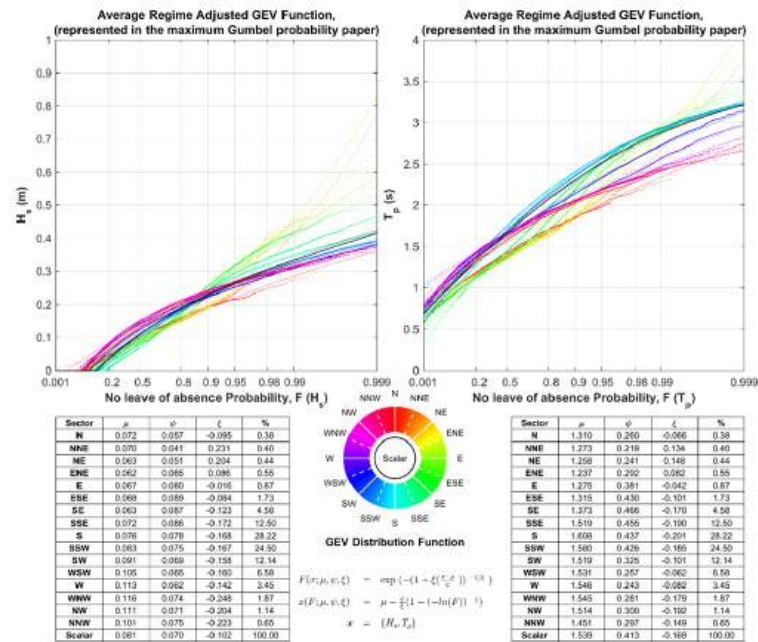


Figura 5.29: Régimen medio direccional

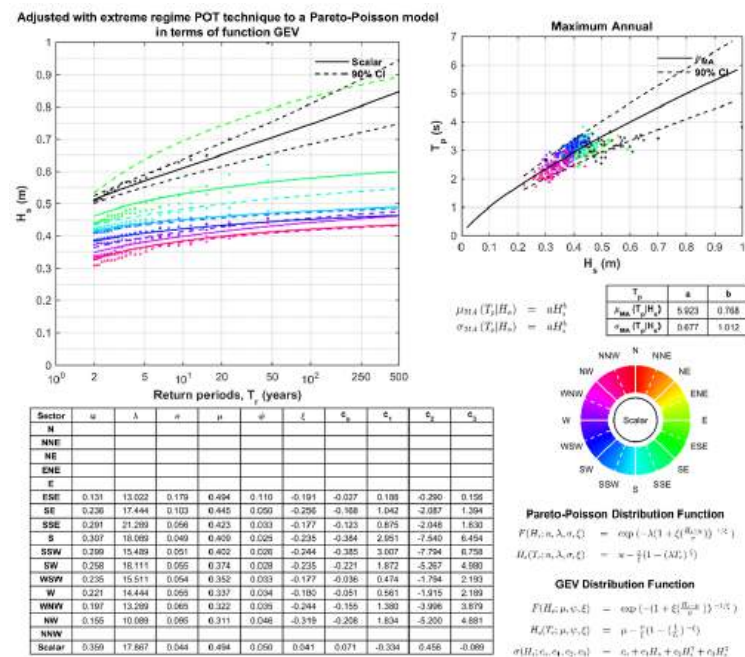


Figura 5.30: Régimen extremal direccional

5.5. Caracterización conjunta del clima del viento y el oleaje

En la figura 5.31, se muestra la tabla de ocurrencia. Se puede observar que mayores velocidades de viento conducen a una mayor altura de ola significativa, lo que demuestra la relación entre el viento en el nodo 6 con coordenadas 29.25°E, 3.5°S y las olas generadas en un punto de control próximo a la zona de estudio, con coordenadas 29.1°E, 3.4°S. La mayor velocidad del viento proviene del NE, haciendo que las mayores olas provengan de la misma dirección. La tendencia de la estacionalidad se revela en las figuras 5.32 (tabla de ocurrencia) y 5.33 (boxplot), con dos tipos de estudio diferentes. No existe una estacionalidad claramente definida, propia de un clima ecuatorial. Se observa que en enero y febrero el viento toma una dirección E-NE, mientras que el resto de los meses toma una dirección O-NO. Aparte de esto, la dirección de las olas oscila SO y SE todo el año. Hay un ligero aumento de la velocidad del viento en los meses de julio y agosto, lo que parece que conlleva un aumento de la altura de las olas en esos meses. La dirección del viento en esos meses atendiendo al box plot, parece estar mucho más concentrada en dirección SO. En la figura 5.34 las rosas direccionales muestran que la mayor parte del viento tiene dirección NO, con un valor extremo en el NE. Del mismo modo, la mayoría de las olas provienen de la dirección S, con un valor extremo en el NE. Esto podría estar relacionado, ya que los vientos pueden estar generando estos picos en las olas, que provienen de la misma dirección que los picos de viento, mostrando una alta intensidad. Como se apreció anteriormente, la mayor parte del viento proviene del NO con máximos en el NE, y la mayor parte de las olas provienen del Sur con máximos alrededor del NNE - NE.

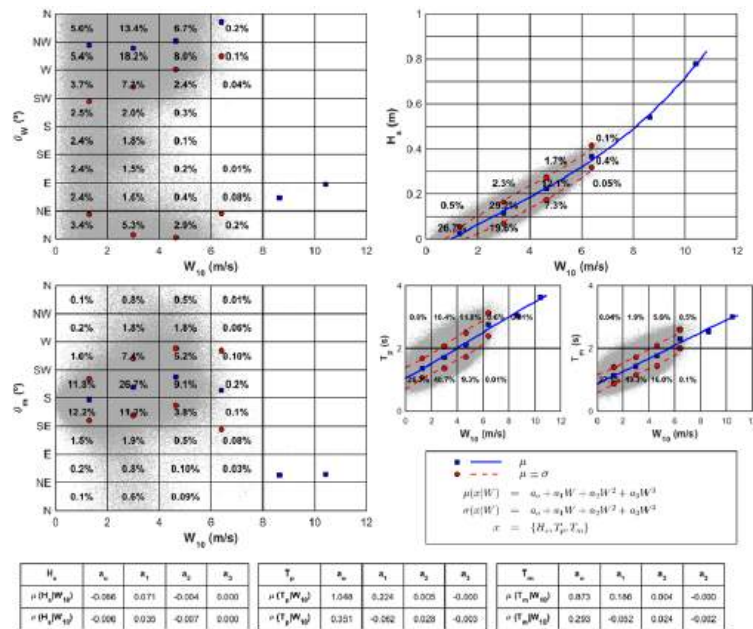


Figura 5.31: Tabla ocurrencia

En las figuras 5.35 y 5.36 se muestra la persistencia estacional y direccional, respectivamente, en el nodo 6. La velocidad del viento más probable tiene un valor aproximado de 3 m/s con más de 600 eventos al año. En cuanto a la duración de los eventos, la línea negra inclinada representa el 50 % del tiempo, sin embargo la línea roja oscura representa el 99 % de no superación (1 % del tiempo), la duración de los eventos más probables es de

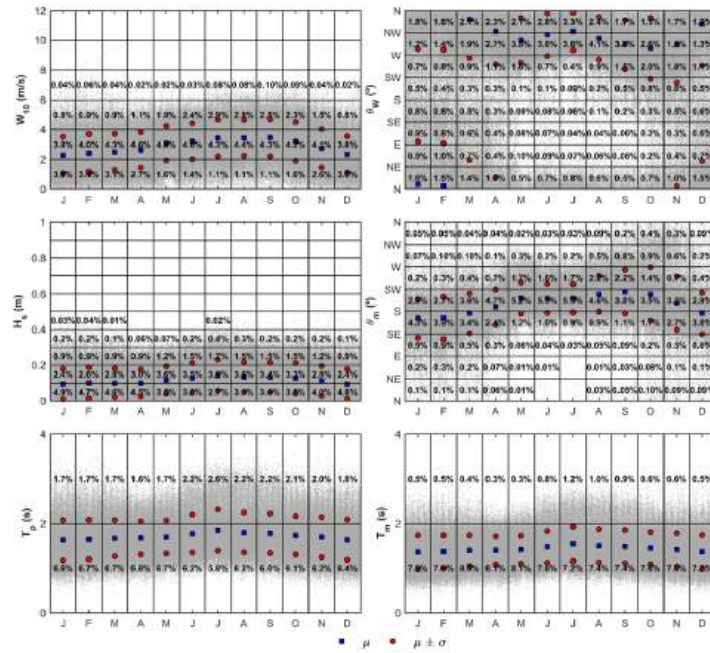


Figura 5.32: Estacionalidad (Tabla ocurrencia)

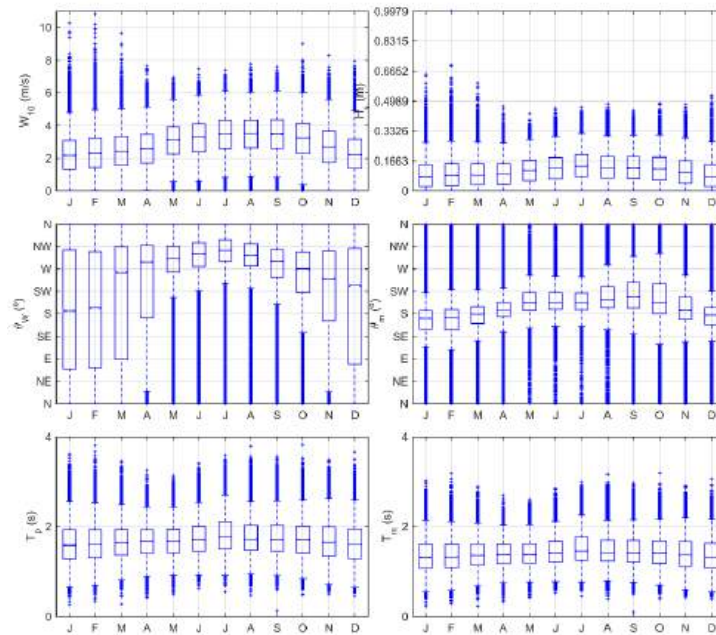


Figura 5.33: Gráfico de cajas

aproximadamente 4,5 días. En los gráficos debajo de los gráficos principales, se aprecian las estaciones, de nuevo no se aprecia claramente estacionalidad.

Atendiendo ahora a la figura 5.37, el número de eventos desde el sector N y No son mayores que hacia otras direcciones. Esto es coherente con los resultados expuestos anteriormente, que la dirección más probable es NO. La duración para cada dirección es bastante similar, excepto para la dirección NE, que muestra eventos más cortos. Los mayores índices de velocidad del viento vuelven a corresponder a las direcciones NE y E. En la figura 46 se expone el régimen medio mensual, donde los valores más altos de la velocidad del viento se produjeron en enero y febrero, al igual que las mayores alturas de ola. Pero las medias más altas tienen lugar en los meses de verano para el viento y el oleaje. En la figura 5.38, se muestra

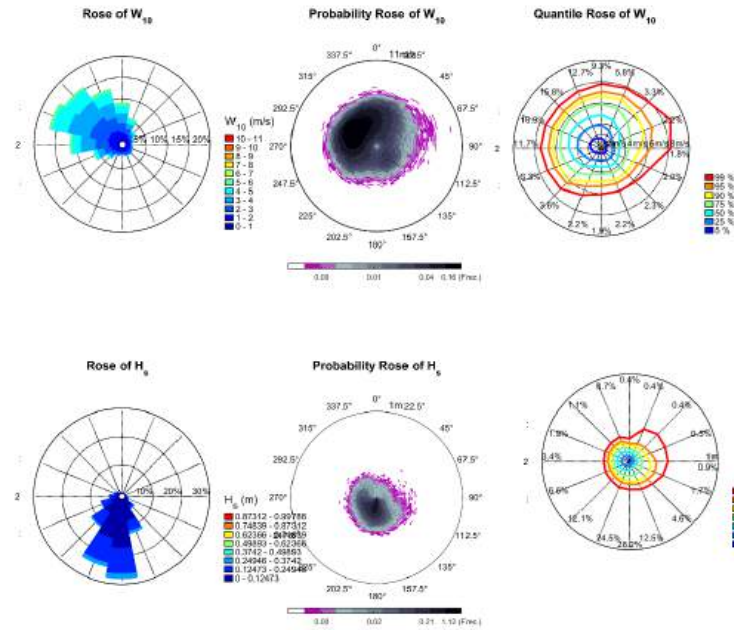


Figura 5.34: Rosas direccionales

el régimen mensual extremo. Los resultados son coherentes con lo que se había visto en el régimen medio, que los eventos más extremos tienen lugar en enero, en lugar de en los meses de verano.

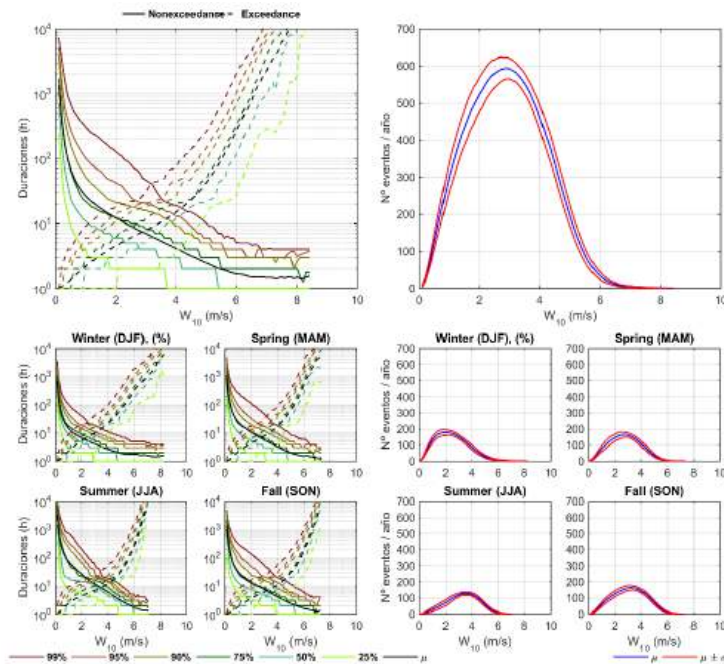


Figura 5.35: Análisis persistencias estacional

En las figuras 5.39 y 5.40 se exponen el régimen direccional medio y extremo, respectivamente. Se observa que las direcciones ENE y E presentan los mayores valores de viento y oleaje, y la dirección más probable, Sur, tiene las medias más pequeñas. Atendiendo ahora a la figura 5.40 se observa el régimen direccional extremo, donde los máximos vientos vuelven a tener lugar en las mismas direcciones máximas que se habían comentado en el párrafo anterior. Los valores más altos caen en torno a la dirección E. Existen algunos valores máximos

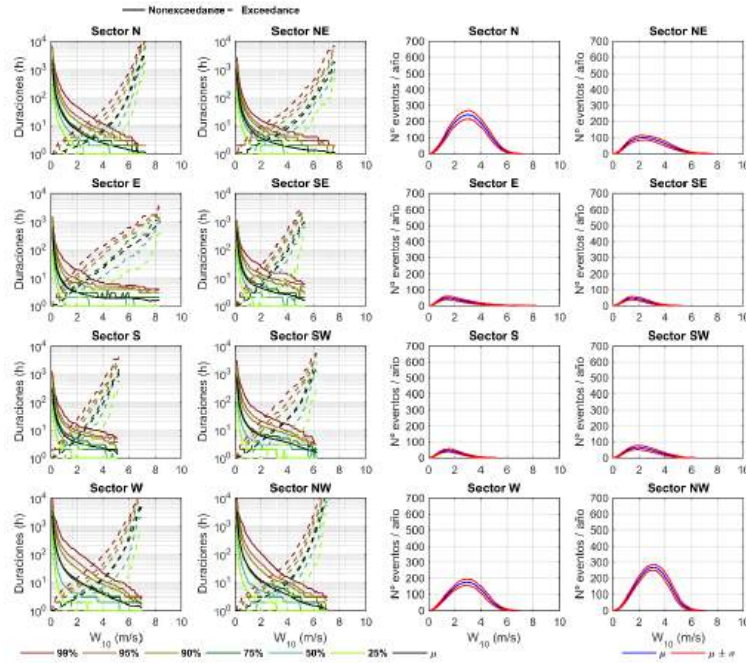


Figura 5.36: Análisis persistencias direccional

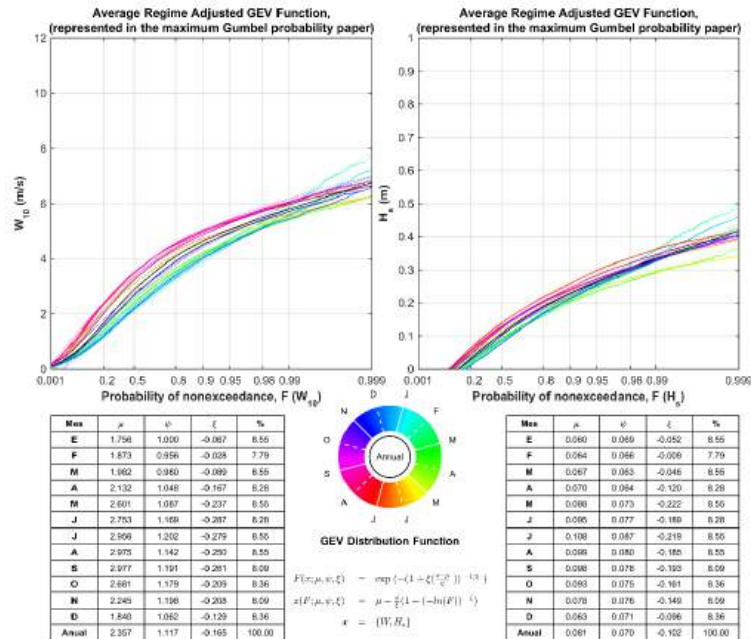


Figura 5.37: Régimen medio mensual

anuales situados fuera de la línea de ajuste desde el N y NNE.

Observando ahora el régimen extremo, se aprecia una relación que se asemeja a una relación lineal entre el viento y la altura de ola, pero cuando el viento aumenta, la altura de ola aumenta también, lo que corrobora lo dicho anteriormente, que el viento y el punto de control muestran una relación entre el viento y el régimen de ola. Aunque no tienen una relación lineal, sí muestran un comportamiento altamente correlacionado. En lo que respecta al periodo de 500 vueltas coincide con un viento de unos 12 m/s, que respetando el ajuste conjunto del viento y la altura de ola da alturas de ola de casi 1 m.

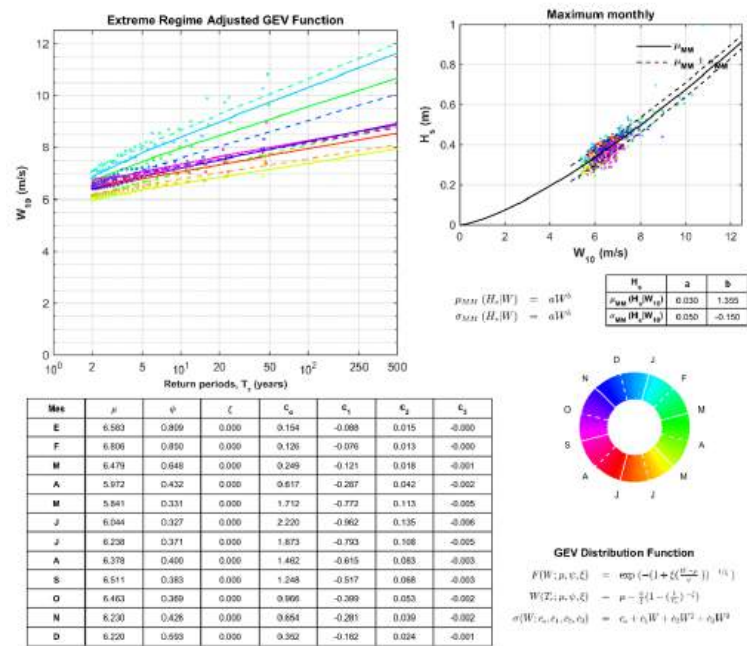


Figura 5.38: Régimen extremal mensual

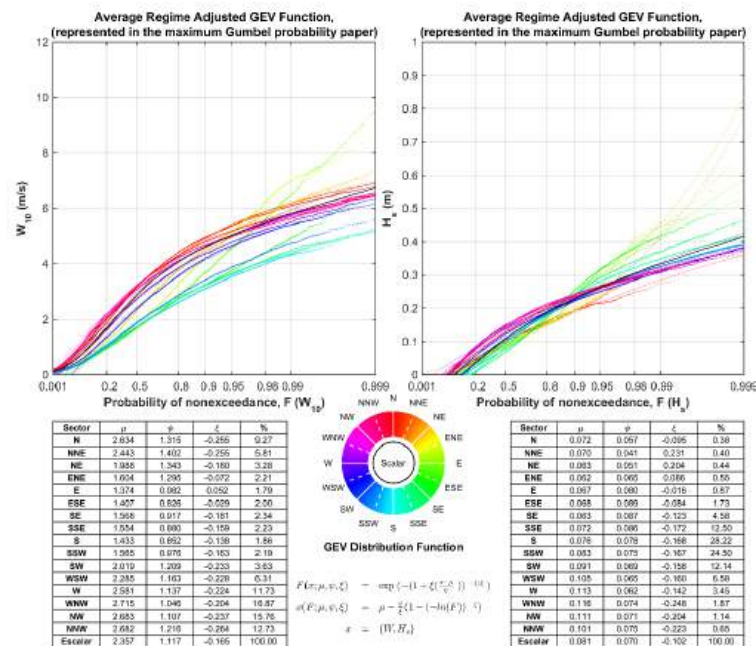


Figura 5.39: Régimen medio direccional

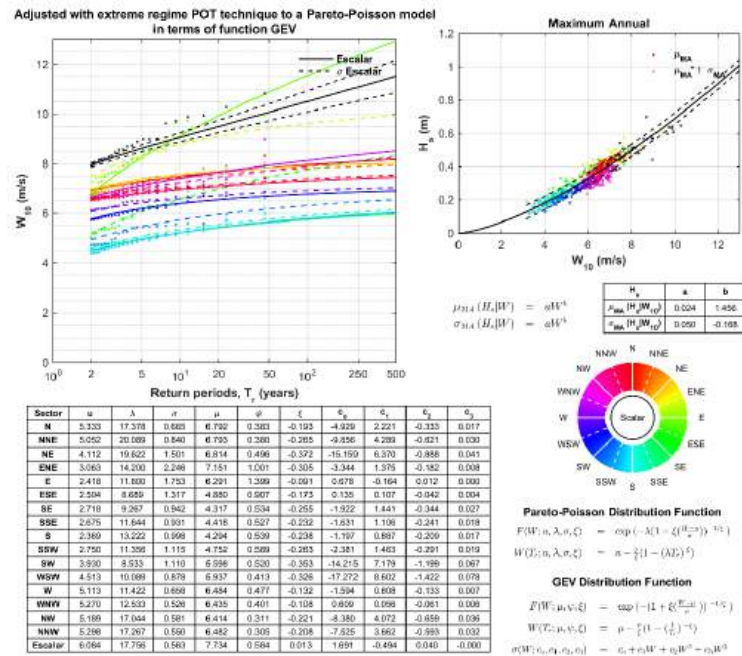


Figura 5.40: Régimen extremal direccional

5.6. Alternativas geométricas para el diseño de la ampliación del puerto

Esta sección muestra la alternativa geométrica final adoptada para el diseño del nuevo puerto. La figura 5.41 muestra el trazado final en planta, donde se aprecian los cambios realizados, que son el dragado en las zonas próximas al puerto y la creación del muelle de contenedores en la parte norte del puerto. Se mantiene el perímetro del puerto anterior, aplicando los cambios mencionados.



Figura 5.41: Ampliación de la dársena portuaria del puerto de Kalundu

En la parte sur del puerto no se han realizado modificaciones, por lo que se mantienen las tipologías portuarias. Éstas se muestran en las figuras 5.42 y 5.43, donde pueden verse, respectivamente, la zona más próxima a tierra y el muelle exterior. Ambas son estructuras de muros de muelle sobre pilotes. Refiriéndonos a la que muestra el muelle (figura 5.42), se

puede observar como debajo del mismo existe una estructura de montículo de rublo con una pendiente desconocida. Por otro lado, la otra estructura (figura 5.43) es una estructura de pilotes con una pantalla entre los pilotes, por lo que será considerada como vertical por el modelo numérico. Para evitar inundaciones, se ha aumentado la altura de los muelles en 2 metros, siendo la altura inicial de 767 m y la altura final de 769 m. Por lo que respecta ahora a la nueva estructura, que se muestra en la figura 5.44, podemos ver que se trata de una estructura apilada sobre un rompeolas inclinado con una pendiente de 1:2. Esta estructura está coronada a 769 m, y el dragado realizado en la zona del muelle está a 759 m. Por lo tanto, todo el complejo está coronado a 769 m, mientras que el dragado de la zona exterior del rompeolas principal tiene una profundidad de 759 m, mientras que el dragado realizado en el interior de la zona protegida por el rompeolas da una altura de 760 m.

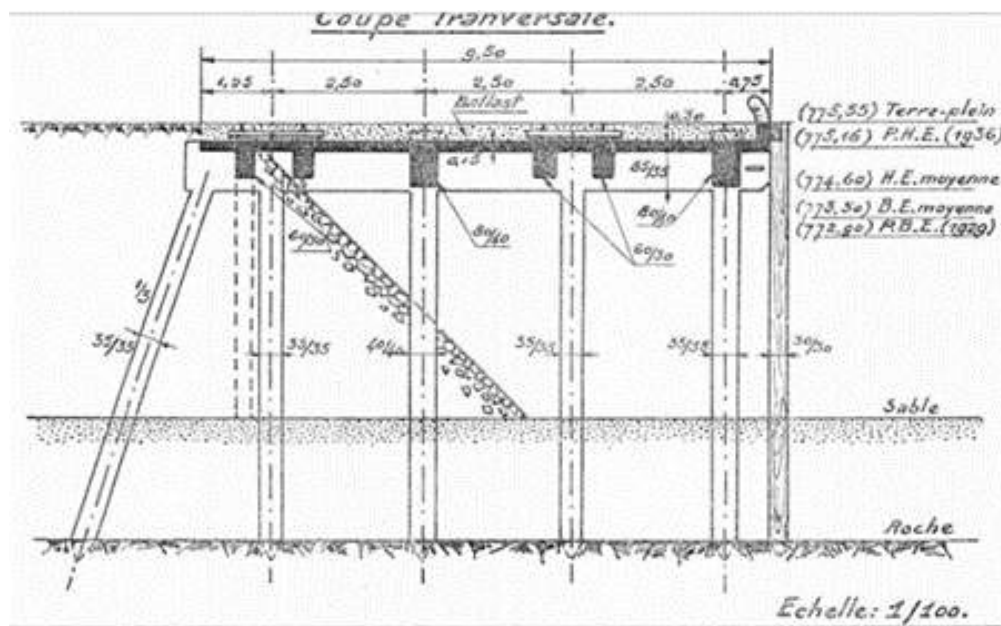


Figura 5.42: Esquema de la dársena sur

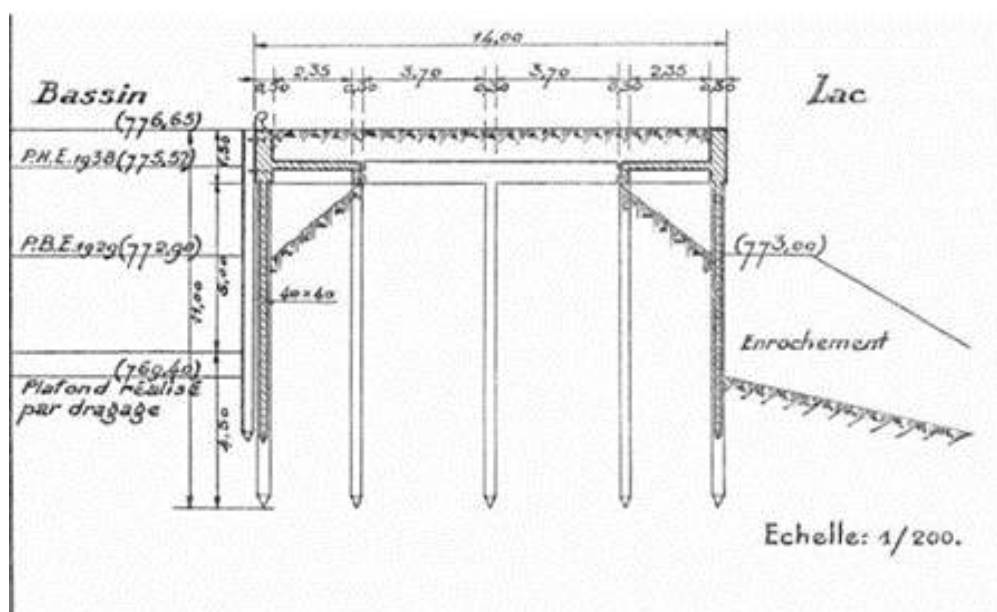


Figura 5.43: Esquema del dique exterior

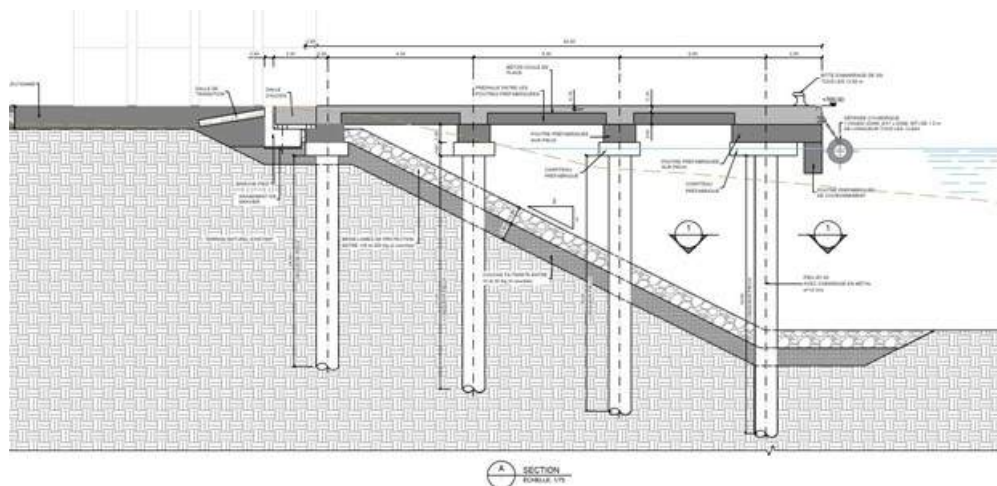


Figura 5.44: Esquema de la dársena norte

5.7. Simulación numérica de la agitación portuaria

Para llevar a cabo la simulación numérica de la ampliación del puerto se han desarrollado diferentes tareas. La primera de estas tareas es la modificación de la batimetría de detalle para incorporar el dragado realizado. Para ello, se han dibujado dos polígonos, tal y como se muestra en la figura 5.45, donde en rojo se muestra el polígono dragado a 760, mientras que en verde el polígono dragado a 759. La figura 5.46 muestra la batimetría de detalle antes y después del dragado.

Teniendo en cuenta que el «cero local» del puerto se ha fijado en una cota de 768 metros, la cresta de las estructuras se encuentra un metro por encima de éstas, y cada zona tiene respectivamente una profundidad de 11 y 12 metros.

Tras las modificaciones efectuadas en la batimetría, se crean los contornos de las mallas. Estos contornos deben tener un lado abierto, en el que se generarán las olas, por lo que la forma y la orientación de este lado variarán en función del forzamiento de las olas. Tras las modificaciones realizadas en la batimetría, se crean los contornos de las mallas. Debido a las estadísticas obtenidas tras la asimilación de las olas exteriores generadas por el viento creadas en primer lugar, se puede observar que las direcciones generales de las olas proceden del ENE y del SSO. Además, debido a la configuración geométrica de la costa y del puerto, no se consideran las olas procedentes de direcciones más occidentales, ya que no son capaces de penetrar hacia el puerto. Por ello los límites numéricos se fijan en 56.25°N (límite Este) y 123.75°N (límite Oeste), considerando fuera de estos límites las marejadas como calmas, no capaces de generar olas agitadoras.

Como resultado, las Figuras 5.47 y 5.48 muestran los contornos obtenidos. La Figura 5.47 muestra el contorno abierto al este con límites direccionales de 56.25 a 123.75°N , mientras que la Figura 5.48 muestra el contorno abierto al sureste con límites direccionales de 123.75 a 213.75°N . La creación de dos contornos basados en la dirección del forzamiento del oleaje aplicado es necesaria para optimizar el rendimiento de la generación numérica, ya que la creación de un contorno más grande capaz de manejar un mayor número de direcciones requeriría un tiempo de cálculo significativamente mayor.

Una vez creados los contornos, el siguiente paso consiste en asignar coeficientes de reflexión a cada sección a lo largo del perímetro del puerto. Para ello se estudian diferentes tipologías de puertos. Se determina que la estructura correspondiente al rompeolas principal exterior, al ser una estructura vertical con pantallas entre los pilotes, tiene un valor de co-

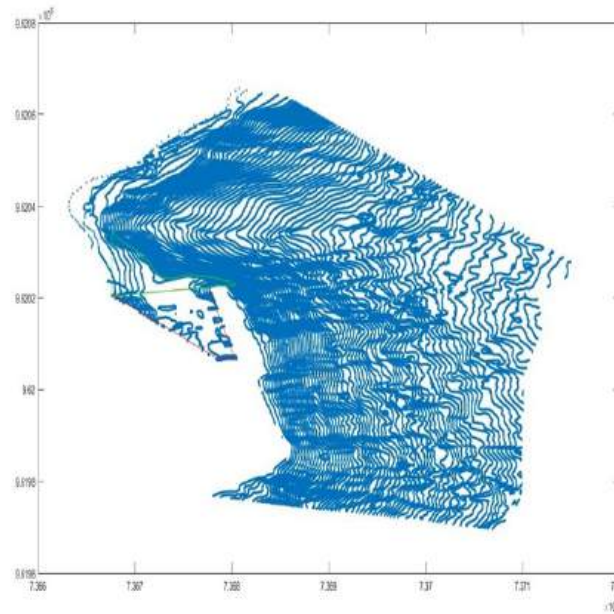


Figura 5.45: Batimetría de detalle con contornos de los polígonos en los que se realiza el dragado

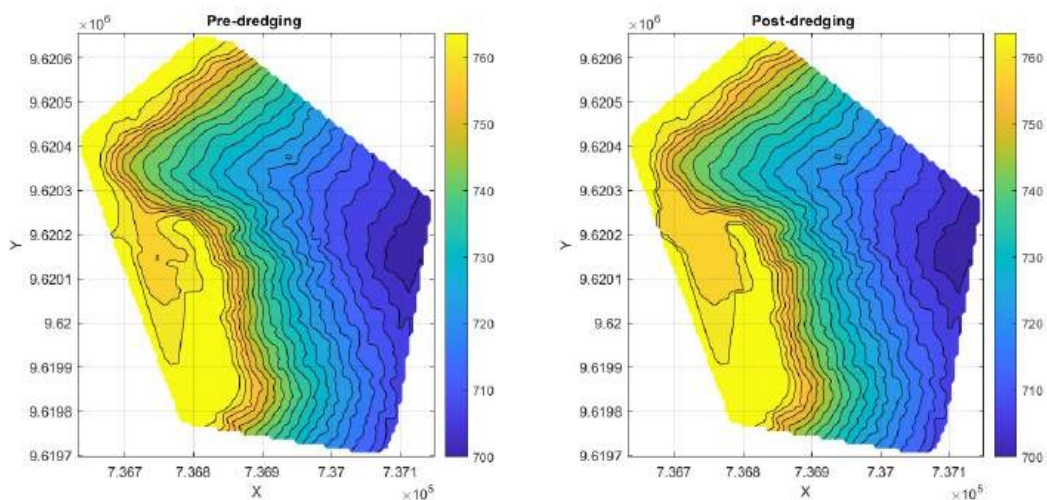


Figura 5.46: Batimetría de detalle pre y post dragado

eficiente de reflexión teórico de 0.9. A las estructuras inclinadas se les asignaron valores de 0.4 y 0.6. A las estructuras inclinadas se les asignaron valores de 0.4 y 0.6. Los valores de 0,6 se asignan a la estructura de la parte sur del puerto, cuya pendiente se desconoce, pero son superiores al coeficiente de reflexión de 0.4 que se asignó a la nueva estructura inclinada con una pendiente de 1:2. Por último, a la playa se le asigna un valor de 0.5 (un coeficiente de reflexión elevado relacionado con un perfil de playa de tipo reflectante). Los contornos restantes se definen como absorbentes para simular los límites abiertos en los que las olas siguen propagándose hacia el infinito sin reflejarse. En la figura 5.49 puede verse cómo se distribuyen los coeficientes de reflexión a lo largo del contorno.

Una vez definidos estos coeficientes, comienza el proceso de creación de la malla numérica. La malla utilizada es una malla no estructurada compuesta por triángulos, similar a la utilizada para la generación de olas de viento. En este caso, la malla vuelve a estar compuesta

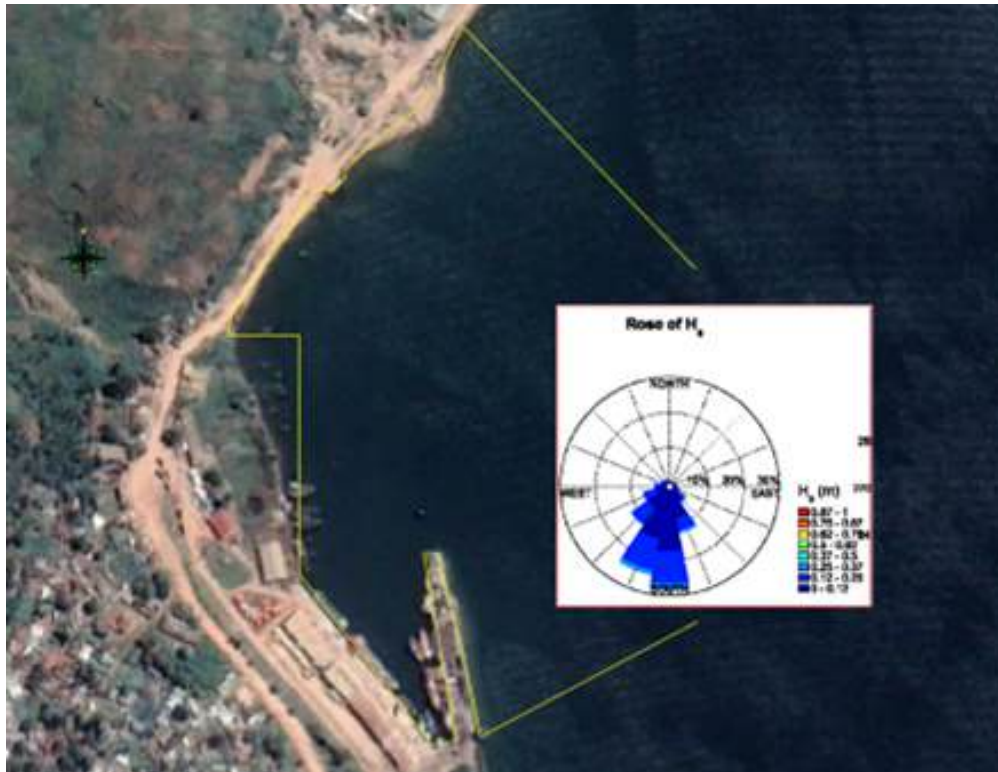


Figura 5.47: Contorno Este



Figura 5.48: Contorno Sur-Este

por triángulos que se adaptan a la morfología de la batimetría en función del periodo de diseño establecido. Por razones computacionales, este periodo de diseño se fija en 1 segundo y se consiguen buenos resultados para periodos de hasta 0.7 segundos. El principio de mallado es que una onda debe estar representada por al menos 10 nodos a lo largo de su longitud de onda.

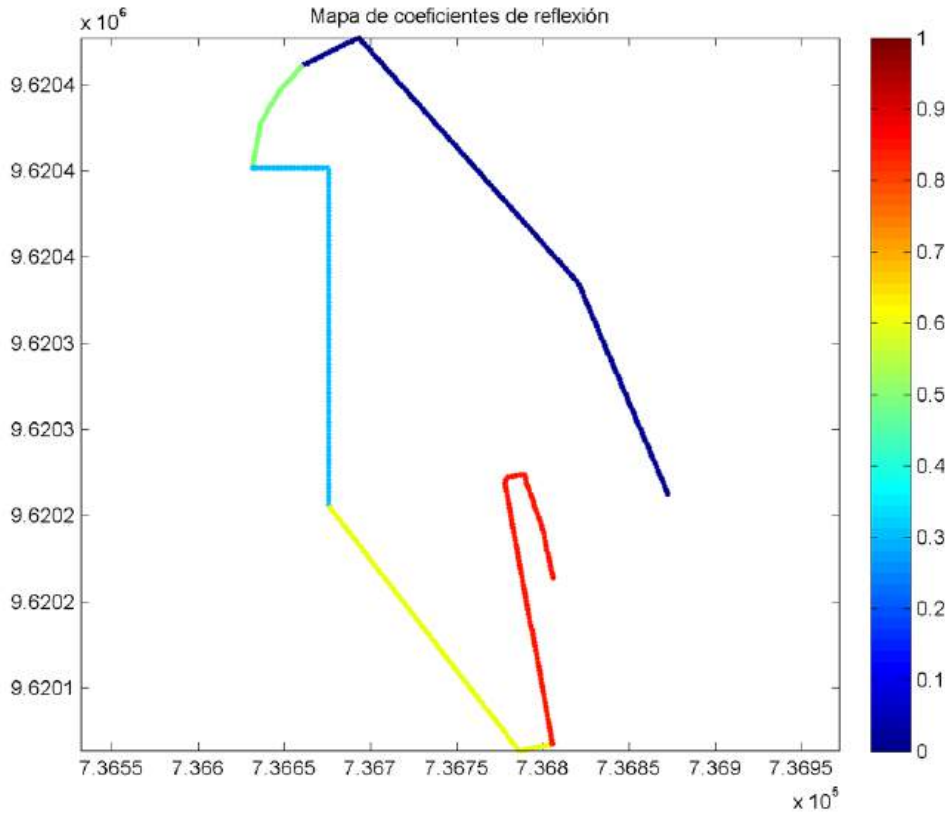


Figura 5.49: Contorno con coeficientes de reflexión

Por lo tanto, dependiendo de la profundidad, la longitud de onda varía, siendo más larga en zonas más profundas, lo que permite una relajación en el número de nodos espaciales, mientras que en profundidades menores, esta densidad de nodos espaciales aumenta. La necesidad de disponer de 10 nodos por longitud de onda se deriva del modelo numérico utilizado. En este caso, se utilizó el modelo MSP (Mild Slope Equation de base elíptica), que resuelve las variaciones de fase y amplitud de las olas a lo largo de una batimetría y topografía variables. Este modelo tiene en cuenta los efectos de refracción, difracción y reflexión (parcial) de las olas. Este modelo se utiliza en todo el mundo para describir la propagación de las olas de agua sobre una batimetría variable, teniendo en cuenta los cambios de amplitud y dirección de las olas debidos a las variaciones de profundidad y a otros factores. El modelo es especialmente útil en ingeniería costera para predecir la penetración y agitación de las olas en zonas portuarias, zonas cercanas a la costa y alrededor de estructuras. Incorpora la refracción de las olas, en la que éstas cambian de dirección al variar la profundidad; la difracción de las olas, en la que éstas se curvan alrededor de los obstáculos y dispersan la energía; y la reflexión de las olas, en la que éstas encuentran estructuras verticales y se reflejan parcialmente.

La ecuación principal utilizada por el modelo puede expresarse como:

$$\nabla(C_g \nabla \varphi) + k^2 c \varphi = 0 \quad (5.2)$$

Donde φ es el potencial de velocidad o altura de onda, c es la velocidad de fase de la onda, C_g es la velocidad de grupo de la onda, k es el número de onda y ∇ denota el operador de gradiente. La aplicación numérica consiste en generar una malla no estructurada, compuesta normalmente de triángulos, con una mayor densidad de malla en las regiones con cambios rápidos de profundidad. Los coeficientes de reflexión se asignan en función del tipo

de estructura y se utilizan límites absorbentes para simular los límites abiertos. La ecuación se resuelve mediante métodos numéricos y el modelo se calibra con condiciones de oleaje conocidas para garantizar su precisión. Esta modelización detallada permite predecir las interacciones del oleaje con las estructuras costeras, lo que ayuda al diseño y la optimización de las infraestructuras marítimas.

Para la estrategia de downscaling numérico de la agitación portuaria, se utilizó una técnica híbrida (similar a la generación y propagación del oleaje exterior presentada en capítulos anteriores). En primer lugar, se seleccionaron 200 casos de oleaje exterior representativos (véase la Figura 5.50) utilizando el Algoritmo de Máxima Disimilitud (MDA). Estos casos se eligieron a partir de la base de datos de oleaje reconstruida en el punto frente al puerto, donde se realizó la caracterización climática presentada anteriormente. Los límites direccionales establecidos fueron definidos por las mallas, con 56.25°N en el este y 213.75°N en el oeste. El periodo mínimo a ejecutar fue de 0.25 s, y la altura mínima de ola de 0.128 m. Una vez seleccionados los casos representativos, cada caso se ejecuta en su malla correspondiente en función de su dirección.

