

# NAP Costas

Atlas de Dinámicas Marinas  
de Uruguay

Manual de uso



Con el apoyo de:



*Atlas de Dinámicas Marinas de Uruguay*

Manual de Uso

**Autores del documento:**

Marta Ramírez Pérez ([ramirezm@unican.es](mailto:ramirezm@unican.es))

Melisa Menéndez

*Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria  
Grupo de Clima Marino y Cambio Climático  
Santander, España*

**-23 de enero de 2019-**

## ÍNDICE

Glosario de términos.....	4
1. Introducción .....	5
2. Mapas Espaciales.....	5
3. Fichas por ubicación costera .....	7
4. Ficha 1: OLEAJE – Régimen medio.....	12
5. Ficha 2: OLEAJE – Régimen extremal .....	14
6. Ficha 3: NIVEL DEL MAR Y CORRIENTES .....	16

## Glosario de términos

<i>CFS</i>	-	Climate Forecast System.
<i>ASTide</i>	-	Modelo regional de marea del Atlántico Sur.
$H_s$	-	Altura de ola significativa.
$T_p$	-	Periodo de pico del oleaje.
Dir	-	Dirección media del oleaje.
$T_r$	-	Periodo de retorno.
<i>POT</i>	-	Peaks over threshold.
<i>GEV</i>	-	Generalized extreme values.
<i>PDF</i>	-	Probability distribution function
<i>CDF</i>	-	Cumulative distribution function

## 1. Introducción

En este documento se describen los productos generados en este Atlas, así como una guía básica para su uso e interpretación. Los productos presentan dos tipologías: (1) información espacial mediante mapas, y (2) información local mediante fichas por ubicación costera específica.

Para una correcta estimación, tanto de los mapas, como de las fichas climáticas puntuales es necesario disponer de una base de datos suficientemente prolongada en el tiempo (se recomienda al menos 30 años de datos históricos continuos y homogéneos) y validada mediante un control de calidad. Los datos utilizados en este Atlas han sido elaborados por el grupo IMFIA de la Universidad de la República de Uruguay. Para información detallada sobre esta base de datos se remite a los informes específicos elaborados por IMFIA sobre la misma.

Este Atlas ha sido desarrollado por el equipo de Clima Marino y Cambio Climático de IHCantabria dentro del proyecto "*Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay*". En particular, dentro de la tarea asociada a la recopilación de bases de datos históricas de las dinámicas marinas. Las demás tareas, dentro de este proyecto, se sustentan sobre la información del Atlas y consisten en la estimación de cambios en las dinámicas marinas, ante diferentes escenarios de emisión de gases invernadero y horizontes, para la evaluación de los impactos en la costa (principalmente por inundación y erosión), tanto a escala nacional, como para una selección de casos de estudio locales. Los resultados de estas tareas estarán también disponibles a través del MVOTMA.

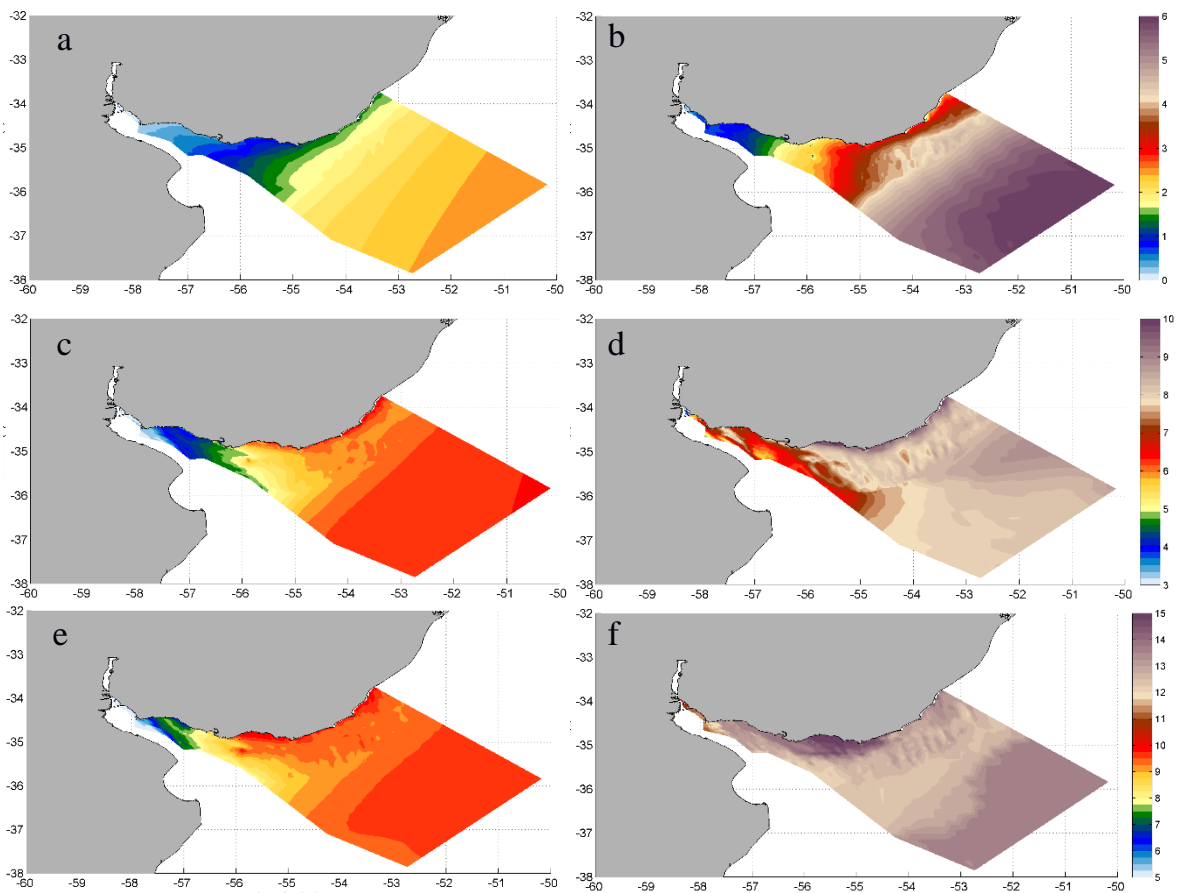
## 2. Mapas Espaciales

Los mapas espaciales son representaciones en formato vectorial (*shapefile*) que permiten visualizar la distribución espacial de las distintas variables de dinámica marina en el dominio marítimo de Uruguay. Estos mapas se han generado a partir de la base de datos desarrollada por IMFIA, combinando los resultados en tres mallas de cálculo de distinta resolución: una malla de mayor resolución (~1 km) que abarca la franja costera y el Río de la Plata medio e interior; otra malla que cubre la plataforma continental y el Río de la Plata exterior (resolución de ~3 km) y, por último, una tercera malla de ~15 km de resolución que cubre el resto del espacio marítimo de Uruguay.

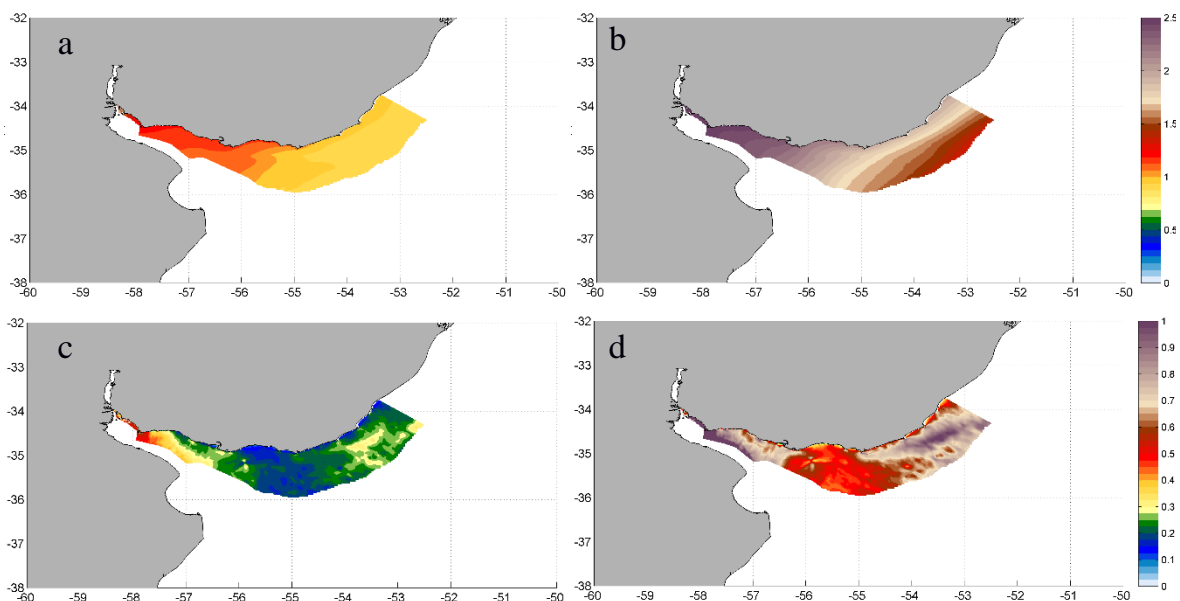
Las variables que se han representado consisten en climatologías de los parámetros del estado de mar del oleaje: altura de ola significativa (m), periodo medio (s) y periodo de pico (s), altura del nivel del mar (m) e intensidad de la corriente (m/s), como se muestran en las figuras 1 y 2.

Se han generado dos mapas espaciales para cada una de estas variables: (i) un mapa con los valores medios anuales en cada punto de la malla, característico de las condiciones medias; y (ii) un segundo mapa con el valor del percentil del 99%, a fin de mostrar las magnitudes de estas variables ante condiciones extremas en la zona de estudio.

Es importante señalar que las variables de nivel del mar y corrientes no están disponibles en la malla de ~15 km de resolución por lo que, en estos casos, los mapas espaciales se limitan a la zona de la plataforma continental, costa uruguaya y Río de la Plata (figura 2).



**Figura 1. Mapas espaciales de (a,b) altura de ola significativa (m), (c,d) periodo medio (s) y (e,f) periodo de pico (s) en el dominio marítimo de Uruguay. La columna izquierda corresponde a los valores medios mientras que la de la derecha, al percentil del 99%, estimados para el periodo 1985-2016.**

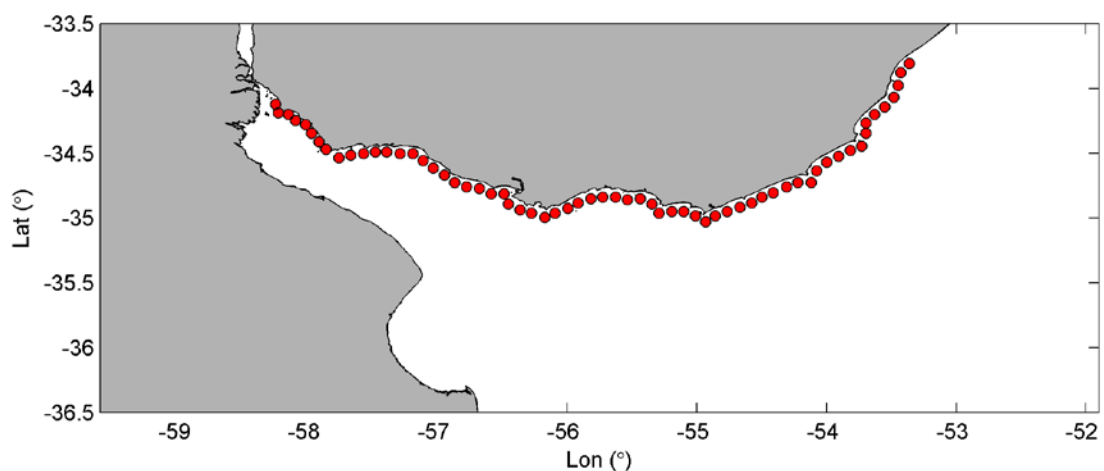


**Figura 2.** Mapas espaciales de (a,b) nivel del mar (m) y (c,d) intensidad de la corriente (m/s) en la franja costera y plataforma continental de Uruguay. La columna izquierda corresponde a los valores medios anuales mientras que la de la derecha, al percentil del 99% para el periodo 1985-2016.