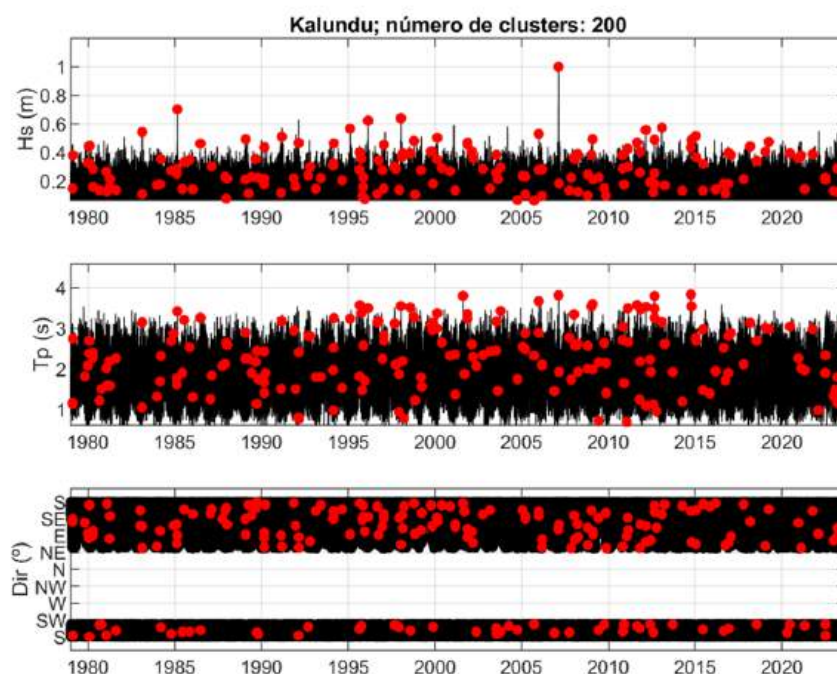


Figura 5.50: Selección casos estadísticamente representativos

En segundo lugar, debido a la falta de datos históricos del nivel del lago, se realizaron pruebas con dos niveles de marea: de 0 m (es decir, marea baja) y un considerando el nivel máximo registrado de 3.3 m para evaluar cómo se comporta la agitación de las olas con estos dos escenarios. Y en tercer lugar, ejecutando numéricamente estos estados de mar, se reconstruyeron series históricas de oleaje mediante métodos de Función de Base Radial (RBF) en diferentes zonas del puerto. La reconstrucción se realizó teniendo en cuenta tanto la altura de ola significativa media como la máxima (H_s) para cada zona de control. En este caso se tienen en cuenta dos posibles configuraciones, que dan lugar a diferentes zonas en cada una de ellas. En la figura 60 es visible esas dos configuraciones, donde se puede apreciar el número del área de cada una de ella. Las series se reconstruyen en cada zona para ambos niveles de marea, permitiendo realizar un análisis al nivel del agua.

5.7.1. Bases y criterios de diseño

Una vez definidas las zonas (véase la Figura 5.51), se establecen los límites operativos de cada una de ellas para permitir el posterior análisis operativo. Esto implica considerar si los buques están orientados longitudinal o transversalmente a las olas incidentes, así como el tipo de buque que operará en cada zona.

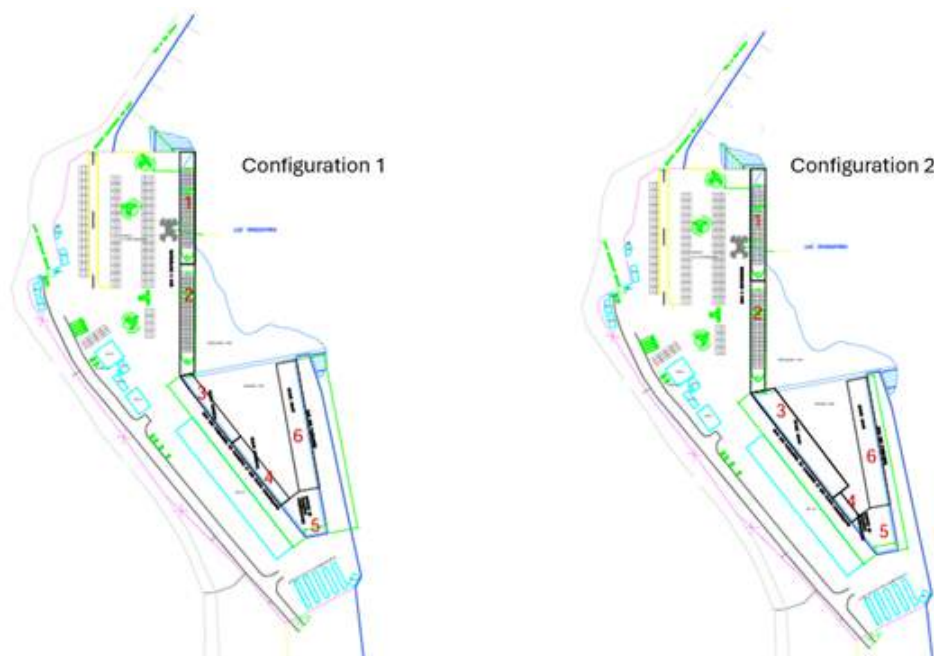


Figura 5.51: Áreas de agitación en ambas configuraciones

El cuadro 5.6 muestra qué tipo de buque corresponde a cada zona en función de la configuración a la que se hace referencia.

Cuadro 5.6: Tipo de barco según la configuración.

Área	Configuración 1 - Tipo de barco	Configuración 2 - Tipo de barco
1	Carga general	Buque portacontenedores
2	Carga general	Buque portacontenedores
3	Ferry (Amani)	Carga general
4	Carga general	Carga general
5	Embarcaciones pequeñas	Embarcaciones pequeñas
6	Ferry (Amani)	Carga general

Las figuras 5.52 y 5.53 muestran los límites operativos del ROM en función de la altura representativa de ola (H_s) y de la media anual de horas de inactividad permitidas, y también en función de si el ataque de la ola según la posición del buque / y muelle es longitudinal (cabeza) o transversal (manga). Los límites seleccionados se muestran resaltados en cuadrados rojos para facilitar su interpretación. Estos límites se han establecido mediante la aplicación de las recomendaciones propuestas en la ROM 3.1-99 (Recomendaciones para Obras Marítimas - Proyectos de Configuración Marítima para Puertos; Canales de Acceso y Zonas Flotantes) [37]. Dado que no existen límites operativos para buques pequeños, se utilizan los límites establecidos para el régimen de residencia. En la Tabla 5.8 se muestran los límites seleccionados para cada tipo de embarcación.

Cuadro 5.7: Límites operativos para operaciones de carga y descarga y régimen de permiso según el tipo de barco.

Tipo de barco	Hs ataque de ola longitudinal (proa) (m)	Hs ataque de ola transversal (a través) (m)	Tiempo inoperativo permitido (h/año)
Carga general	1.0	0.8	200
Ferry	0.5	0.3	200
Buque porta-contenedores	0.5	0.3	200
Embarcaciones pequeñas	0.4	0.2	40

Tras la reconstrucción de las series de altura de ola significativa máxima (Hs-max) y media (Hs-mean) en cada zona y debido a la falta de datos históricos de nivel del lago, es necesario verificar qué serie (entre las series de Hs generadas en bajamar y pleamar) produce la peor agitación del oleaje en cada zona (análisis del peor escenario). Para ello, presentamos en las figuras 5.54a y 5.54b dos gráficos de dispersión comparando ambas series Hs para todas las zonas. Este procedimiento sólo se aplica para la configuración 1, ya que su comportamiento es análogo al de la segunda. Se puede observar que, ambas series (pleamar y bajamar) son bastante similares, lo que significa que apenas hay influencia de la batimetría en la propagación y agitación de las olas alrededor del puerto.

Sin embargo, para definir qué series Hs deben considerarse para el análisis de la bajamar, se calcula también un coeficiente definido como los puntos situados por encima y por debajo de la bisectriz. Dado que en el eje x están las alturas en pleamar y en el eje y las alturas en bajamar, cuando el coeficiente toma valores superiores a 1, el peor caso será el de bajamar, mientras que cuando toma valores inferiores a uno, el peor caso será el de pleamar. En este caso ambos coeficientes, tanto el de Hs-media como el de Hs-max, toman valores inferiores a uno, por lo que para ir sobre seguro nos aproximaremos a la serie basada en marea alta. Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 5.54a y 5.54b donde se muestra la bisectriz, con la nube de puntos representada en un color en función del área y del valor del coeficiente. Una vez tomada la decisión, se lleva a cabo un análisis de los tiempos de parada sobre la base de los principios propuestos anteriormente, extraídos del ROM 3.1-99 [37]. Para ello, sólo se tomarán las series de alturas medias de ola, dado que la operatividad se aplica al análisis de probabilidad de no superación de Hs (régimen interanual medio de Hs). La Figura 5.55 muestra las series temporales de las Hs-media y Hs-max de cada zona para la aproximación de marea alta. Se observa que la serie Hs-max presenta valores por encima de la media, como era de esperar, alcanzando valores en torno a 1.68 m, mientras que la serie Hs-mean históricamente los datos no superan 1.5 m.

5.8. Post-procesamiento de los resultados y análisis de operatividad

Como se mencionó anteriormente, y a modo de recapitulación, en esta subsección se presenta el método y los resultados obtenidos para el análisis de operatividad, aplicando los umbrales previamente definidos tomados de ROM 3.1-99 [37]. Es importante mencionar que el siguiente análisis de tiempo de inactividad utiliza exclusivamente series reconstruidas

CARACTERISTICAS DEL AREA	Tiempos de inoperatividad en horas, por todos los conceptos ^{(1) (2)}
A. Areas de buques en tránsito (accesos, vías de navegación, canales, bocanas, áreas de maniobras, etc.)	
1. Puertos de interés general	
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	200 h. año 20 h. mes
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes
2. Puertos de refugio	
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	300 h. año 30 h. mes
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes
3. Otros puertos	400 h. año 40 h. mes
4. Terminales especializados	
— Pasajeros, Contenedores, Ferries y otros terminales que operen con líneas regulares	200 h. año 20 h. mes
— Graneles de cualquier tipo y otros terminales que no operen con líneas regulares	600 h. año 60 h. mes
B. Areas de buques en permanencia (Fondeaderos, amarra-deros, dársenas, muelles, atraques, terminales, etc.)	
1. Puertos de cualquier tipo	40 h. año 20 h. mes
2. Terminales especializados	
— Pasajeros, Contenedores, Ferries y otros terminales que operen con líneas regulares	200 h. año 20 h. mes
— Graneles de cualquier tipo y otros terminales que no operen con líneas regulares	500 h. año 50 h. mes

Figura 5.52: Limites operativos fijados por la ROM 3.1-99 [37]

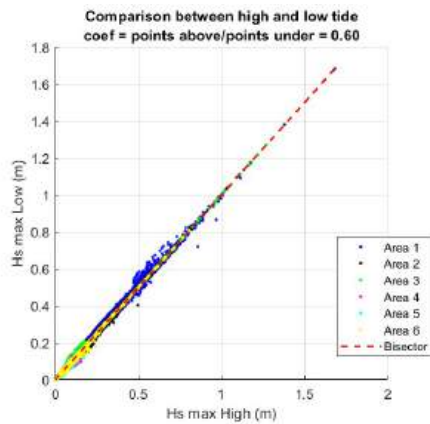
Hs-medias para cada zona, ya que representa un comportamiento Hs medio dentro de cada zona de control donde estarán amarrados los buques.

Las siguientes figuras (ver figuras 5.56 - 5.61) muestran los resultados para el régimen Hs-medio con los umbrales definidos por el ROM para la configuración 1 (ver tabla 5.7). Puede observarse que en todos los casos no se superan los límites de tiempo de inactividad exigidos para todas las zonas. El número de horas de funcionamiento puede verse en la tabla 5.8. Como conclusión a los resultados presentados, se puede afirmar que las zonas de la configuración 1 cumplen los umbrales establecidos para la operatividad. El número de horas por encima del umbral puede verse en la tabla 5.9. Las figuras 5.62 a 5.67 muestran los resultados para la configuración 2. Al igual que para la configuración 1, los umbrales apenas se superan. Es importante destacar que para la configuración 2 para el área 1 presentan un aumento de las horas de inactividad (debido a los límites recomendados para los portacontenedores), pero siguen cumpliendo con el límite de horas establecido con sólo 47 horas medias al año (por

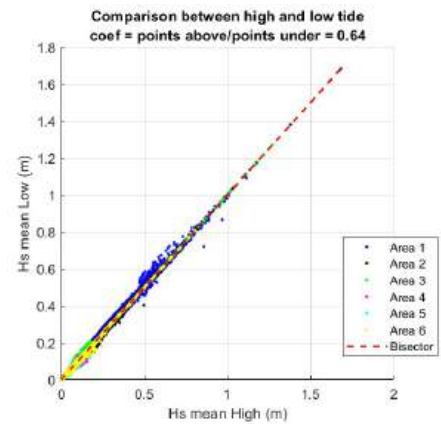
	Velocidad absoluta del viento $V_{10.1 \text{ min}}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{c, 1 \text{ min}}$	Altura de ola H_s
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.2 m/s
> 60.000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	1.5 m/s	0.6 m
• Acciones en sentido transversal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.0 m
30.000-200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.2 m
> 200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	0.7 m/s	1.0 m
Descargando	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	0.8 m
> 60.000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	1.0 m
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	0.7 m/s	0.4 m
3. Permanencia de buques en muelle			
— Petroleros y Transportadores de Gases Licuados			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	30 m/s	2.0 m/s	3.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	25 m/s	1.0 m/s	2.0 m
— Transatlánticos y Cruceros (2)			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.7 m
— Embarcaciones deportivas (2)	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.2 m
— Otro tipo de buques	Limitaciones impuestas por las cargas de diseño de los muelles		

Figura 5.53: Límites operativos fijados por la ROM 3.1-99 [37]

debajo de las 200 horas al año permitidas). Por otro lado, el resto de las zonas prácticamente no presentan periodos de inactividad. Observando las tablas 5.10 y 5.11, podemos ver que en las áreas 1, 2, 3, 4 y 6 las horas están por debajo de 200 horas al año y en el área 5 están por debajo de 40, lo que se traduce en un porcentaje de operatividad siempre superior al 99,5 %. Tras observar los resultados, se puede deducir que el área con mayor agitación es el área 1, siendo adecuada tanto para buques de carga general como para portacontenedores. Asimismo, en ambas configuraciones, el área 2 cumple más ampliamente los requisitos tanto de los buques de carga general como de los portacontenedores, por lo que sería mejor ubicar estos últimos en esta área. Además, la operatividad del área 1 oscila para las dos configuraciones entre el 99,45 % y el 99,98 % para mares de manga más restrictivos, dependiendo del tipo de buque y del sentido de las acciones realizadas respecto al muelle, mientras que en ambas



(a) Relación entre las Hmax en ambos niveles



(b) Relación entre las Hmedias en ambos niveles

Figura 5.54: Relaciones entre coeficientes en ambos niveles.

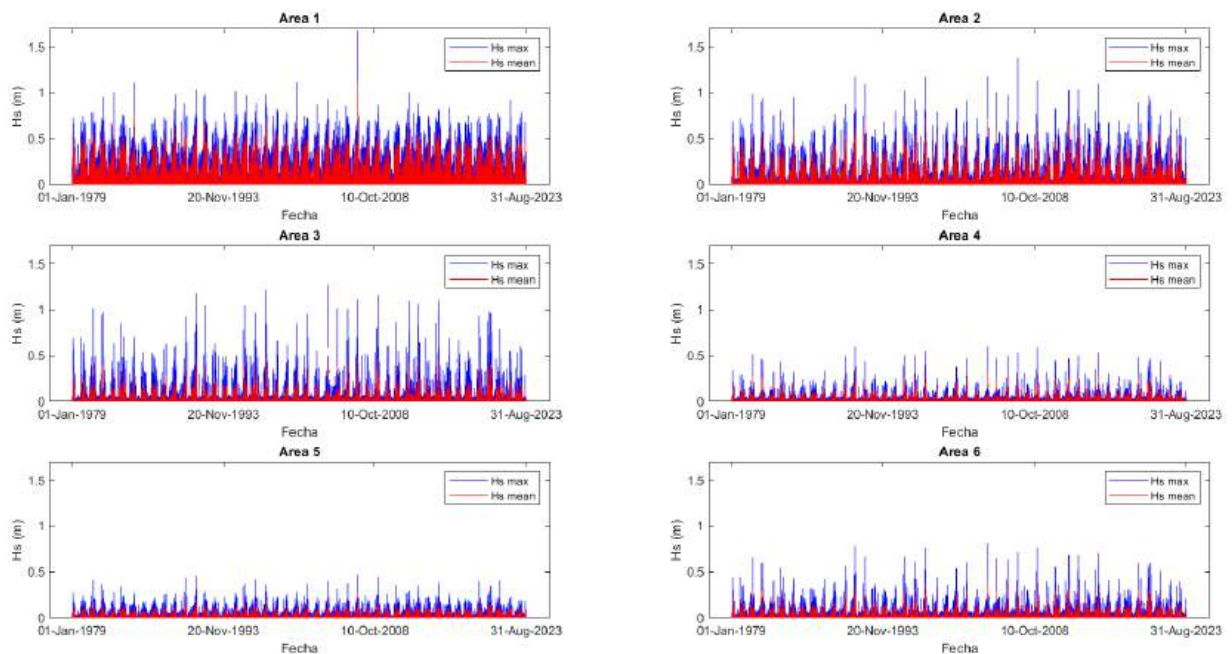


Figura 5.55: Series temporales de Hmax y Hmedia

configuraciones el área 2 tiene una operatividad del 99 %. El área 3 cumple satisfactoriamente con sus dos aplicaciones para ferry y carga. Siguiendo con este análisis, podemos observar que al tener las áreas 4 y 5 para ambos casos las mismas finalidades, cumplen satisfactoriamente los umbrales para carga y pequeños buques. Por último, la zona 6, al igual que la 3, cumple ambos requisitos. Por lo tanto, la agitación en el interior del puerto es satisfactoria con los requisitos propuestos. En ninguna de las zonas de ninguna de las configuraciones se supera el límite de horas respectivamente. El caso más desfavorable se da en la configuración 2, área 1, en situaciones transversales, con 47 horas anuales de inoperatividad, que ni siquiera se acercan al límite de 200 horas anuales fijado por el ROM.

Por último, es importante mencionar que, aunque el carácter operativo del puerto está garantizado según los límites de agitación calculados a partir del documento ROM. Existe una familia de estados de mar procedentes de las direcciones este hacia el puerto, que pueden asociarse a tormentas de aproximadamente 1 m de Hs y 3.5 s de Tp. Estas tormentas genera-

Cuadro 5.8: Porcentaje de operatividad anual para oleaje de proa y de costado en la configuración 1.

Área	Porcentaje (proa)	Porcentaje (costado)
1	99.9965	99.9965
2	100	100
3	100	99.9828
4	100	100
5	100	99.9996
6	100	99.9944

Cuadro 5.9: Horas que exceden el umbral establecido por ROM 3.1-99 en la Configuración 1.

Área	Horas (proa)	Horas (costado)
1	0.0307	0.03067
2	0	0
3	0	1.5028
4	0	0
5	0	0.0307
6	0	0.4907

Cuadro 5.10: Porcentaje de operatividad por año para mares de proa y costado en la Configuración 2.

Área	Porcentaje (proa)	Porcentaje (costado)
1	99.9643	99.4556
2	99.9856	99.8621
3	100	100
4	100	100
5	100	99.9997
6	100	100

Cuadro 5.11: Horas que superan el umbral establecido por ROM 3.1-99. Configuración 2.

Área	Horas (proa)	Horas (costado)
1	3.128	47.6894
2	1.2574	12.0834
3	0	0
4	0	0
5	0	0.0307
6	0	0

das localmente en la parte norte del lago se propagan directa y abiertamente hacia el nuevo puerto y llegarán prácticamente sin cambios a la nueva zona de amarre, experimentando perturbaciones en torno a 1 y 1.6 m (para Hs incidente + reflejada). Este tipo de estado del mar sólo se produce el 0.00035 % de las horas al año (una media de 3 horas al año), que ni siquiera se acerca al límite de 200 horas al año fijado por el ROM.

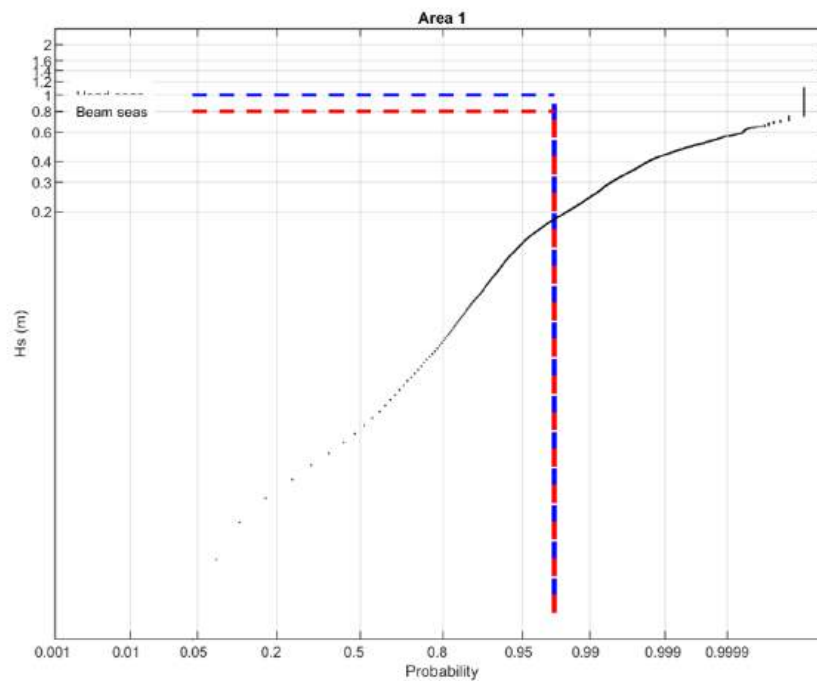


Figura 5.56: Régimen medio para el área 1. Configuración 1.

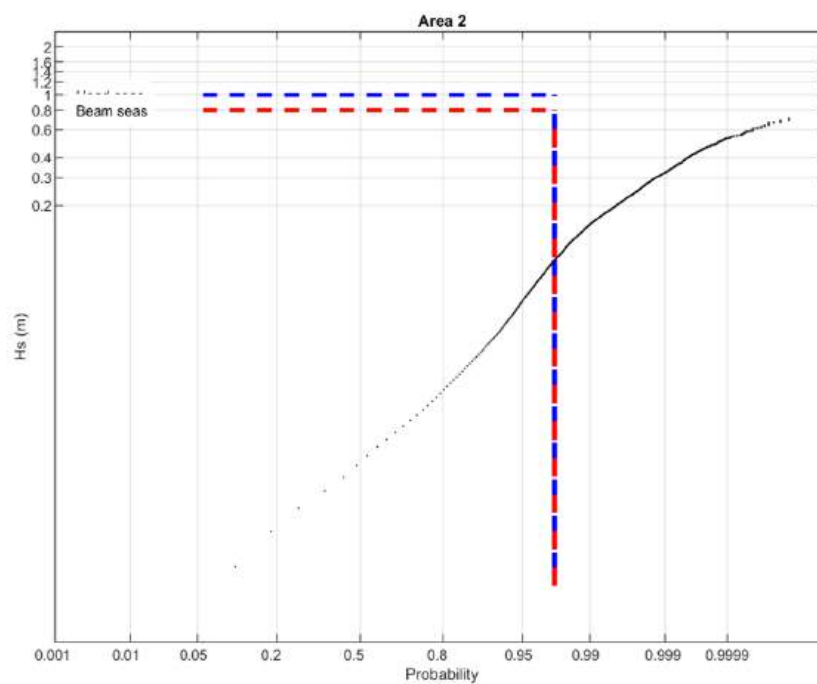


Figura 5.57: Régimen medio para el área 2. Configuración 1.

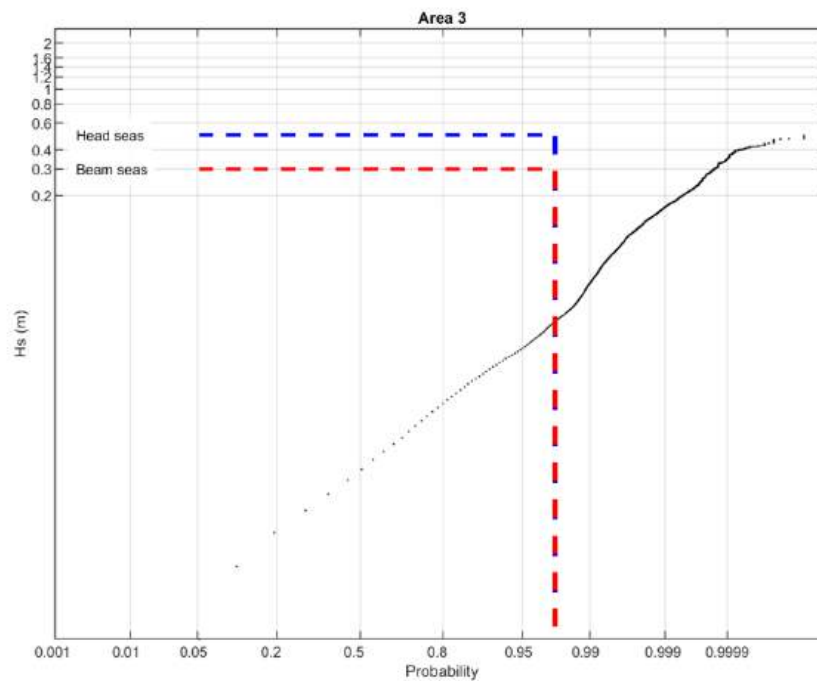


Figura 5.58: Régimen medio para el área 3. Configuración 1.

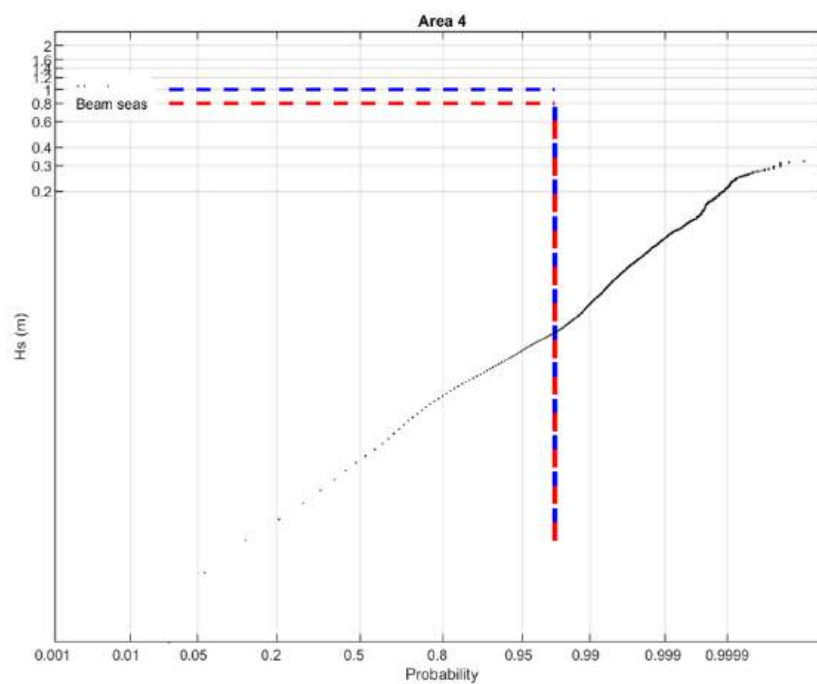


Figura 5.59: Régimen medio para el área 4. Configuración 1.

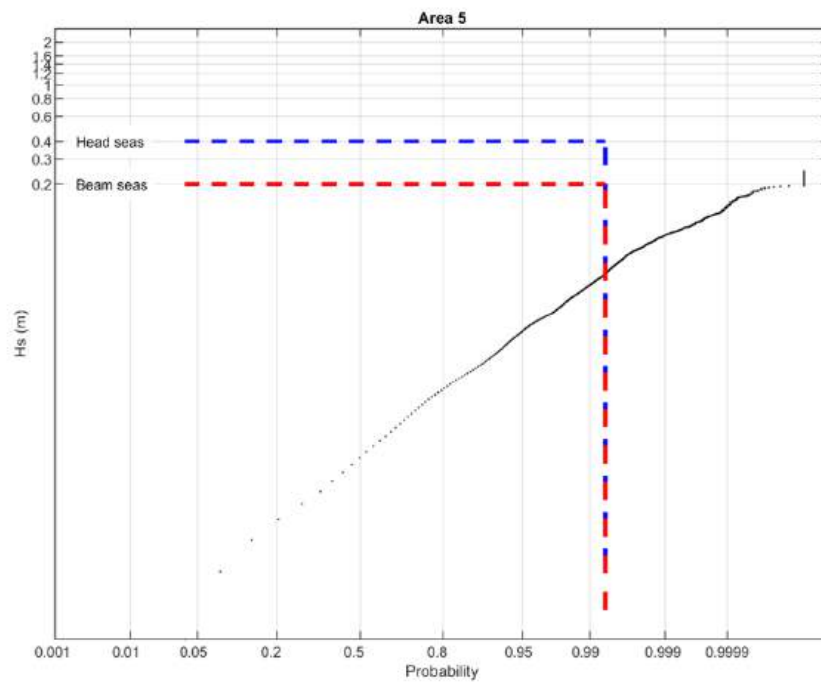


Figura 5.60: Régimen medio para el área 5. Configuración 1.

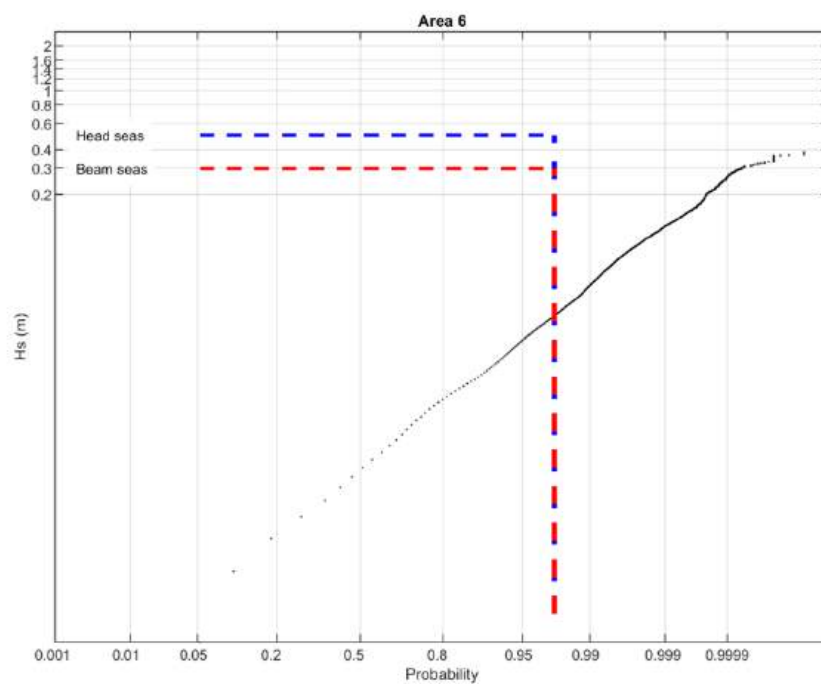


Figura 5.61: Régimen medio para el área 6. Configuración 1.

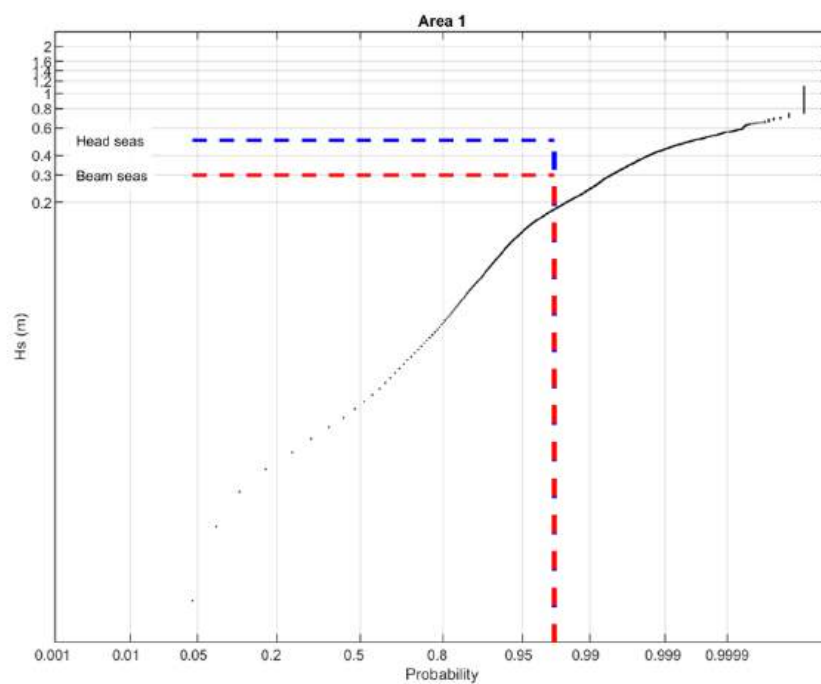


Figura 5.62: Régimen medio para el área 1. Configuración 2.

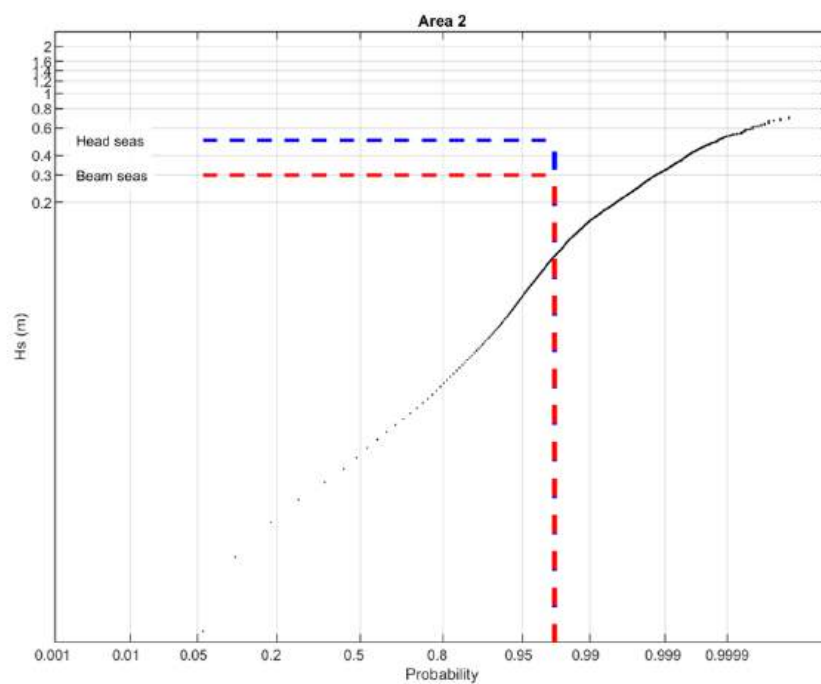


Figura 5.63: Régimen medio para el área 2. Configuración 2.

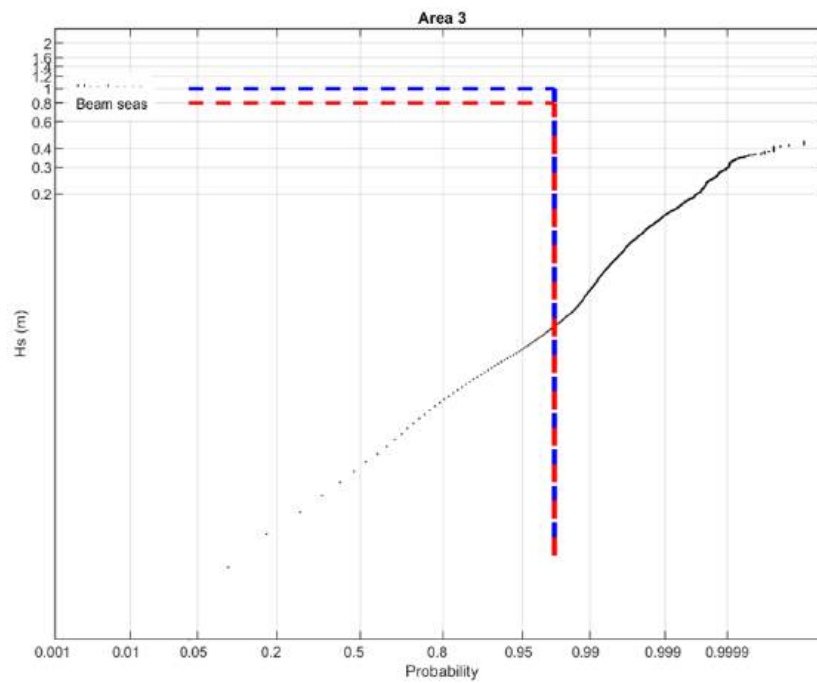


Figura 5.64: Régimen medio para el área 3. Configuración 2.

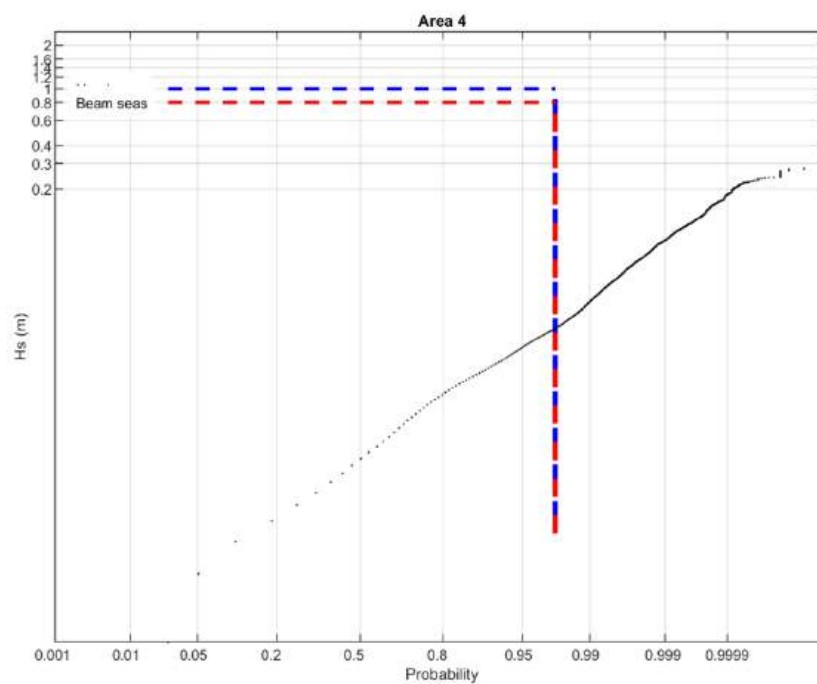


Figura 5.65: Régimen medio para el área 4. Configuración 2.

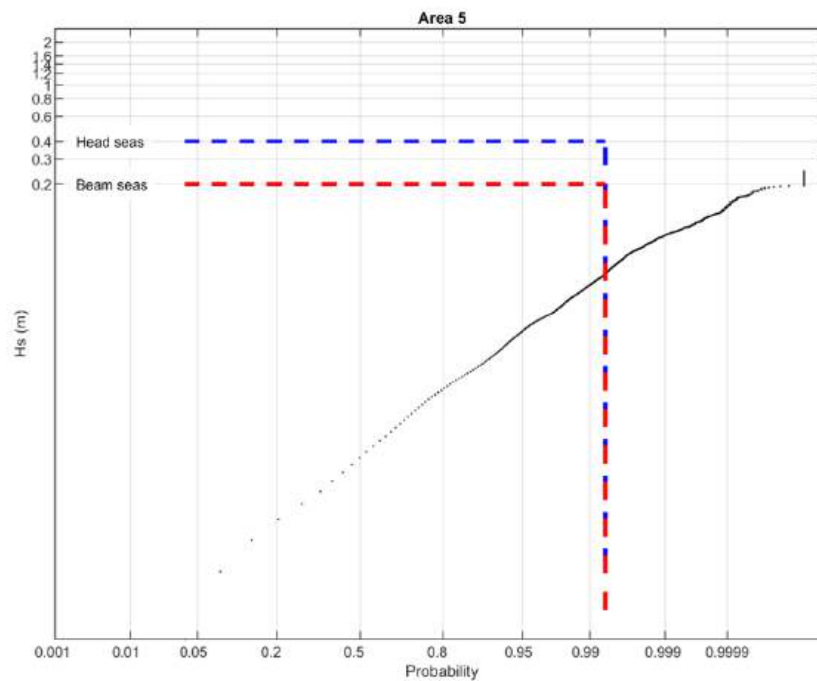


Figura 5.66: Régimen medio para el área 5. Configuración 2.

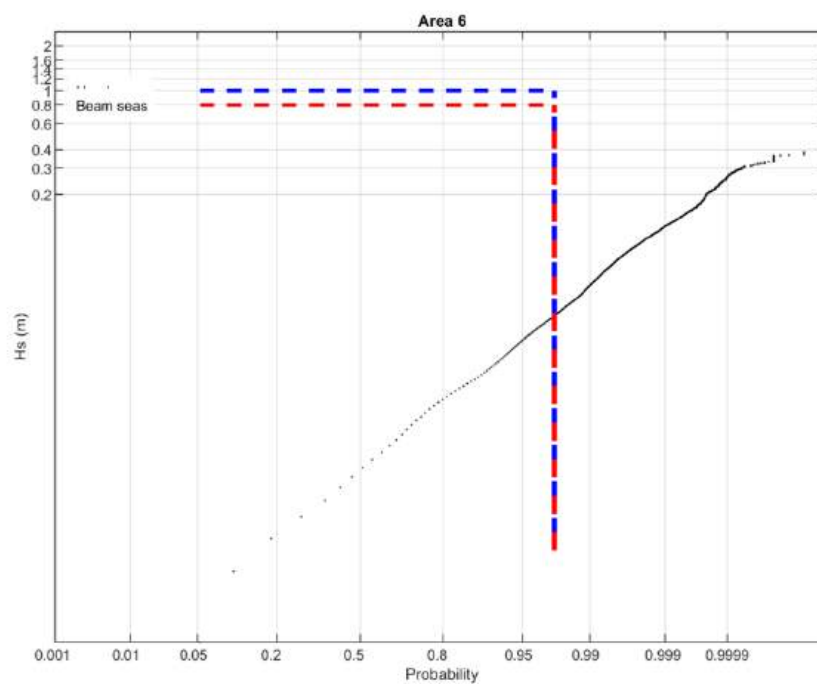


Figura 5.67: Régimen medio para el área 6. Configuración 2.

6. Conclusiones generales

El análisis de las condiciones de viento y oleaje cerca del puerto de Kalundu dio lugar a la creación de una base de datos detallada y exhaustiva, que incluye datos históricos sobre el viento, resultados de modelos numéricos y estadísticas sobre el clima de olas, esenciales para evaluar la agitación del puerto propuesto. Se caracterizaron los regímenes de viento en múltiples puntos de control, identificando tanto las condiciones típicas como las extremas, cruciales para comprender los factores que influyen en la generación de olas en el lago Tanganica. El análisis del clima de olas reveló patrones y tendencias significativos, incluyendo eventos de olas extremas, proporcionando información crítica para evaluar los impactos potenciales de la agitación en el puerto propuesto. Las simulaciones numéricas basadas en la base de datos demostraron los efectos potenciales de las diferentes condiciones de viento y oleaje en el entorno operativo del puerto, ofreciendo una valiosa información para optimizar el diseño del puerto y minimizar el tiempo de inactividad. La base de datos y los resultados de las simulaciones se cotejaron con las hojas de datos climáticos proporcionadas, lo que confirmó la fiabilidad y exactitud de las conclusiones del estudio y garantizó su aplicabilidad para la planificación y la toma de decisiones en el futuro. Se recomienda actualizar continuamente la base de datos con nuevos datos de viento y oleaje para adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes, junto con nuevos estudios sobre los impactos a largo plazo del cambio climático en el régimen de oleaje, lo que será valioso para el desarrollo sostenible de los puertos. Como conclusiones del estudio numérico de la agitación portuaria, podemos señalar que la pleamar, que en este caso se ha asociado al nivel máximo registrado, es ligeramente peor en términos de agitación que la bajamar, ya que la primera permite mayores alturas de ola. Por otro lado, refiriéndonos a las configuraciones propuestas de las zonas portuarias, observamos que ambas configuraciones cumplen satisfactoriamente los umbrales de tiempo de parada / operatividad establecidos por el documento ROM 3.1-99, incluso para la Zona 1 en la Configuración 2 (considerando buques portacontenedores), donde se observa una menor operatividad para los buques portacontenedores, pero sin superar el número de horas de parada recomendadas por el documento ROM. Es importante mencionar que todo el análisis de tiempos de parada se ha realizado considerando únicamente las series reconstruidas a partir de la media H_s calculada en cada una de las áreas de control, por ser éste el protocolo tradicionalmente seguido en este tipo de análisis.

A. Análisis de afección variabilidad viento sobre punto de control

En este anexo se adjunta el análisis llevado a cabo para el estudio de la relación de los distintos viento sobre nodos. Se muestran las fichas climáticas de viento, se han tomado 7 nodos de viento para representar el comportamiento del viento a lo largo de toda la superficie del lago. Las fichas climáticas son las siguientes: tabla de ocurrencia, estacionalidad (tabla de ocurrencia y boxplot), rosas direccionales, persistencia estacional, régimen de persistencia direccional, régimen medio mensual, régimen medio direccional, régimen extremo mensual, régimen extremo direccional, régimen medio y régimen extremo. Las fichas de cada punto se presentan en cada uno de los apartados para facilitar su intercomparación. Los puntos de estudio corresponden a los nodos 6, 10, 16, 20, 28, 35 y 44 (ver Fig.A.1). El viento comparado está siempre en el punto de control situado frente al lago en las coordenadas 3.15 S, 38.40 E, por lo que el objetivo del estudio es ver cómo se relacionan los vientos en diferentes puntos con el punto de control de oleaje.

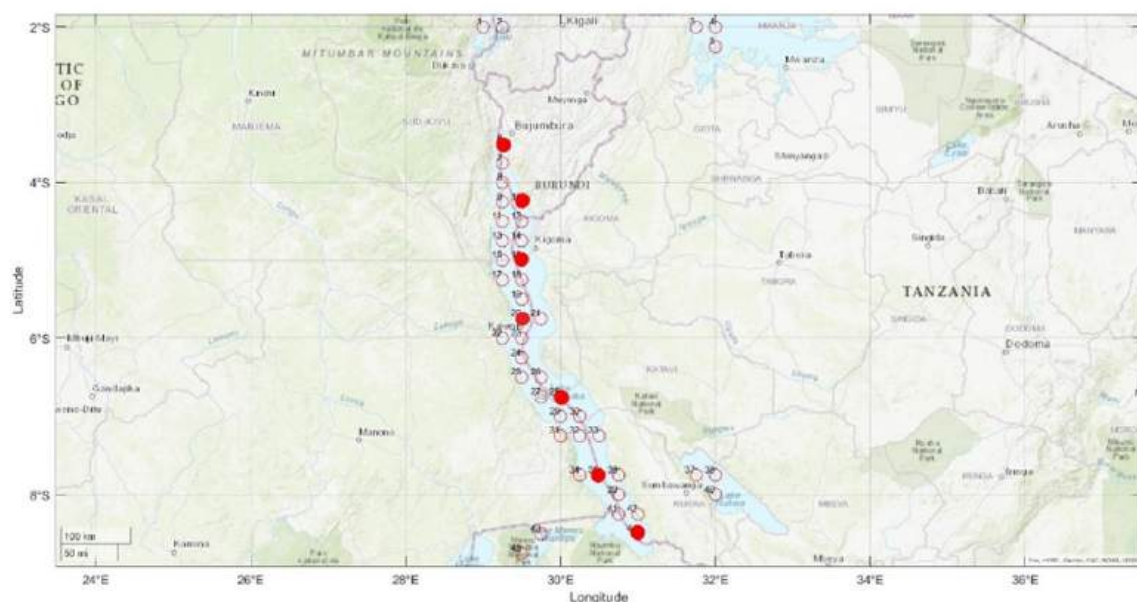


Figura A.1: Localizaciones de los nodos sobre los que se realiza el análisis (en rojo sólido)

A.0.1. Tabla de ocurrencia

En las figuras del A.2 al A.8 se presentan las tablas de ocurrencia de los nodos de reanálisis objeto de estudio. Las direcciones e intensidades del viento varían en función de la posición

del nodo en superficie. En el nodo 6, los vientos son más intensos que en los nodos 10 y 16, y las direcciones más extremas proceden del E-NE, mientras que en los nodos 10 y 16 se concentran en torno al sur. El nodo 20 muestra intensidades más altas, sin embargo, no se corresponden con un aumento significativo de la altura de las olas en el punto de control. Lo mismo ocurre en los nodos 28, 35 y 44, lo que demuestra que, debido a la gran superficie del lago, la dinámica del viento que actúa en lugares alejados del punto de control no afecta a la dinámica de las olas en el punto de control.