### 3. Fichas por ubicación costera

Las fichas consisten en un cuadro resumen con información sintetizada sobre el Clima Marítimo de las variables oleaje, nivel del mar y corrientes, y su leyenda asociada (en formato PDF).

Se han seleccionado 63 ubicaciones costeras, distribuidas de forma homogénea a lo largo de toda la costa de Uruguay (figura 3).



**Figura 3.** Mapa con la localización de los 63 puntos en los que se han generado las Fichas Climáticas.



En la tabla 1 se detalla el índice establecido, las coordenadas y profundidad de cada una de las ubicaciones seleccionadas.

Indice	Lat	Lon	Prof. (m)	Indice	Lat	Lon	Prof. (m)
1	-33.8088	-53.3607	13.44	33	-34.8473	-55.8174	10.24
2	-33.8758	-53.4277	12.28	34	-34.8808	-55.9179	8.83
3	-33.9763	-53.4500	15.83	35	-34.9255	-55.9961	9.70
4	-34.0656	-53.4835	17.79	36	-34.9590	-56.0966	8.91
5	-34.1438	-53.5505	18.14	37	-34.9925	-56.1747	9.25
6	-34.1996	-53.6287	14.75	38	-34.9590	-56.2752	8.11
7	-34.2666	-53.6957	13.33	39	-34.9366	-56.3646	8.07
8	-34.3448	-53.6957	18.62	40	-34.8920	-56.4539	7.25
9	-34.4453	-53.7292	24.36	41	-34.8138	-56.4874	6.01
10	-34.4788	-53.8185	21.70	42	-34.8138	-56.5879	8.28
11	-34.5234	-53.9078	20.80	43	-34.7691	-56.6773	7.21
12	-34.5681	-53.9972	17.04	44	-34.7579	-56.7778	7.34
13	-34.6351	-54.0753	17.18	45	-34.7244	-56.8671	7.41
14	-34.7244	-54.1200	24.40	46	-34.6686	-56.9453	7.26
15	-34.7244	-54.2205	23.06	47	-34.6128	-57.0346	6.26
16	-34.7579	-54.3098	26.65	48	-34.5569	-57.1128	4.72
17	-34.8026	-54.4104	22.71	49	-34.5011	-57.1909	4.06
18	-34.8361	-54.4997	27.53	50	-34.5011	-57.2914	3.57
19	-34.8808	-54.5779	21.99	51	-34.4899	-57.3919	3.57
20	-34.9143	-54.6672	23.04	52	-34.4899	-57.4813	3.67
21	-34.9478	-54.7677	21.76	53	-34.5011	-57.5706	4.19
22	-34.9813	-54.8571	23.26	54	-34.5123	-57.6711	4.41
23	-35.0260	-54.9352	27.64	55	-34.5346	-57.7605	3.86
24	-34.9813	-55.0134	22.62	56	-34.4676	-57.8610	5.82
25	-34.9478	-55.1027	20.46	57	-34.4118	-57.9168	5.72
26	-34.9478	-55.1920	19.44	58	-34.3448	-57.9726	3.41
27	-34.9590	-55.2925	20.46	59	-34.2778	-58.0173	5.15
28	-34.8920	-55.3484	16.10	60	-34.2443	-58.0955	2.28
29	-34.8473	-55.4377	10.86	61	-34.1996	-58.1513	4.75
30	-34.8585	-55.5382	13.42	62	-34.1884	-58.2295	3.56
31	-34.8361	-55.6276	12.25	63	-34.1214	-58.2518	2.38
32	-34.8361	-55.7281	10.77				

**Tabla 1. Índice, coordenadas y profundidad de las 63 localizaciones analizadas.**

De forma genérica se han definido 3 fichas tipo:

- Ficha 1: OLEAJE – Régimen medio:

El régimen medio define las condiciones climáticas usuales de una determinada variable. Generalmente se refiere a la distribución estadística de una o varias variables de forma combinada (distribución conjunta). Se define por tanto como el conjunto de estados de oleaje de mayor probabilidad de ocurrencia y está ligado con las actividades más comunes de navegación y costeras (por ejemplo, la operatividad en los puertos).

En esta ficha resumen se presentan distintos aspectos relativos al régimen medio del oleaje: la distribución del oleaje por direcciones, la relación entre altura de ola significativa y periodo de pico, la probabilidad asociada a diferentes magnitudes de la altura de ola significativa y los estadísticos más comunes de la altura de ola significativa para cada mes.

- Ficha 2: OLEAJE - Régimen extremal:

El régimen extremal del oleaje tiene como objetivo caracterizar los eventos asociados a temporales marítimos desde el punto de vista probabilístico. Para ello, se basa en el análisis de valores atípicos muy elevados (máximos) y su distribución estadística de extremos asociada, lo que permite la estimación de la magnitud de una variable asociada a lo que se denomina periodo de retorno (intervalo medio de tiempo al cabo del cual se igualará o superará un suceso de una determinada magnitud). El régimen extremal del oleaje está ligado a la vida útil de las estructuras costeras, así como asociado a impactos costeros de erosión e inundación.

En esta ficha se muestra la relación entre la magnitud de la altura de ola significativa y periodos de retorno estimados, así como la relación existente entre los máximos históricos de la altura de ola significativa y el periodo de pico o el nivel del mar.

- Ficha 3: NIVEL DEL MAR Y CORRIENTES:

La ficha resumen referente al nivel del mar y corrientes asociadas conjuga descripciones del régimen medio y extremal del nivel del mar junto con la distribución direccional de las corrientes marinas (promediadas a lo largo de la columna de agua). Es evidente que las condiciones medias asociadas a las corrientes pueden condicionar actividades marítimas, mientras que para el nivel del mar condicionan notablemente la ubicación de la línea de costa. Por otra parte, los niveles extremos del nivel del mar están estrechamente ligados a fenómenos de inundación costera.

En esta ficha se presenta la distribución de la magnitud de corrientes por direcciones, los estadísticos básicos del nivel del mar mes a mes, y la probabilidad de ocurrencia de las condiciones medias y extremas del nivel del mar.

Las fichas están constituidas por una serie de figuras y valores numéricos con información climática, así como un panel lateral derecho con información básica sobre la ubicación costera analizada e información relativa a la realización de la ficha. A continuación, se describen los paneles laterales derechos (figura 4), ya que siguen un patrón común para todas las fichas.

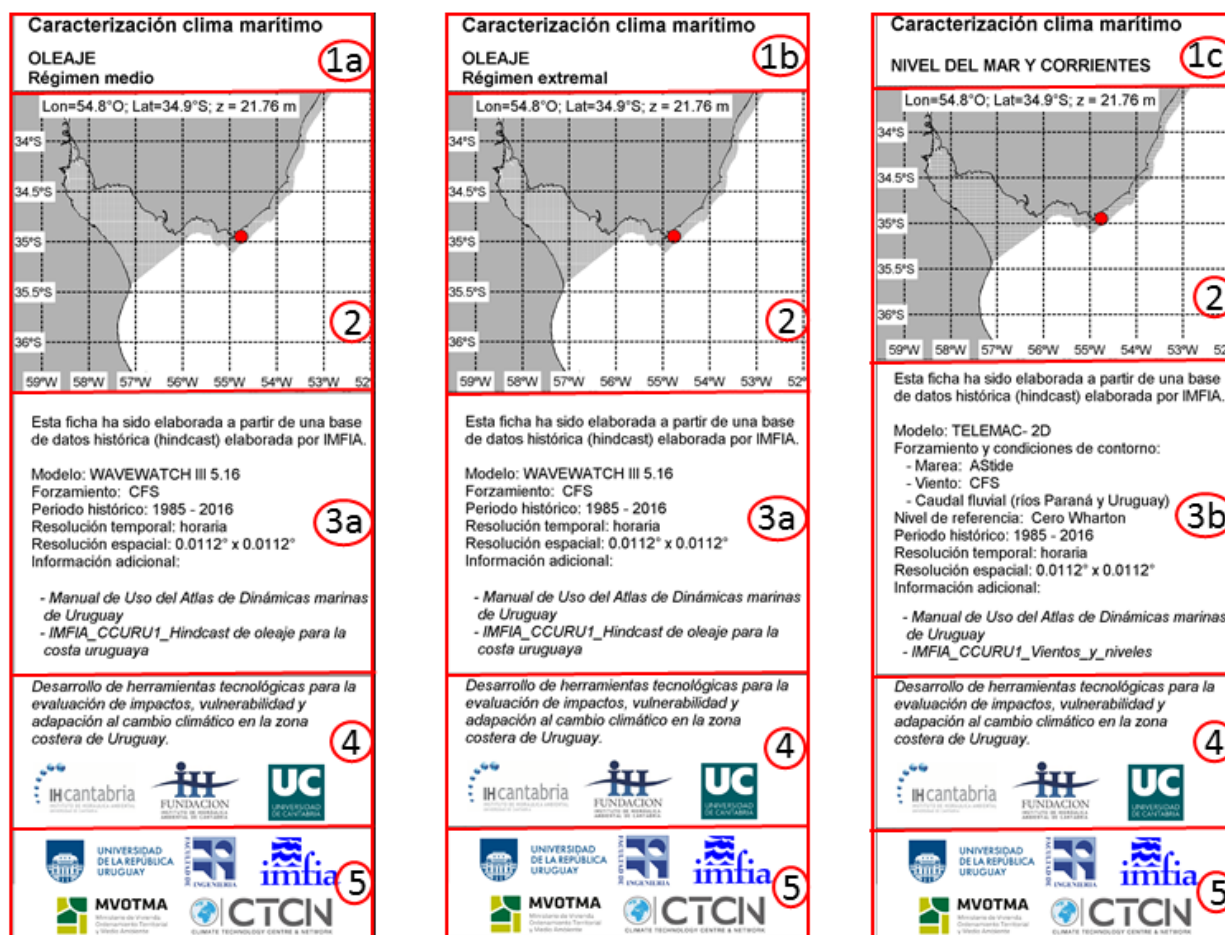


Figura 4. Panel de información lateral para las tres fichas elaboradas.

El panel lateral derecho consta de 5 cajas o paneles claramente delimitados como se muestran en la Figura 4:

En el panel superior (1) aparece el título de la ficha “Caracterización del clima marítimo”, así como la/s variable/s que se analiza/n (es decir, oleaje o nivel y corrientes) y, por último, en el caso de la variable oleaje, la tercera línea especifica el régimen analizado en la ficha (régimen medio o extremal). El siguiente panel (2) muestra un mapa general de la costa de Uruguay con todos los nodos de la malla numérica de mayor resolución, de la cual se ha extraído la información necesaria para el desarrollo de las fichas. El círculo rojo indica la ubicación del punto que se está caracterizando, además de mostrar sus coordenadas y la profundidad a dicha localización.

En el tercer panel (3) se presenta información de distinta índole. En primer lugar, se nombra la institución que ha desarrollado la base de datos de hindcast de dinámicas marinas en Uruguay (es decir, el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República Oriental de Uruguay). A continuación, se aporta información relevante sobre los modelos y los forzamientos utilizados para generar dichas bases de datos, así como su resolución espacial ( $0.0112^\circ$  equivale a 1 km aproximadamente) y temporal (horaria, con cobertura desde 1985 a 2016):

3a) La serie histórica de oleaje en la costa se ha reconstruido a partir de propagaciones hechas con el modelo WaveWatch III versión 5.16, utilizando como forzamiento atmosférico los campos de viento en superficie de CFS (CFSR (1979-2010) y CFSv2 (2011-2016) e incluyendo las variaciones de nivel del mar históricos, con una resolución espacial entre 0.2 y 0.3 grados).