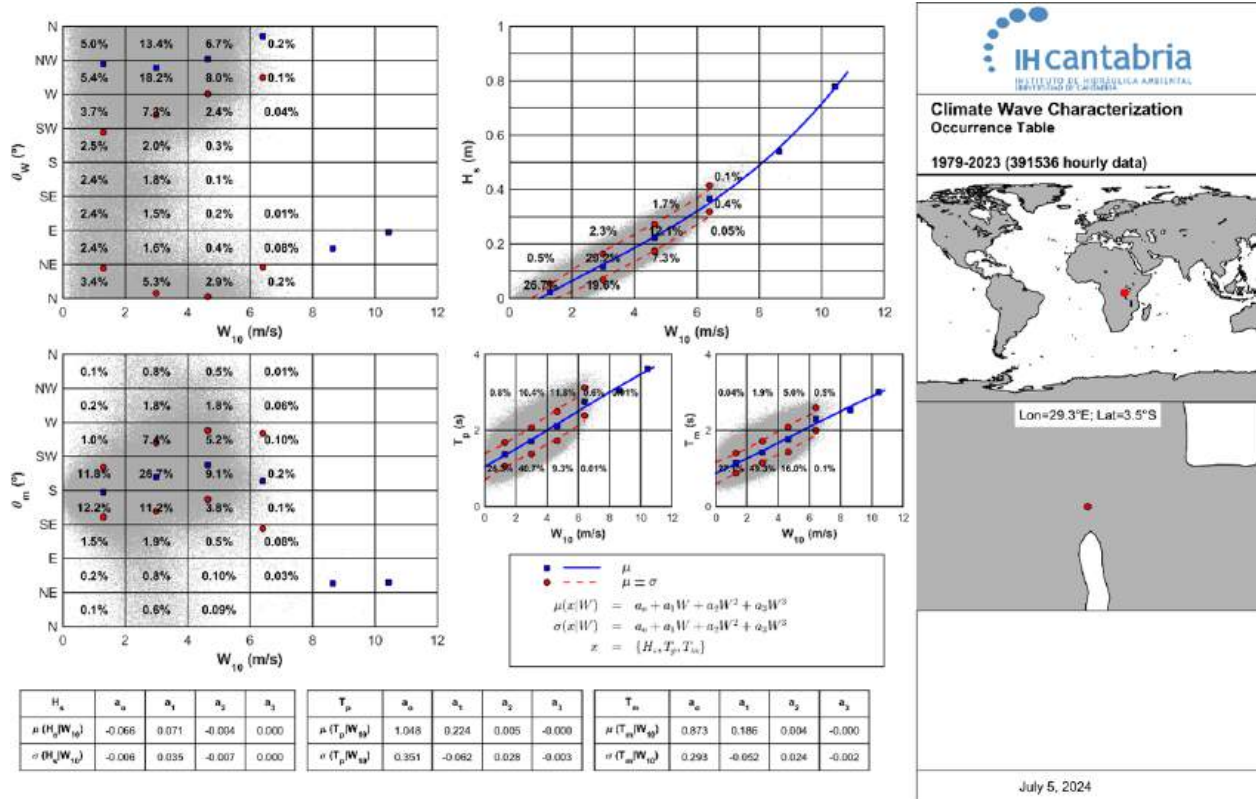


Figura A.2: Tabla de ocurrencia nodo 6

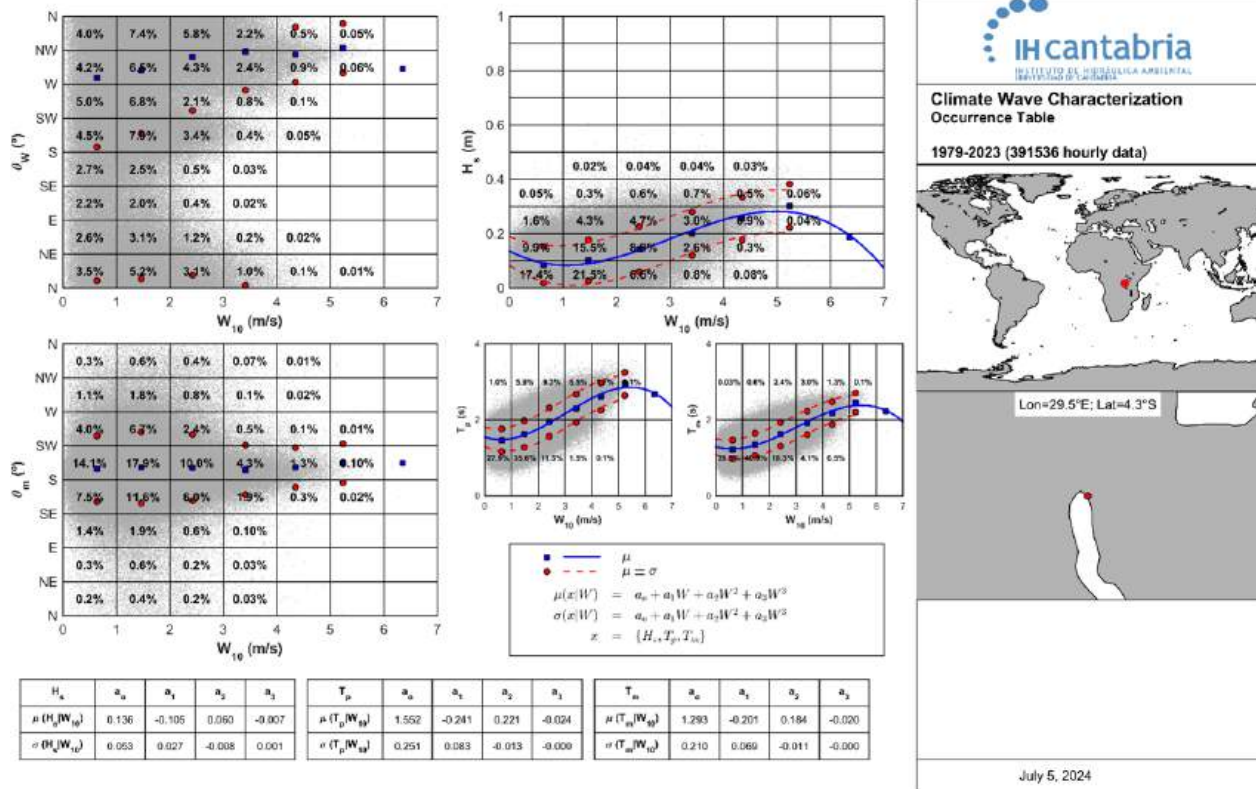


Figura A.3: Tabla de ocurrencia nodo 10

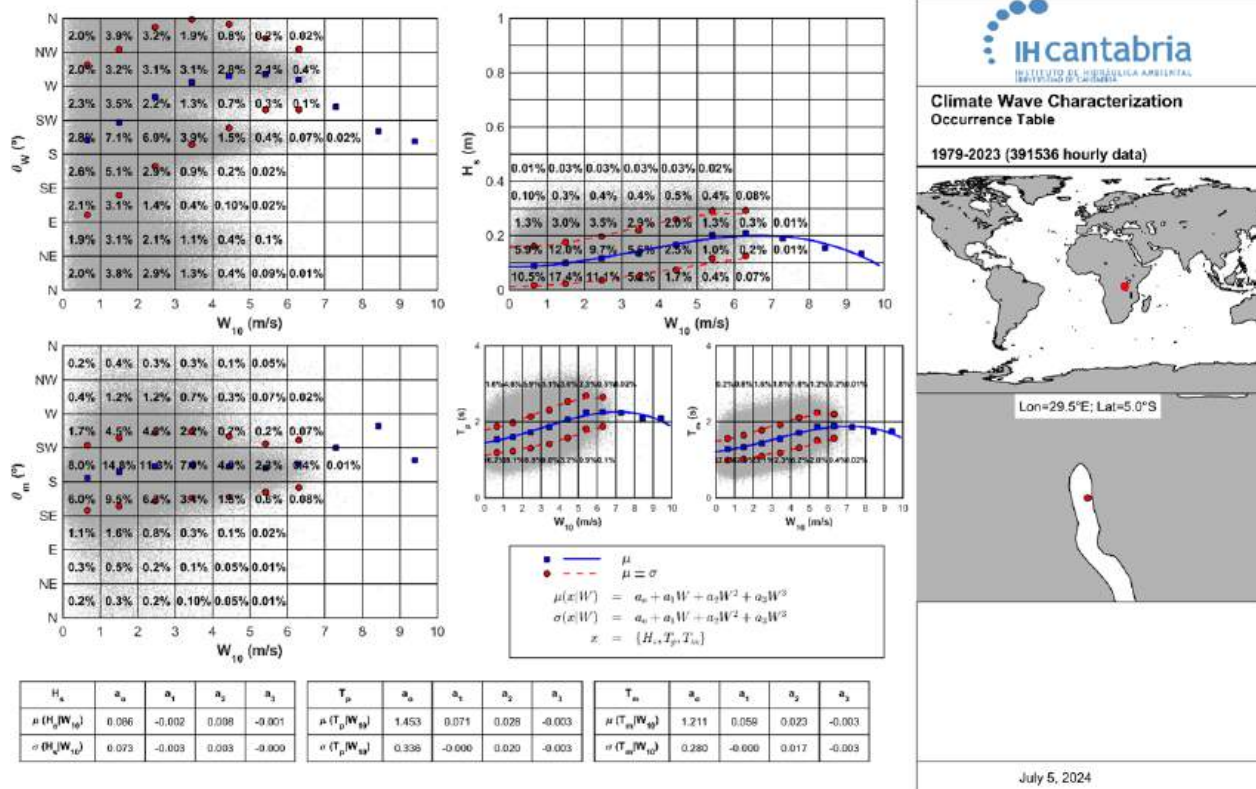


Figura A.4: Tabla de ocurrencia nodo 16

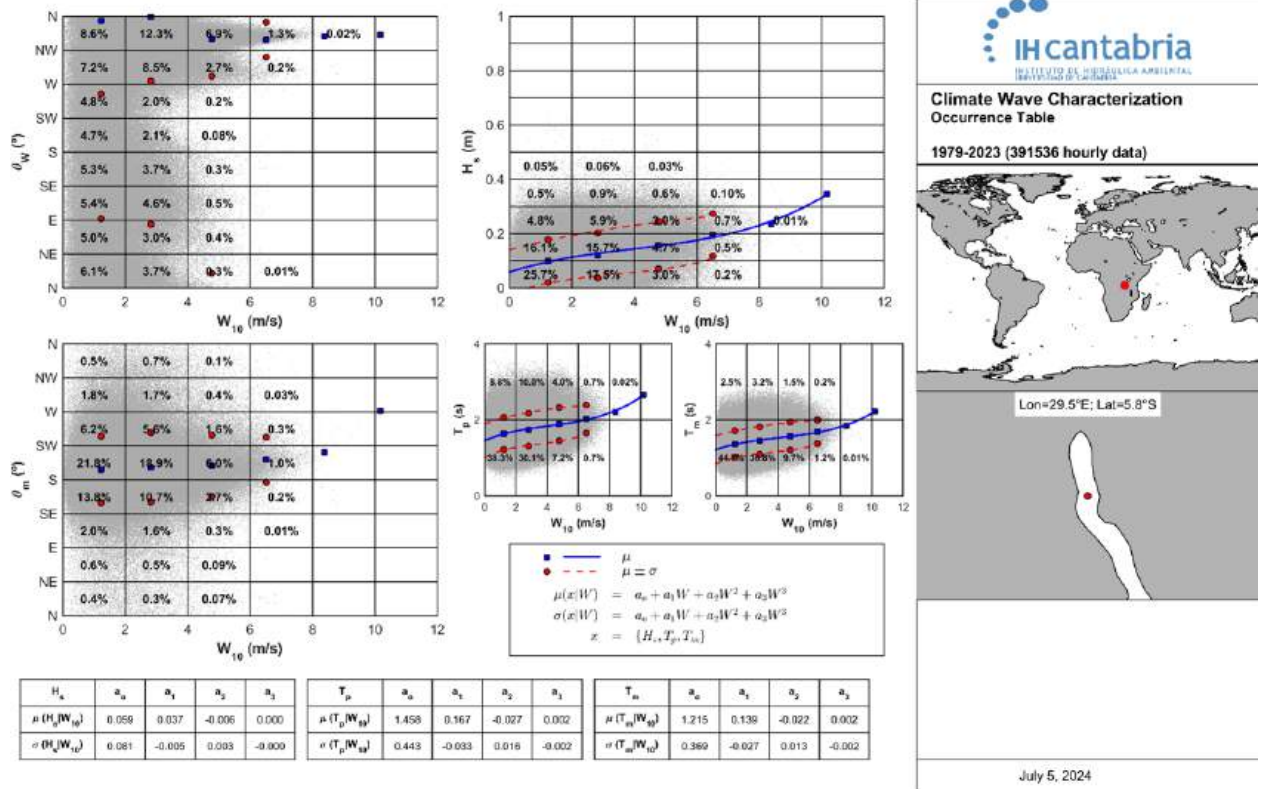


Figura A.5: Tabla de ocurrencia nodo 20

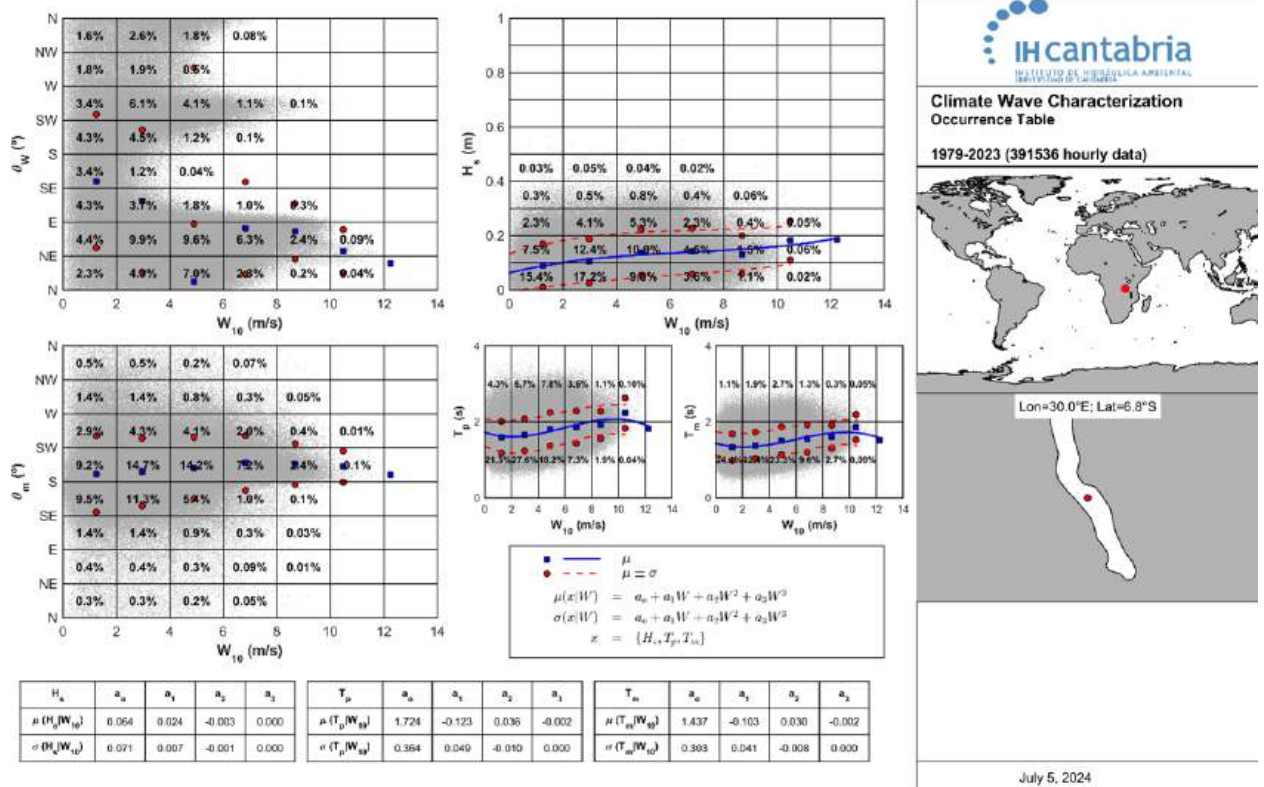


Figura A.6: Tabla de ocurrencia nodo 28

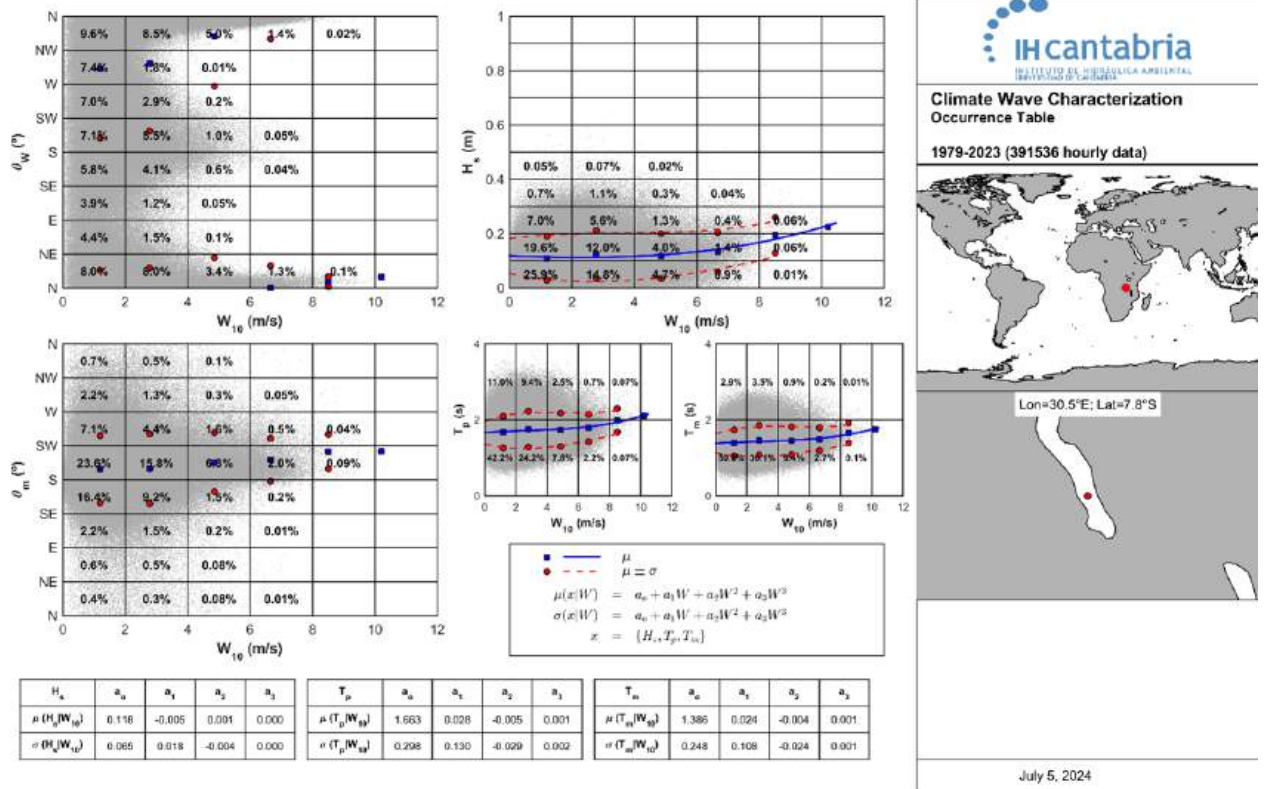


Figura A.7: Tabla de ocurrencia nodo 35

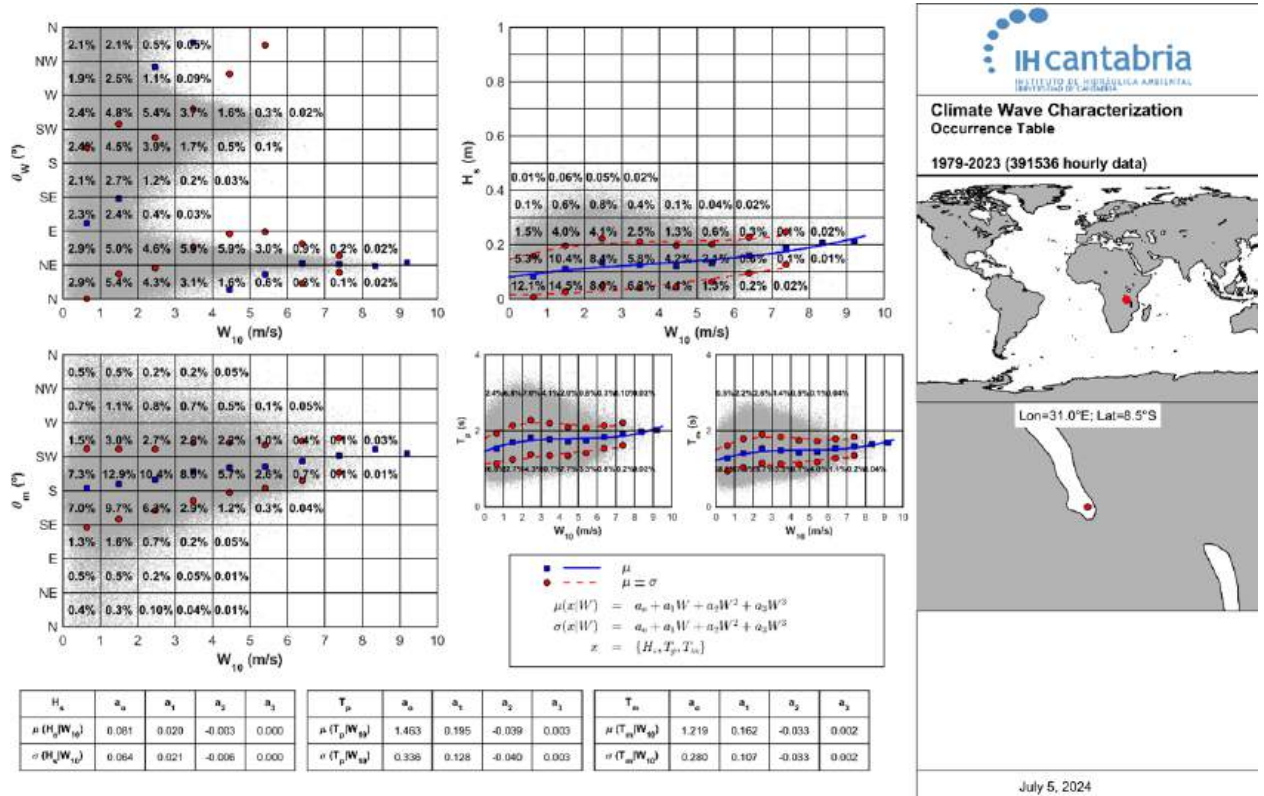


Figura A.8: Tabla de ocurrencia nodo 44

A.0.2. Estacionalidad

En las figuras A.9 a A.15 se muestran las tablas de ocurrencia de los fenómenos estacionales, mientras que en las figuras A.16 a A.22 se muestran los gráficos de cajas de este fenómeno. El objetivo de este apartado es evaluar el efecto de la estacionalidad sobre el viento, y su relación con el oleaje en el punto de control. En todos los nodos, excepto en el nodo 44, no existe una estacionalidad claramente definida, perteneciendo a un clima ecuatorial. Sin embargo, en el nodo 44, existe una estacionalidad en la que el viento muestra un aumento en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, que corresponden al invierno en el hemisferio sur. En el nodo 6, se observa que en enero y febrero el viento toma una dirección E-NE, mientras que para el resto de los meses toma una dirección O-NO. En el nodo 10, todos los vientos toman direcciones O, NO; en el nodo 16, O-NO; mientras que del 20 al 44 hay mayor discrepancia en las direcciones, siendo el nodo 44 el que muestra mayor variabilidad. En todos los casos, la ola predominante procede del Sur en el punto de control, lo que corrobora que las discrepancias en los patrones de viento en puntos distantes del punto de control del lago no afectan a los patrones de ola en el mismo.

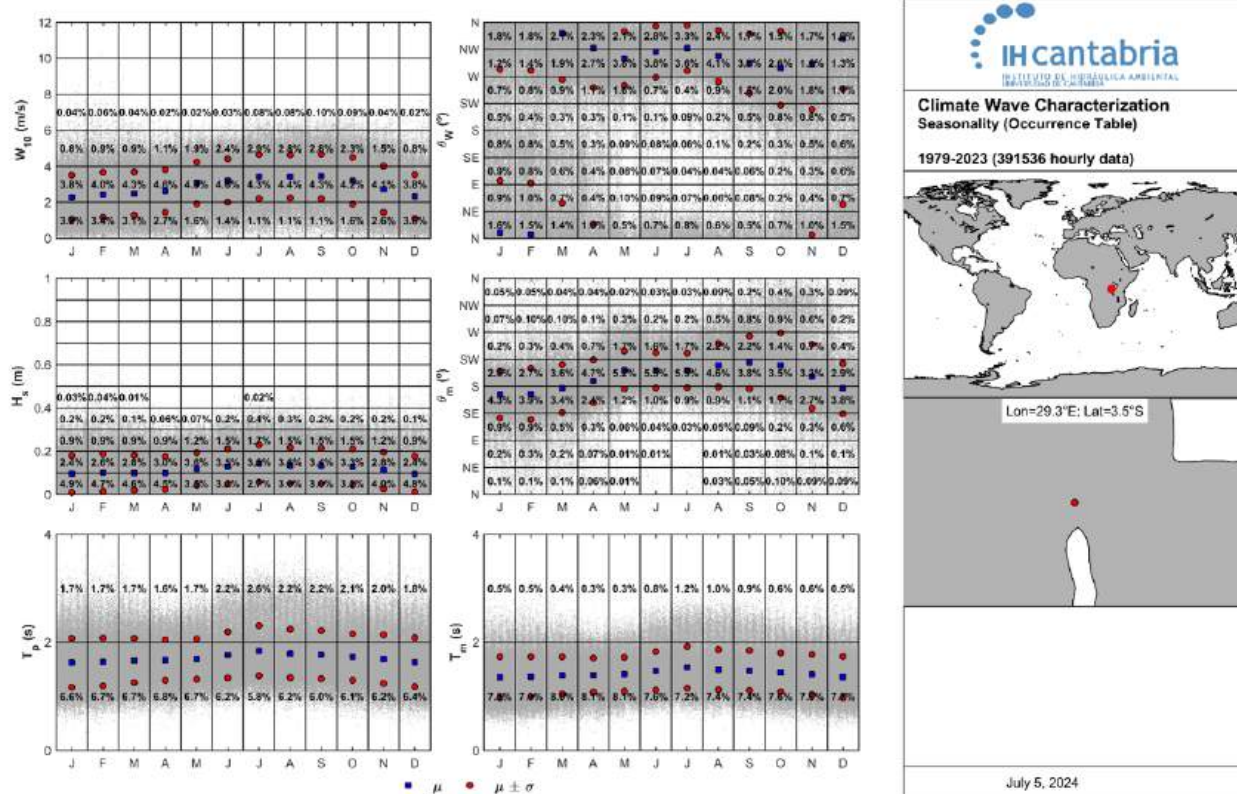


Figura A.9: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 6

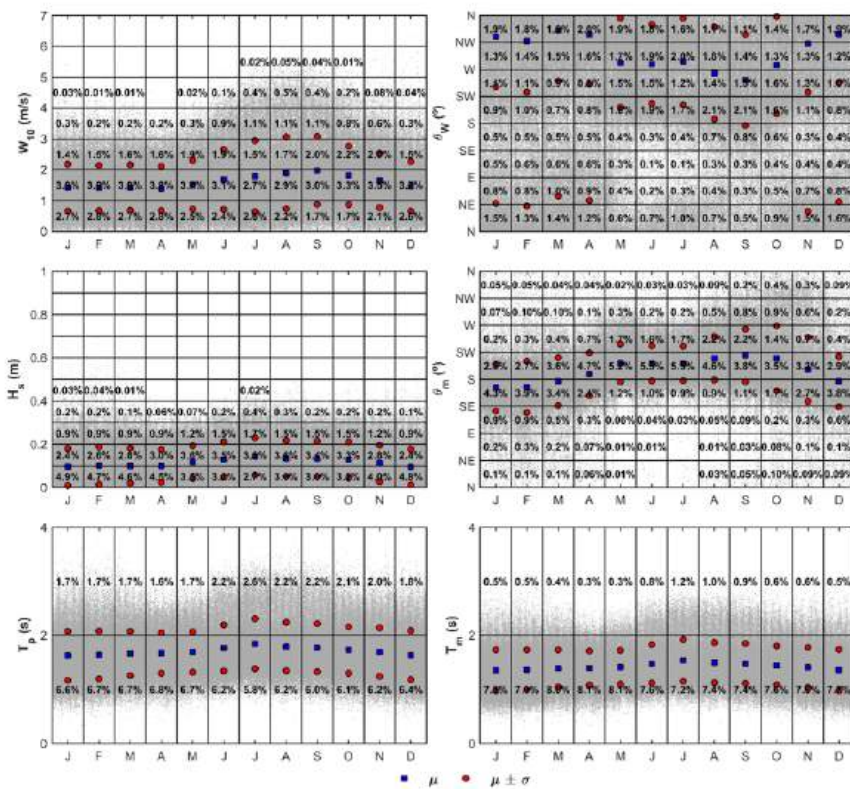


Figura A.10: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 10

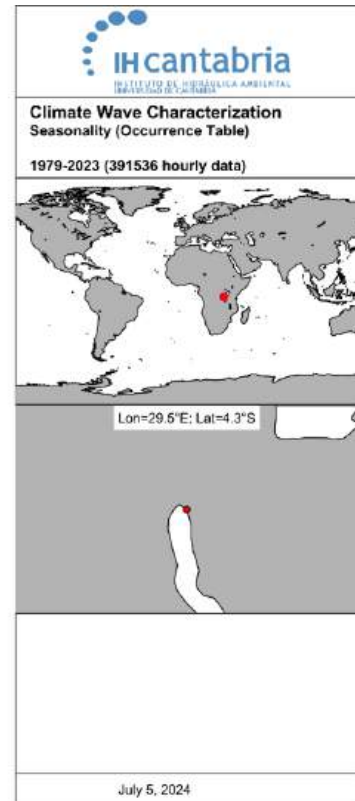


Figura A.11: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 16

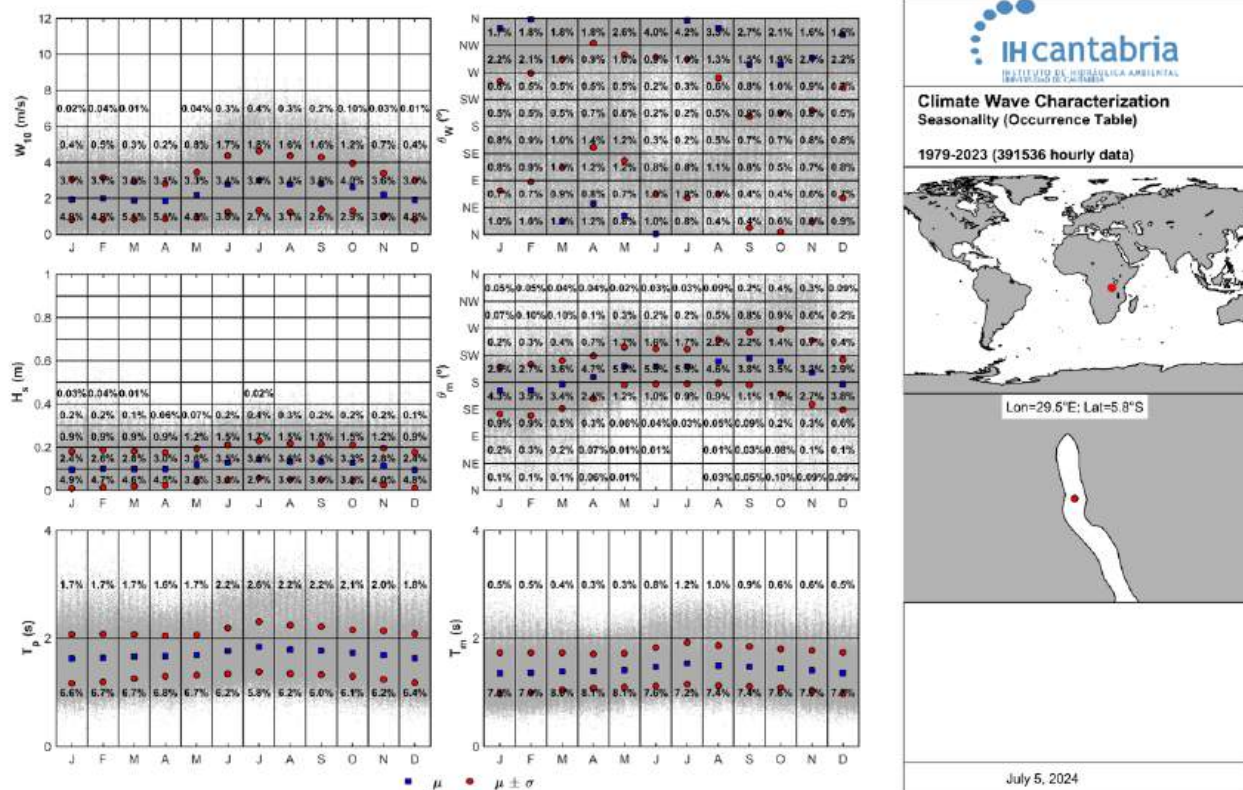


Figura A.12: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 20

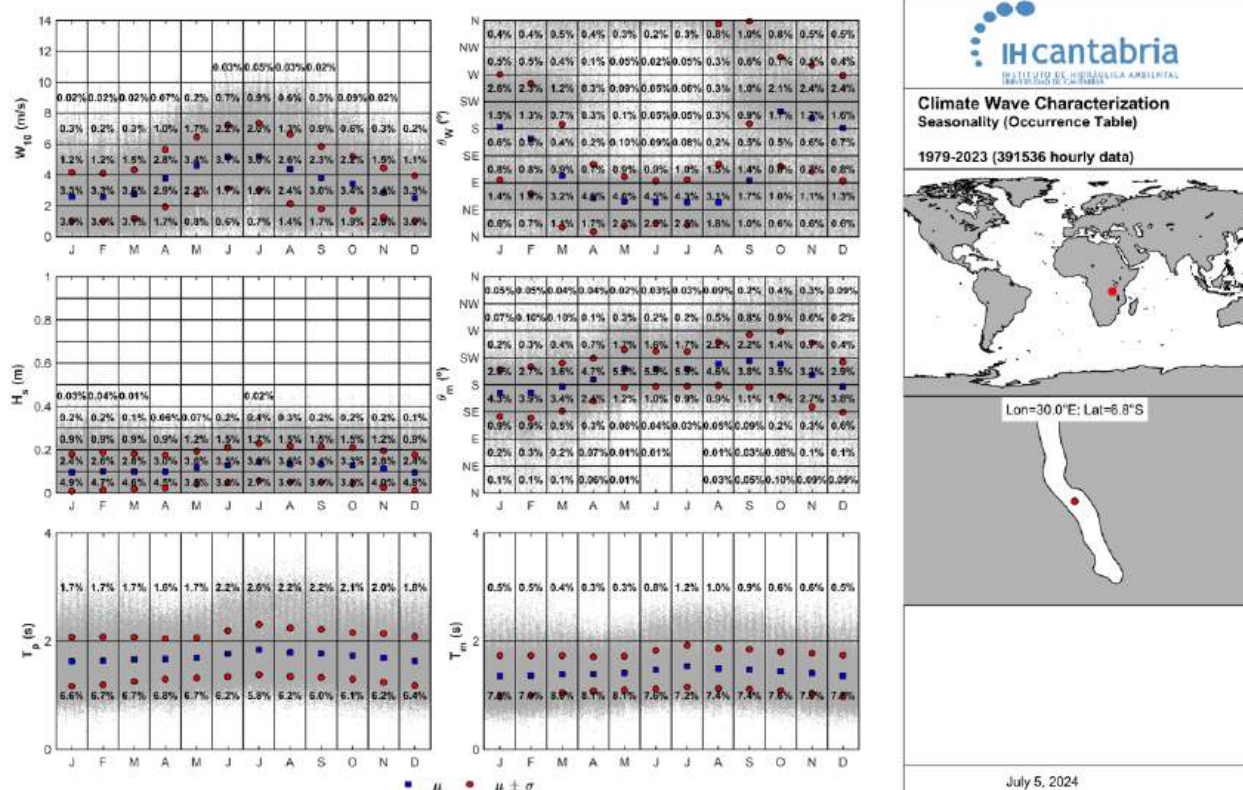


Figura A.13: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 28

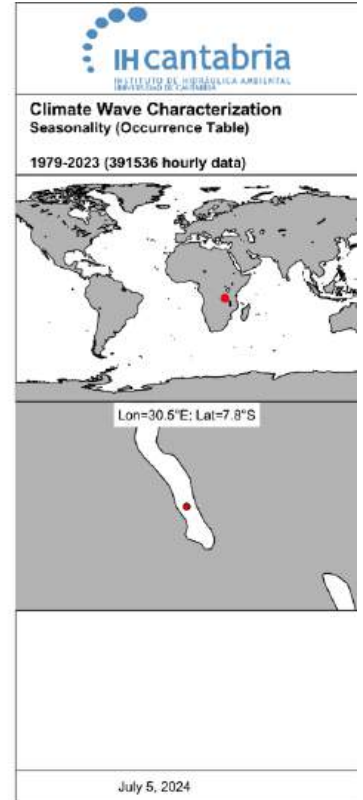
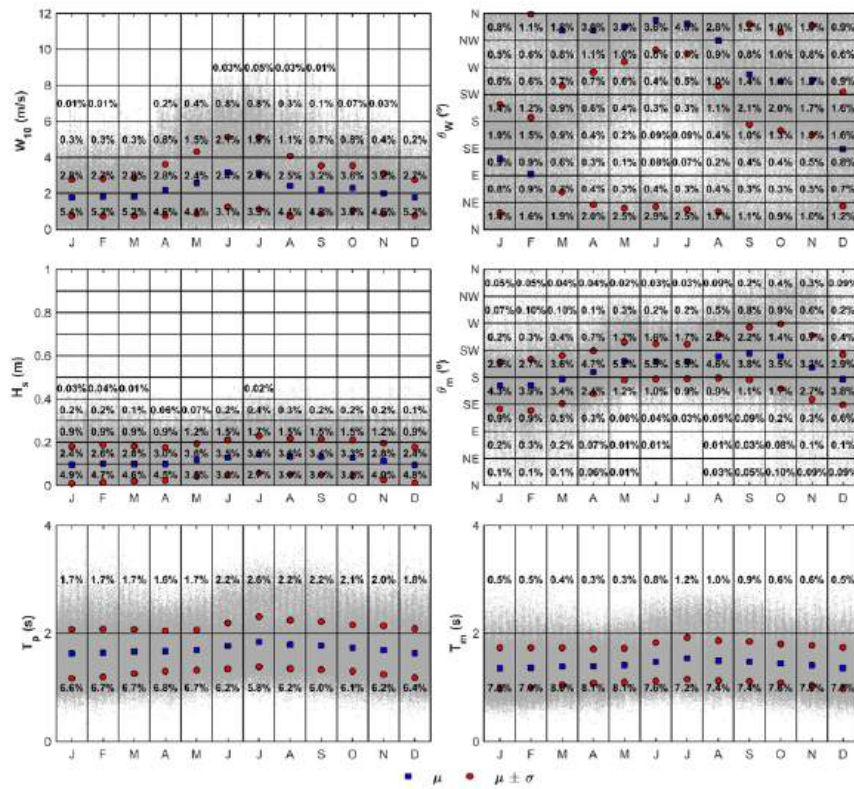


Figura A.14: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 35

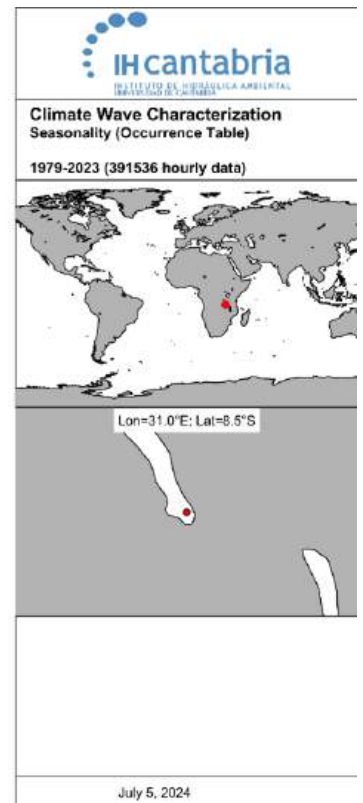
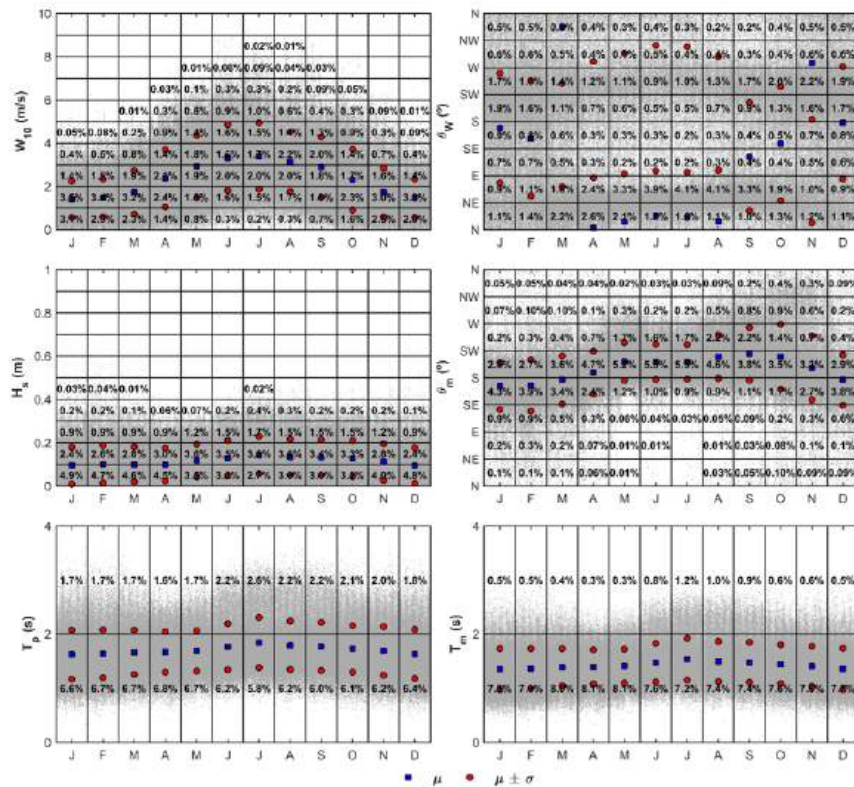