3b) La serie histórica de nivel del mar y corrientes se ha generado a partir del modelo 2D Telemac, utilizando como forzamientos la marea astronómica (que, a su vez, ha sido simulada con un modelo regional del Atlántico Sur desarrollado en el IMFIA, ASTide) y los vientos CFS (con resolución horizontal de  $0.2^\circ - 0.3^\circ$ ). Como condiciones de contorno utiliza los caudales medios diarios de los ríos Paraná y Uruguay. Los datos de nivel se expresan respecto al nivel de referencia Cero Wharton.

Por último, se hace referencia a dos documentos donde se puede encontrar información adicional sobre las bases de datos y las fichas:

- El manual de uso del atlas (este documento), en donde se detalla el contenido de las fichas.
- El informe técnico de las bases de datos de hindcast de oleaje y de nivel y corrientes desarrolladas por IMFIA. En estos documentos se describen de forma detallada las fuentes de datos utilizadas, las metodologías, los modelos empleados, así como la calibración y validación de las bases de datos generadas.

El cuarto panel (4) indica el nombre del proyecto para el que se han elaborado las fichas climáticas, así como los logos de las instituciones implicadas en el desarrollo de este Atlas. El panel inferior (5) muestra los logos de los participantes y financiadores del proyecto.

Un ejemplo de estas fichas se muestra y describe en detalle en los siguientes apartados.

#### 4. Ficha 1: OLEAJE – Régimen medio

En la figura 5, se muestra un ejemplo de la ficha indicando cada panel de forma numerada. En el panel 1 se muestra la rosa direccional del parámetro del oleaje altura de ola significativa, con sectores direccionales de  $22.5^\circ$ . Los sectores de color indican diferentes magnitudes de la variable (cuyas magnitudes se especifican en la leyenda de colores) y el radio de esta rosa indica la frecuencia de presentación del oleaje. Este gráfico aporta información de las direcciones predominantes de oleaje y de los valores predominantes dentro de esas direcciones.

En los paneles 2 y 3 se presentan las distribuciones de frecuencia conjunta de la altura de ola significativa frente al periodo de pico y dirección media del oleaje, respectivamente. Estos gráficos permiten determinar posibles relaciones entre estas variables. Para llevar a cabo este análisis conjunto de las dos variables, el periodo de pico se ha discretizado cada 2 segundos, y la dirección media del oleaje cada  $45^\circ$ , mientras que la discretización de la altura de ola significativa varía entre 0.2 m y 1 m, en función de su rango de variación. En cada recuadro se indica la frecuencia relativa de ocurrencia tanto en escala de grises como en porcentaje numérico.

El panel 4 describe la función de distribución acumulada para el parámetro altura de ola significativa. Los resultados mostrados entre probabilidad y altura de ola significativa se han obtenido mediante el ajuste de una distribución teórica a la muestra de datos histórica de partida. Tras varios análisis, la distribución de probabilidad log-normal fue seleccionada como mejor candidata. Ajustar los datos a una distribución teórica en vez de utilizar los datos empíricos permite obtener una expresión compacta que suaviza e interpola la información proporcionada por el histograma.

En el panel 5 se muestra la estacionalidad de los máximos mensuales de la altura de ola significativa mediante un diagrama de cajas, donde la marca central representa la mediana y los bordes representan el rango intercuartílico (RIC), delimitado por los percentiles 25% (Q1) y 75% (Q3). Las líneas se extienden desde la caja hasta 1.5 veces el RIC siempre que la muestra alcance estos valores o hasta el máximo/mínimo de la muestra de datos. Valores inferiores o superiores a estos límites se consideran datos atípicos (outliers), representados por cruces.

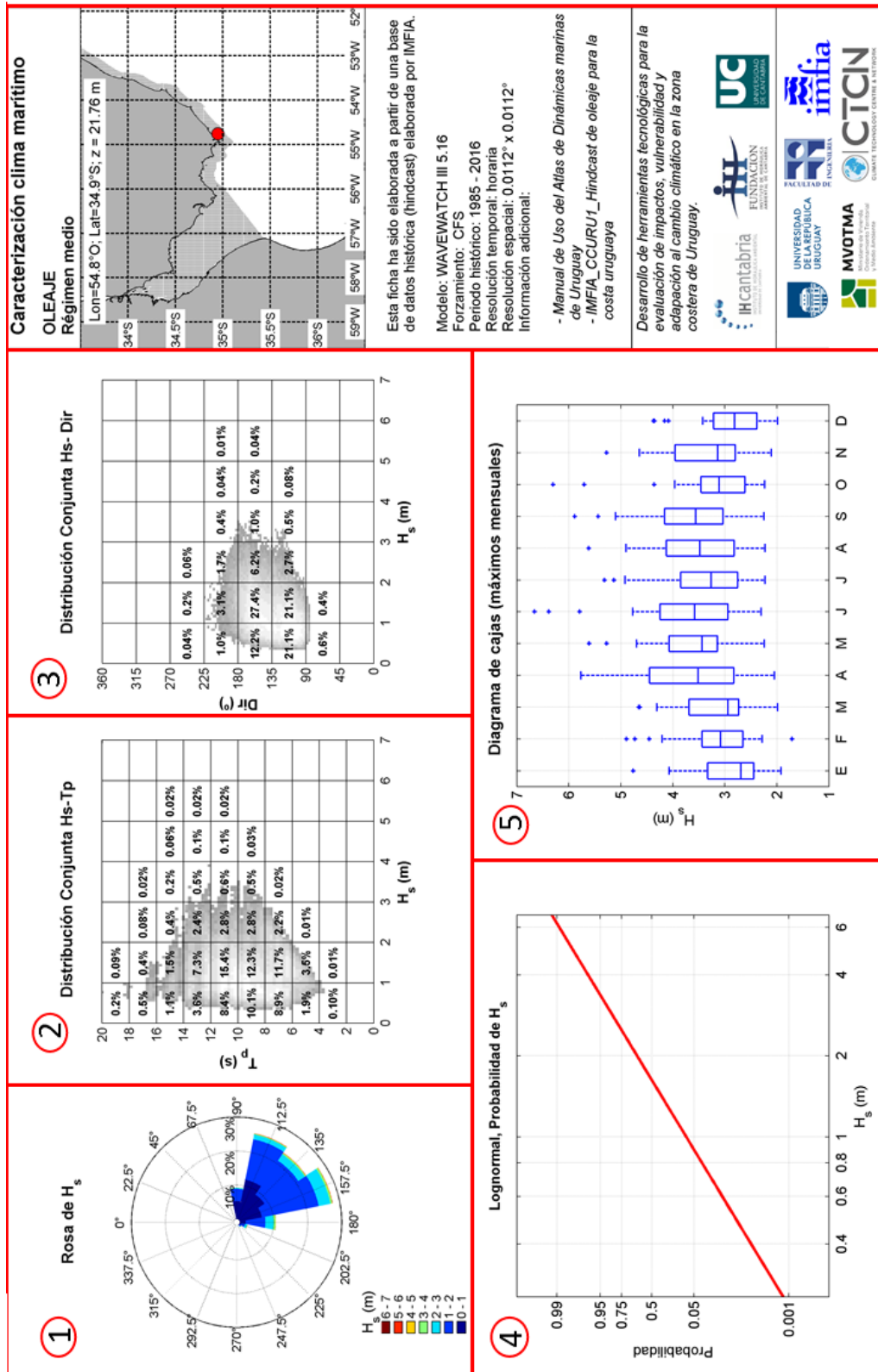


Figura 5. Ficha 1 de ejemplo. Régimen medio oleaje.

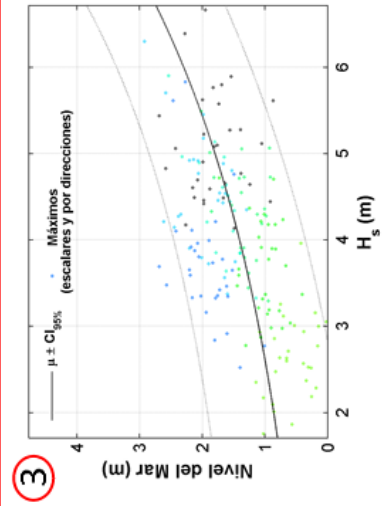
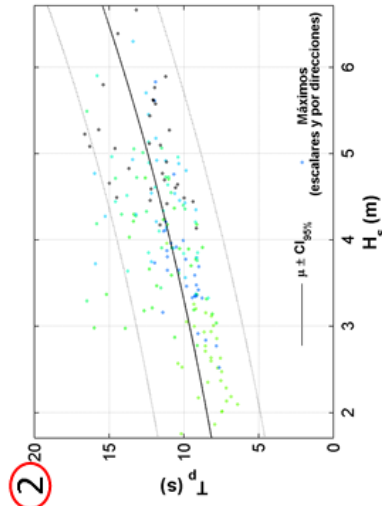
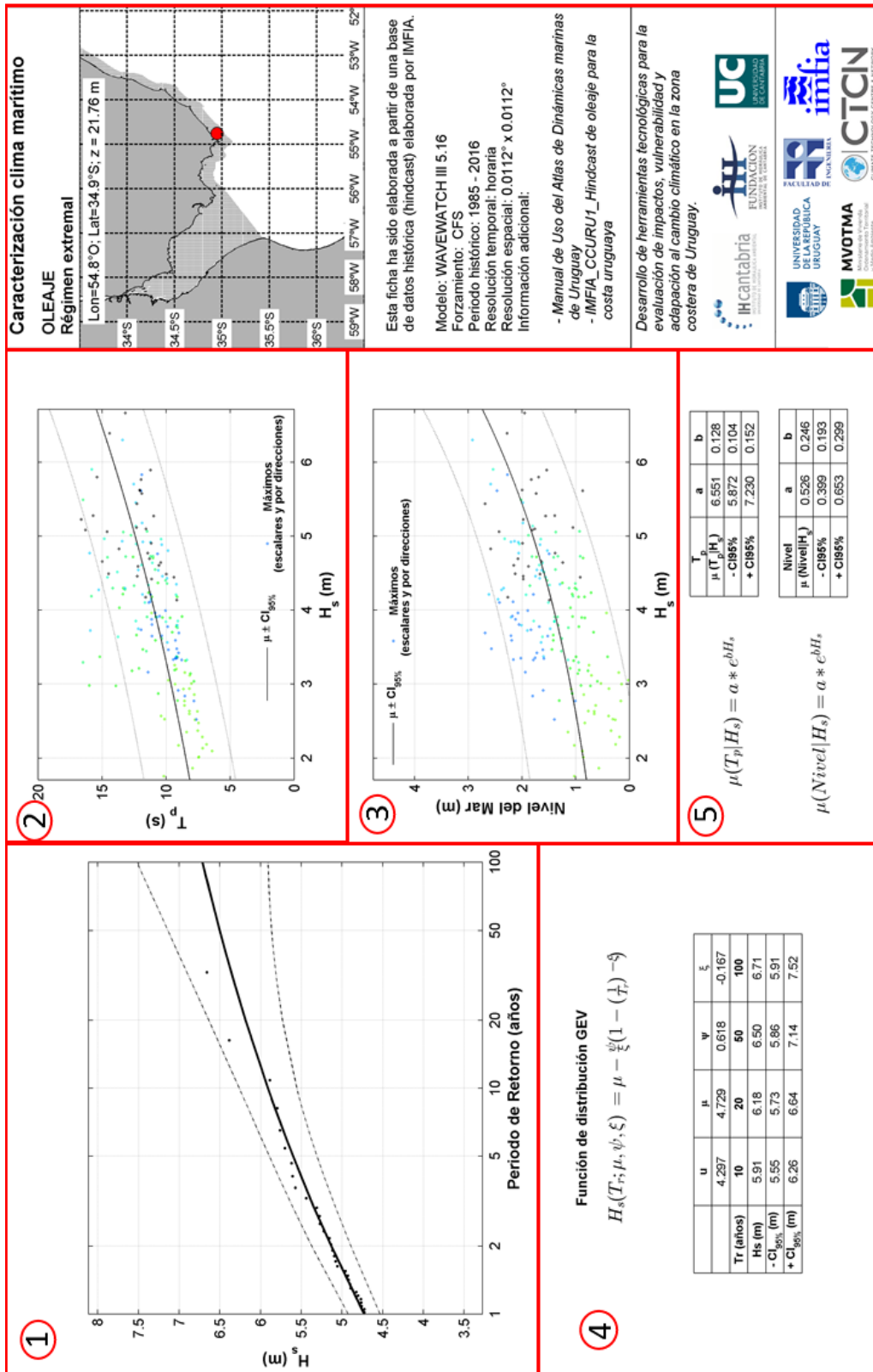
## 5. Ficha 2: OLEAJE – Régimen extremal