Figura A.15: Estacionalidad (Tabla de ocurrencia) nodo 44

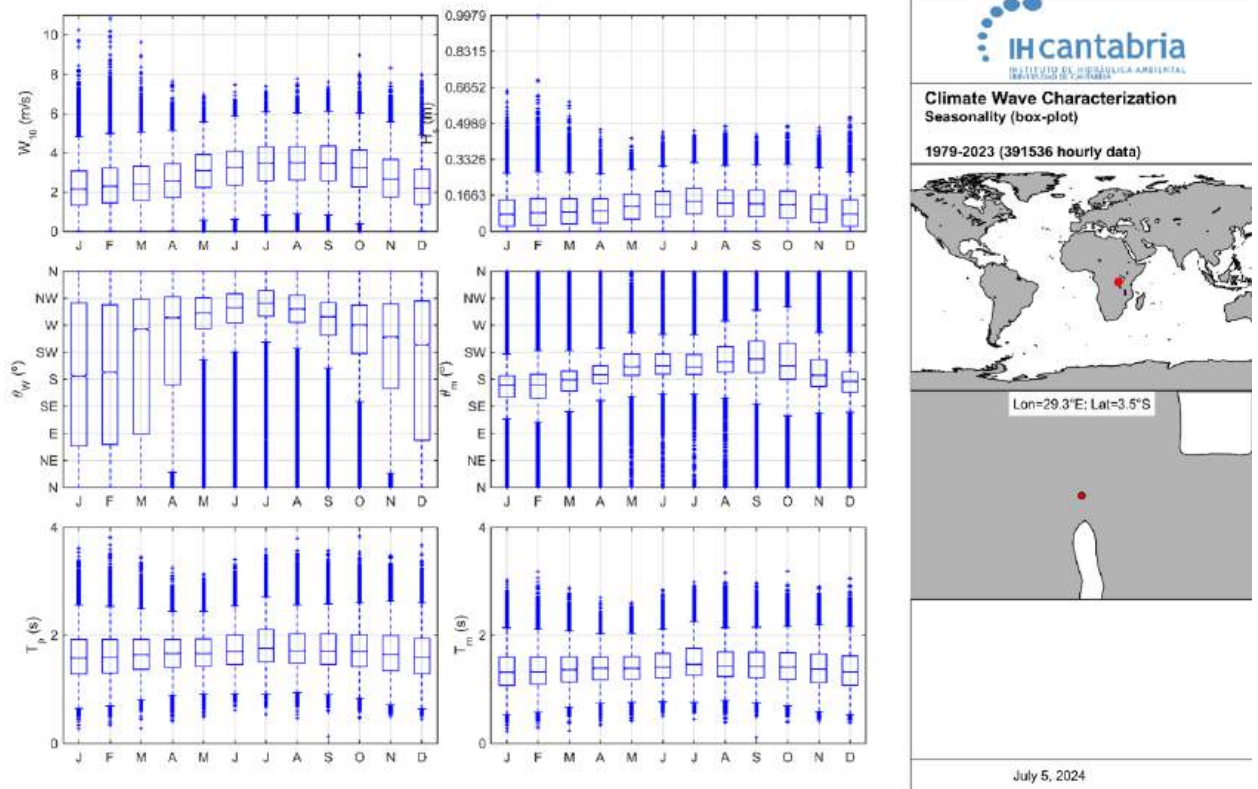


Figura A.16: Estacionalidad (Box plot) nodo 6

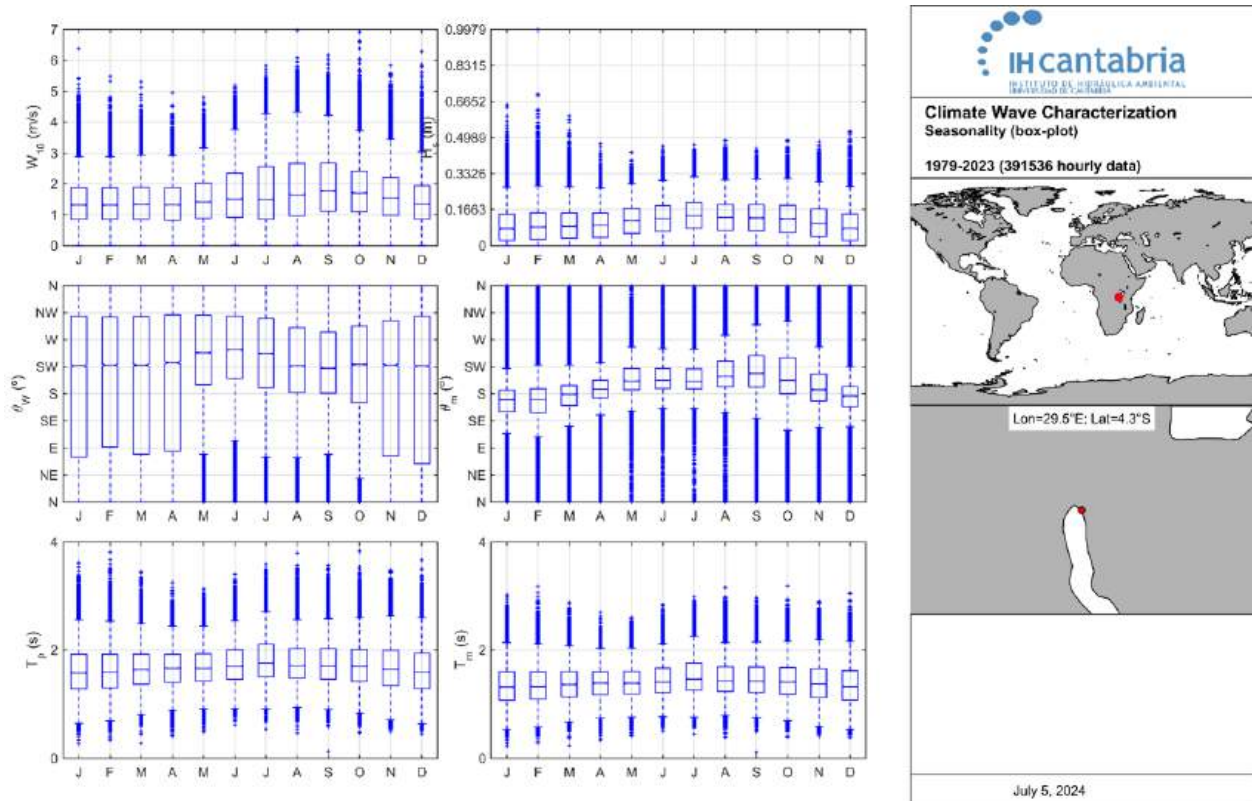


Figura A.17: Estacionalidad (Box plot) nodo 10

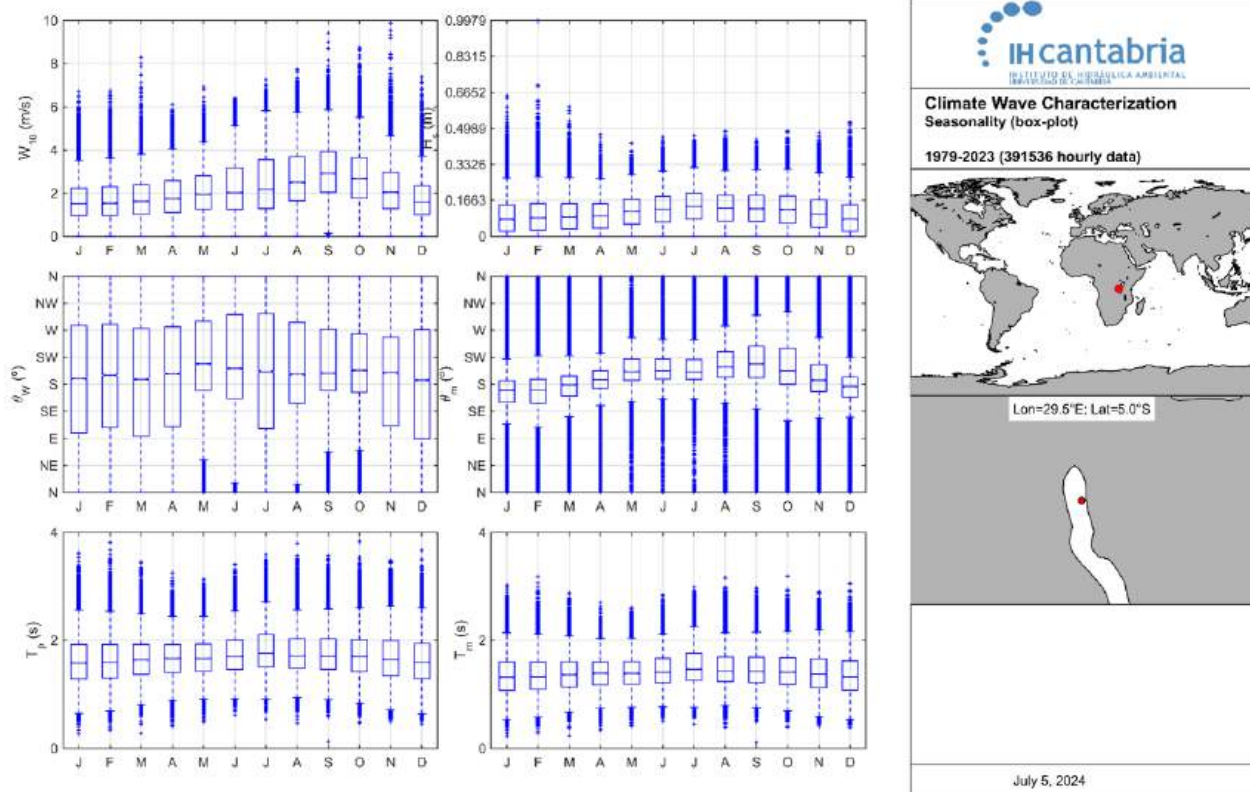


Figura A.18: Estacionalidad (Box plot) nodo 16

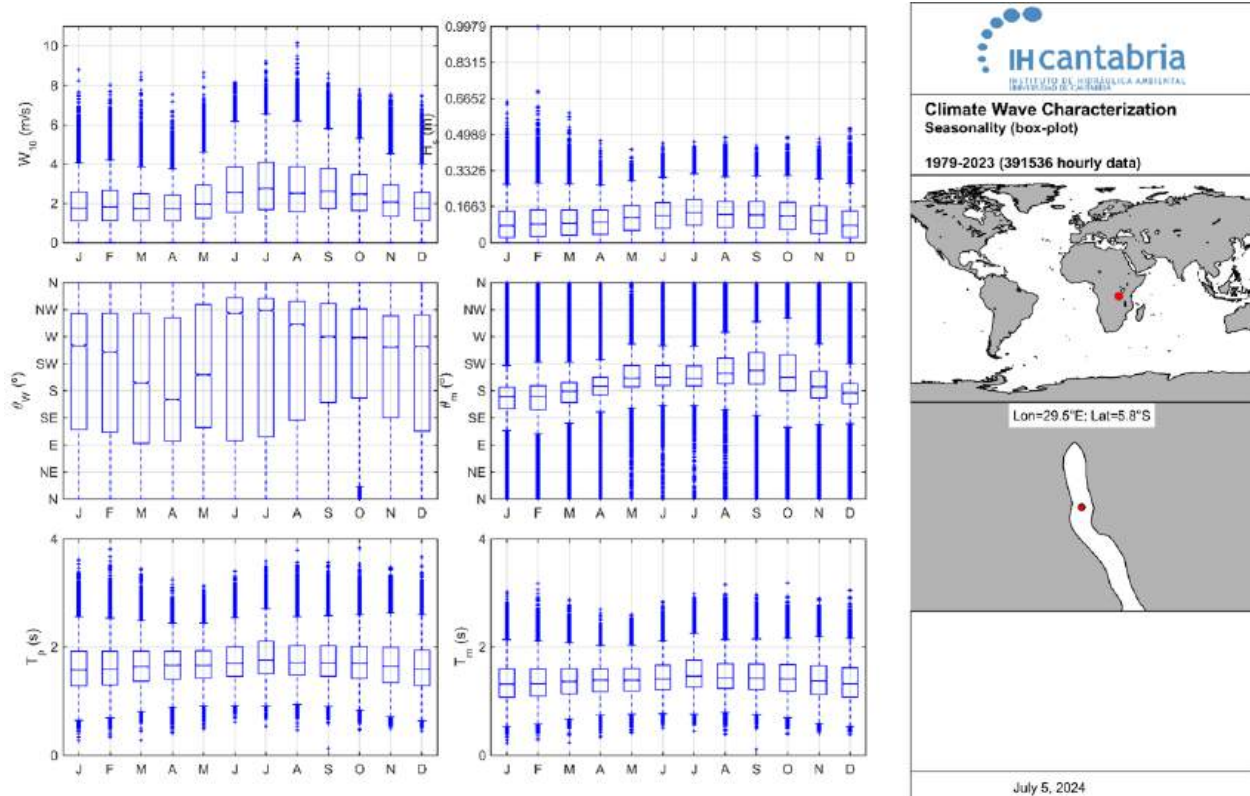


Figura A.19: Estacionalidad (Box plot) nodo 20

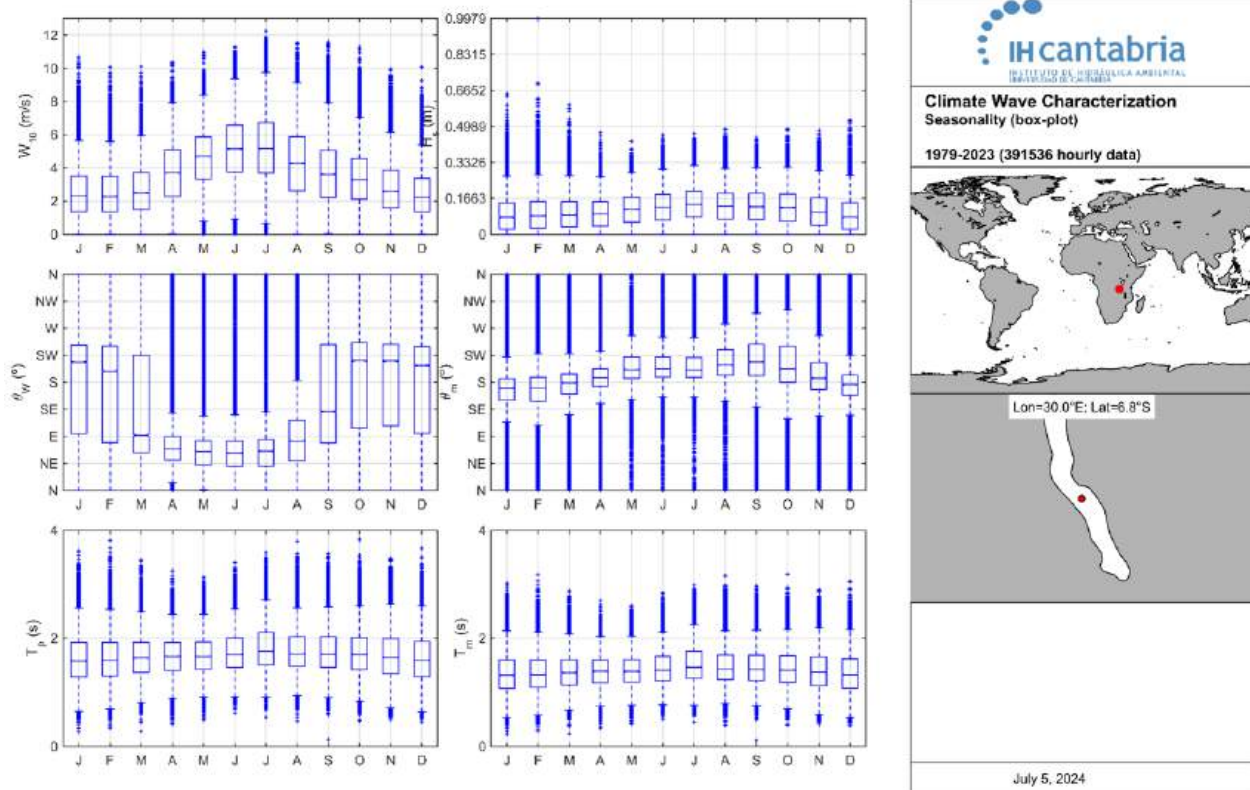


Figura A.20: Estacionalidad (Box plot) nodo 28

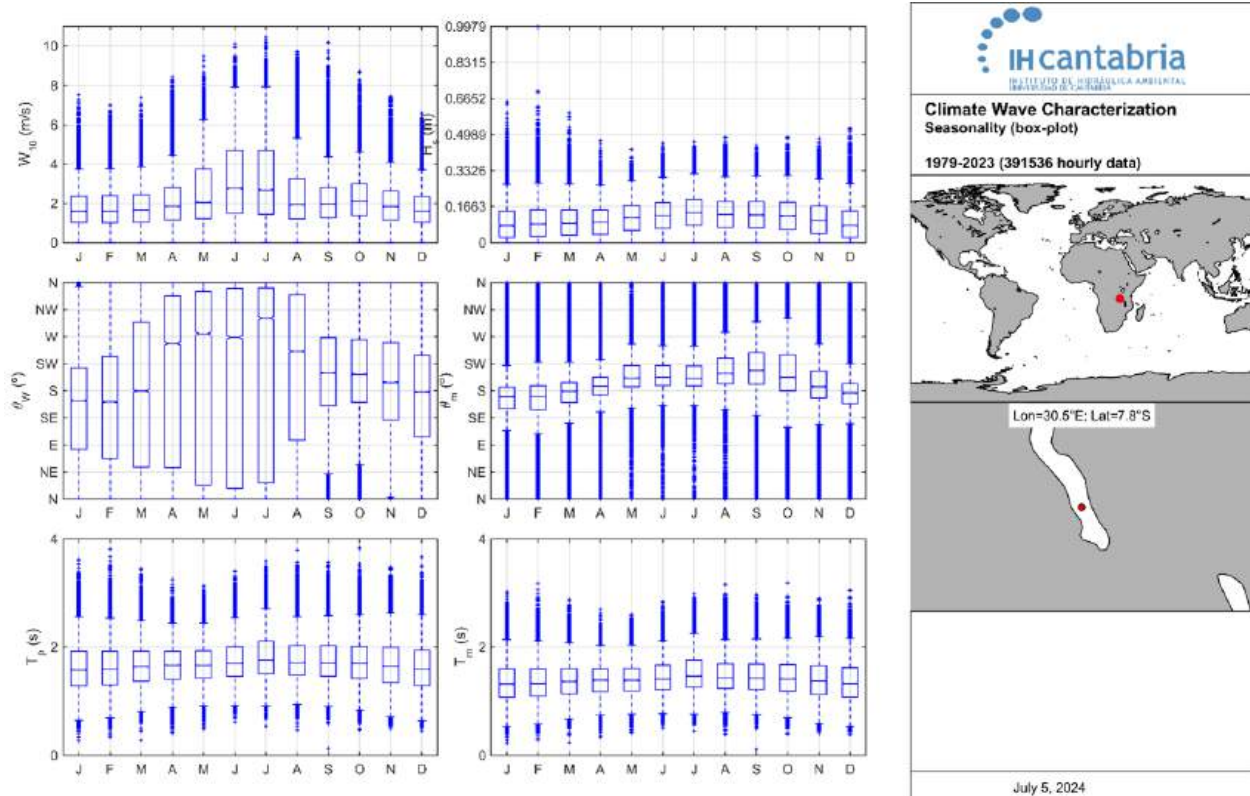


Figura A.21: Estacionalidad (Box plot) nodo 35

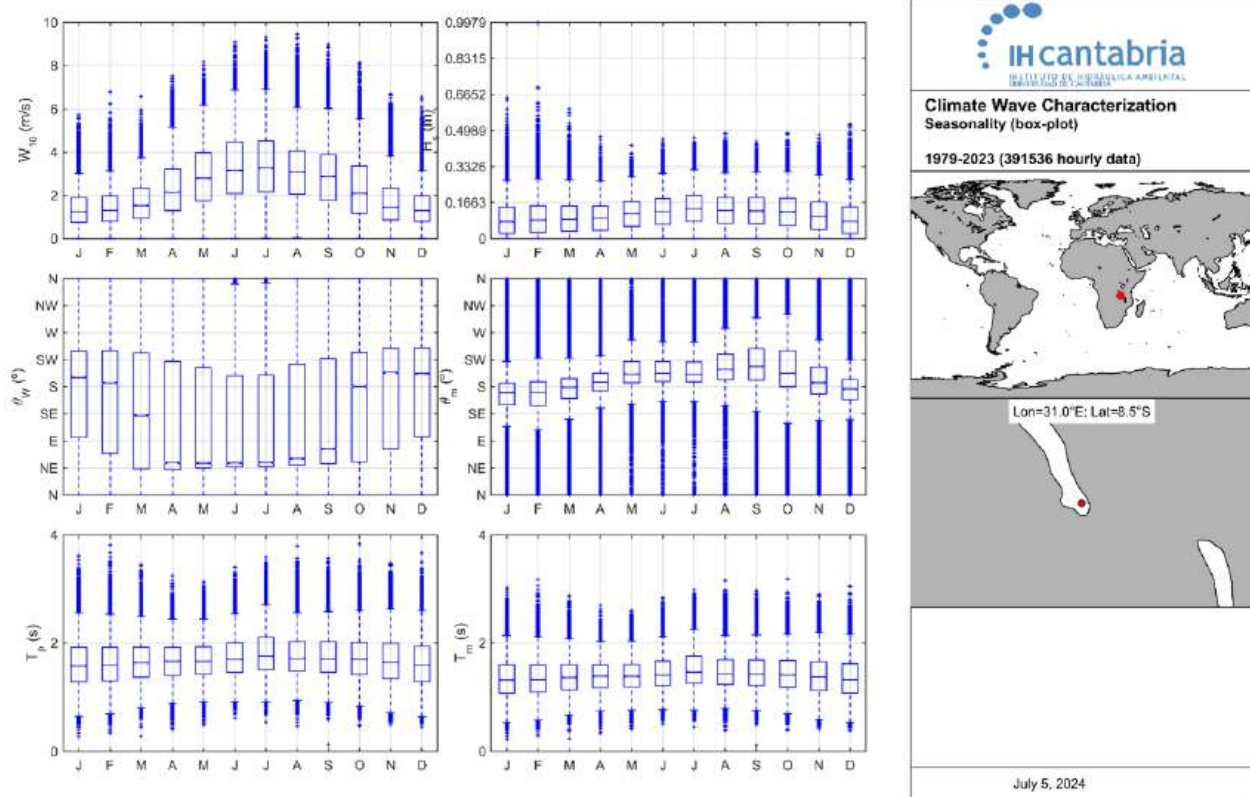


Figura A.22: Estacionalidad (Box plot) nodo 44

A.0.3. Rosas direccionales

A continuación se muestran las rosas direccionales para las variables de altura de ola en el punto de control y viento en cada uno de los puntos seleccionados anteriormente (ver Fig. A.1). En el nodo 6, se observa que la mayor parte del viento tiene dirección NO, con un pico en el NE. Del mismo modo (esto se aplica a todos los nodos de viento, por lo que se señala aquí), la mayoría de las olas provienen de la dirección S, con un pico en el NE. Esto podría estar relacionado, ya que los vientos en el nodo 6 (el más cercano a la zona de estudio) pueden estar generando estos picos en las olas, que provienen de la misma dirección que los picos de viento, mostrando una alta intensidad. En el nodo 10, las direcciones oscilan entre el NO y el SO, con picos en el NO, mientras que en el nodo 16, las direcciones provienen del SO; en el nodo 20, del NO; y en los nodos 28, 35 y 40, oscilan entre el NE y el N. Una vez más, se observa que no hay relación entre la dinámica en las zonas alejadas del lago y el punto de control.

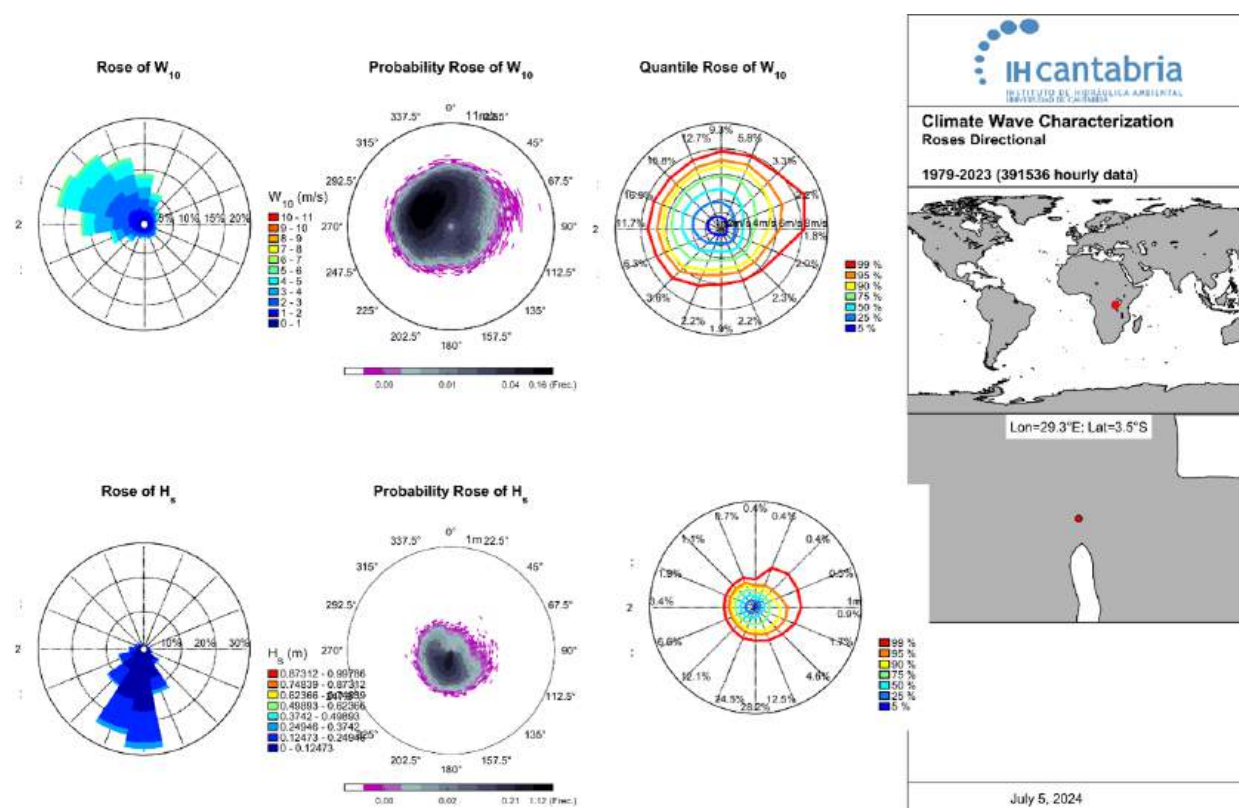


Figura A.23: Rosa direccional nodo 6

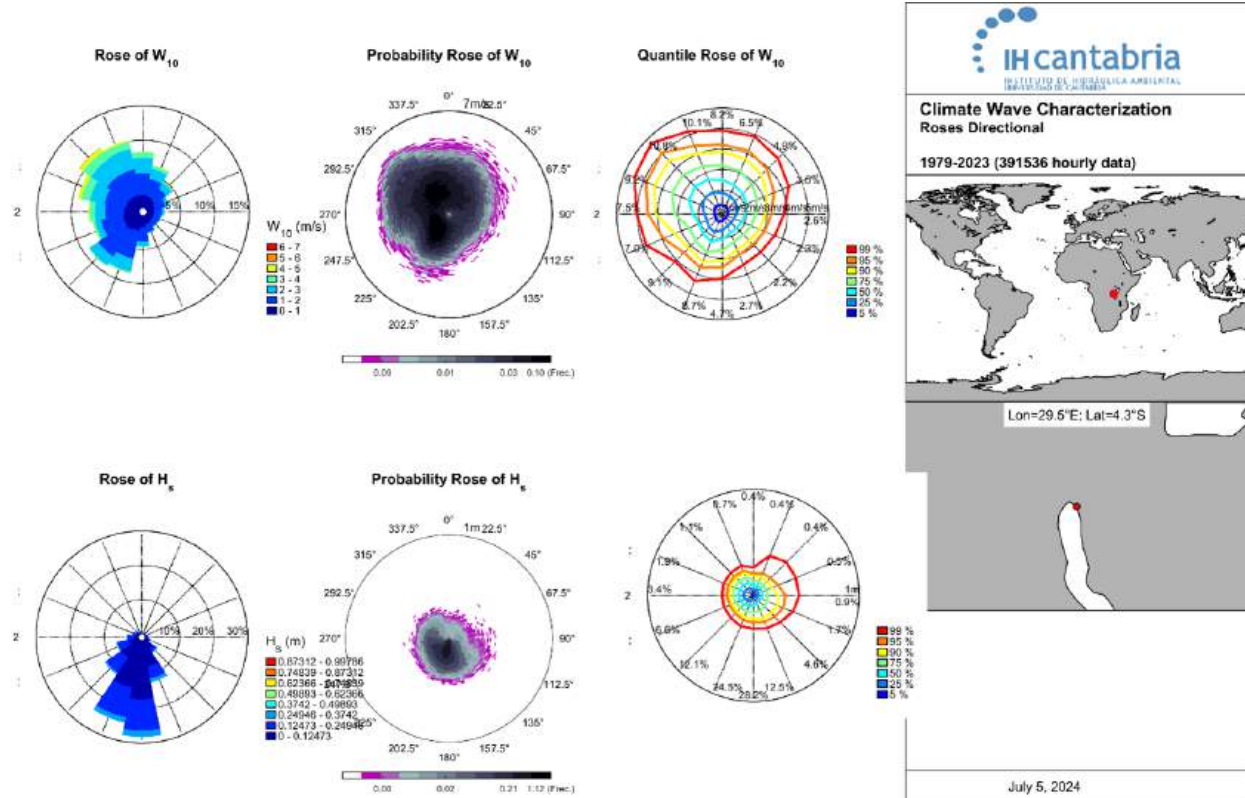


Figura A.24: Rosa direccional nodo 10

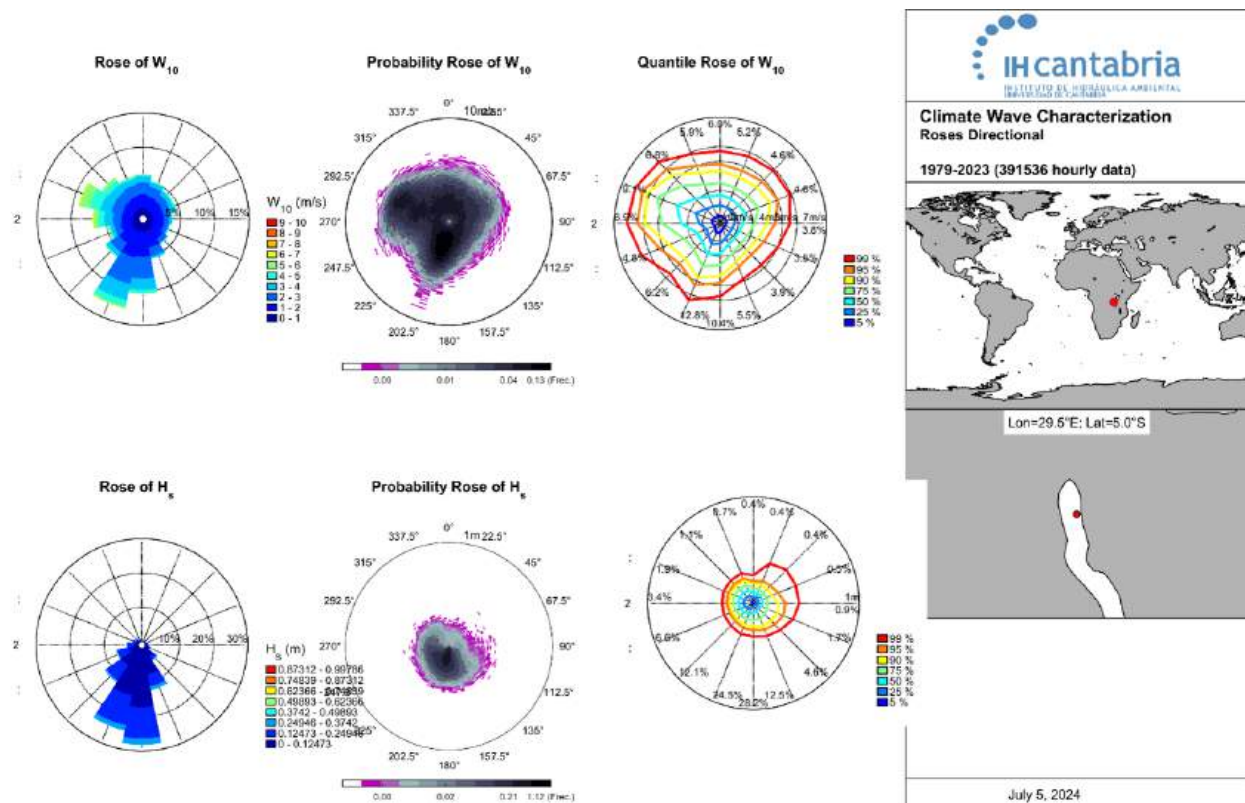


Figura A.25: Rosa direccional nodo 16

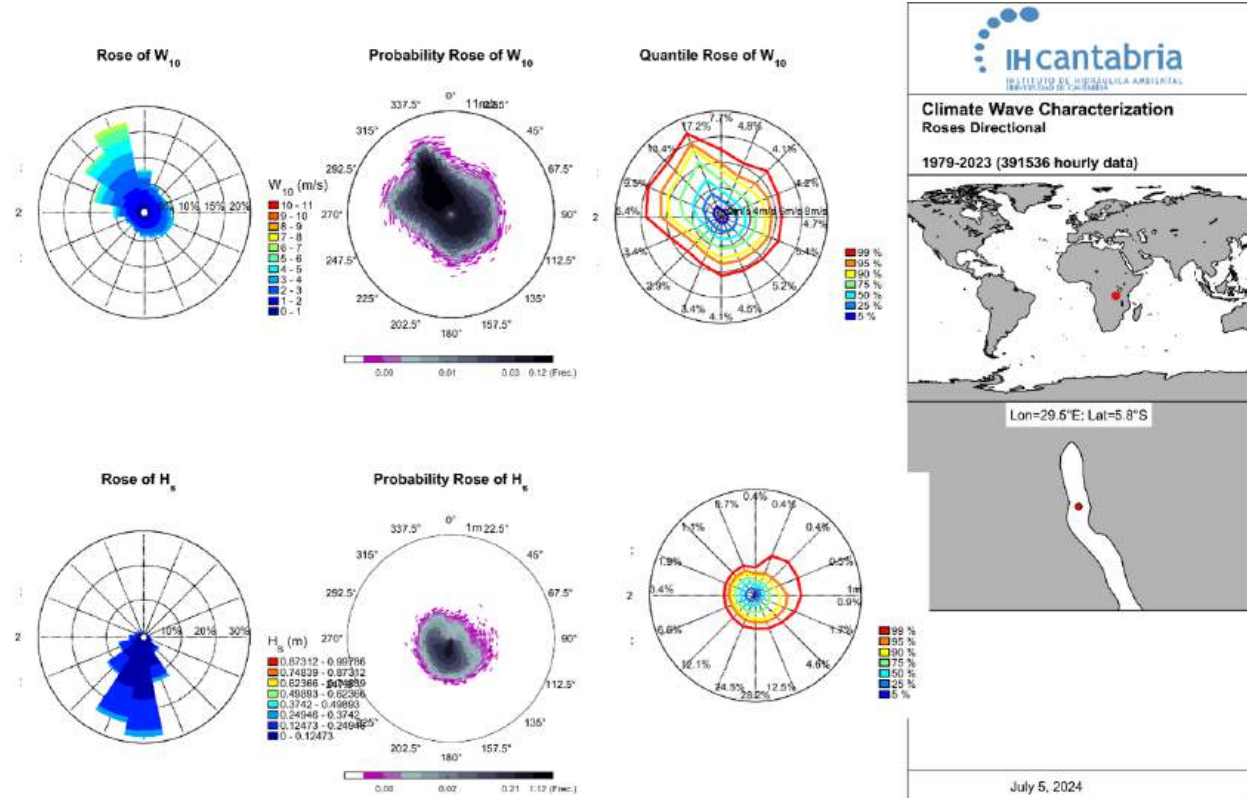


Figura A.26: Rosa direccional nodo 20

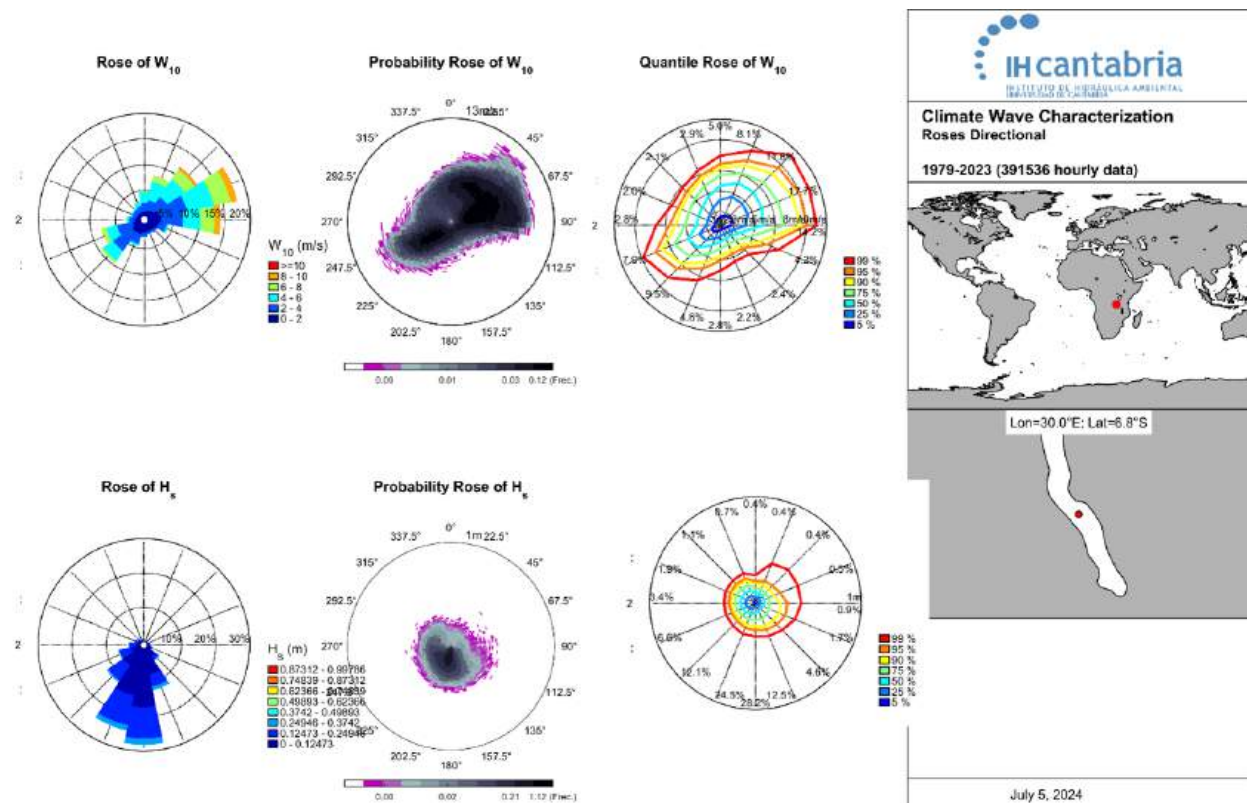


Figura A.27: Rosa direccional nodo 28

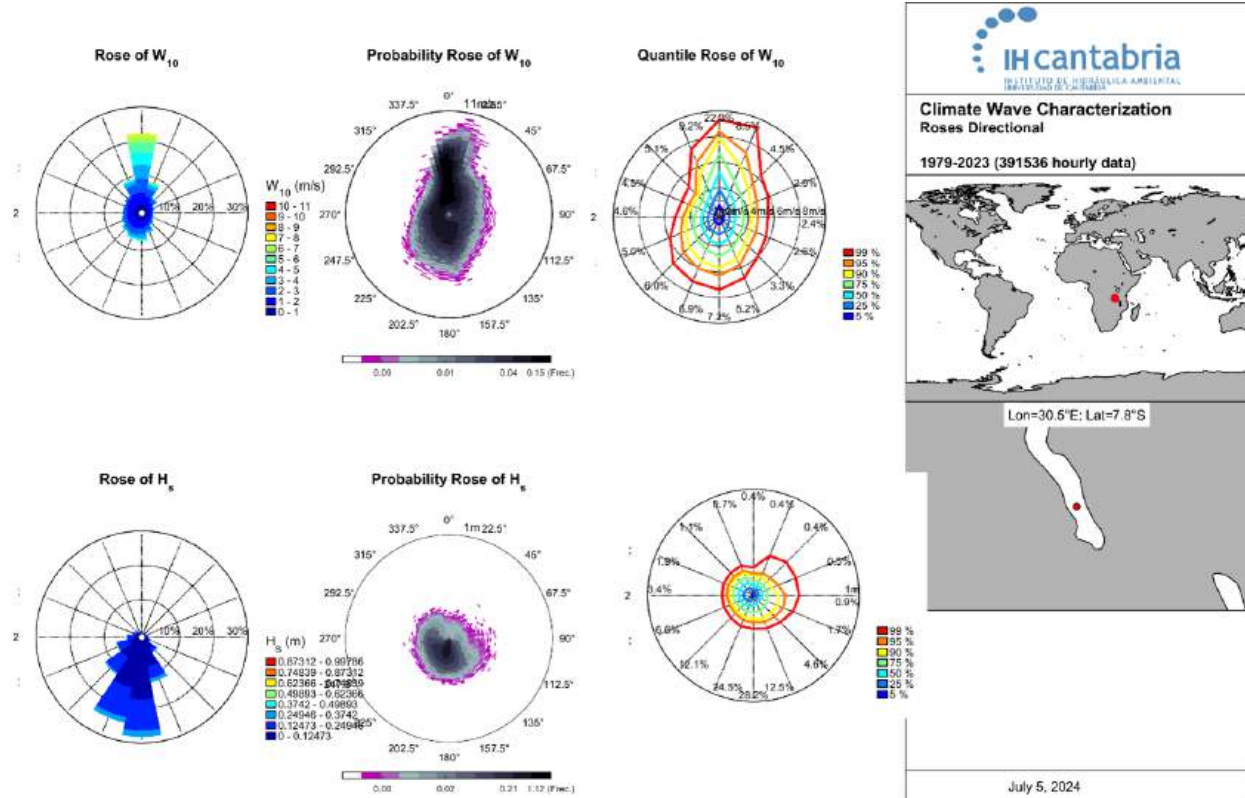


Figura A.28: Rosa direccional nodo 35

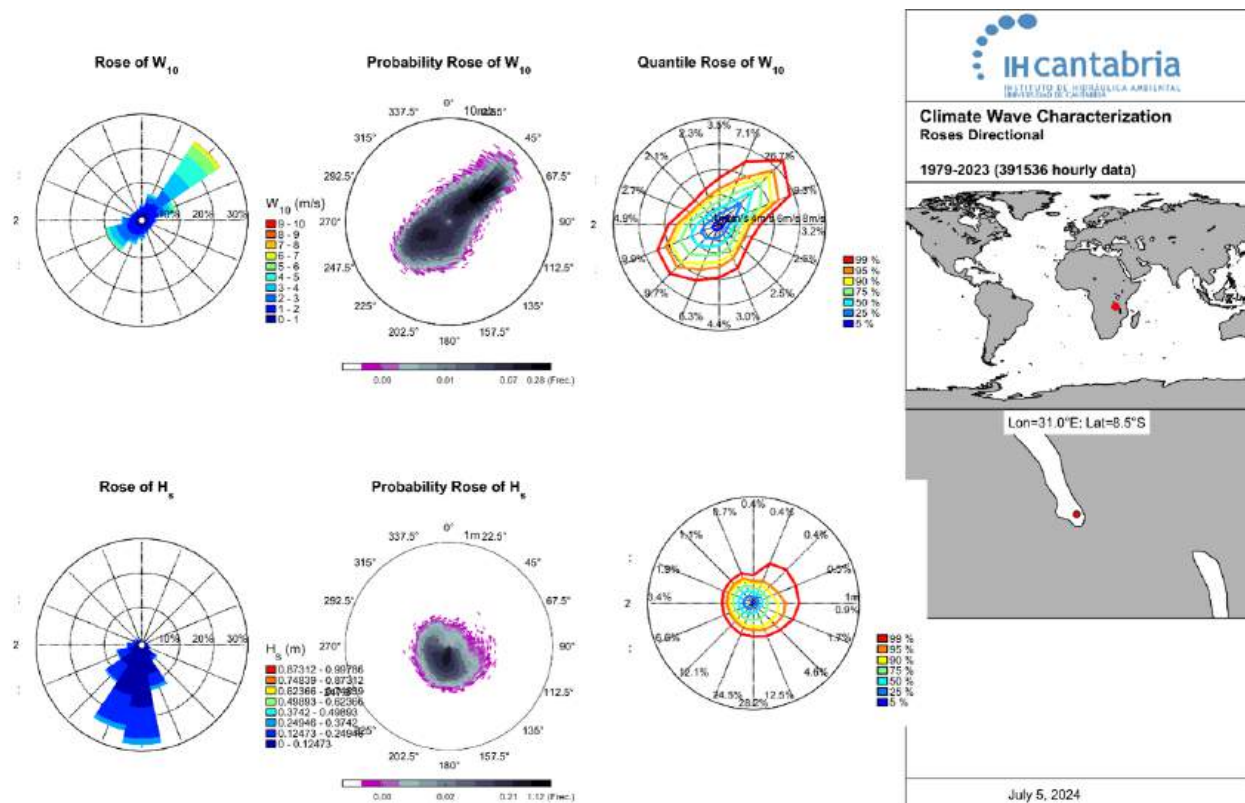


Figura A.29: Rosa direccional nodo 44

A.0.4. Análisis persistencias estacional y direccional

En el párrafo siguiente, en las figuras del A.30 al A.36 se muestran los resultados del análisis de persistencia estacional, mientras que en las figuras del A.37 al A.43 se muestran los resultados del análisis de persistencia direccional. En el nodo 6 la velocidad del viento más probable tiene un valor de aproximadamente 3 m/s con más de 600 eventos al año, mientras que en el nodo 10 el viento más probable es de 1,2 m/s con 800 eventos al año, los resultados en el nodo 16 son muy similares. En el nodo 20 la velocidad del viento más probable es un poco superior a la de los nodos 10 y 16, con 2 m/s y también 800 eventos al año. Por otro lado, el nodo 28 presenta la misma velocidad de viento pero menos veces al año. Los nodos 35 y 44 aumentan de nuevo el número de eventos por año con la velocidad del viento más probable por encima de 2 m/s de nuevo. En cuanto a la duración de los eventos, la línea negra inclinada representa el 50 % del tiempo y es muy similar para todos los nodos, sin embargo la línea roja oscura representa el 99 % de no superación (1 % del tiempo). Es visible que los nodos 6 y 28 tuvieron los mayores eventos. En los gráficos debajo de los gráficos principales se aprecian las estaciones, de nuevo no es visible ninguna estacionalidad clara. Atendiendo ahora a las figuras de 53 a 59 se puede ver que el número de eventos y la duración de los mismos son similares en todos los nodos, siendo las direcciones E y O en el nodo 6 algo superiores en dirección y duración que las otras direcciones.

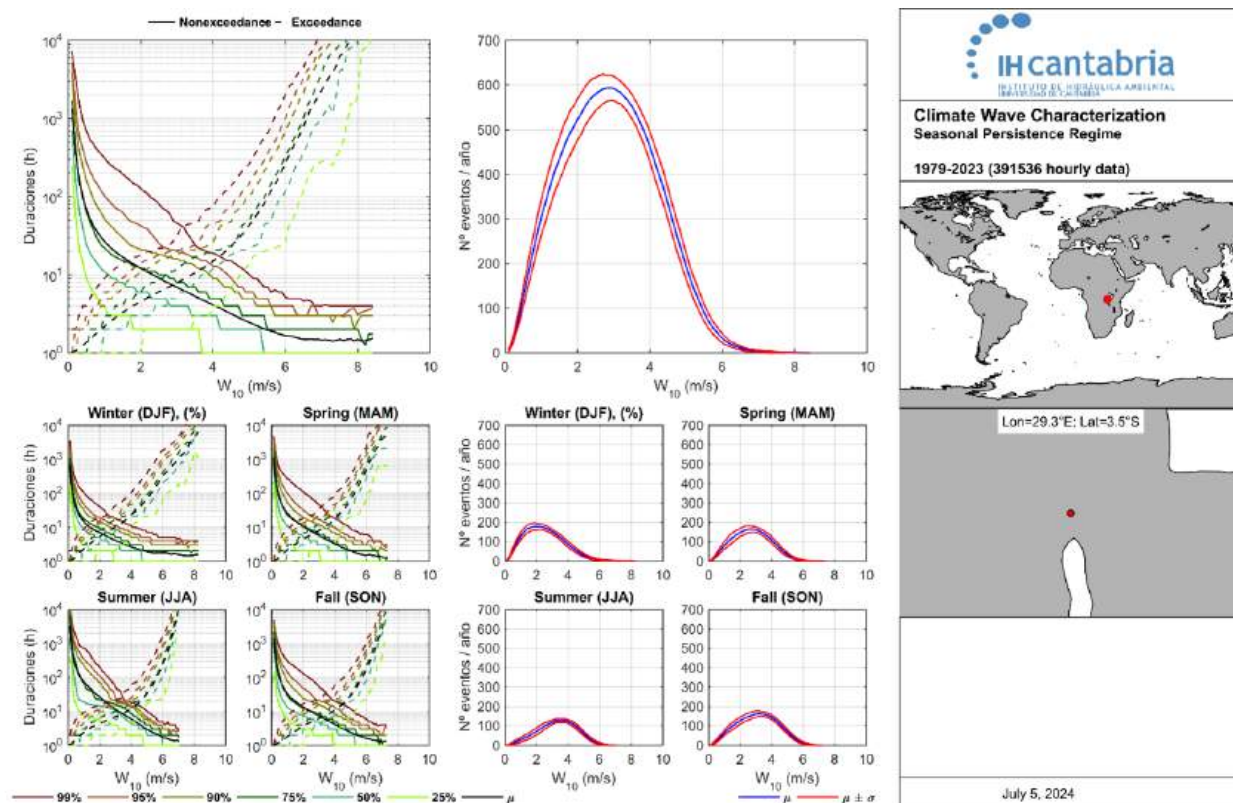


Figura A.30: Análisis persistencias estacional nodo 6

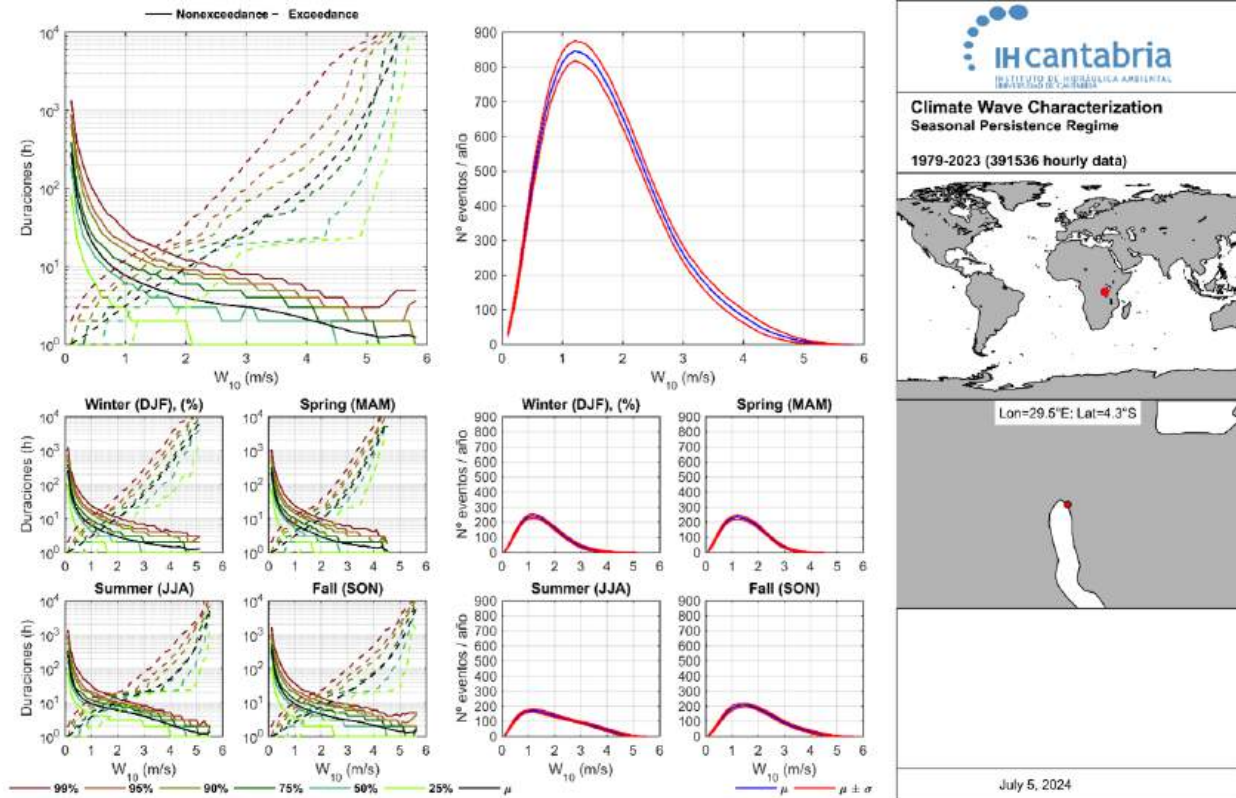


Figura A.31: Análisis persistencias estacional nodo 10

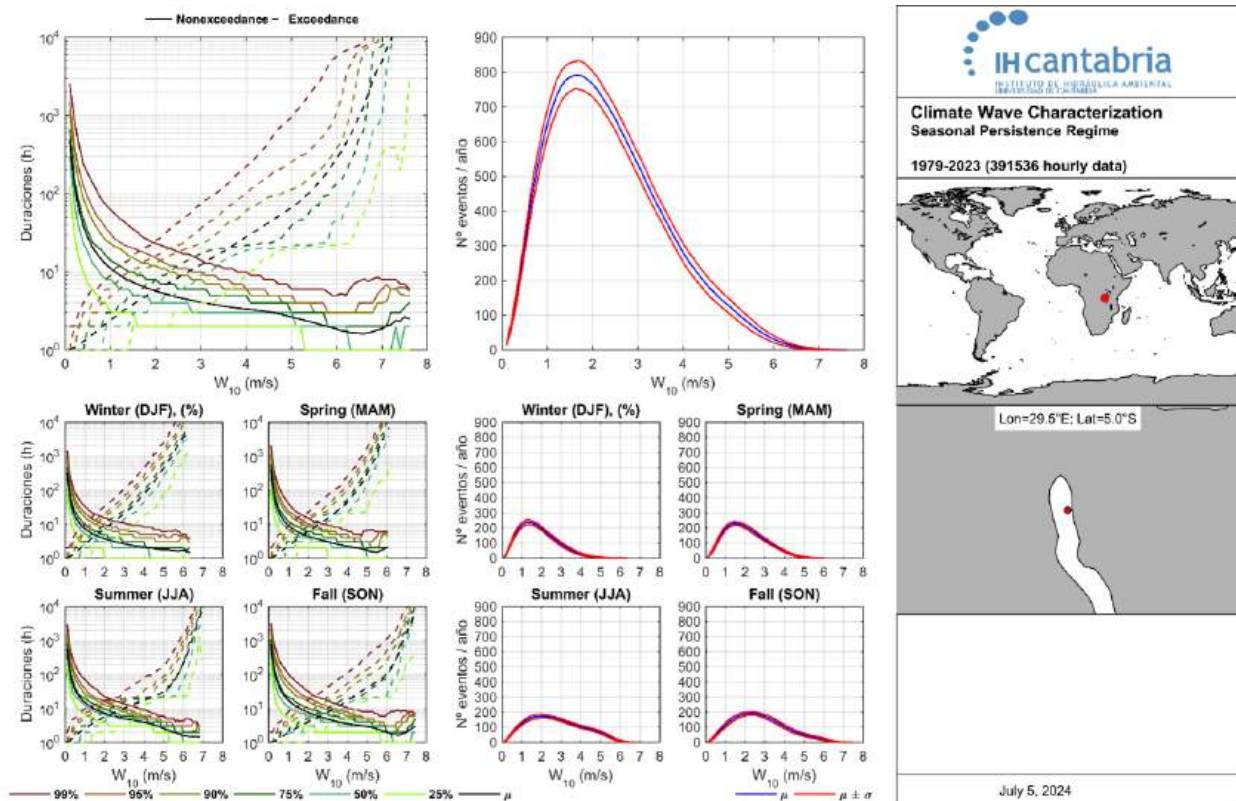


Figura A.32: Análisis persistencias estacional nodo 16

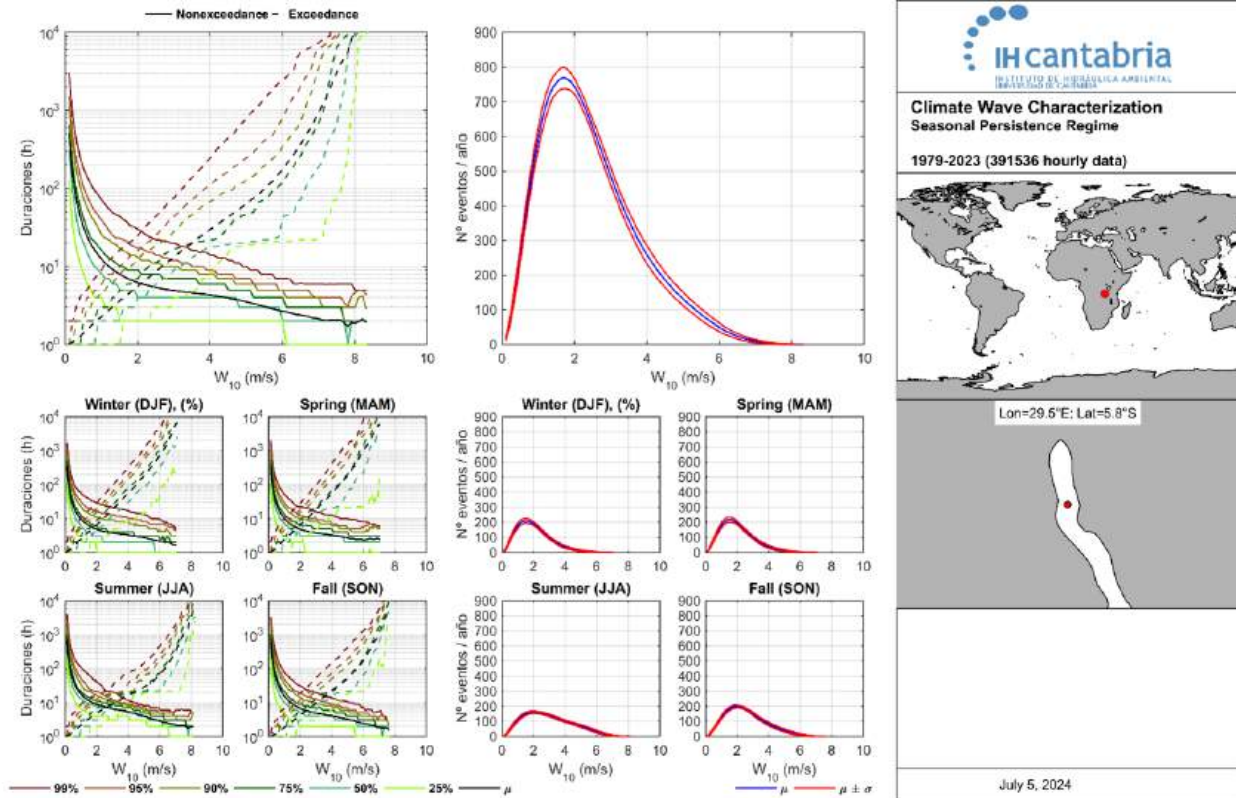


Figura A.33: Análisis persistencias estacional nodo 20

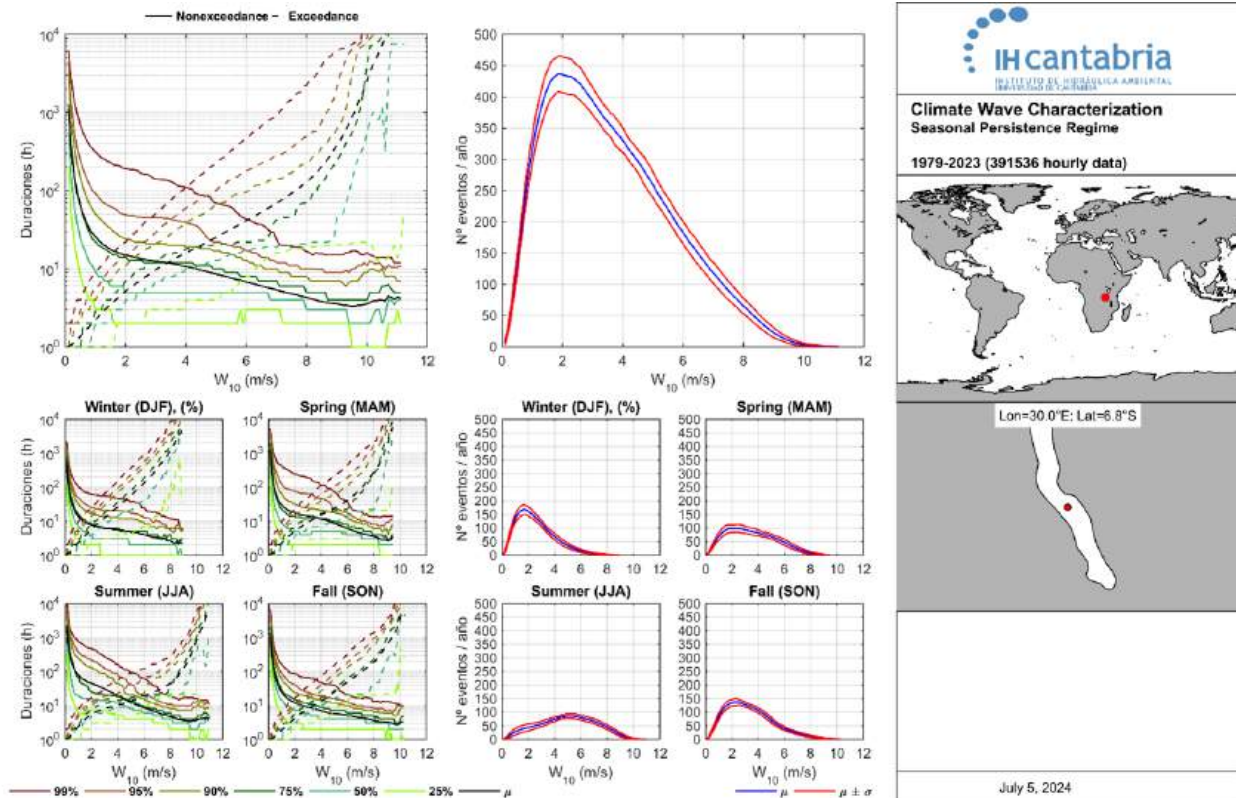


Figura A.34: Análisis persistencias estacional nodo 28

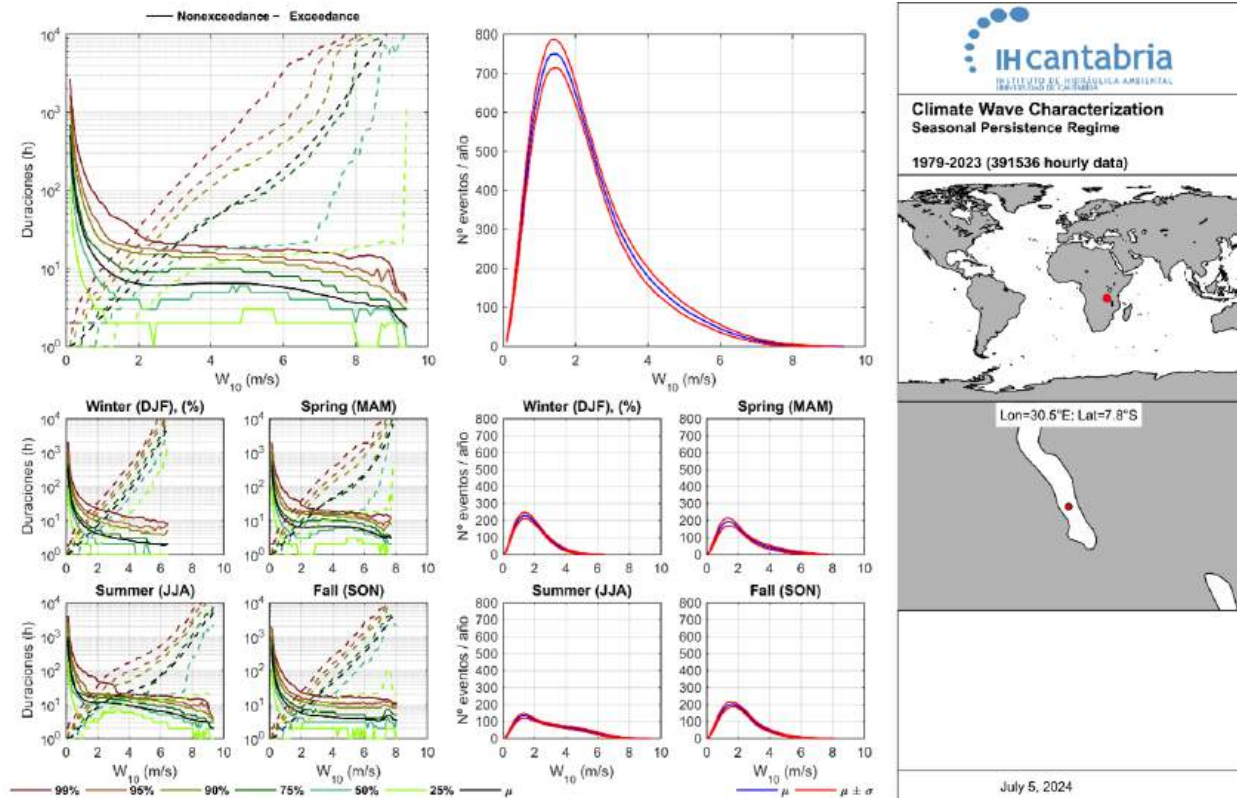


Figura A.35: Análisis persistencias estacional nodo 35

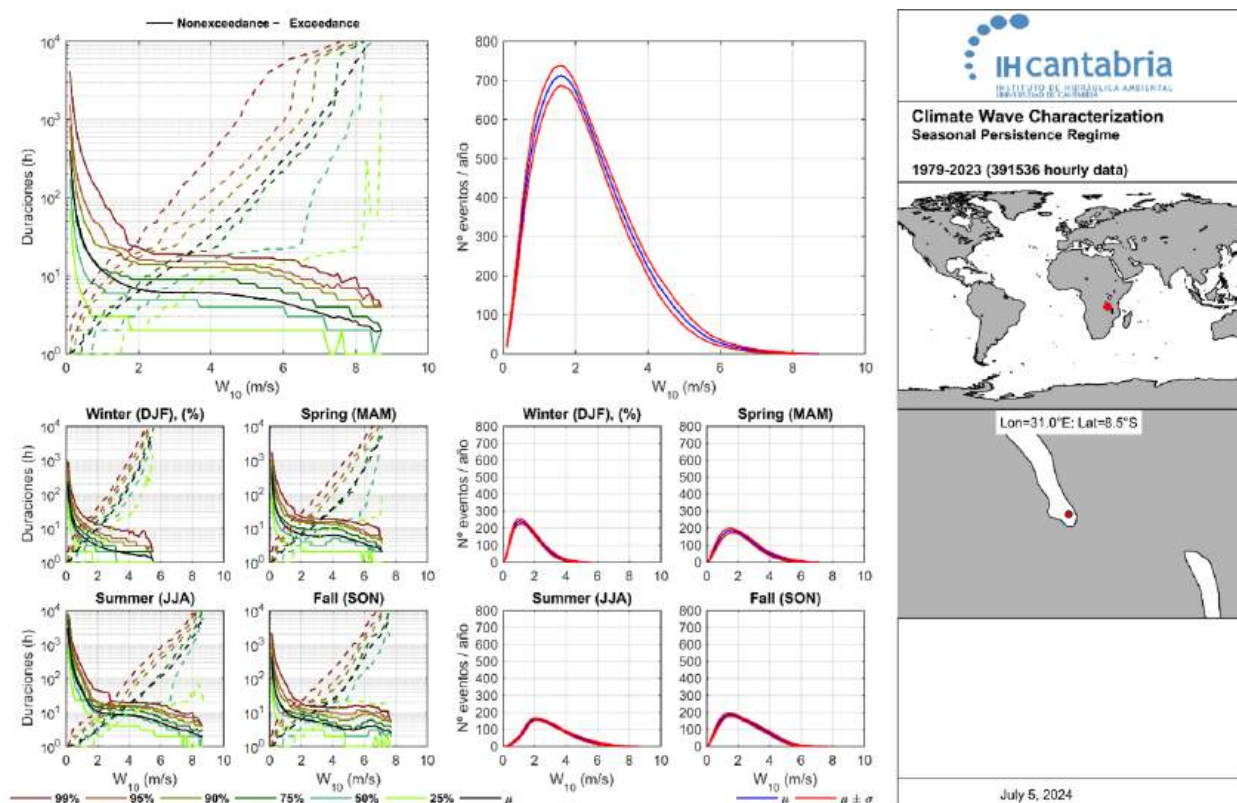


Figura A.36: Análisis persistencias estacional nodo 44

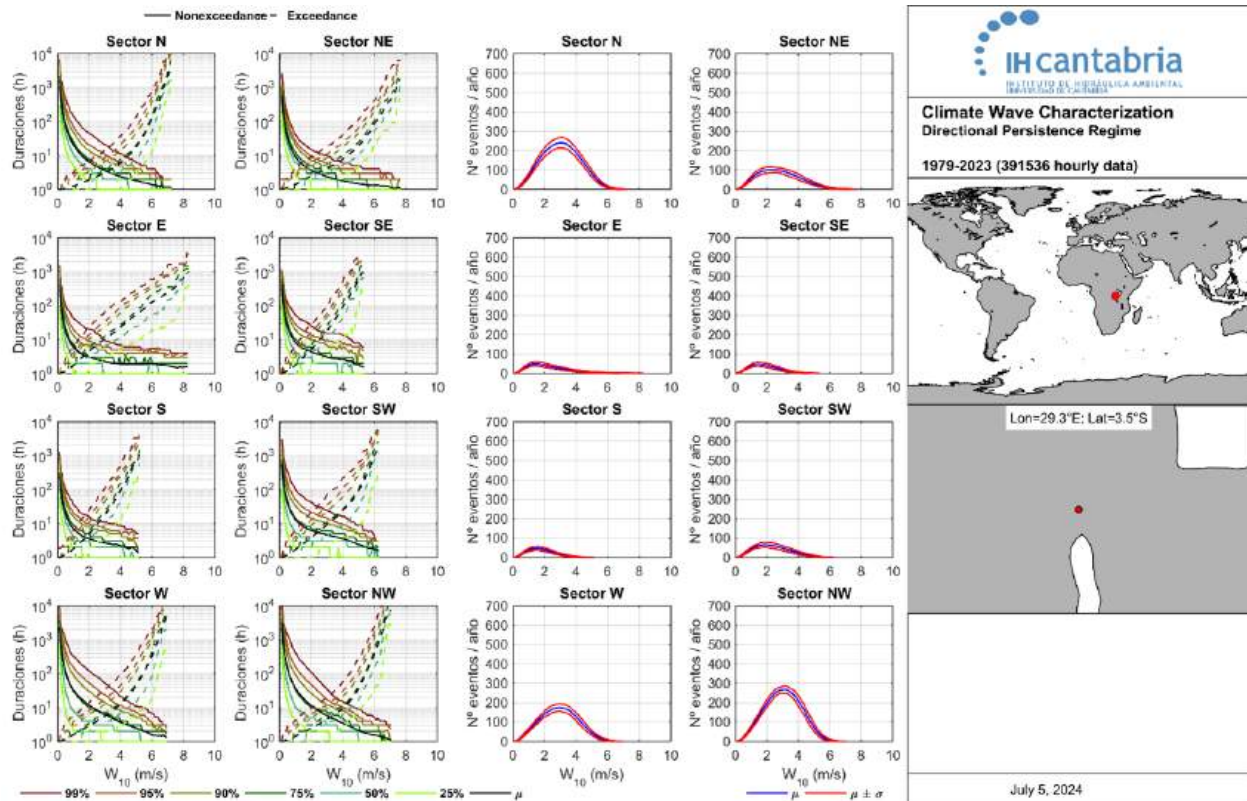


Figura A.37: Análisis persistencias direccional nodo 6

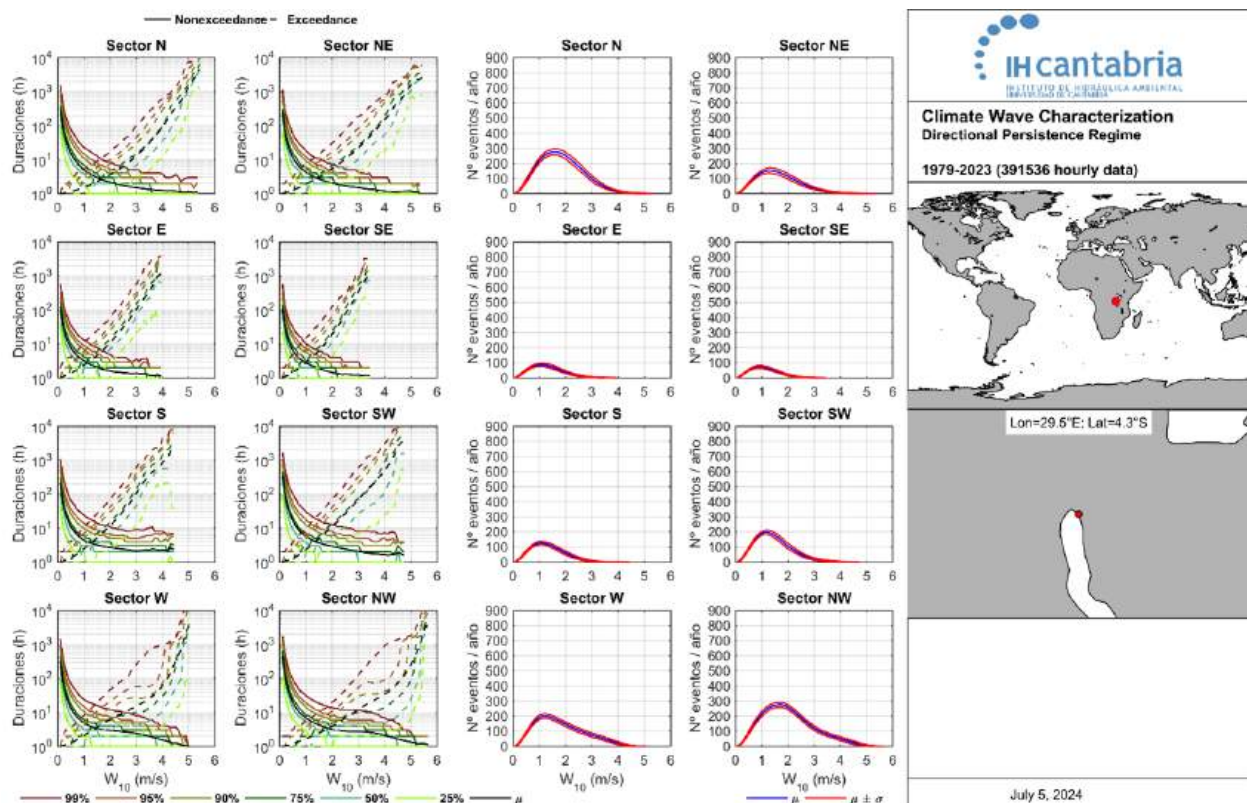


Figura A.38: Análisis persistencias direccional nodo 10

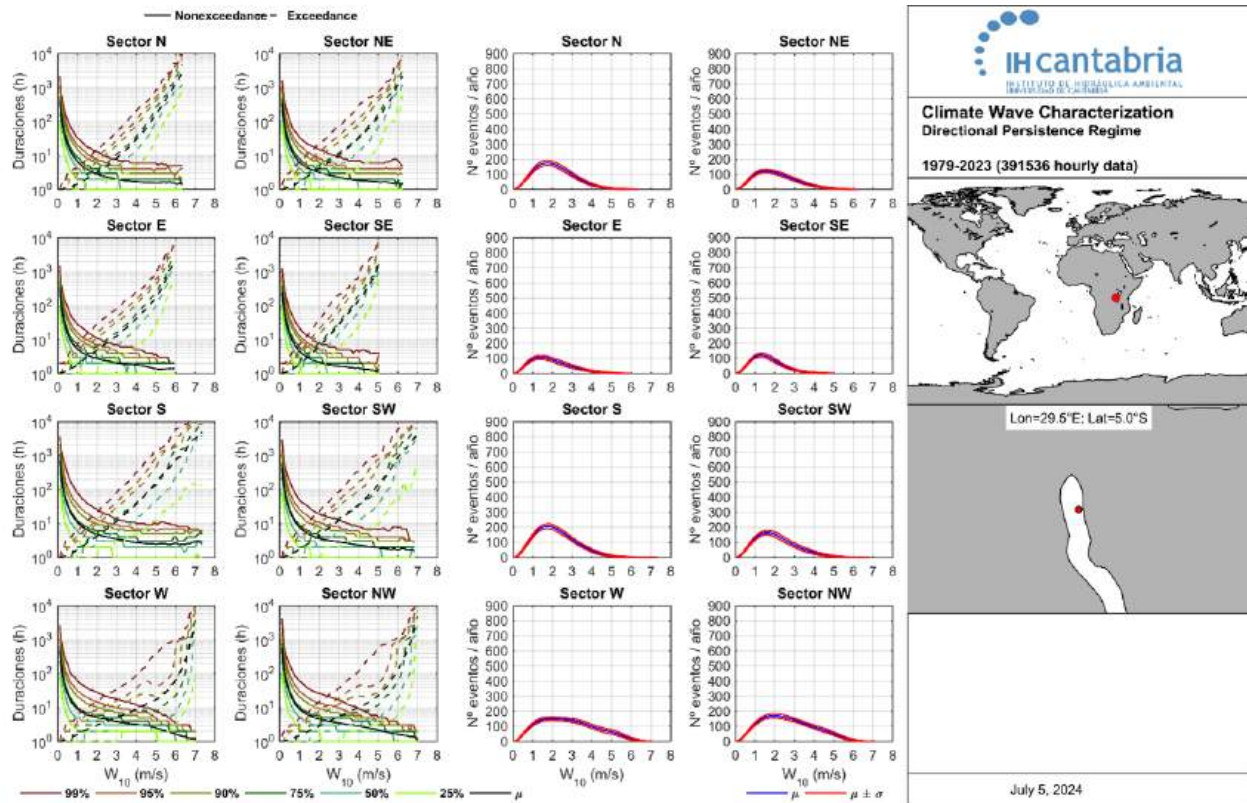


Figura A.39: Análisis persistencias direccional nodo 16

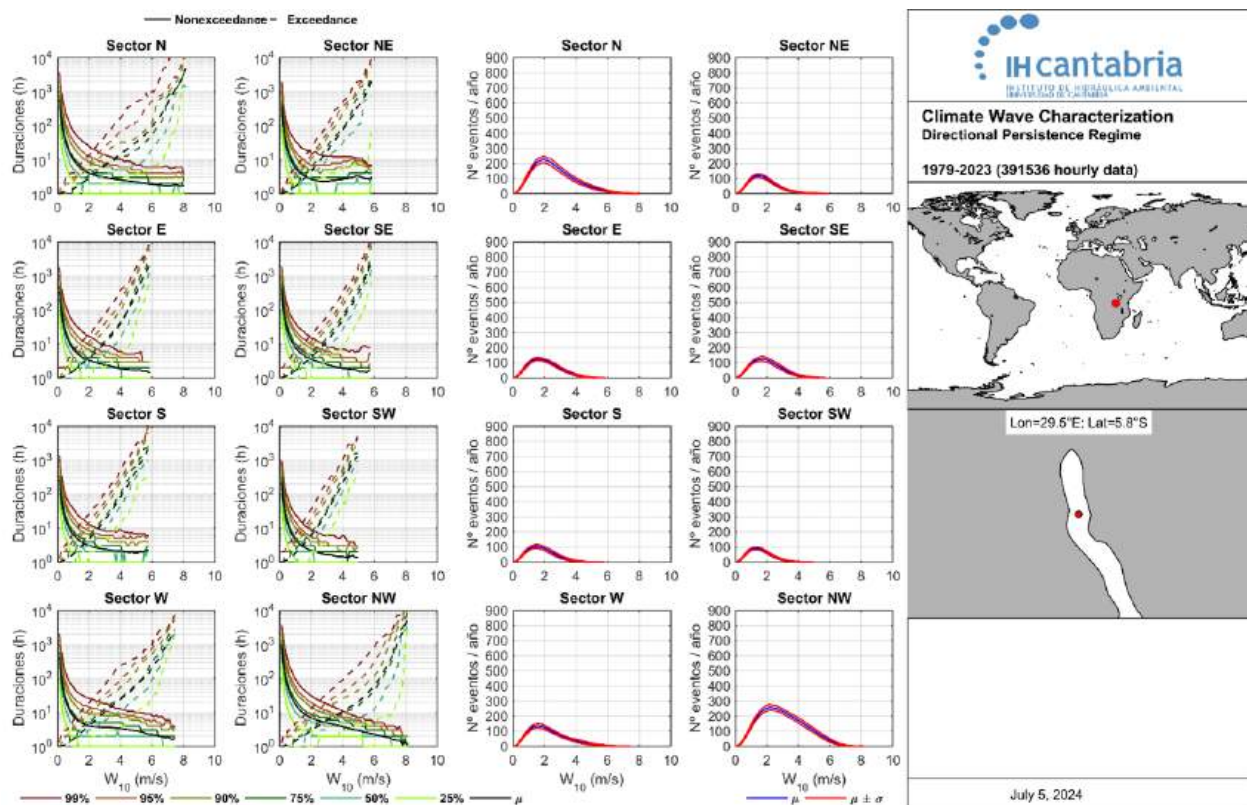


Figura A.40: Análisis persistencias direccional nodo 20

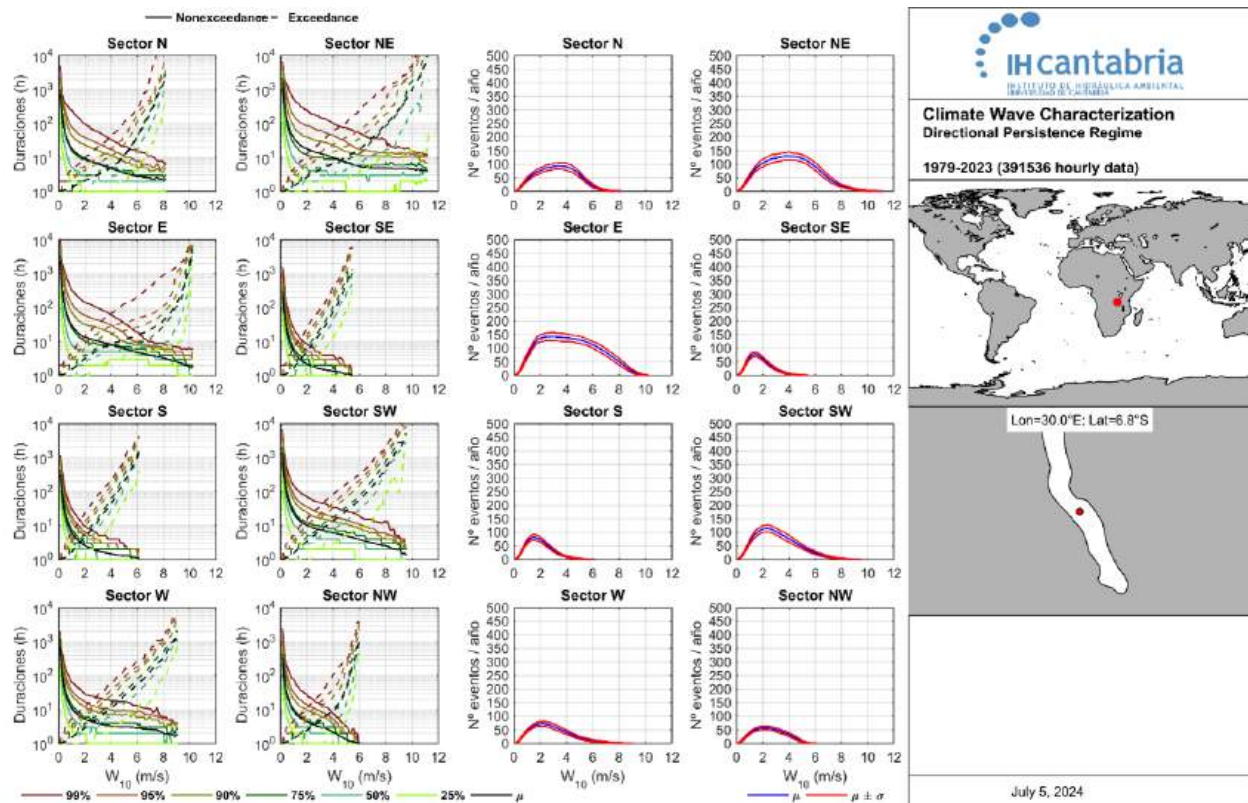


Figura A.41: Análisis persistencias direccional nodo 28

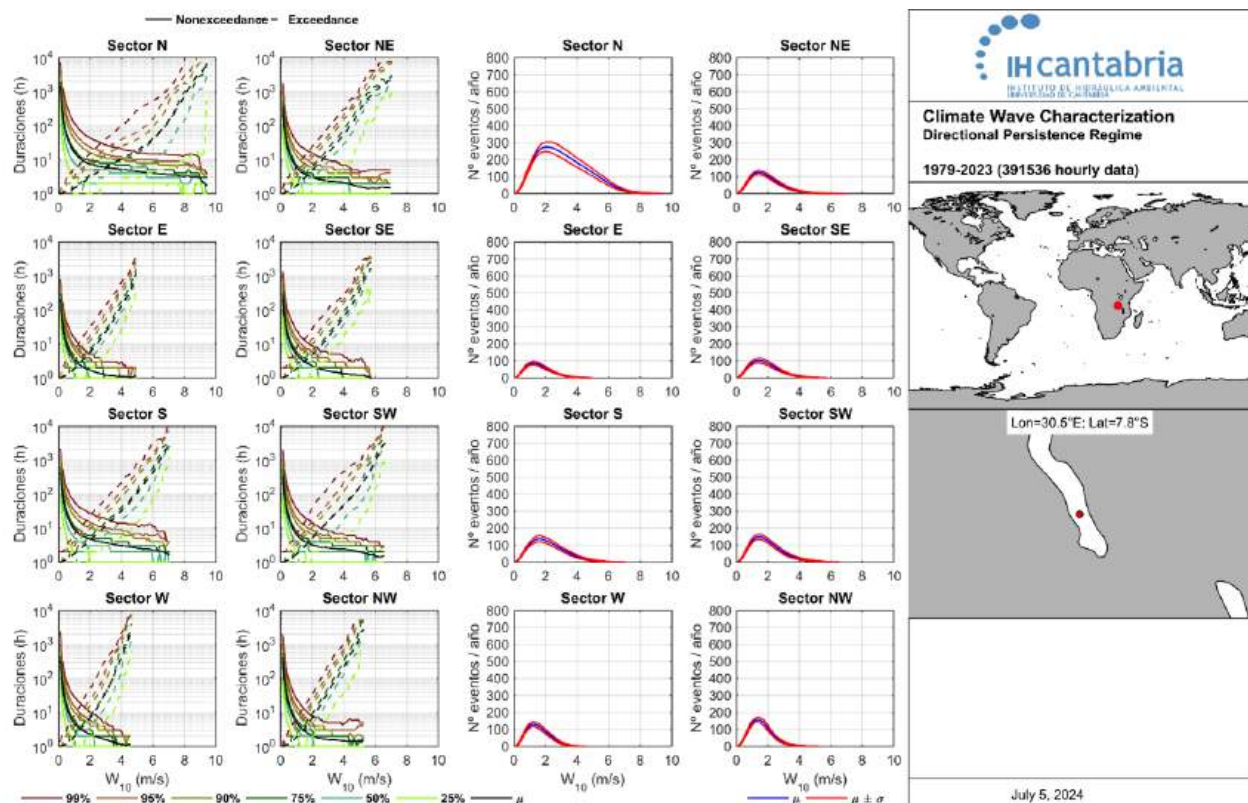


Figura A.42: Análisis persistencias direccional nodo 35

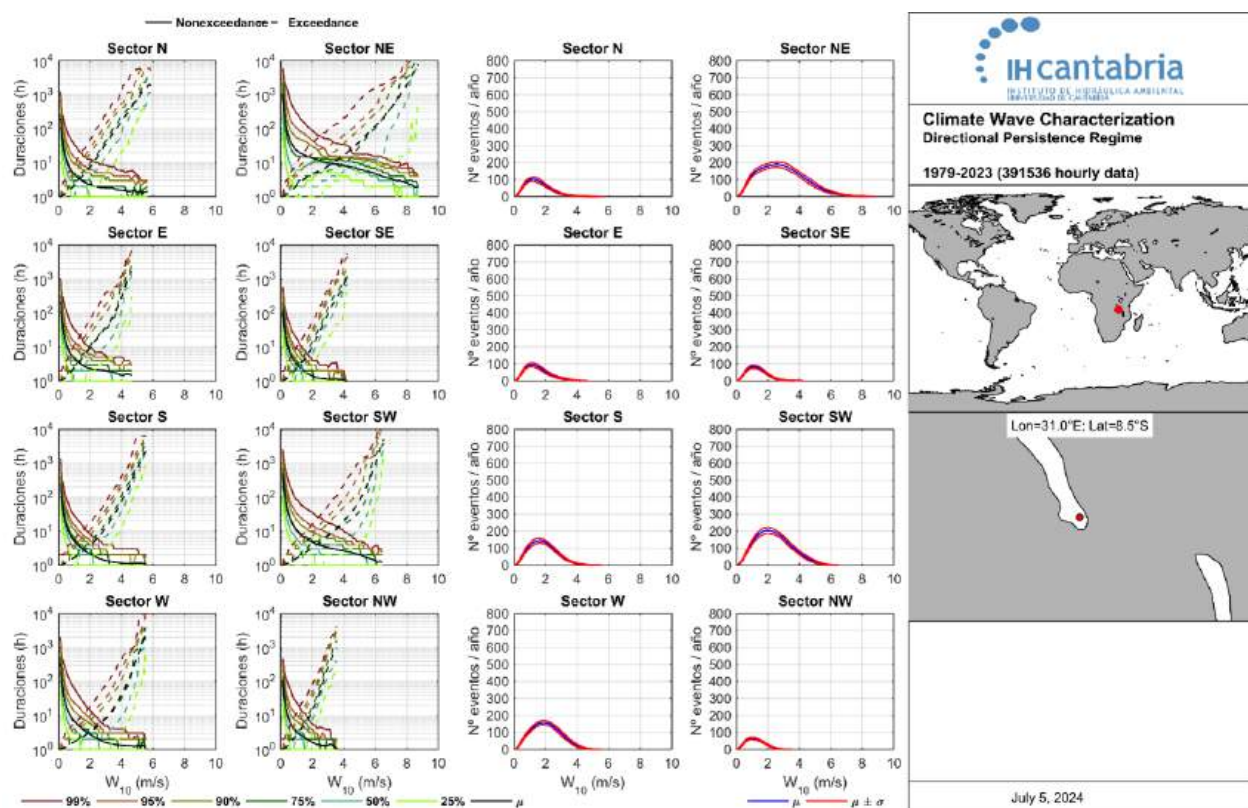


Figura A.43: Análisis persistencias direccional nodo 44

A.0.5. Régimen medio y extremal mensual

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al régimen mensual medio y extremo. Los resultados para los regímenes medios corresponden a las figuras de la A.44 hasta la A.50 y los resultados para el régimen extremo a las cifras de A.51 a A.57. Como el oleaje se mide siempre en el mismo punto, sólo se comenta para el primer gráfico de cada tipo. En la figura A.44 se puede ver el régimen medio para el nodo 6. Los valores más altos de la velocidad del viento se dieron en enero y febrero, al igual que las mayores alturas de ola. Mientras que en los nodos 10 y 16 la mayor velocidad del viento se produce en octubre y septiembre. Siguiendo hacia el sur, en el resto de los nodos, los máximos tienen lugar en los meses de verano, junio, julio y agosto. En cuanto al régimen extremo, se observa el mismo comportamiento que para el régimen medio, los máximos en el nudo 6 se producen en los meses de invierno, mientras que en los nodos 10 y 16 lo hacen en los meses de otoño y en el resto de los nodos en los meses de verano. Esto puede deberse a la posición geográfica del lago Tanganica, muy próximo al ecuador, y a su gran extensión en sentido vertical, que intercepta diferentes climas a través de él. En el norte, más cercano al hemisferio norte, el invierno tiene lugar durante los meses de invierno, mientras que en el hemisferio sur, el invierno tiene lugar en los meses de verano.