En la figura 6, se muestra un ejemplo de la ficha que caracteriza el régimen extremal del oleaje. Los resultados que se muestran en esta ficha proceden de un análisis de valores extremos constituido por (i) la selección de valores máximos, (ii) análisis estadísticos.

Los valores máximos analizados se definen a partir del método POT (picos sobre un umbral). Este método consiste en fijar un valor umbral, fijado en el cuantil del 99.5% para cada serie histórica horaria, y seleccionar los valores máximos de las series independientes sobre este umbral (picos). Para asegurar independencia entre máximos (que los valores no estén asociados a la misma condición de tormenta) se ha definido una separación entre picos de, al menos, 72 horas. Los máximos utilizados para asociar las probabilidades de altura de ola significativa relacionadas con periodos de retorno se muestran en el panel 1 mediante puntos negros. Además, los paneles 2 y 3 muestran los máximos obtenidos por el método POT para diferentes sectores direccionales del oleaje (puntos de color).

El ajuste del régimen extremal de la altura de ola significativa se representa en el panel 1. Para realizar este gráfico de periodo de retorno se ha aplicado el modelo estadístico de extremos Pareto-Poisson. Este modelo asume que los máximos seleccionados mediante el método POT, se pueden modelar mediante una distribución de Pareto, mientras que la ocurrencia de estos máximos sigue un proceso de Poisson. De esta manera, mediante el teorema de Pickands, se puede relacionar este modelo con el modelo de máximos anuales asociado a la distribución generalizada de extremos (GEV) y convertir la probabilidad de los valores de extremos estimada a periodos de retorno anuales. El ajuste a la distribución de extremos se ha realizado mediante la técnica de máxima verosimilitud. Los resultados de este modelo de extremos se muestran una línea negra. Además, las líneas discontinuas representan los intervalos de confianza del 95%. En la parte inferior (panel 4) se muestra la ecuación de la función de distribución GEV, así como una tabla con dos contenidos. En la parte superior se recoge el valor del umbral de la altura de ola significativa y los parámetros estimados de la distribución GEV (lo que permite una directa obtención del valor de altura de ola significativa asociado a un periodo de retorno,  $T_r$ ). En la parte inferior, se aporta información sobre la altura de ola (con sus correspondientes intervalos de confianza del 95%) asociada a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

Los paneles 2 y 3 muestran la relación entre los valores máximos de altura de ola significativa y el periodo de pico y nivel del mar, respectivamente. Se ha hecho un ajuste entre ambas variables (la línea negra continua,  $\mu$ ) y se han representado las bandas de confianza del 95% (líneas discontinuas). Se ha considerado que tanto el período de pico como el nivel varían en función de la altura de ola mediante una ley exponencial, cuya ecuación y parámetros estimados se recogen en el panel 5.



5

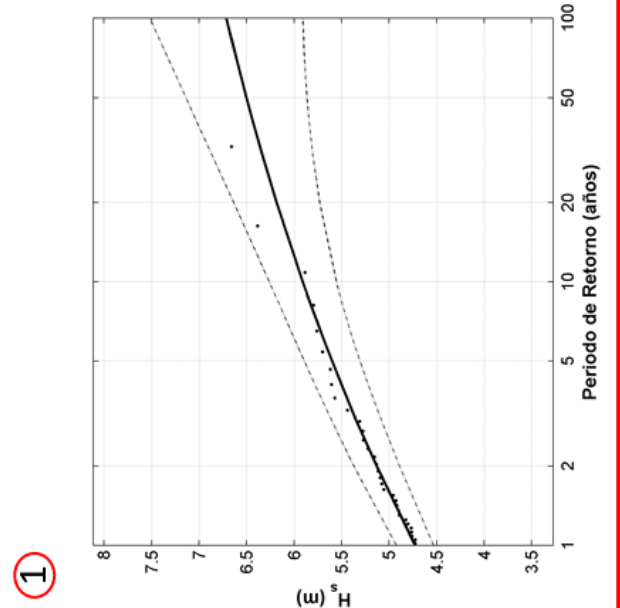
$$\mu(T_d|H_s) = a * e^{bH_s}$$

$T_d$	a	b
$\mu(T_d H_s)$	6.551	0.128
-CI95%	5.872	0.104
+CI95%	7.230	0.152

$$\mu(Nivel|H_s) = a * e^{bH_s}$$

Nivel	a	b
$\mu(Nivel H_s)$	0.526	0.246
-CI95%	0.399	0.193
+CI95%	0.653	0.299



4

Función de distribución GEV

$$H_s(T_r; \mu, \psi, \xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi} \left(1 - \left(\frac{T_r}{\mu}\right)^{-\xi}\right)$$

	u	$\mu$	$\psi$	$\xi$
Tr (años)	10	4.297	4.729	0.618
Hs (m)	5.91	6.18	6.50	6.71
-CI <sub>95%</sub> (m)	5.55	5.73	5.86	5.91
+CI <sub>95%</sub> (m)	6.26	6.64	7.14	7.52

Figura 6. Ficha 2 de ejemplo. Régimen extremal del oleaje.