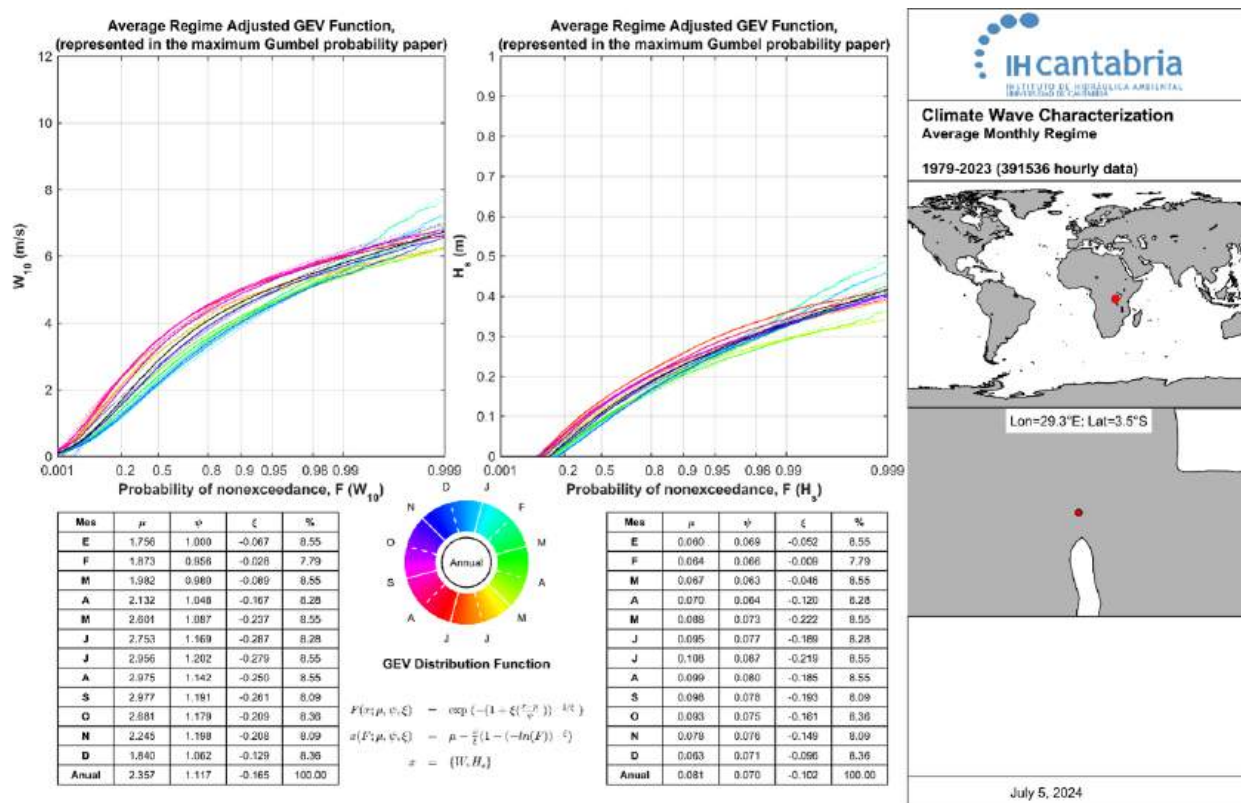


Figura A.44: Régimen medio mensual nodo 6

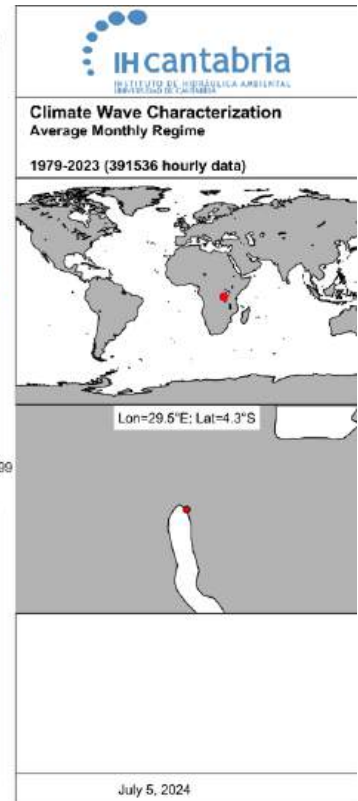
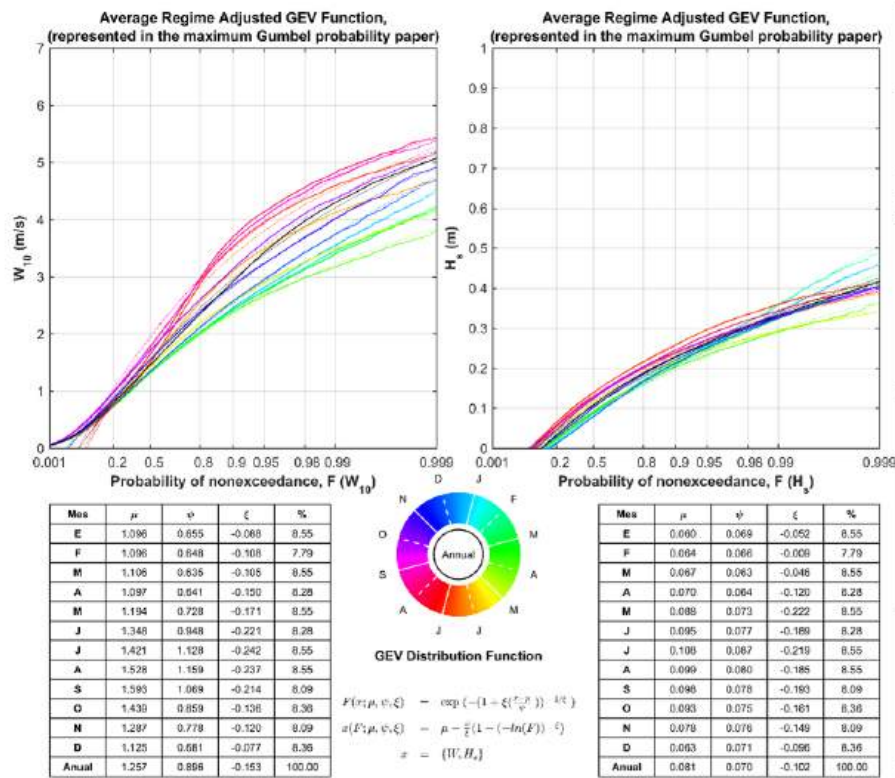


Figura A.45: Régimen medio mensual nodo 10

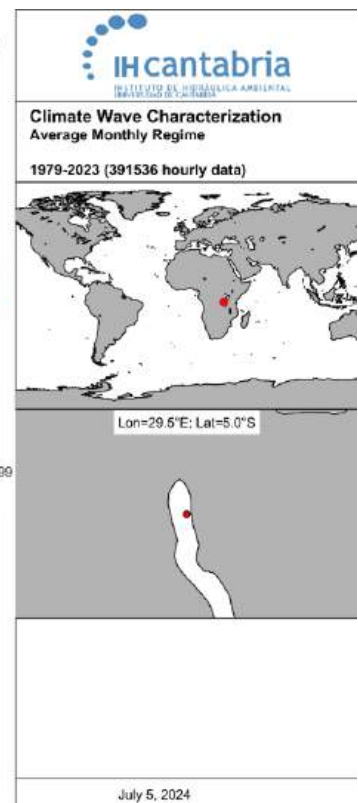
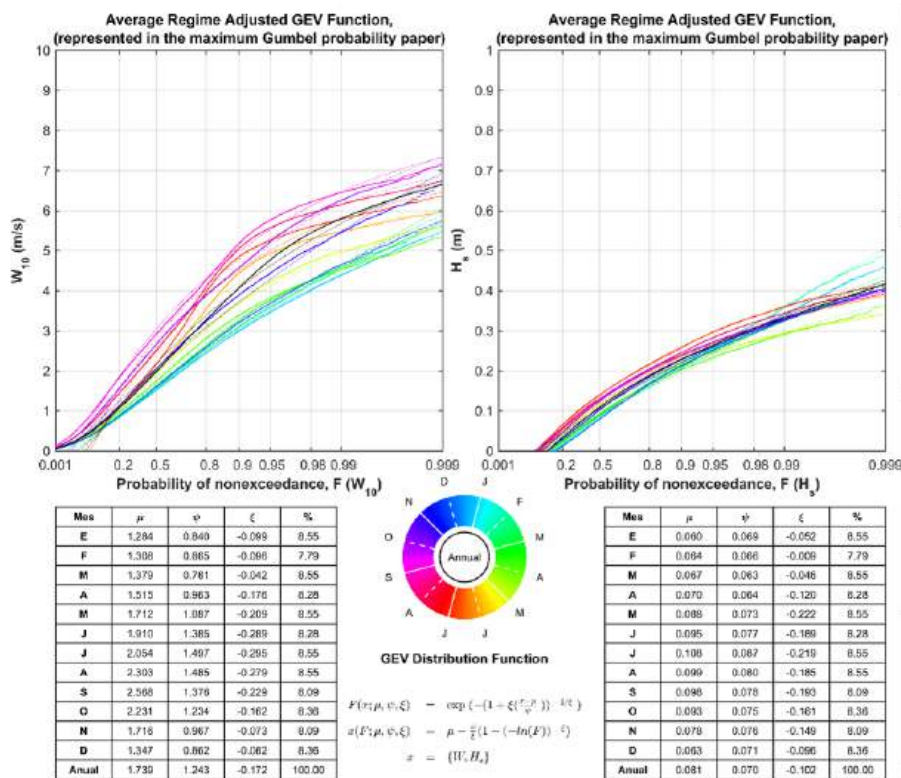


Figura A.46: Régimen medio mensual nodo 16

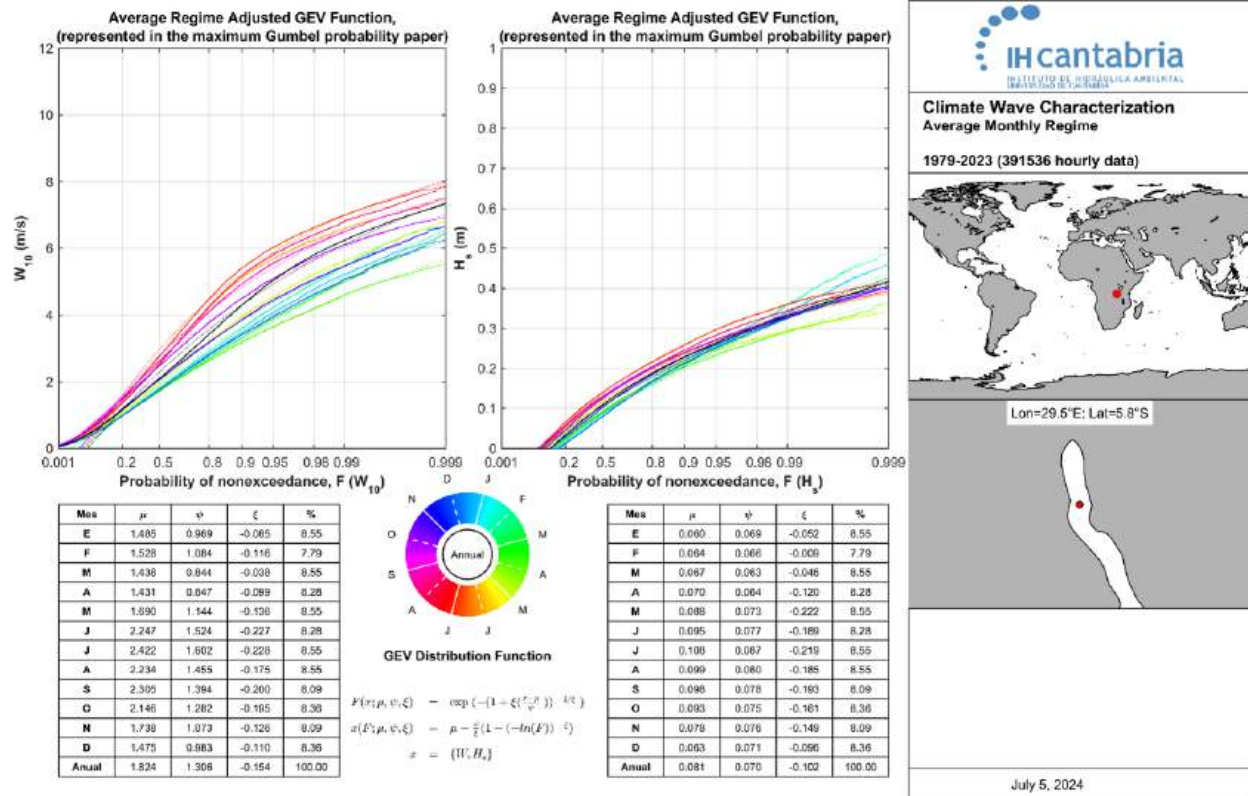


Figura A.47: Régimen medio mensual nodo 20

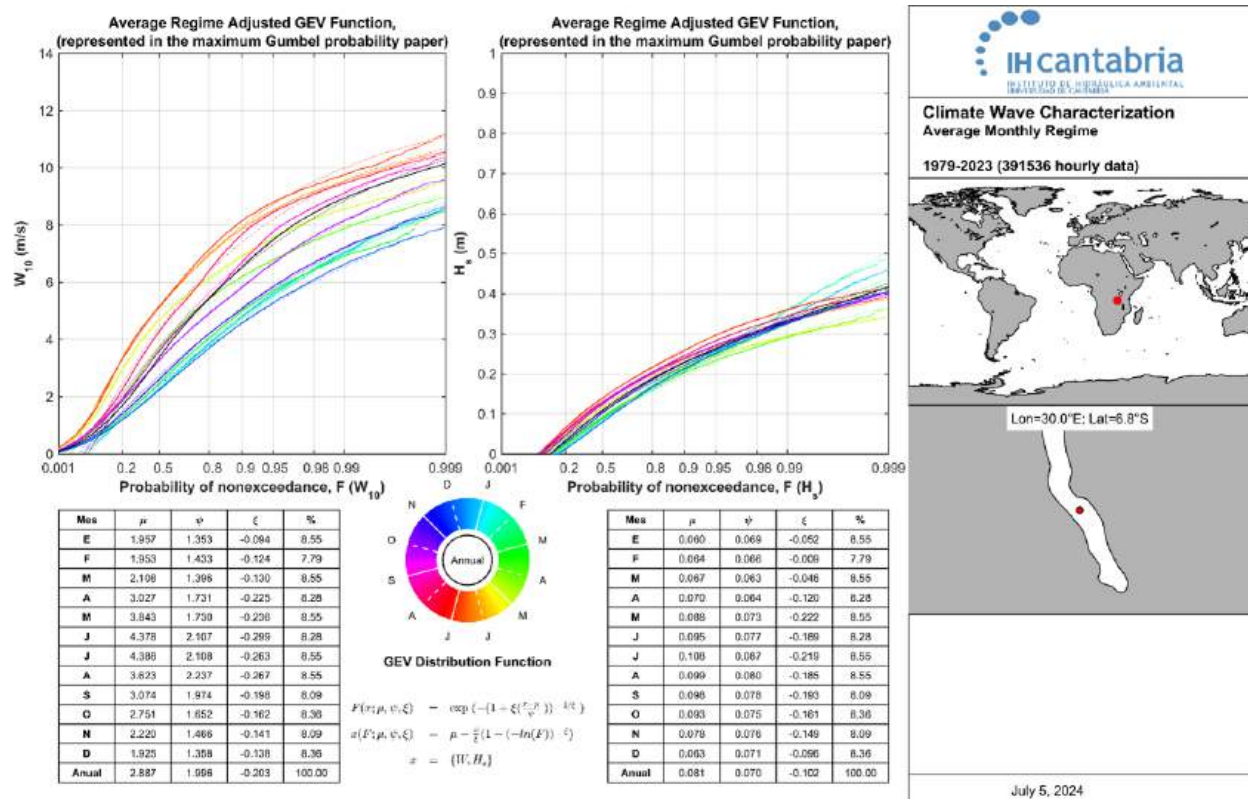


Figura A.48: Régimen medio mensual nodo 28

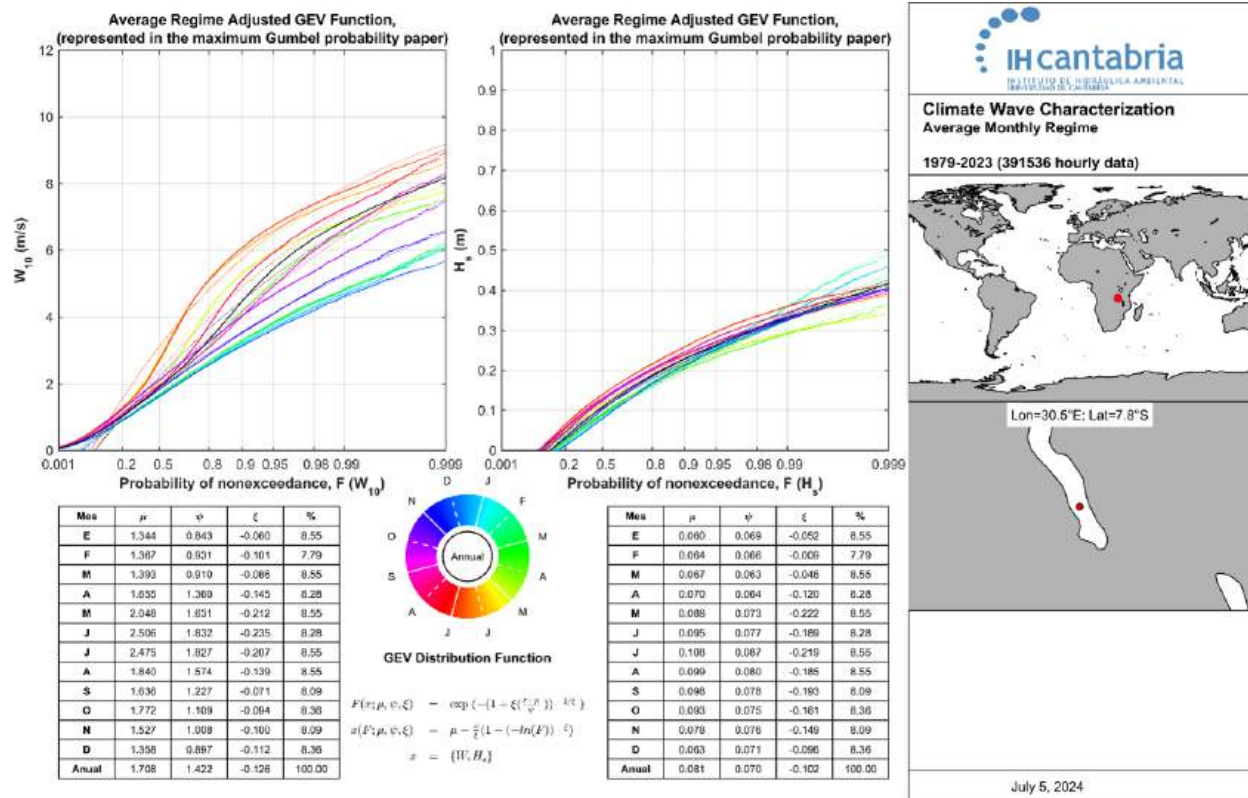


Figura A.49: Régimen medio mensual nodo 35

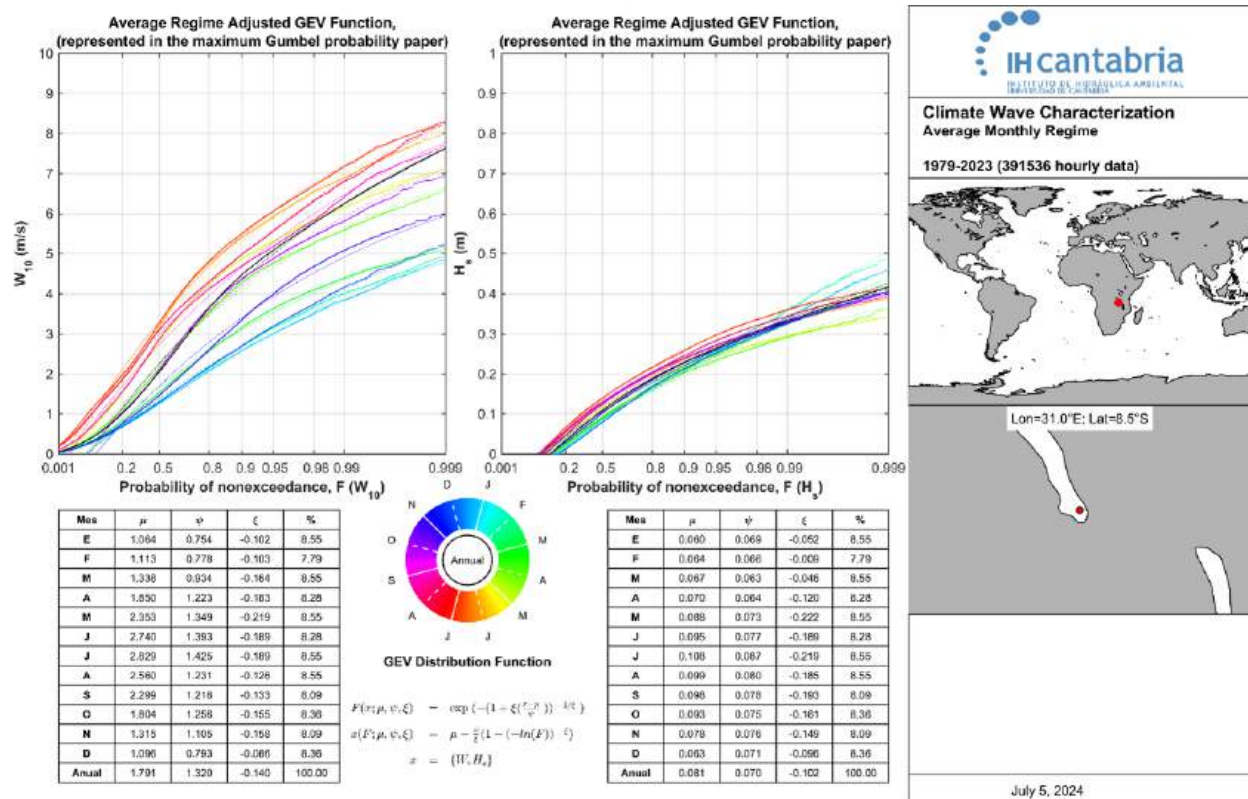


Figura A.50: Régimen medio mensual nodo 44

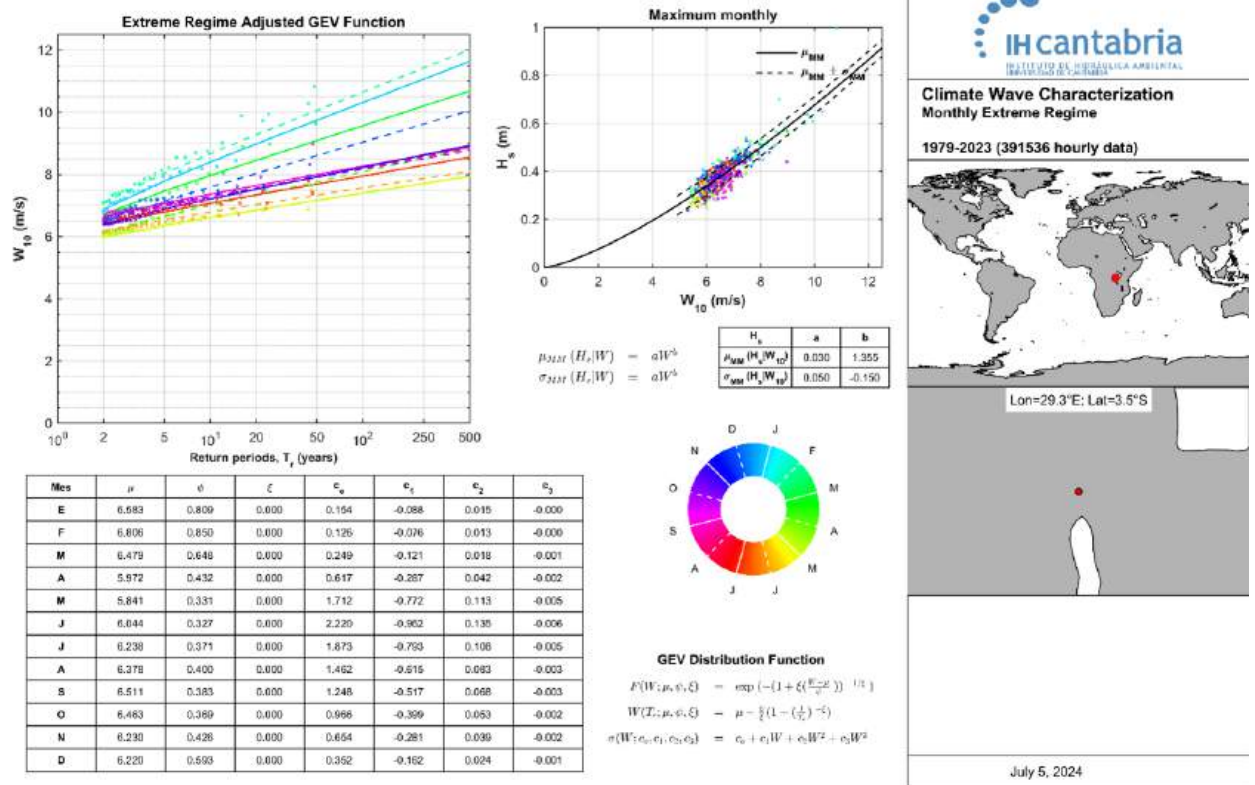


Figura A.51: Régimen extremal mensual nodo 6

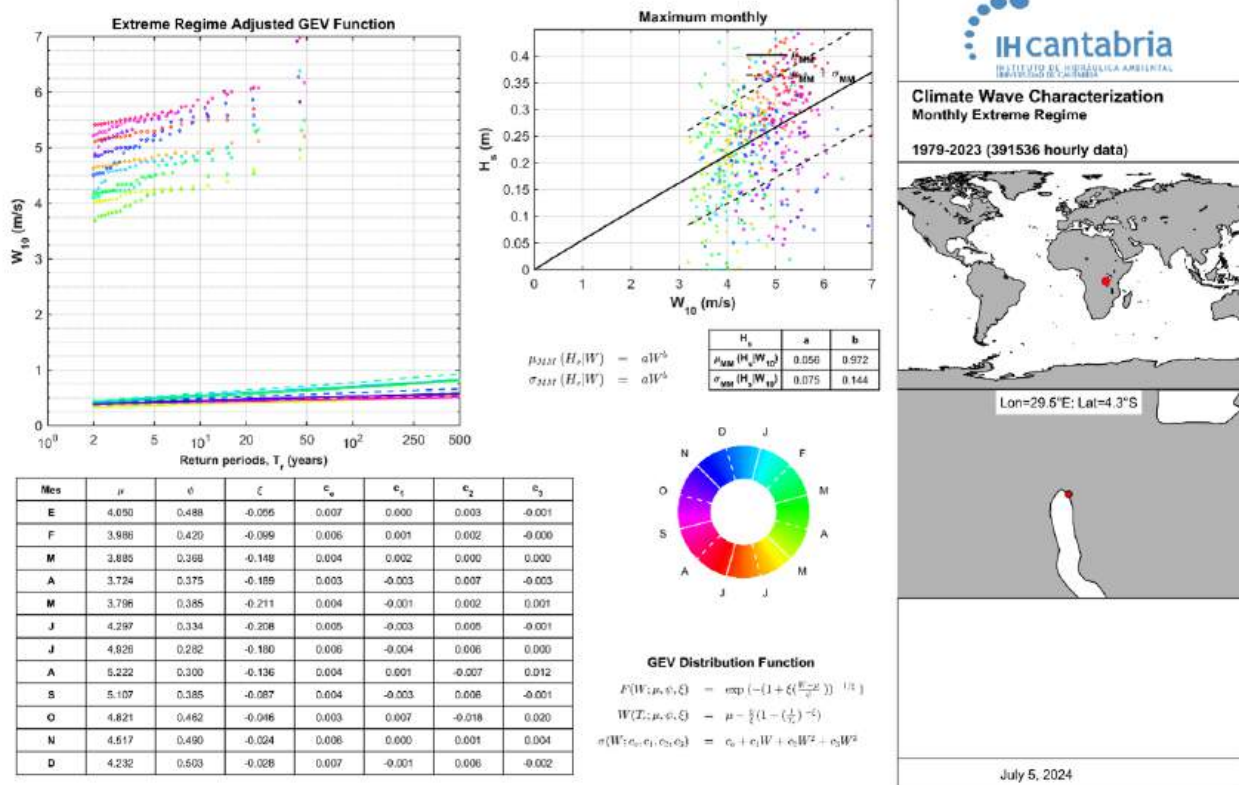


Figura A.52: Régimen extremal mensual nodo 10

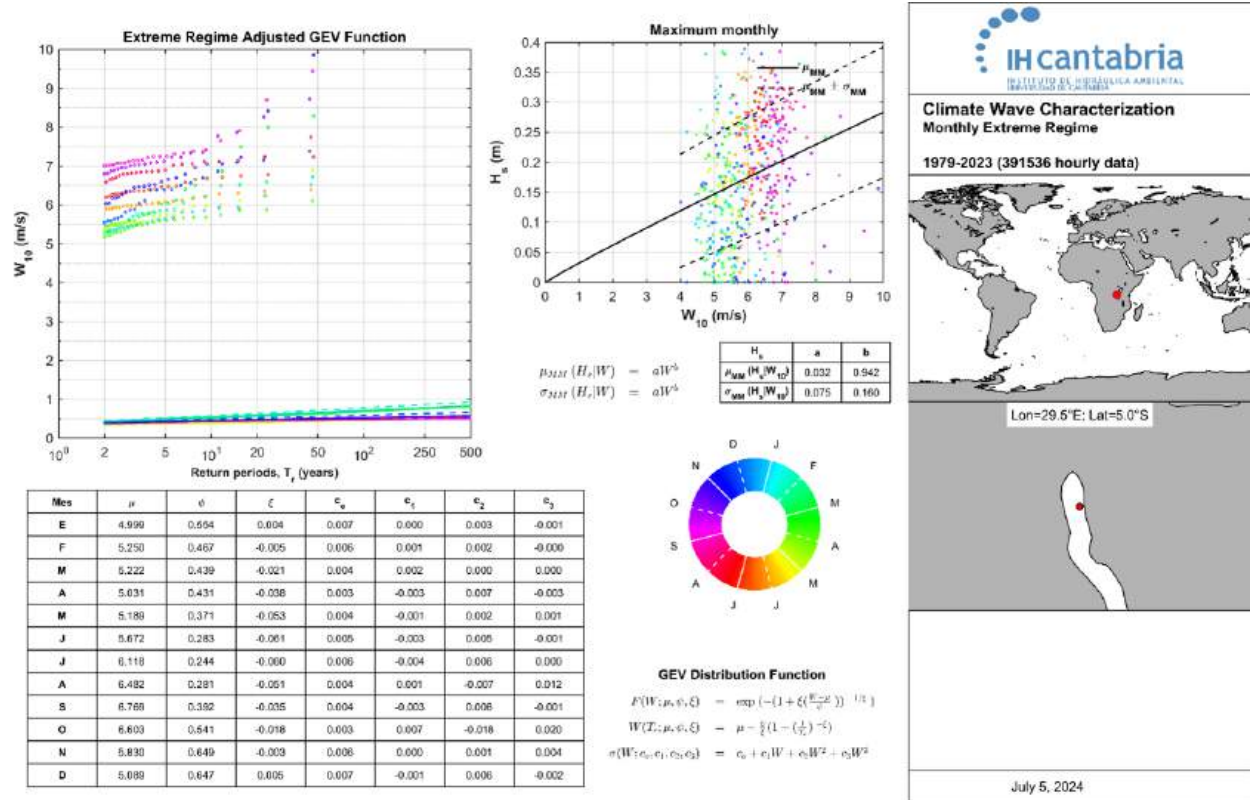


Figura A.53: Régimen extremal mensual nodo 16

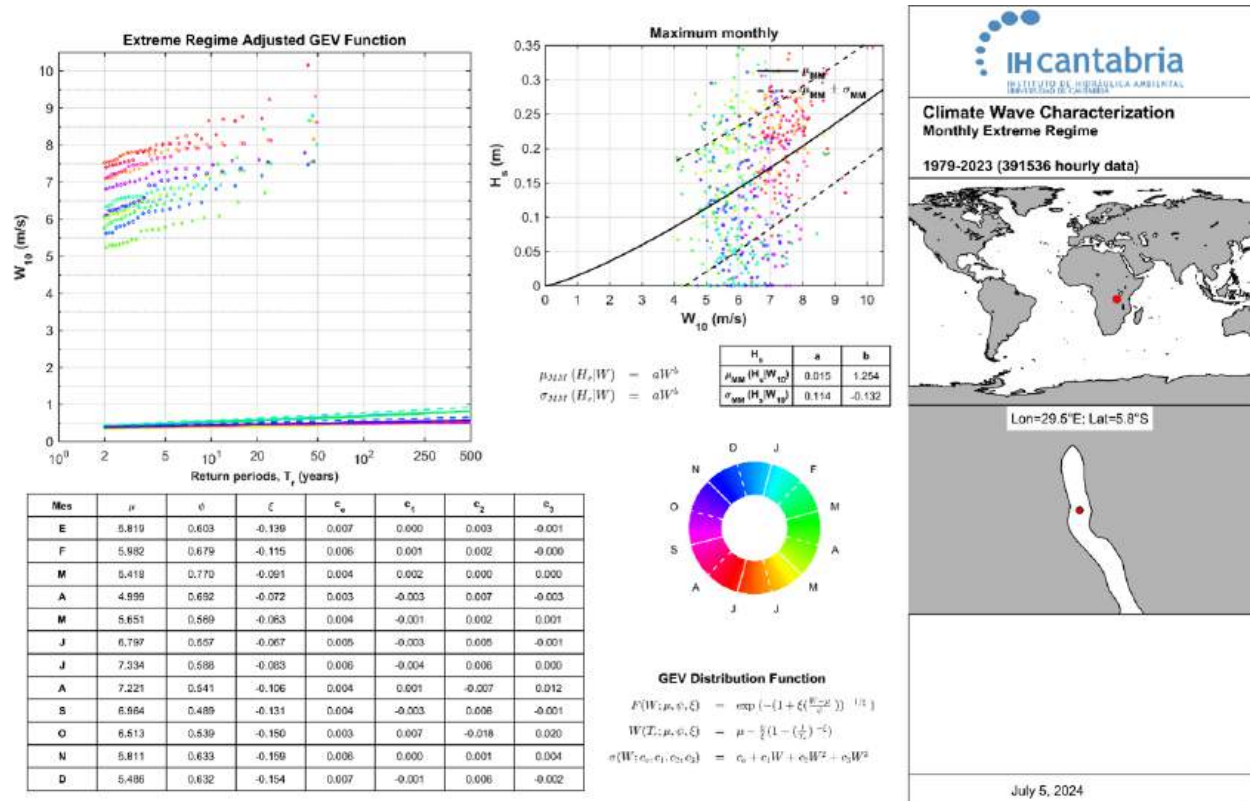


Figura A.54: Régimen extremal mensual nodo 20

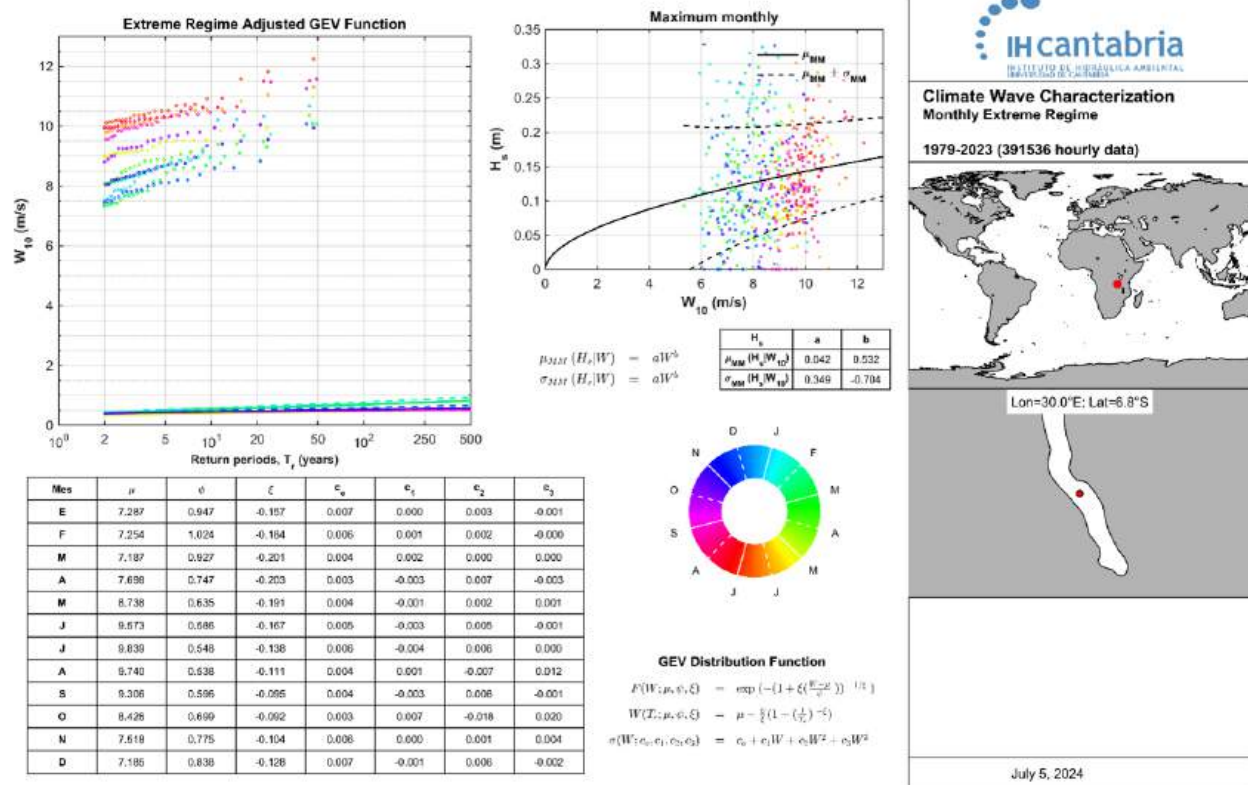


Figura A.55: Régimen extremal mensual nodo 28

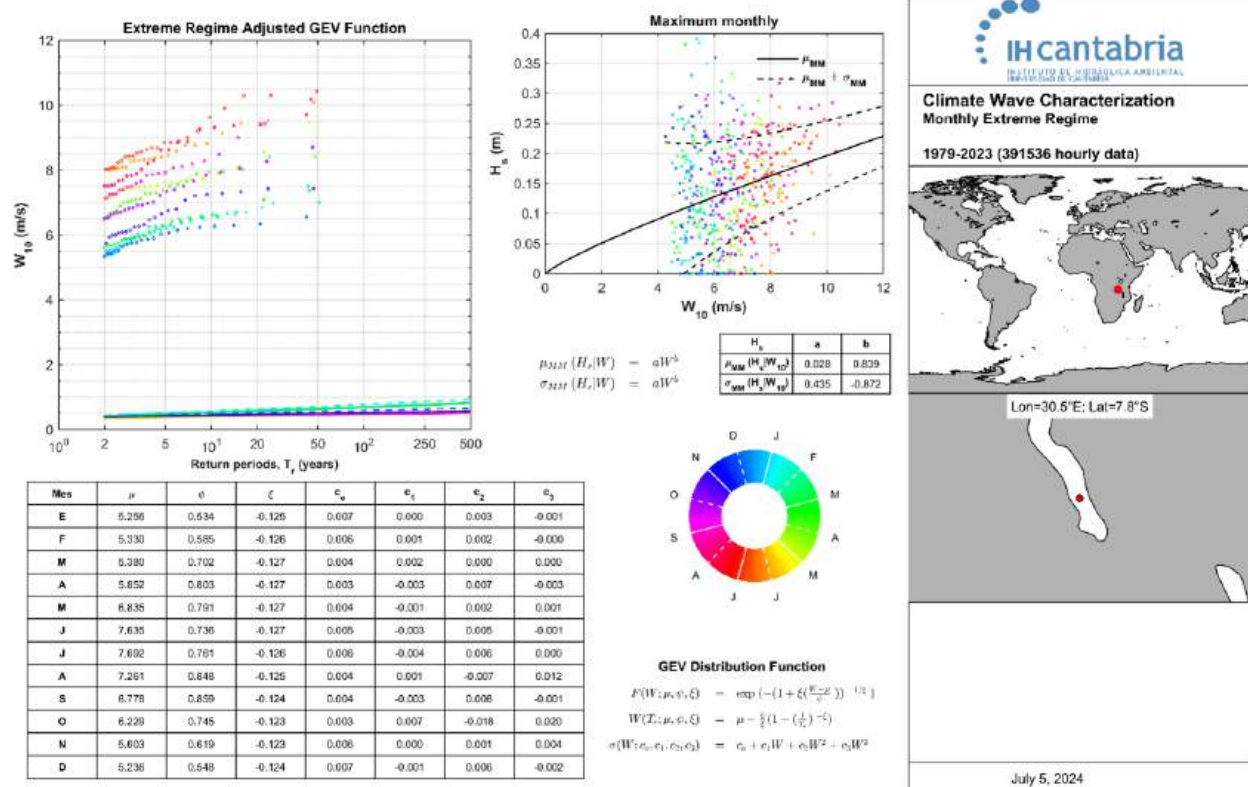


Figura A.56: Régimen extremal mensual nodo 35

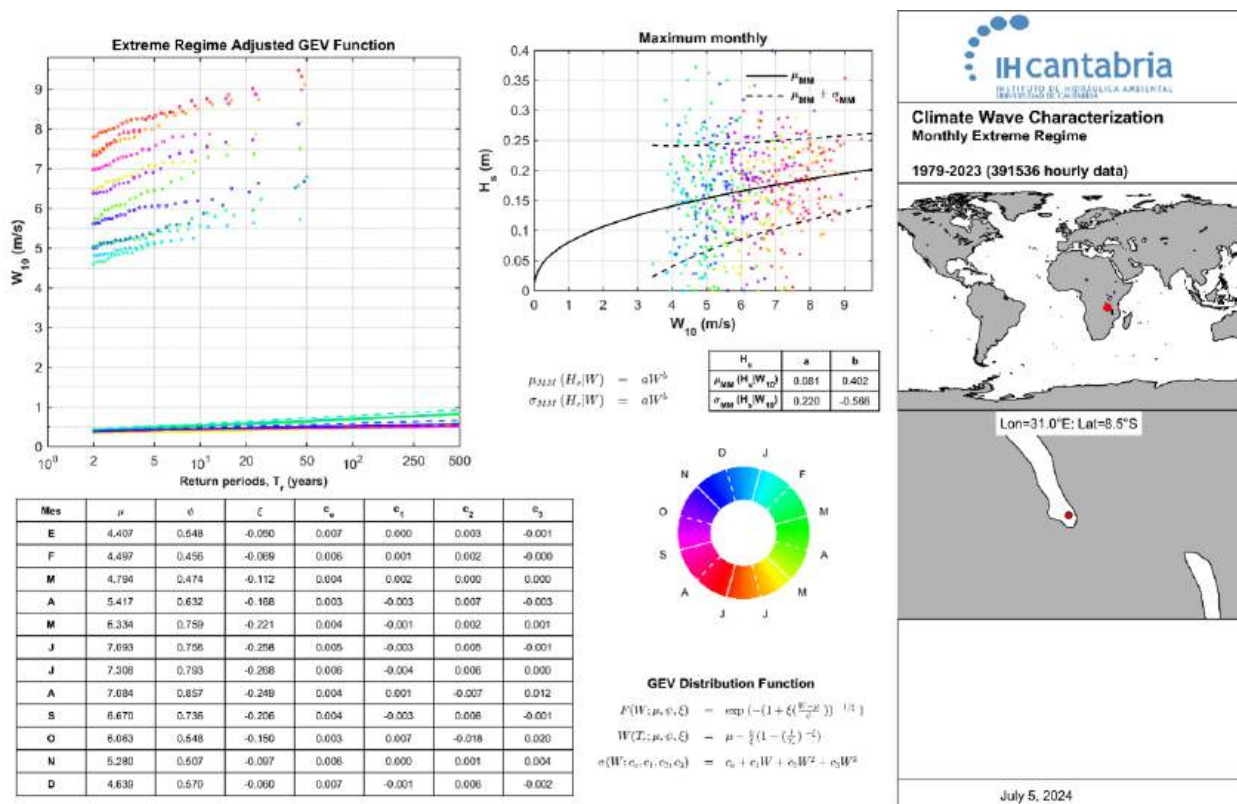


Figura A.57: Régimen extremal mensual nodo 44

A.0.6. Régimen medio y extremal direccional

En esta sección se presentan los resultados del régimen direccional medio y extremo. En las figuras A.58 a A.64 se representa el régimen direccional medio. En el nodo 6 se observa que son las direcciones ENE y E las que presentan valores más altos de vientos y olas. En el nodo 10 la mayor velocidad del viento proviene del NO, en el nodo 16 lo hace del sur y en los nodos del 20 al 44 lo hacen del N y NNE respectivamente. Atendiendo ahora a las figuras del A.65 al A.71 se observa el régimen direccional extremo, donde los máximos vientos se producen de nuevo en las mismas direcciones máximas que se habían comentado en el párrafo anterior. En cuanto a las olas, ENE vuelve a ser la dirección máxima, que concuerda con la velocidad del viento en el nodo 6 pero no en los demás, esto lleva a la conclusión de que las olas en el punto de control están siendo determinadas por el viento en el nodo 6.