## 6. Ficha 3: NIVEL DEL MAR Y CORRIENTES

La figura 7 muestra un ejemplo de la ficha de caracterización del régimen medio y extremal del nivel del mar y corrientes. En el panel 1 se representa la rosa de probabilidad de la intensidad de la corriente marina promediada en vertical (m/s). El gráfico polar ha sido discretizado en sectores cada  $22.5^\circ$  y el radio representa el valor de intensidad de la corriente. Todos los valores de la serie histórica horaria de corrientes se proyectan en la rosa utilizando una paleta de colores asociada a la frecuencia de presentación (por ejemplo, los colores rosa indican datos inusuales mientras que los tonos más oscuros, los más frecuentes).

En el panel 2 se muestran varios estadísticos de los máximos mensuales del nivel del mar mediante un diagrama de cajas para cada mes (la marca central representa la mediana de los datos y los límites del rectángulo el rango inter-cuartílico (RIC), definido por los percentiles 25% y 75%). Las líneas se extienden desde la caja hasta 1.5 veces el RIC siempre y cuando existan valores en la muestra de datos. En caso que no se alcancen estos valores máximos/mínimos en la muestra, la línea se termina con el valor máximo/mínimo muestral. Valores inferiores o superiores a estos límites se consideran datos atípicos (outliers), representados por cruces.

Los paneles 3 y 4 muestran el comportamiento del régimen medio del nivel del mar, mediante el histograma de los datos empíricos (panel 3) y su función de probabilidad acumulada (CDF) en el panel 4.

En los paneles 5 y 6 se muestra el régimen extremal del nivel del mar. El método matemático utilizado es similar al descrito para caracterizar el régimen extremal del oleaje (véase descripción de la Ficha 2, apartado anterior). En este caso también se ha asumido el valor del umbral como el percentil del 99.5% de la serie temporal completa y una independencia entre eventos extremos de al menos 3 días.

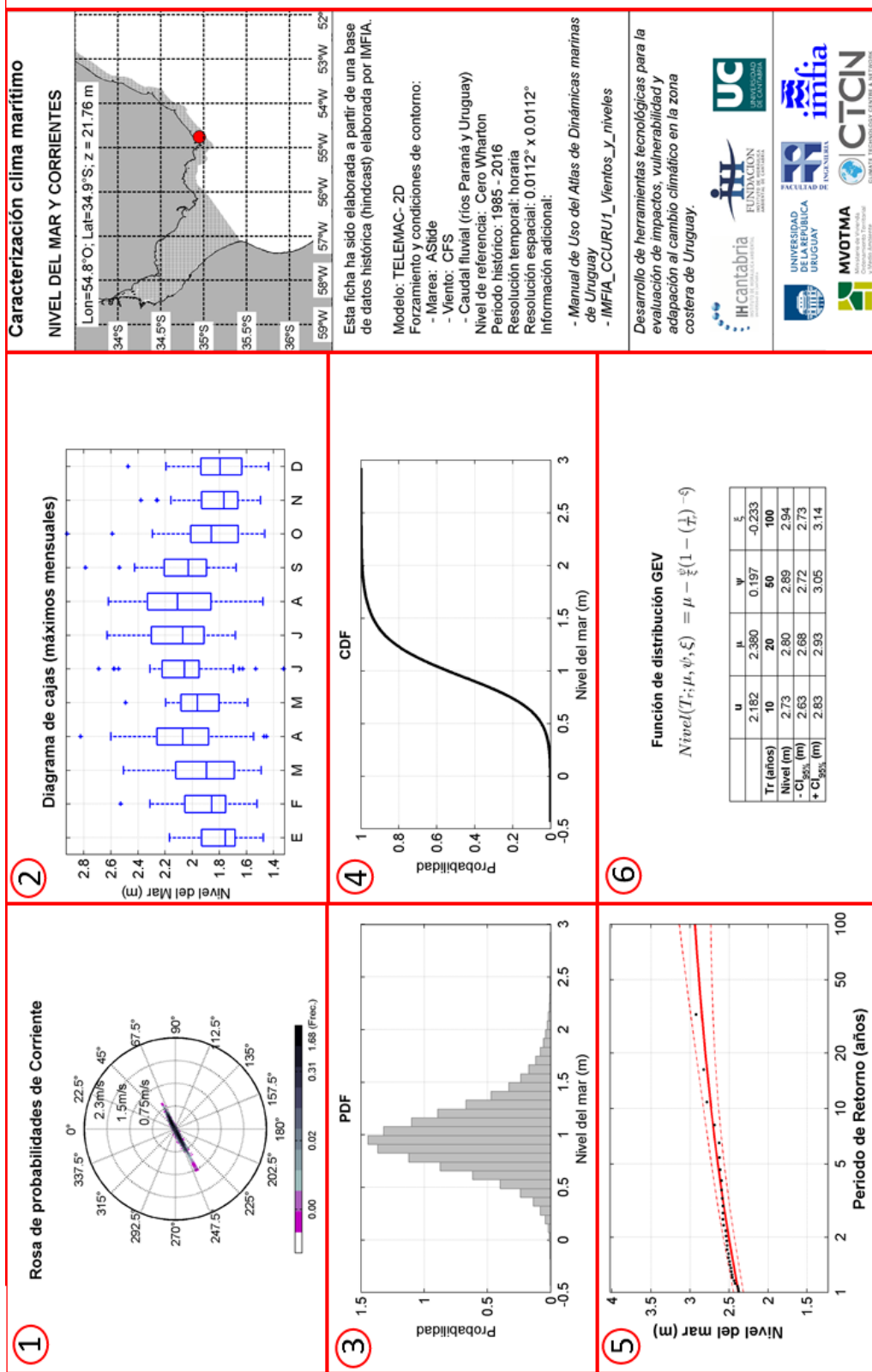


Figura 7. Ficha 3 de ejemplo. Régimen medio y extremal de nivel y corrientes.