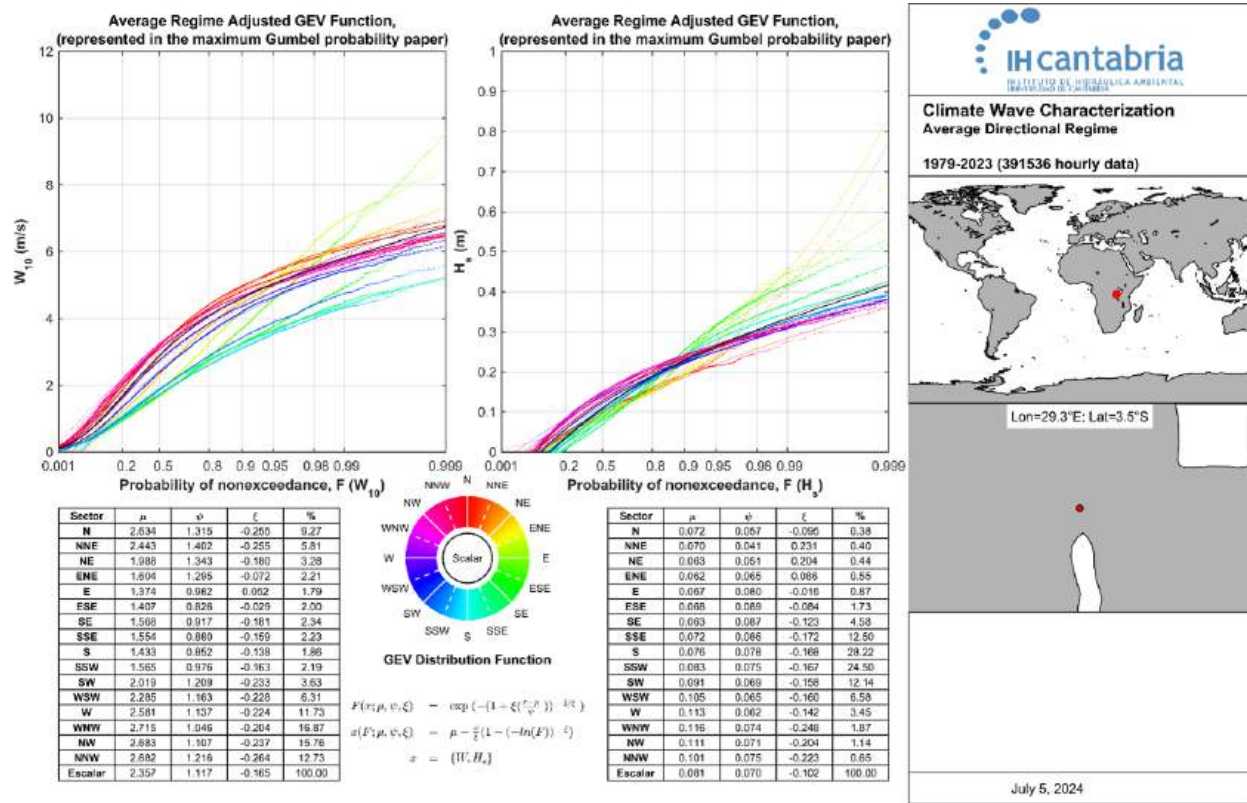


Figura A.58: Régimen medio direccional nodo 6

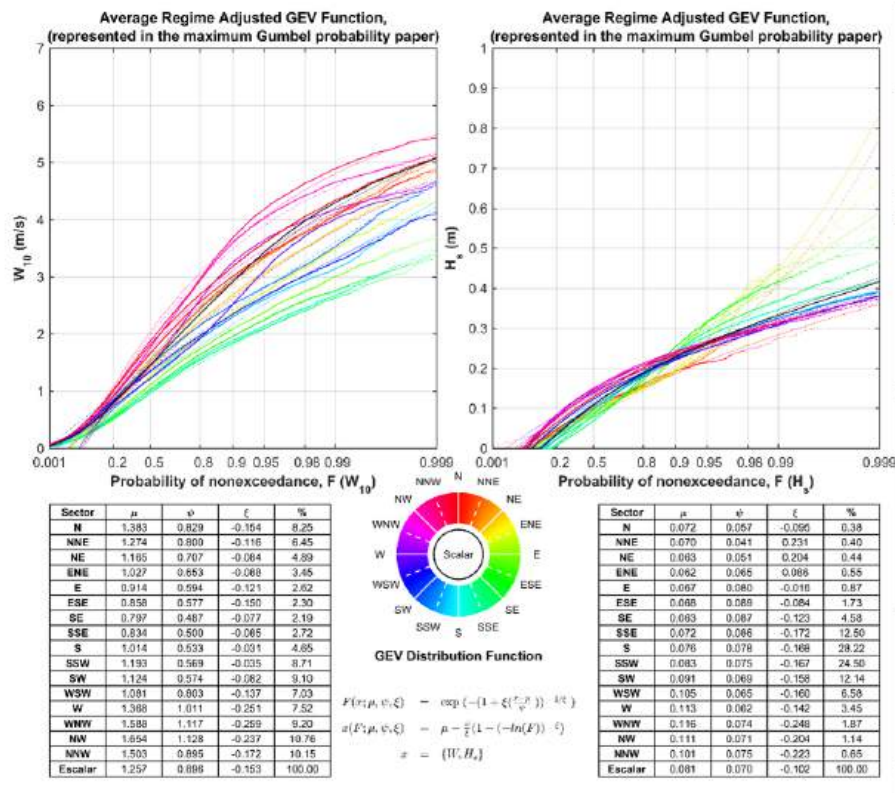


Figura A.59: Régimen medio direccional nodo 10

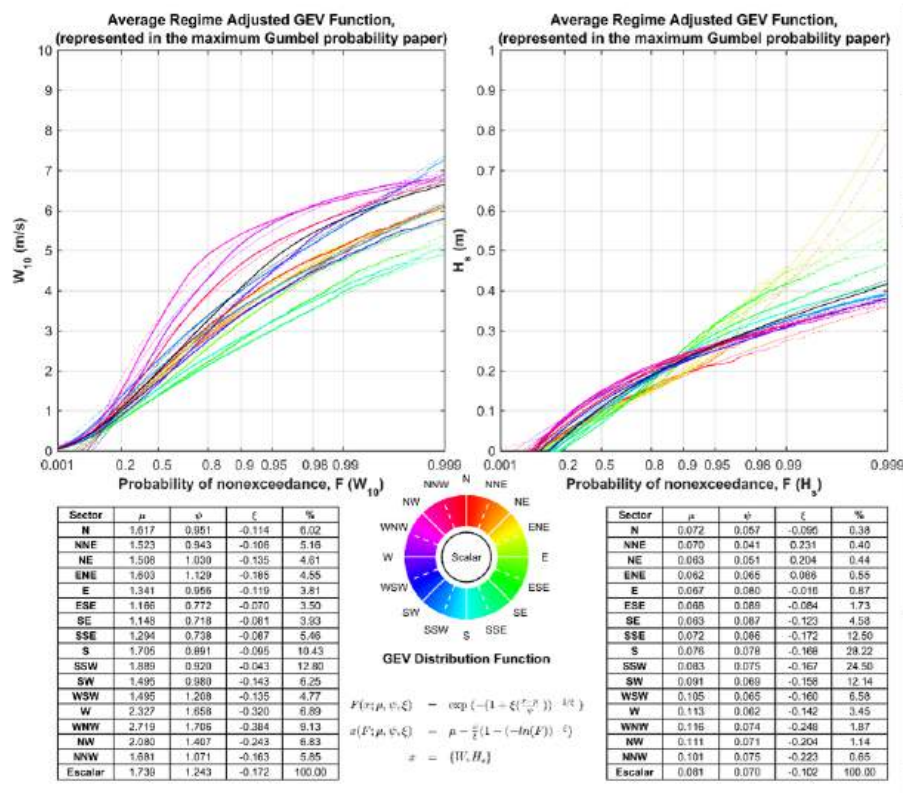


Figura A.60: Régimen medio direccional nodo 16

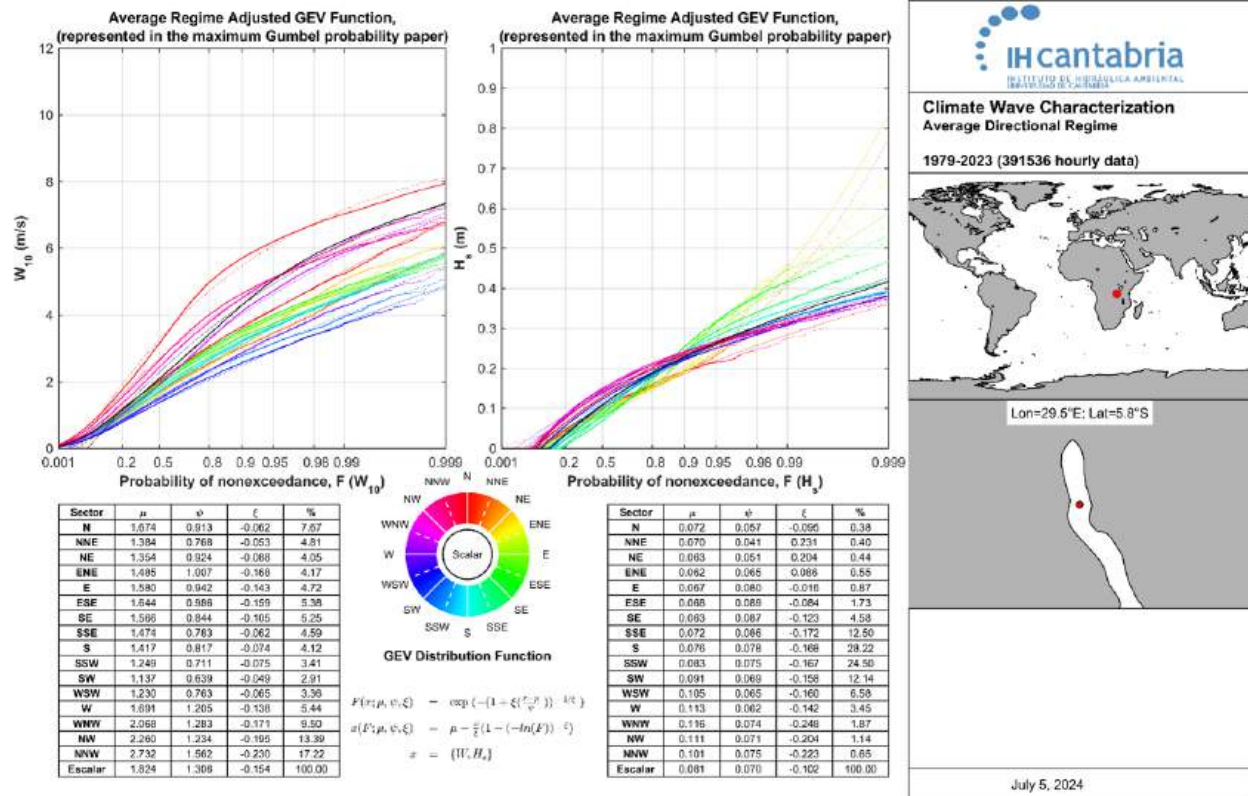


Figura A.61: Régimen medio direccional nodo 20

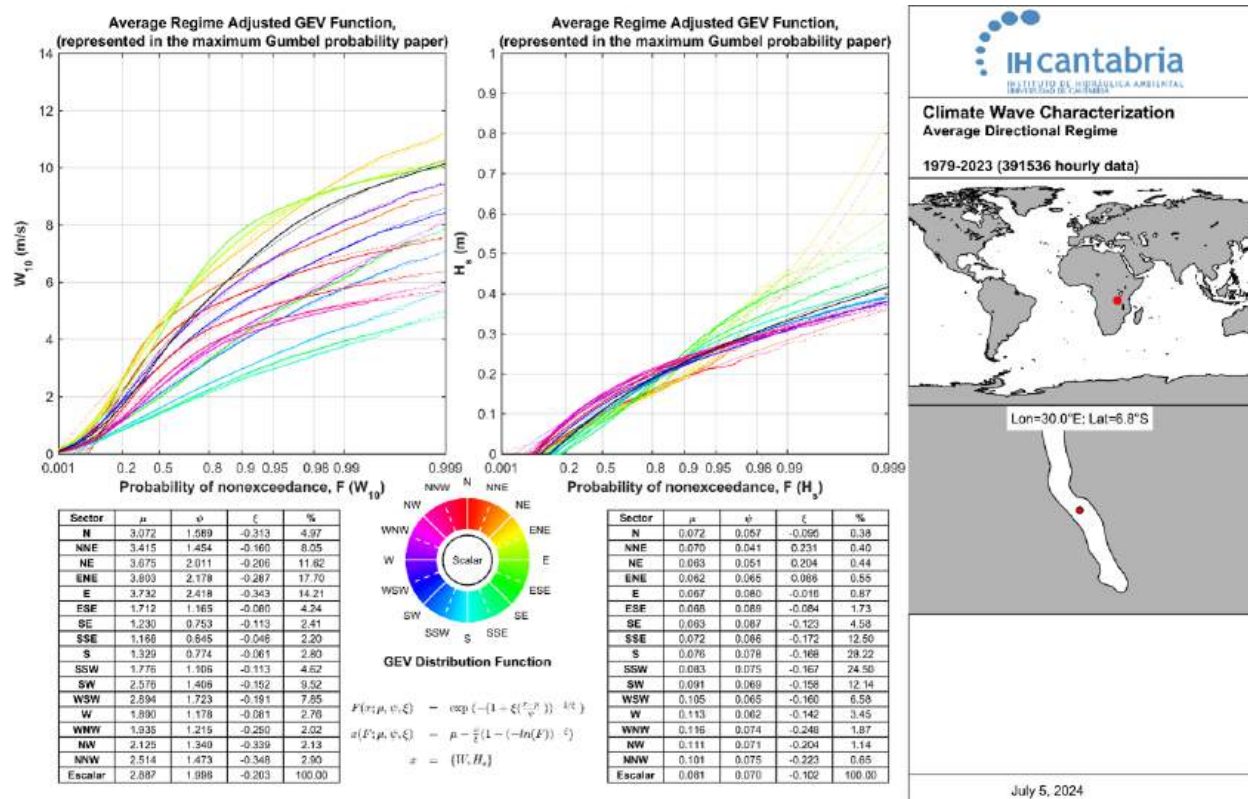


Figura A.62: Régimen medio direccional nodo 28

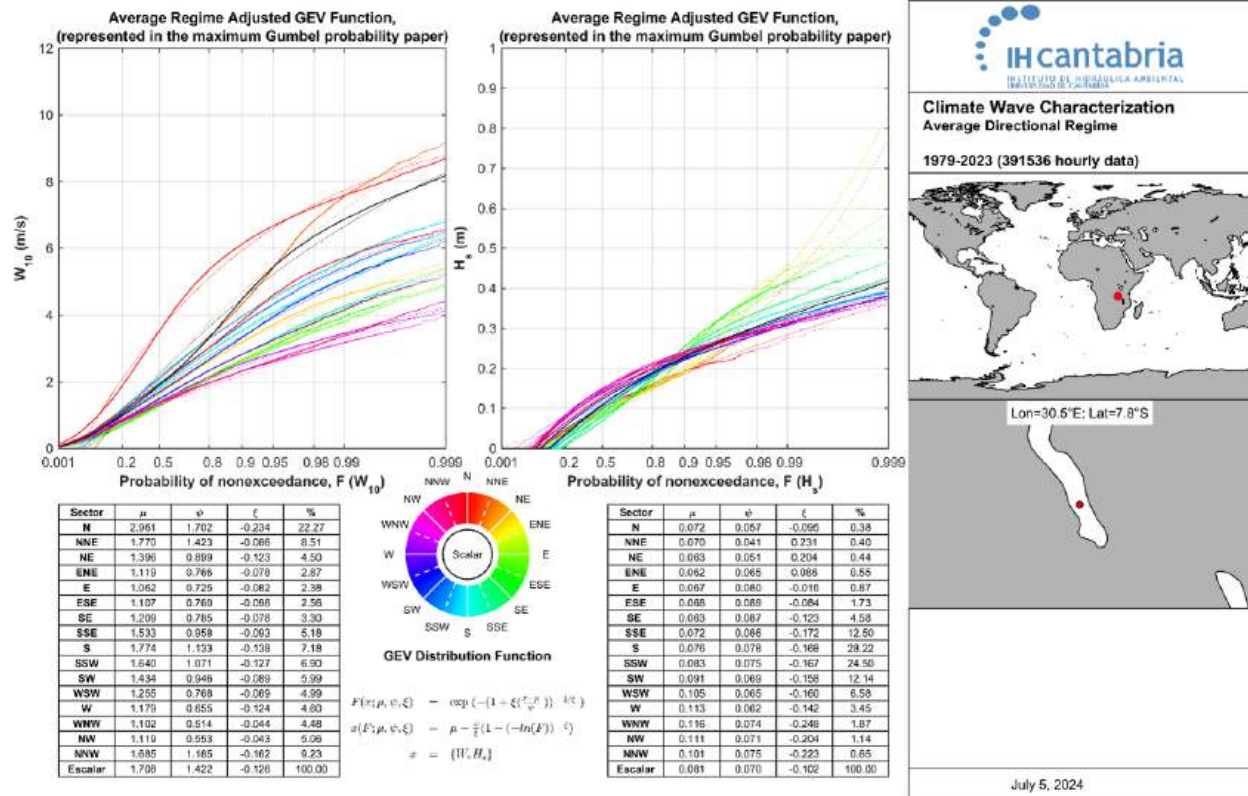


Figura A.63: Régimen medio direccional nodo 35

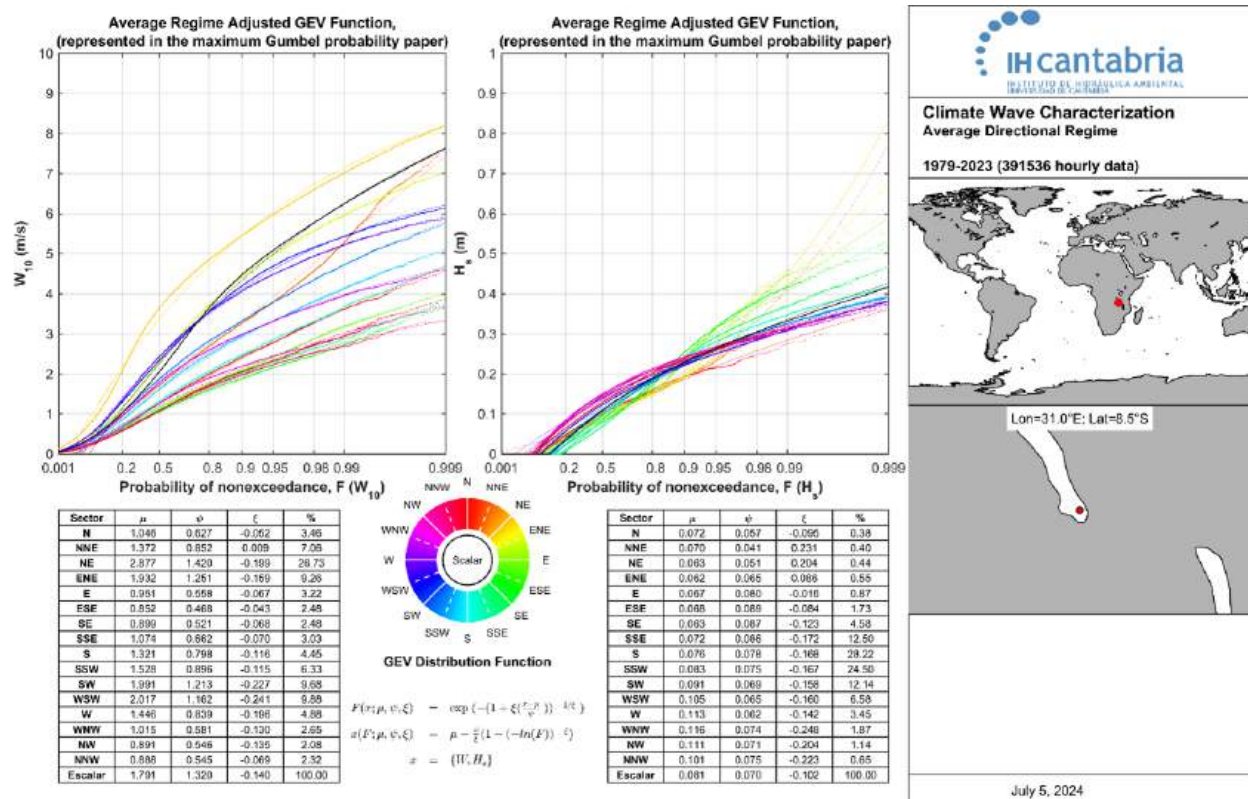


Figura A.64: Régimen medio direccional nodo 44

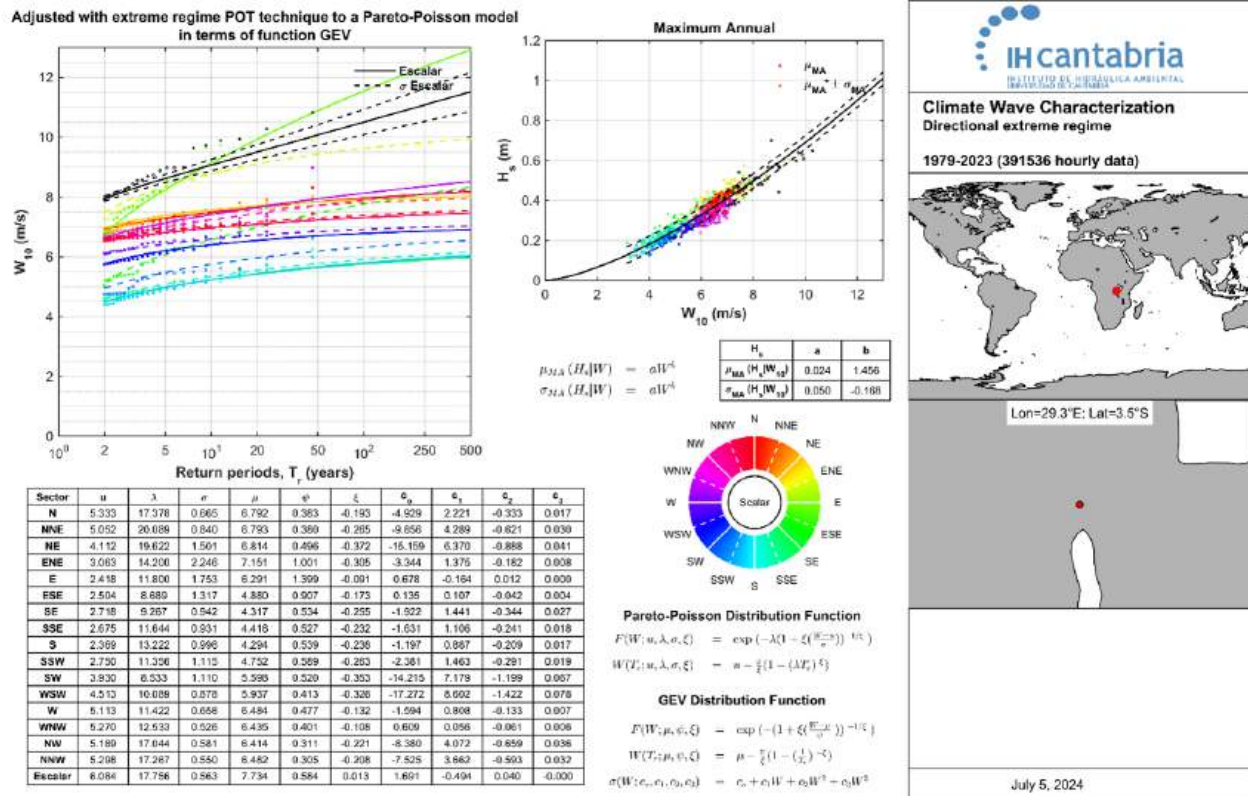


Figura A.65: Régimen extremal direccional nodo 6

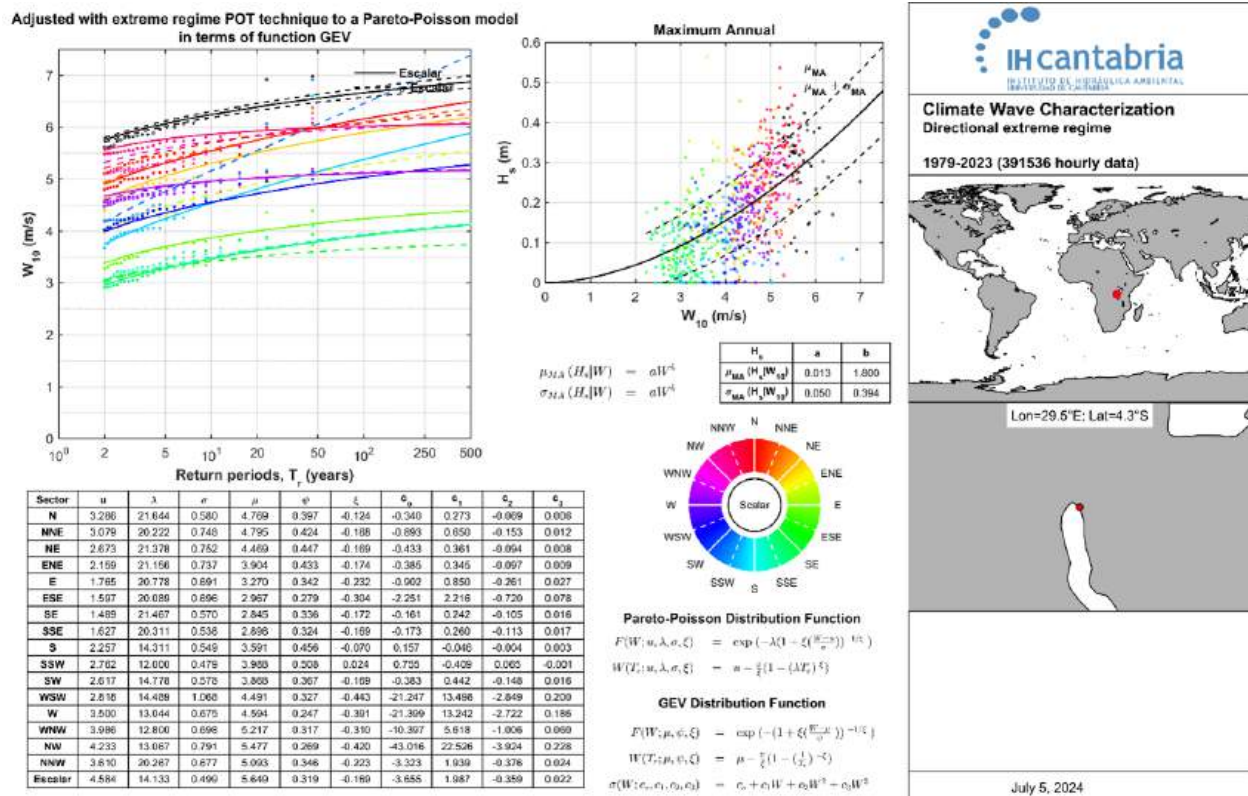


Figura A.66: Régimen extremal direccional nodo 10

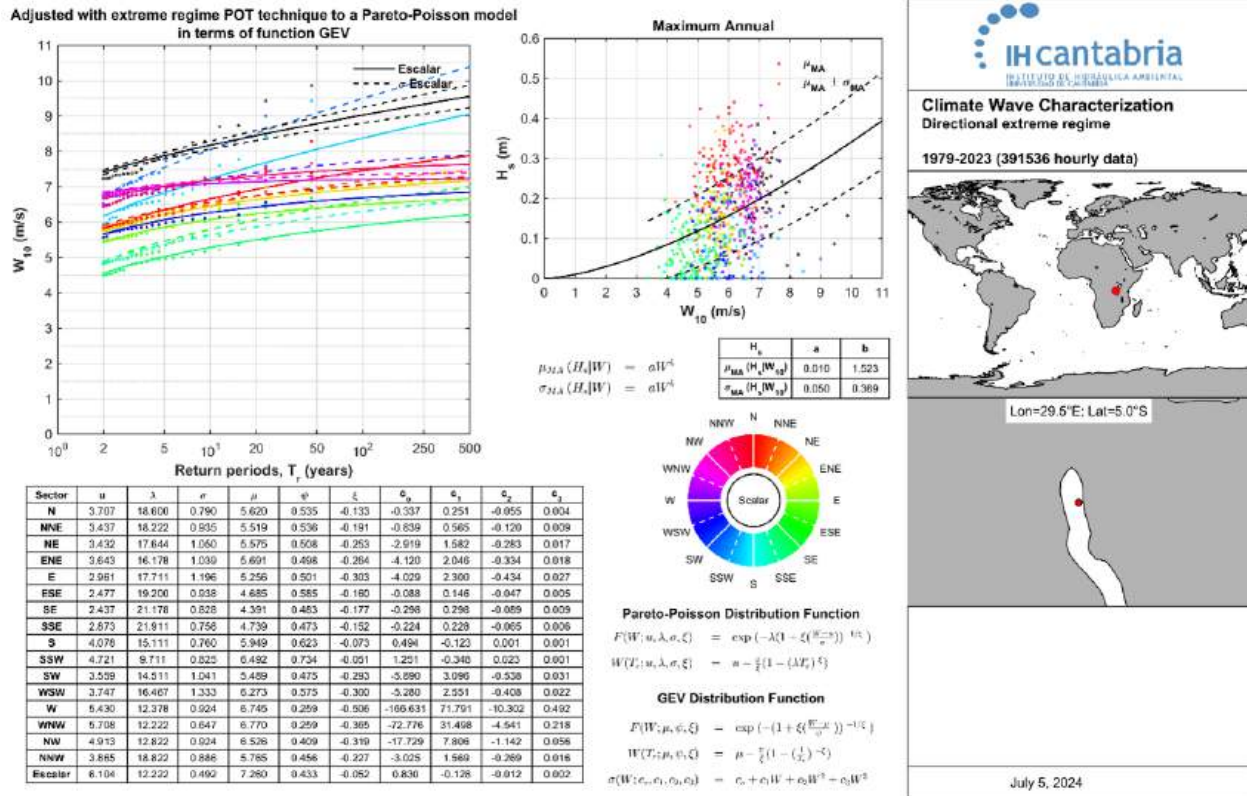


Figura A.67: Régimen extremal direccional nodo 16

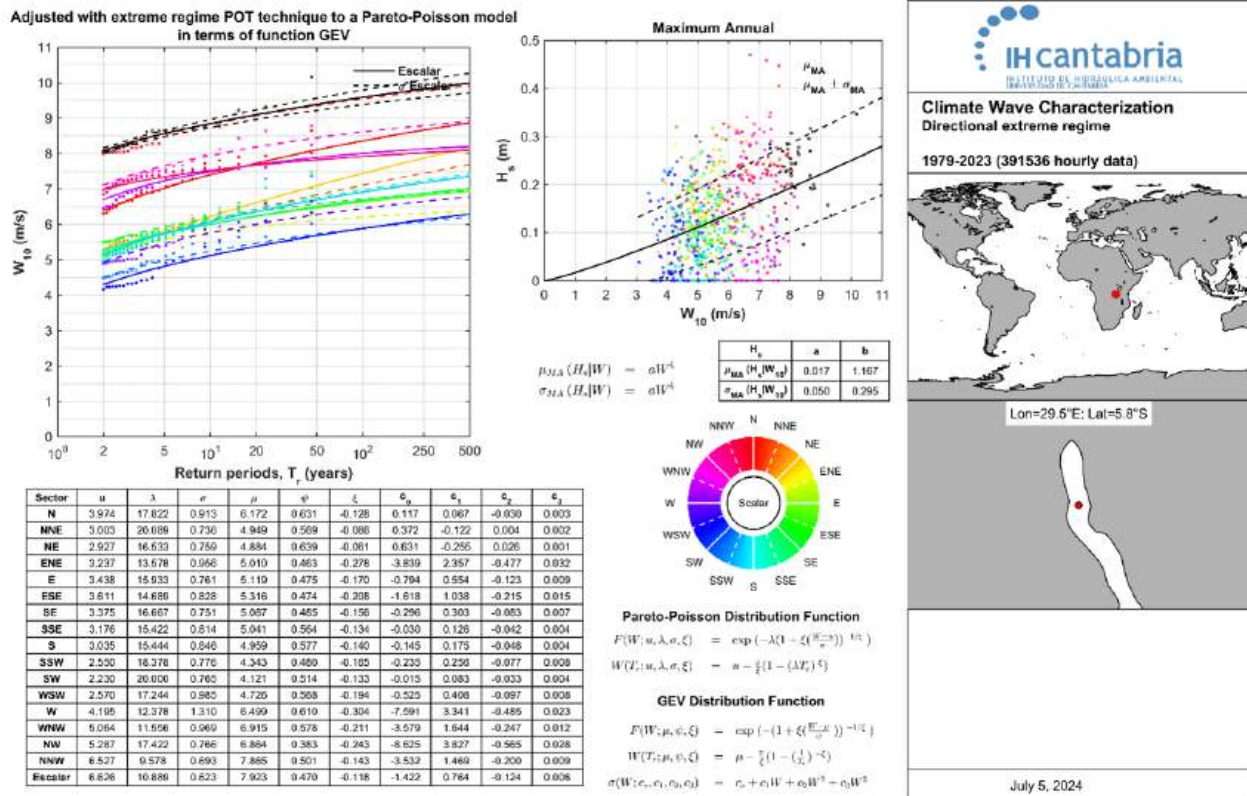


Figura A.68: Régimen extremal direccional nodo 20

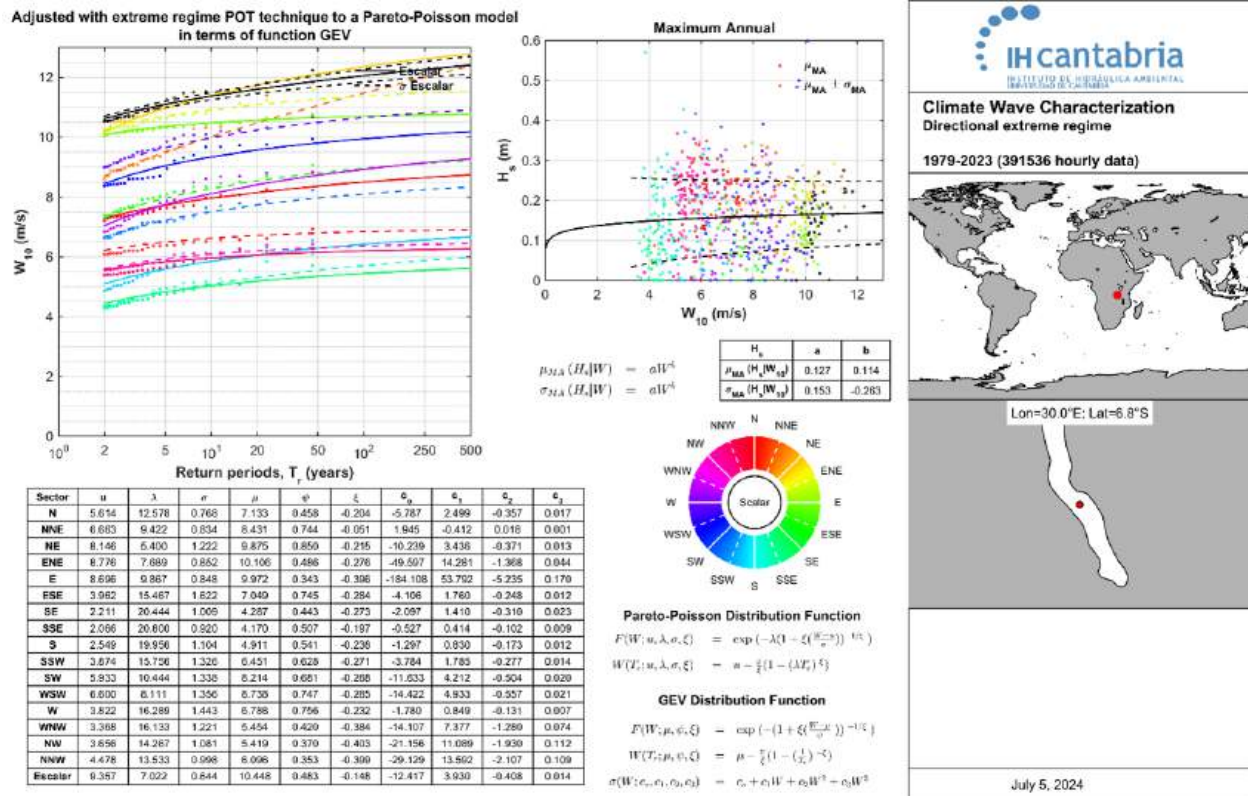


Figura A.69: Régimen extremal direccional nodo 28

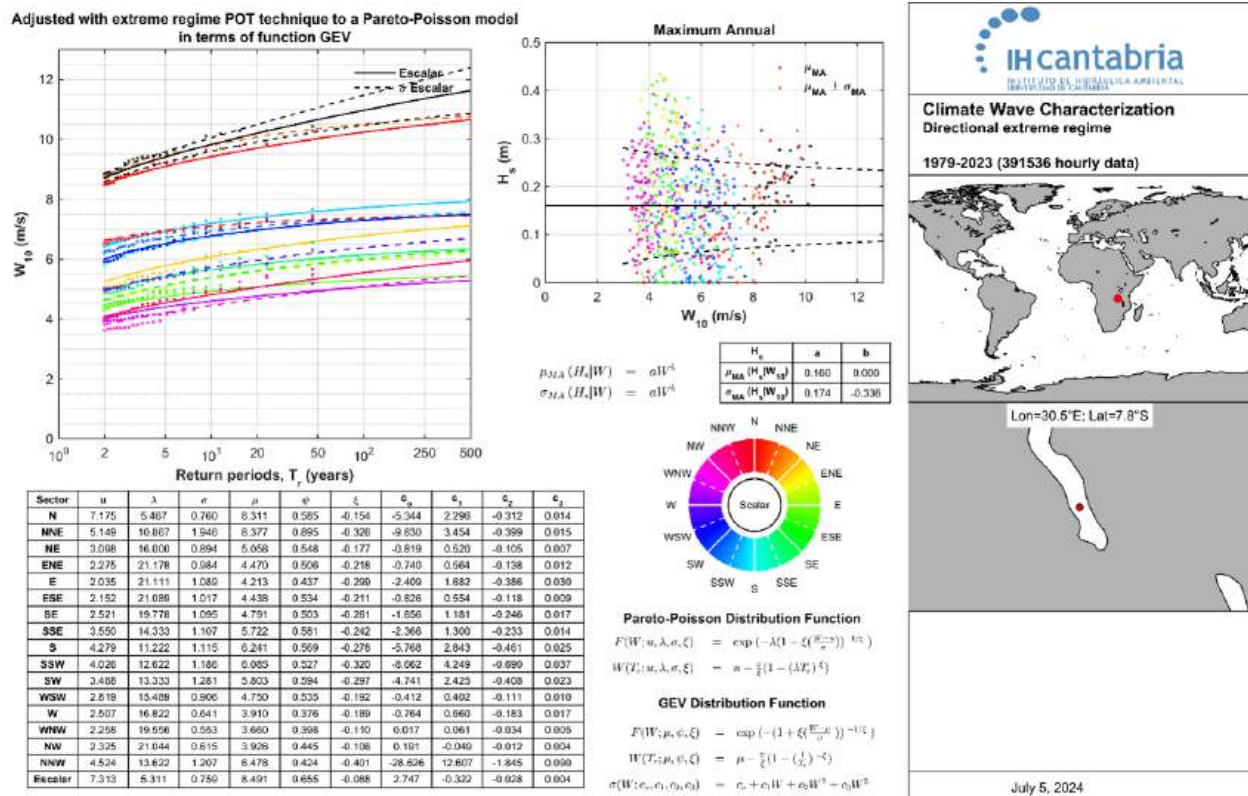


Figura A.70: Régimen extremal direccional nodo 35

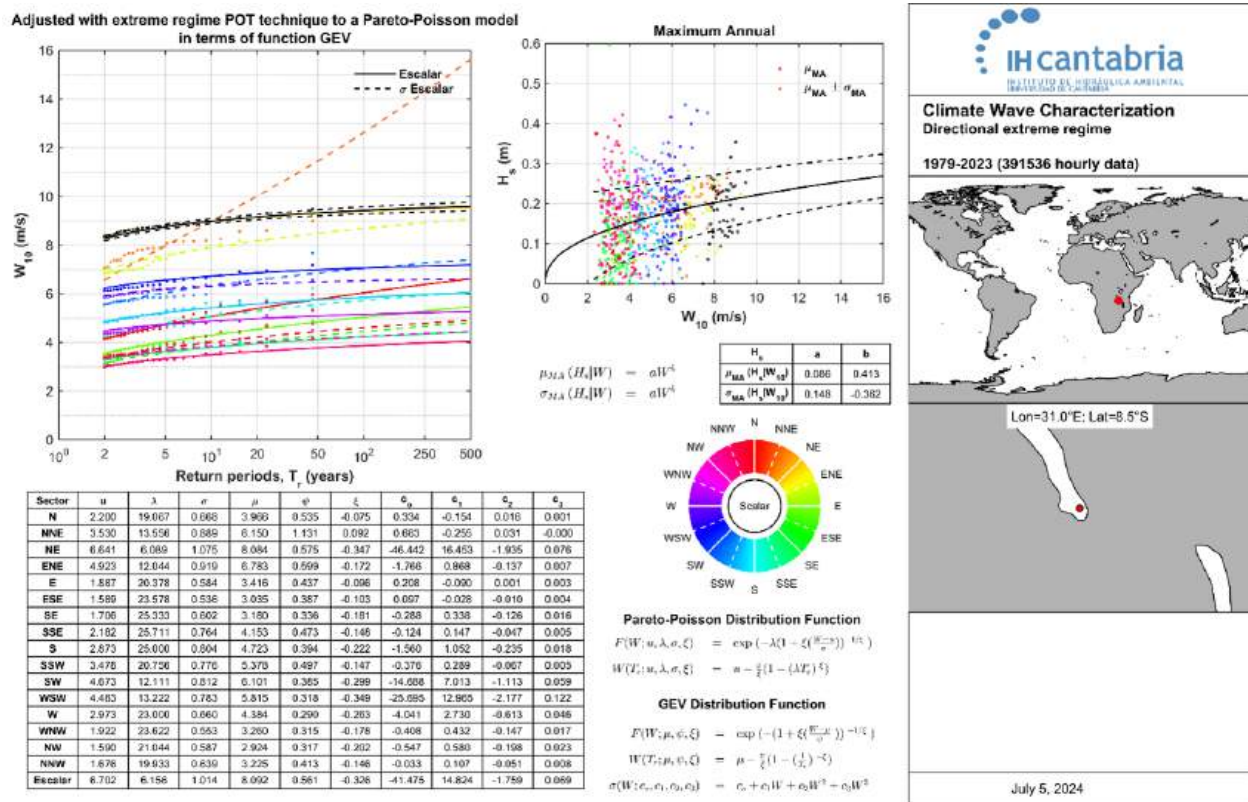


Figura A.71: Régimen extremal direccional nodo 44

A.0.7. Régimen medio y extremal

En esta última sección se muestra el régimen escalar medio y extremo para cada nodo de reanálisis. En las figuras del A.72 al A.78 se muestra el régimen medio y en las figuras del A.79 al A.85 el régimen extremo. Respecto al régimen medio, el nodo 6 presenta, con el 99.9% de los vientos con valores inferiores a aproximadamente 6.5 m/s, un régimen de vientos superior al del nodo 10, donde el 99.9% de los valores son inferiores a 5 m/s. Pero el resto de los nodos tienen un régimen de vientos superior al nodo 6, siendo el máximo el nodo 28. Atendiendo ahora al régimen extremo, en el nodo 6 podemos ver una relación casi lineal entre el viento y la altura de ola, cuando el viento aumenta la altura de ola también lo hace, lo que corrobora lo que se había comentado antes, que el nodo 6 y el punto control muestran una relación entre el régimen de viento y ola. En cambio los nodos 10, 16 y 20 no muestran ninguna relación, y los nodos 28, 35 y 40 muestran una relación pero es solo un hecho matemático, debido a las evidencias que se habían visto antes de que la dinámica en la parte sur del lago no afecta a los patrones en el norte del mismo. Respecto al nodo 6, el periodo de retorno de 500 coincide con un viento de más o menos 12 m/s, que respetando el ajuste conjunto del viento y la altura de ola da alturas de ola de 1 m.

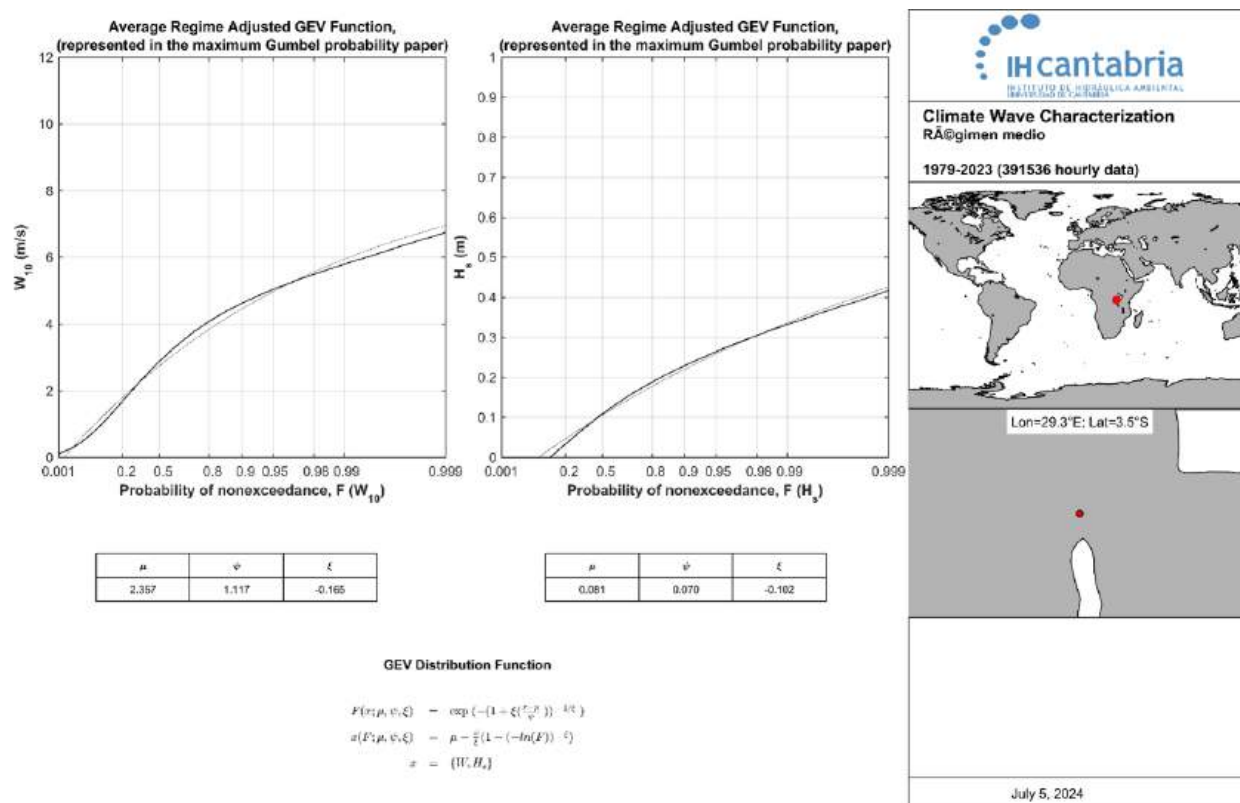


Figura A.72: Régimen medio nodo 6

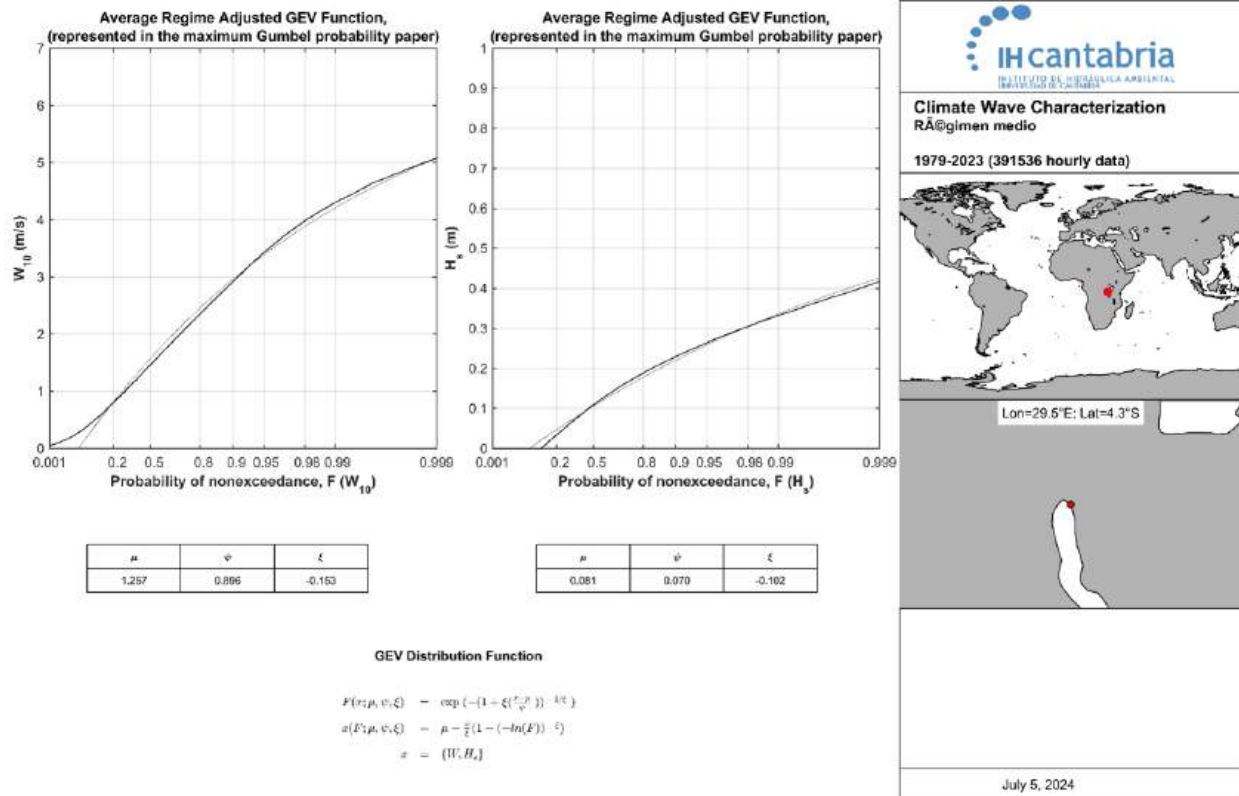


Figura A.73: Régimen medio nodo 10

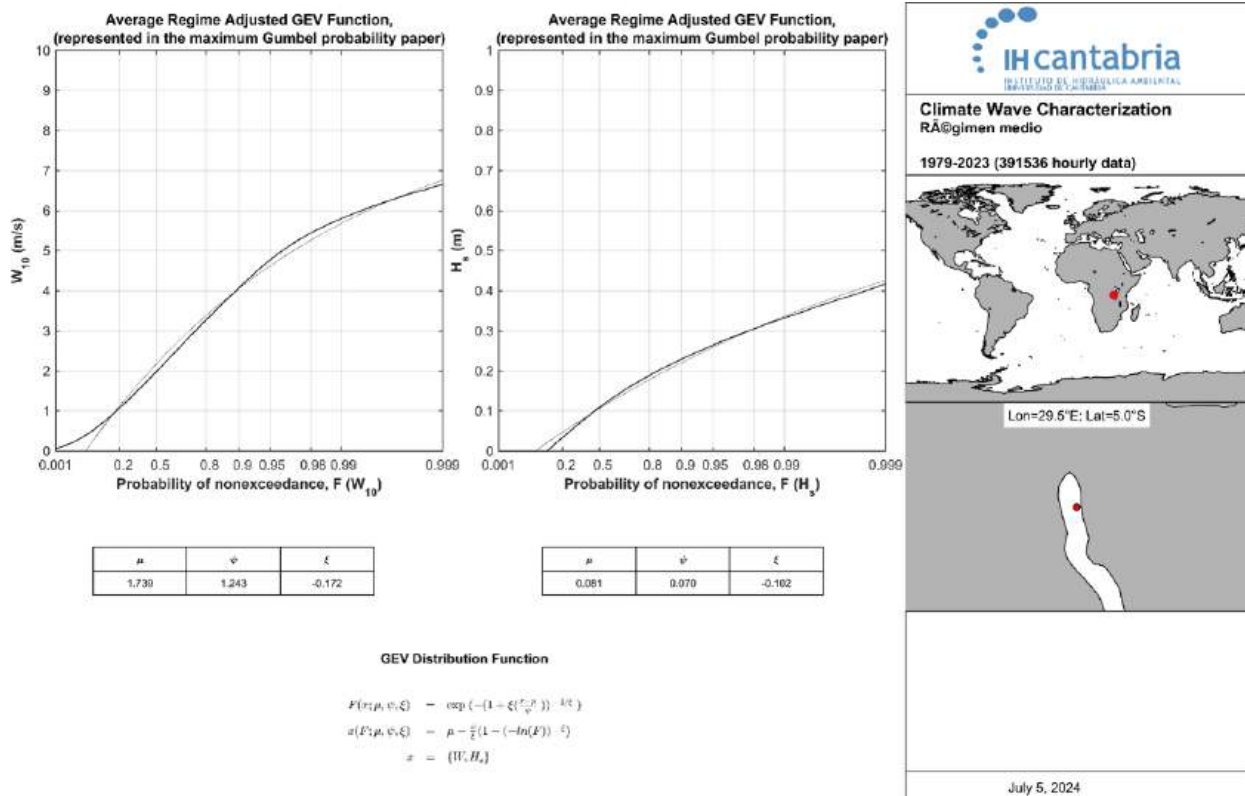


Figura A.74: Régimen medio nodo 16

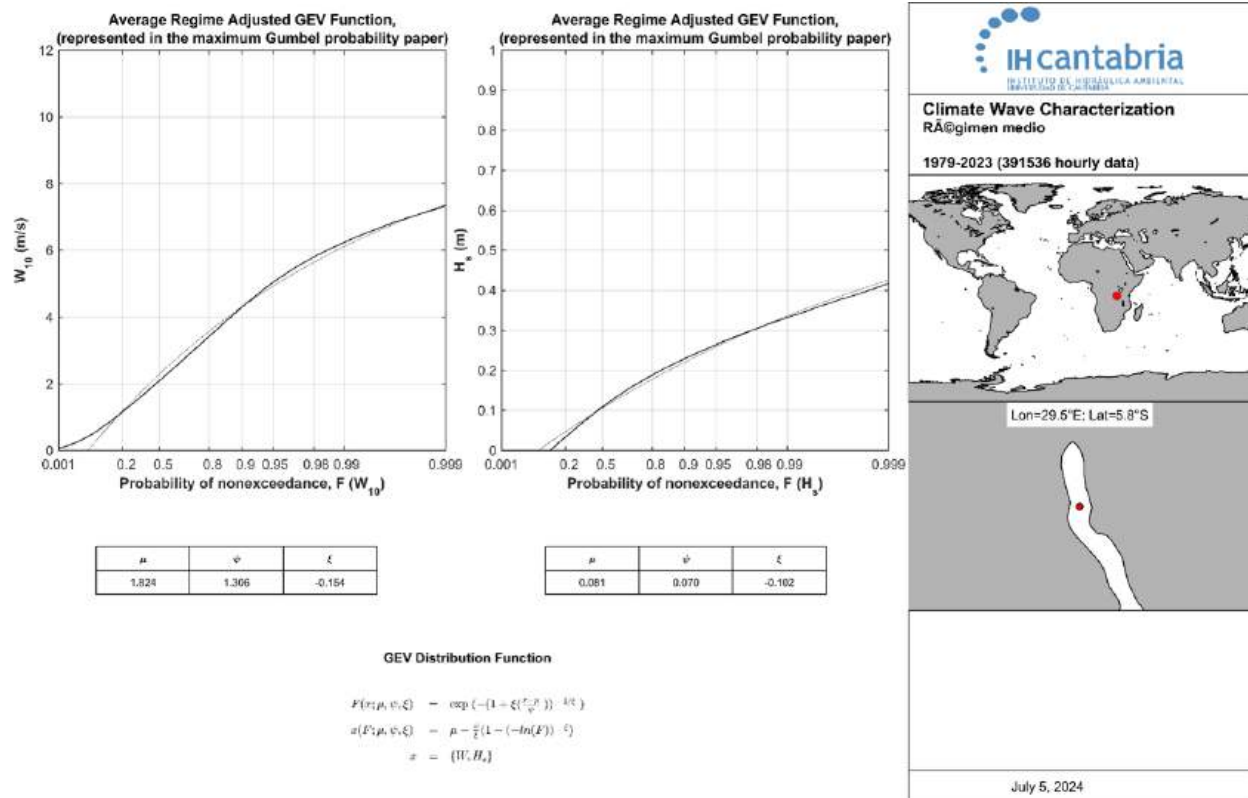


Figura A.75: Régimen medio nodo 20

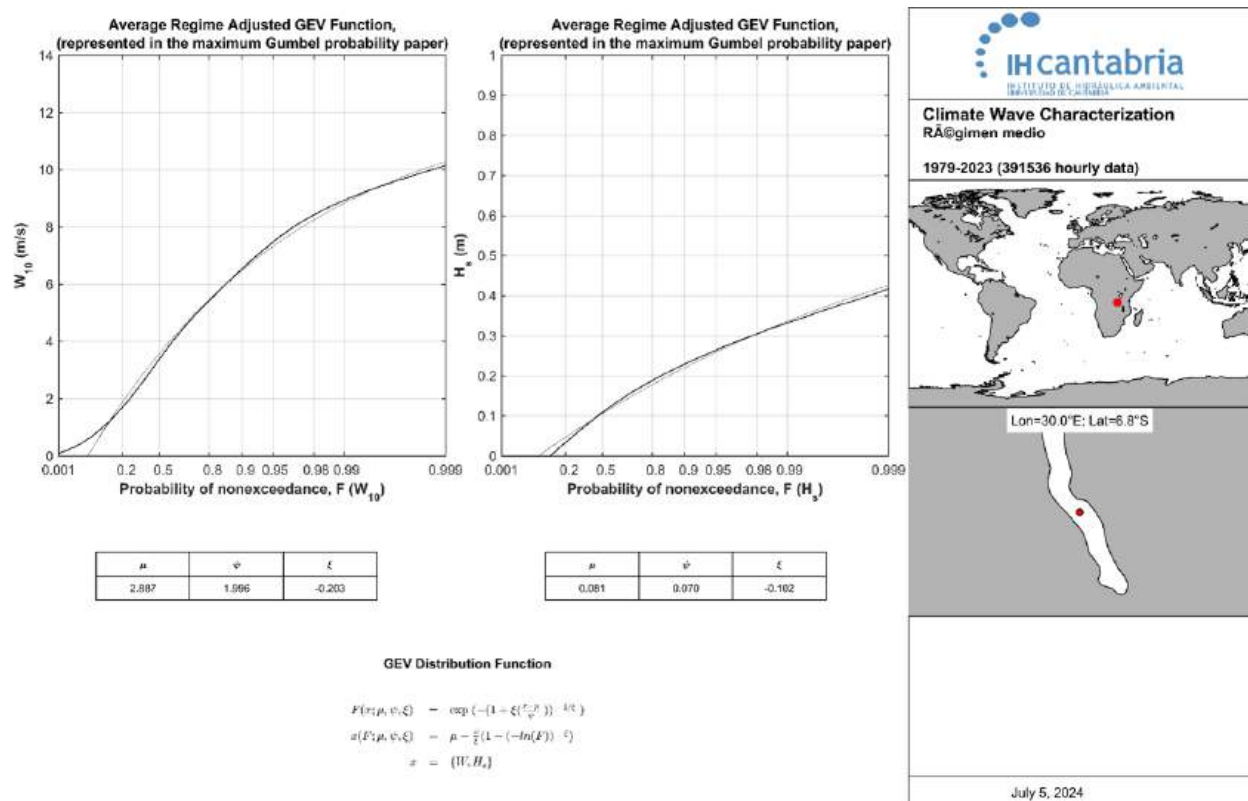


Figura A.76: Régimen medio nodo 28

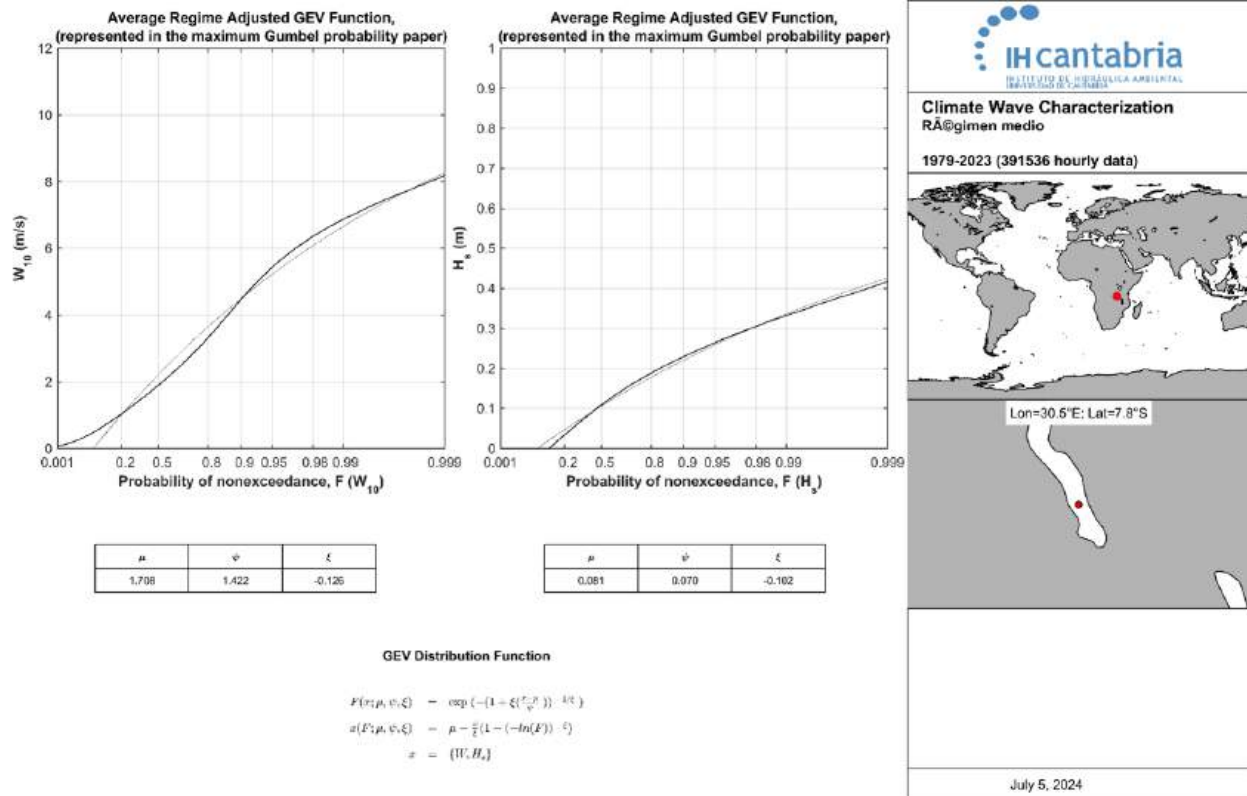


Figura A.77: Régimen medio nodo 35

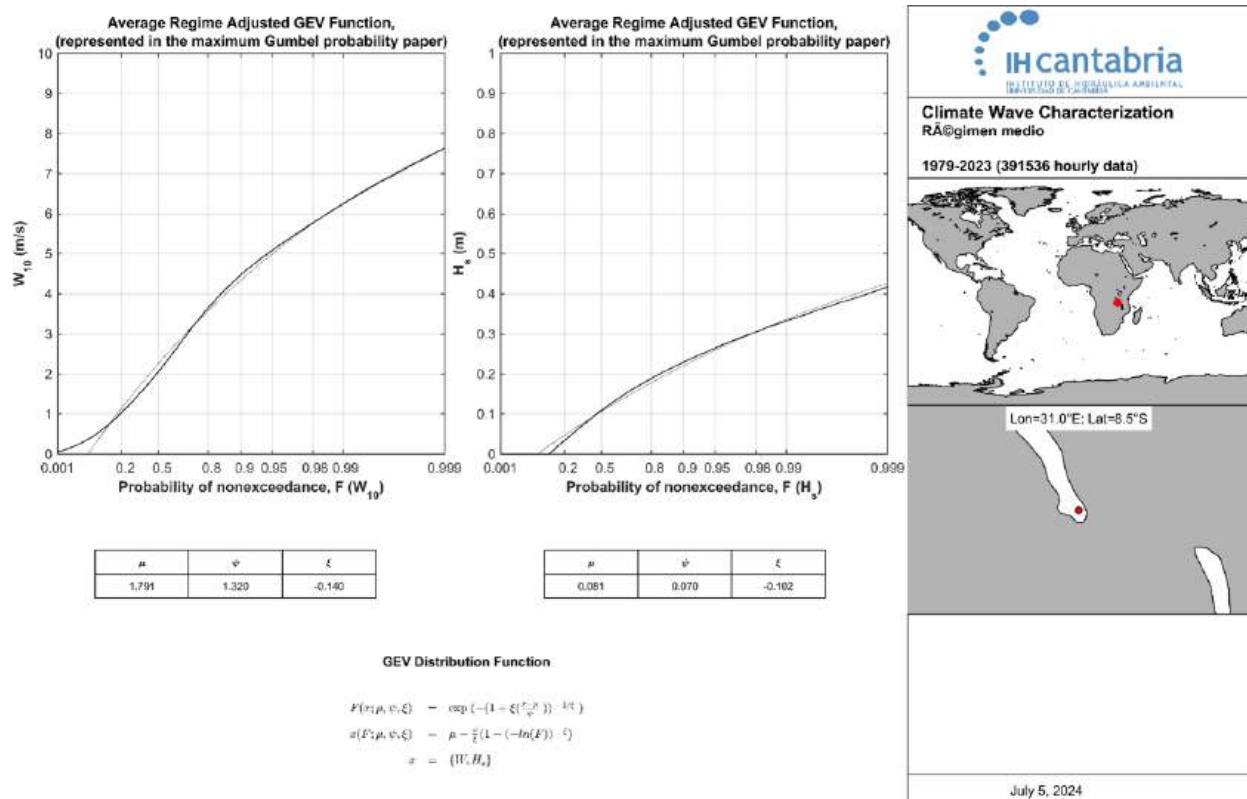


Figura A.78: Régimen medio nodo 44

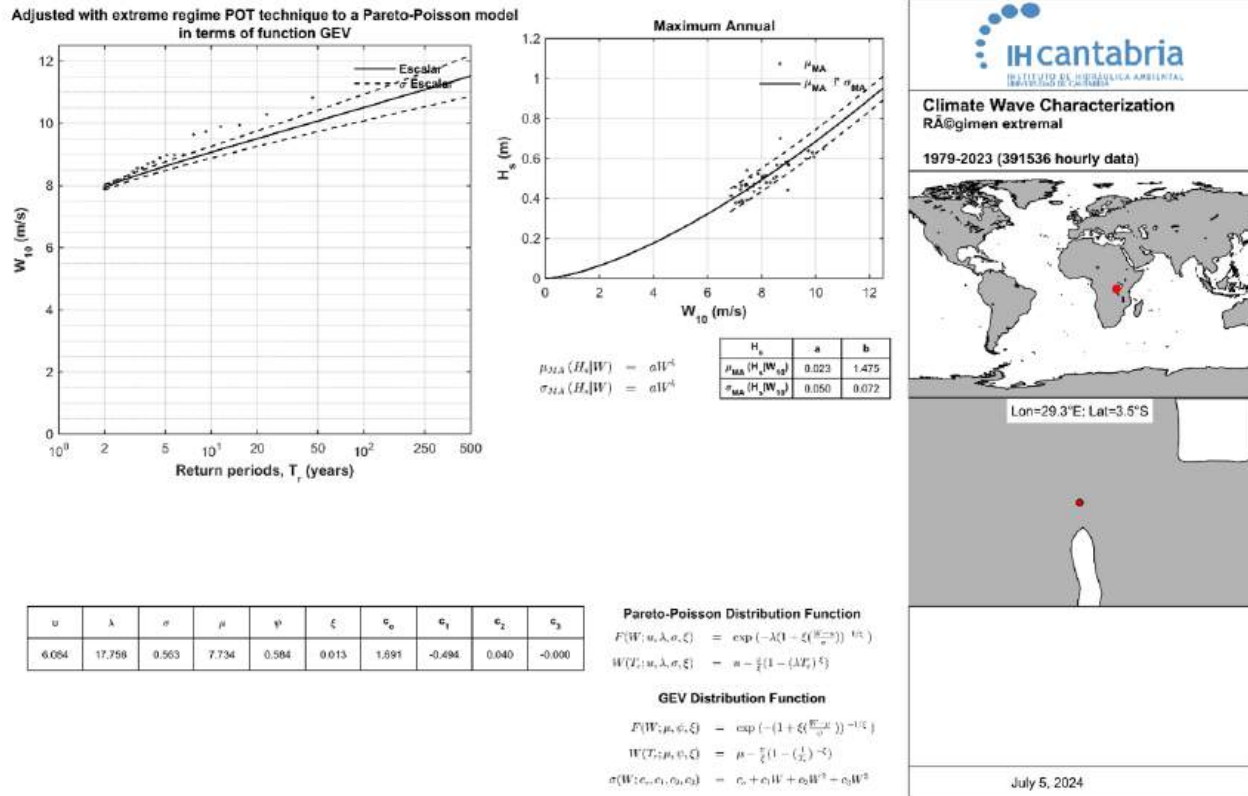


Figura A.79: Régimen extremal nodo 6

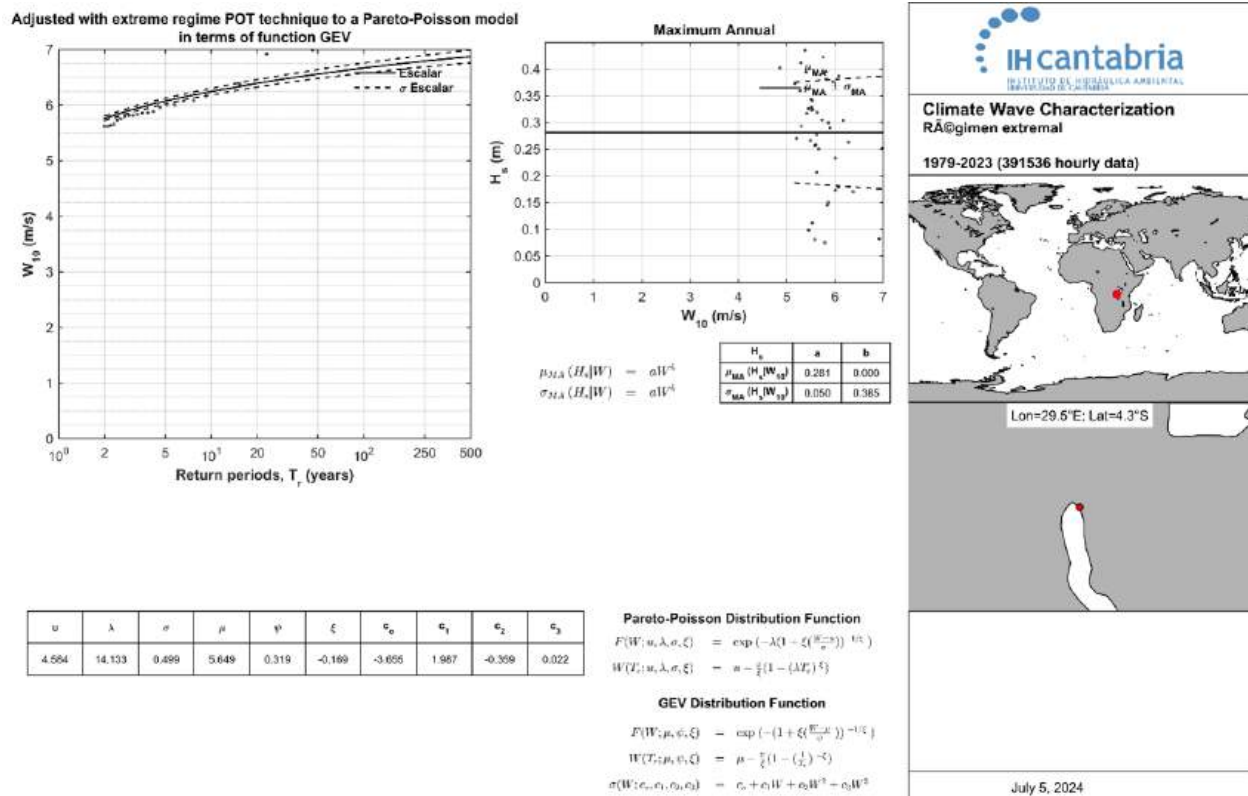


Figura A.80: Régimen extremal nodo 10

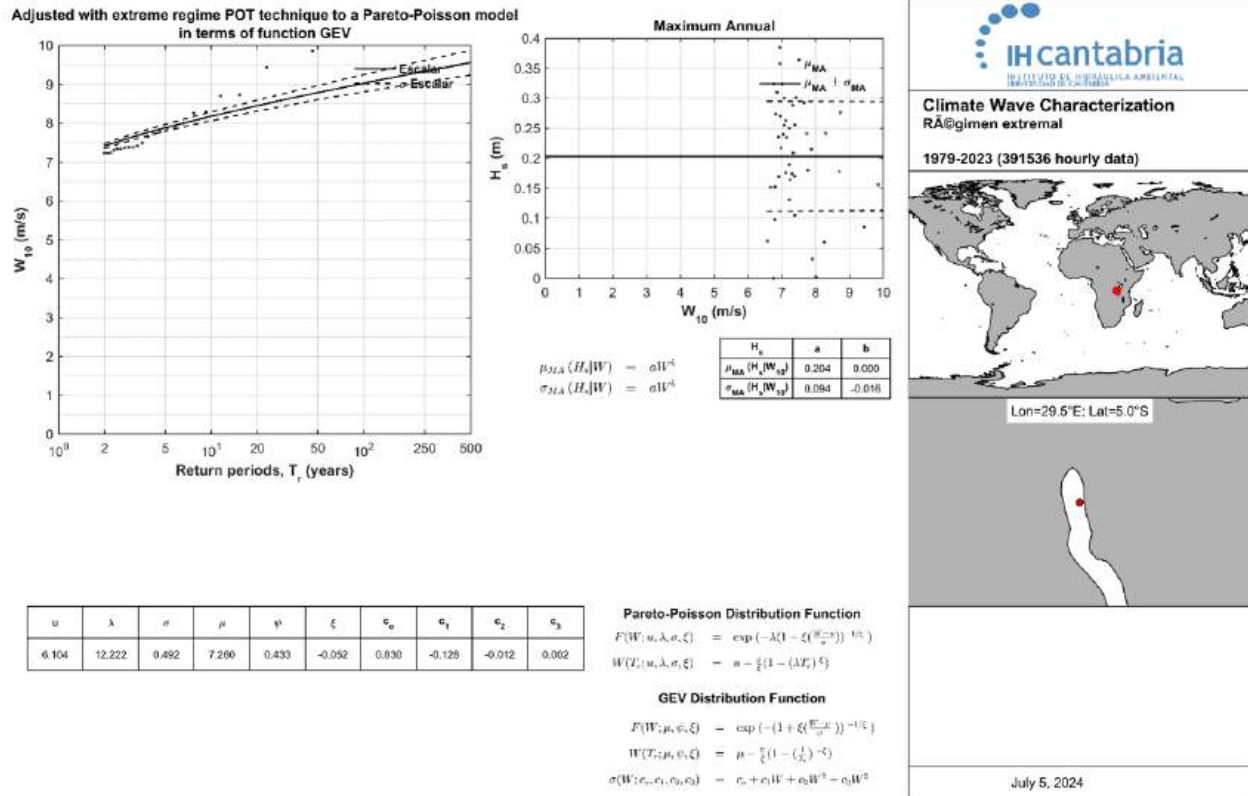


Figura A.81: Régimen extremal nodo 16

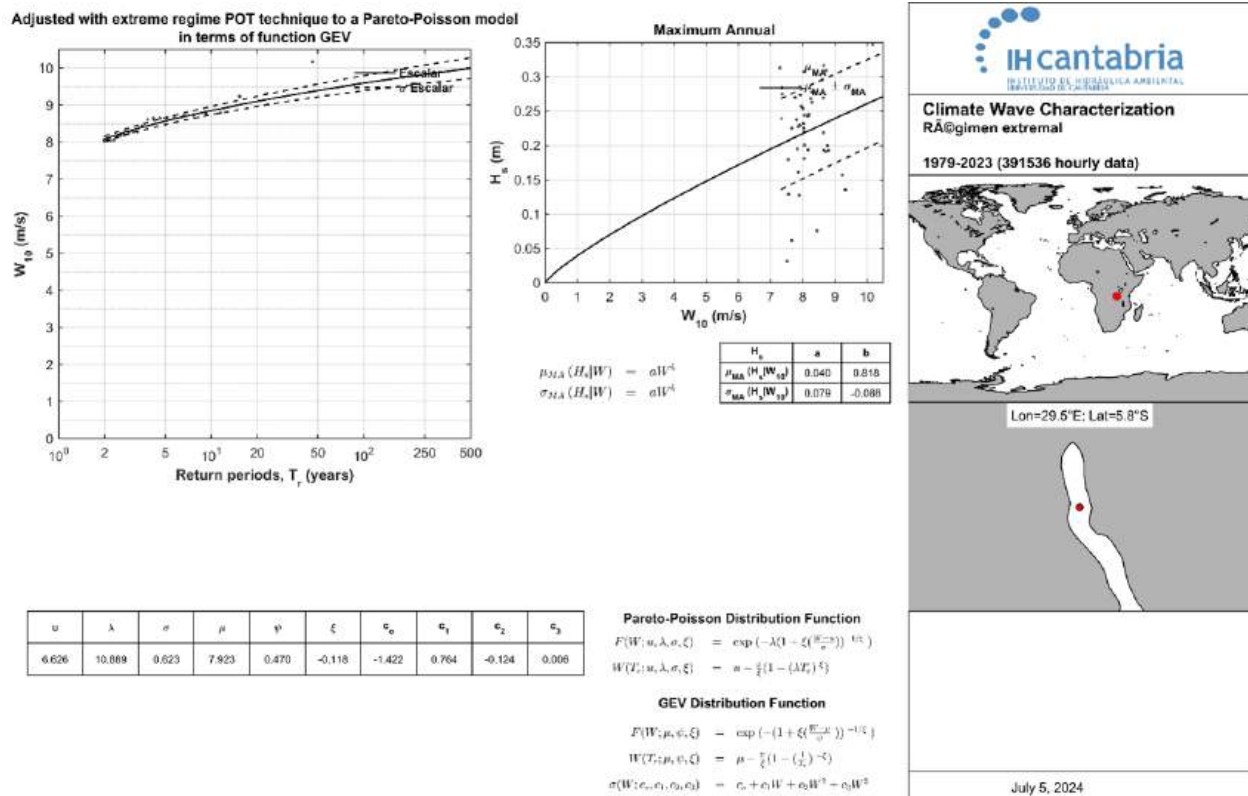


Figura A.82: Régimen extremal nodo 20

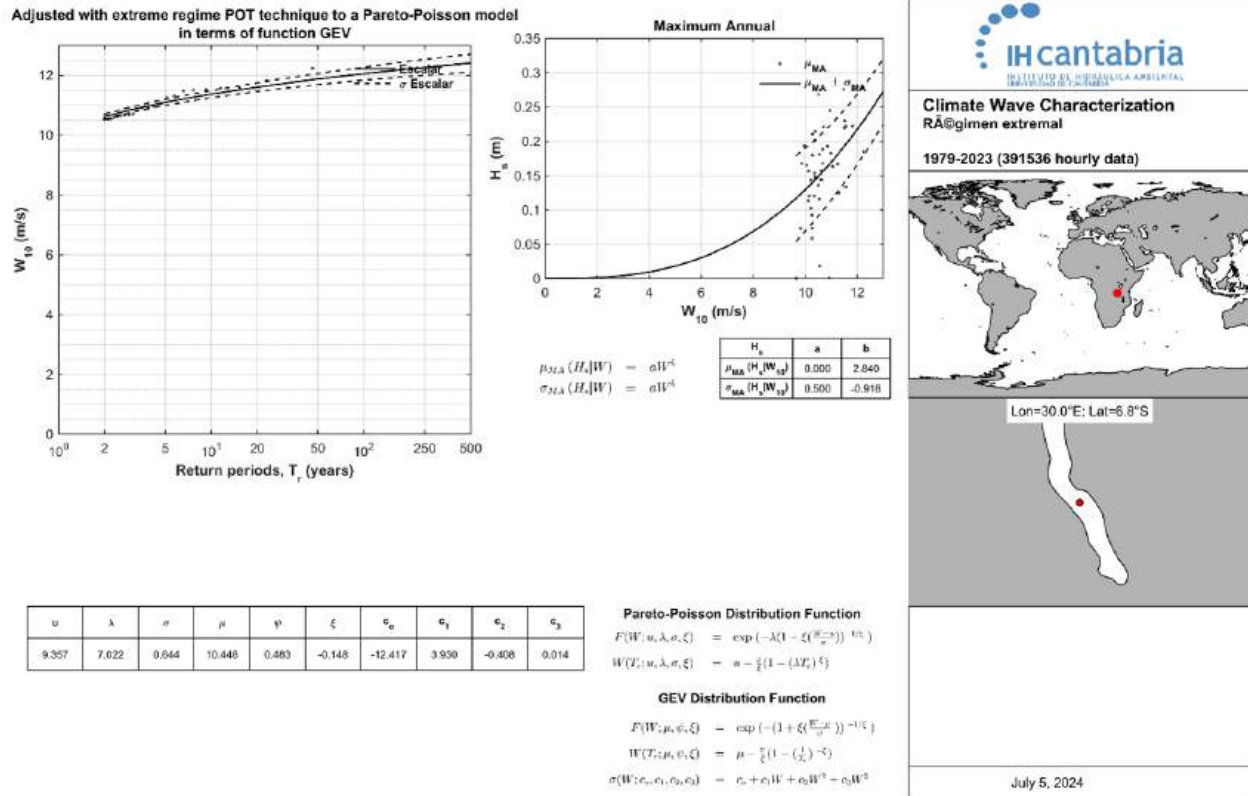


Figura A.83: Régimen extremal nodo 28

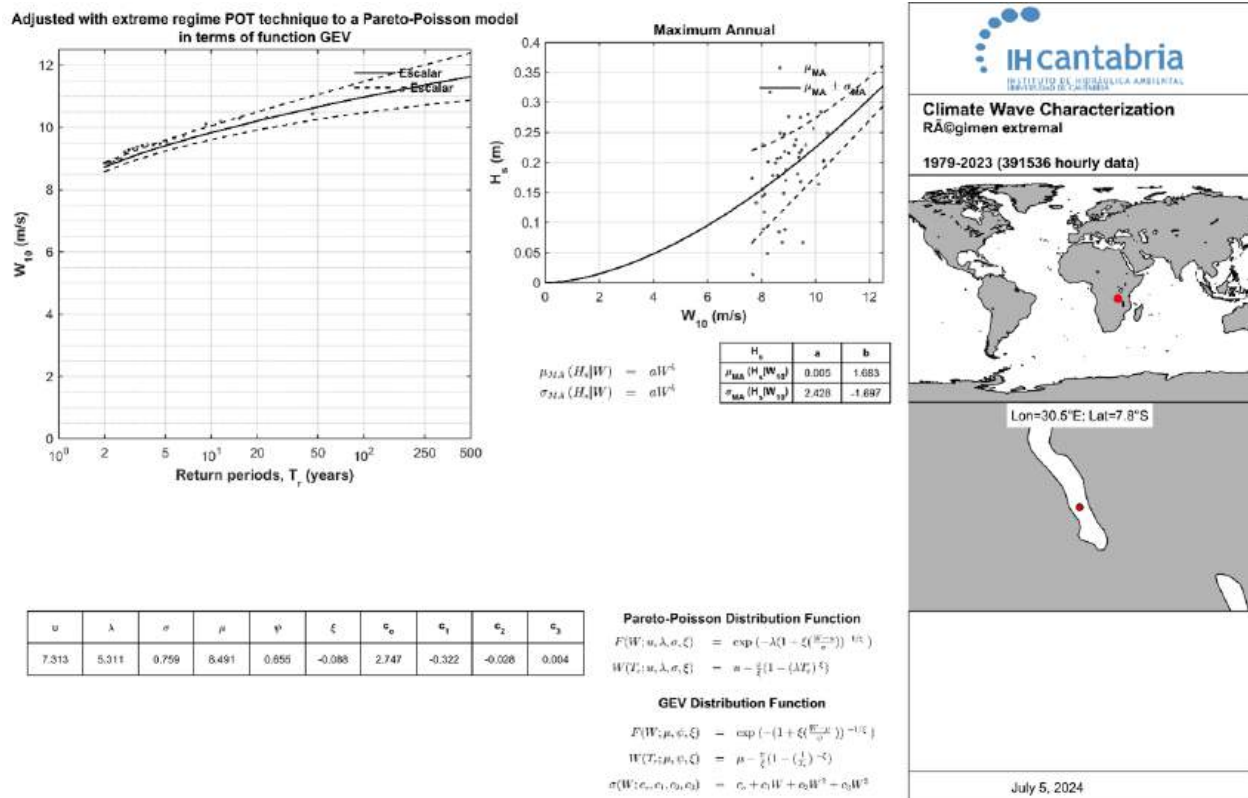


Figura A.84: Régimen extremal nodo 35

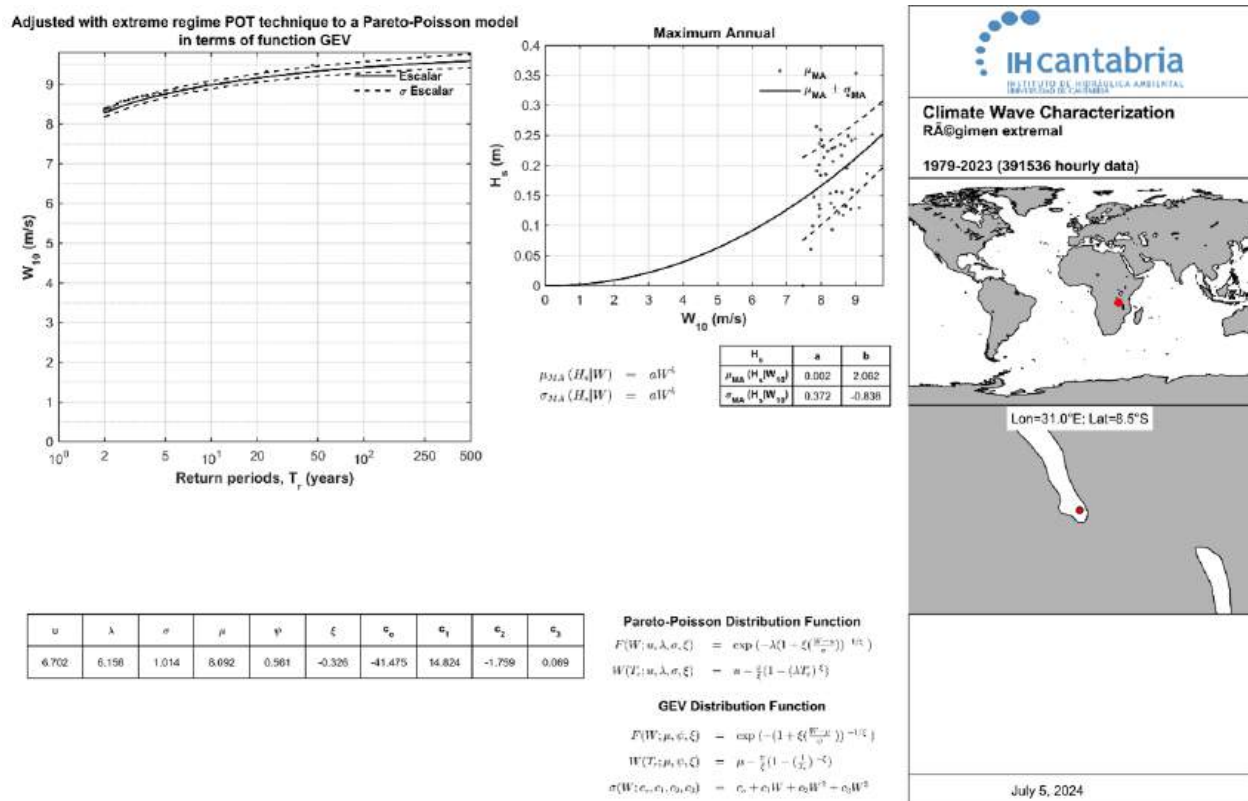


Figura A.85: Régimen extremal nodo 44

Bibliografía

- [1] S.R. Alin, A.S. Cohen, R. Bills, M.M. Gashagaza, E. Michel, J.J. Tiercelin, et al. Effects of landscape disturbance on animal communities in Lake Tanganyika, East Africa Conservation Biology, 13 (5) (1999), pp. 1017-1033, 10.1046/j.1523-1739.1999.96476.x
- [2] Booij, N., Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H. *A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7649–7666, 1999.
- [3] Bray, R. N., Bates, A. D., and Land, J. M. *Dredging: A Handbook for Engineers*. CRC Press, 2009.
- [4] Briggs, M. J. *Wave Forces on Inclined and Vertical Walls*. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 1974.
- [5] Burcharth, H. F., and Hughes, S. A. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. World Scientific, 2000.
- [6] Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas (2011). Coastal Engineering, Vol. 58, N^o 9, pp. 851–862. Elsevier
- [7] Chowdhury, M. R., and Jeng, D.-S. *Wave Hydrodynamics and Coastal Engineering*. World Scientific, 2015.
- [8] Coles, S. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, 2001.
- [9] G.W. Coulter. Fisheries. G.W. Coulter (Ed.), Lake Tanganyika and its life, Oxford University Press, Oxford (1992), pp. 139-150
- [10] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5: The fifth generation ECMWF reanalysis. Recuperado el 2 de julio de 2024, de <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- [11] Q. Gao, S. Chen, C. Yu. Resources use and environmental management across Lake Tanganyika basin, Africa Journal of Subtropical Resources and Environment, 10 (1) (2015), pp. 62-70, 10.19687/j.cnki.1673-7105.2015.01.009
- [12] Gbetkom, P. G. (2024). Lake Tanganyika Basin Water Storage Variations from 2003–2021 for Water Balance and Flood Monitoring. Environmental Monitoring and Assessment, 1-14.<https://doi.org/10.1007/s10661-023-10876-7>
- [13] Gilbert Mubalama Mugisho et al 2024 Environ. Res. Commun. 6 025003. DOI 10.1088/2515-7620/ad23f3

- [14] Guanche, R., Losada, I.J., and Izaguirre, C. *Multivariate statistical modelling of extreme wave heights and periods in the Northeast Atlantic Ocean*. Coastal Engineering, 75, 27–39, 2013.
- [15] Holthuijsen, L.H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007.
- [16] Japan International cooperation agency. (2012). Study on the Port of Bujumbura in Burundi. [Document name if available]. [PADECO Co., Ltd. Nippon Koei Co. Ltd.].
- [17] John S. Irwin, A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability, Atmospheric Environment (1967), Volume 13, Issue 1, 1979, Pages 191-194, ISSN 0004-6981, DOI: .org/10.1016/0004-6981(79)90260-9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004698179902609>
- [18] B. Kelly, E. Mtiti, P.B. McIntyre, Y. Vadeboncoeur Stable isotopes reveal nitrogen loading to Lake Tanganyika from remote shoreline villages Environmental Management, 59 (2) (2017), pp. 264-273, 10.1007/s00267-016-0787-y
- [19] Kotz, Samuel and Nadarajah, Saralees. Extreme Value Theory: An Introduction (2000). Springer
- [20] Pekka Kotilainen, Timo HUTTULA and Anu PELTONEN. (November, 1995). Hydrodynamics of Lake Tanganika: RESULTS OF MARCH 1993-DECEMBER 1994
- [21] O.V. Lindqvist, H. Mölsä & J. Sarvala. (1999, June). Hydrodynamics of Lake Tanganyika: SUMMARY OF THE SCIENTIFIC PROGRAMME 1992-98.
- [22] Liting Xu and Shuhe Zhao and Sophia Shuang Chen and Cheng Yu and Buyun Lei. Analysis of arable land distribution around human settlements in the riparian area of Lake Tanganyika in Africa. Applied Geography (125) (2020), pp. 102344. doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102344. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622818312062>
- [23] Liu, P. L.-F. *Wave Generation and Propagation in Coastal and Ocean Engineering*. Elsevier, 2010.
- [24] Logistics Cluster. Democratic Republic of Congo - Port Kalundu. Disponible en: <https://dlca.logcluster.org/democratic-republic-congo-215-democratic-republic-congo-port-kalundu>. Accedido el 2 de julio de 2024.
- [25] The Study of Master Plan for Port Sector. (2012).
- [26] MATLAB, version 9.10.0 (R2021a), The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2021. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [27] Nicholson, S. E. (2020). Historical and modern fluctuations of Lakes Tanganyika and Rukwa and their relationship to rainfall variability. Quaternary Research, 1-13. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.19>
- [28] H.H. Nkotalu. Lake Tanganyika ecosystem management strategies Aquatic Ecosystem Health and Management, 11 (1) (2008), pp. 36-41, 10.1080/14634980801891373

- [29] V.O. Odongo, D.W. Mulatu, F.K. Muthoni, P.R. van Oel, F.M. Meins, C. van der Tol, et al. Coupling socio-economic factors and eco-hydrological processes using a cascade-modeling approach *Journal of Hydrology*, 518 (2014), pp. 49-59, 10.1016/j.jhydrol.2014.01.012
- [30] PIANC. *Design Principles for Small and Medium Marine Harbors*. PIANC Report No. 123, 2014.
- [31] Pirazzoli, P.A. *Surges, atmospheric pressure and wind-sea waves on the western coast of France*. *Journal of Coastal Research*, 5(4), 709–722, 1989.
- [32] P.D. Plisnier, D. Chitamwebwa, L. Mwape, K. Tshibangu, V. Langenberg, E. Coenen. Limnological annual cycle inferred from physical-chemical fluctuations at three stations of Lake Tanganyika *Hydrobiologia*, 407 (1999), pp. 45-58, 10.1023/a:1003762119873
- [33] Port Access in the Lake Tanganyika.
- [34] Powell, M. J. D. Radial Basis Functions for Multivariable Interpolation: A Review. In: *Algorithms for Approximation*, Springer, 2001.
- [35] Project Information Document. (2018). Páginas 17-18.
- [36] Puertos del Estado. *Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) 1.0-09*. Disponible en: <https://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%201.0-09.pdf>
- [37] ROM 3.1-99 (Recommendations for Maritime Works - Maritime Configuration Projects for Ports; Access Channels and Floating Areas). Puertos del Estado.
- [38] Serrat-Capdevila, A., Lajaunie, M. L., Bonzanigo, L., Figueira, P., Bench, R. (2016). Port Access in the Lake Tanganyika: Key Challenges and Recommendations. Document of the World Bank, Water Global Practice, Africa Region.
- [39] SWAN team. SWAN Team, SWAN User Manual, Delft University of Technology. Available at: <http://swanmodel.sourceforge.net/>
- [40] The Nature Conservancy. (n.d.). ArcGIS Online. <https://tnc.maps.arcgis.com>
- [41] United States Coast Guard (USCG). *Navigation and Vessel Inspection Circular*. NVIC 7-10, 2010.
- [42] Piet Verburg, Bomba Kakogozo, Lawrence Makasa, Stanlaus Muhoza, and Jean-Marie Tomba. (May, 1998). Hydrodynamics of Lake Tanganyika: Results for 1996.
- [43] Piet Verburg, Bomba Kakogozo, Lawrence Makasa, Stanlaus Muhoza, and Jean-Marie Tomba. (May, 1998). Hydrodynamics of Lake Tanganyika: SYNOPSIS AND INTER-ANNUAL COMPARISONS 1993 – 1996.
- [44] World Bank. (2018, March 01). Project Information Document/Integrated Safeguards Data Sheet (PID/ISDS) Concept Stage. Report No: PIDISDSC23954. Lake Tanganyika Transport Program - SOP2 - Burundi (P165119).