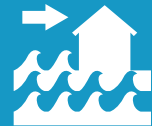


# NAP Costas

Plan Nacional de  
Adaptación Costera  
de Uruguay

Documento preparatorio

Hindcast de oleaje para la costa uruguaya



**Hindcasts de oleaje para la costa uruguaya.**

<u>Documento:</u>	IMFIA_CCURU1_d0001.v0.1_Hindcast de oleaje para la costa uruguaya	
<u>Versión</u>	0.1 ( <b>BORRADOR</b> )	
<u>Fecha:</u>	2/08/2018	
<u>Autores:</u>	Rodrigo Alonso Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR
<u>Contraparte:</u>	Mónica Gómez Melisa Menendez Iñigo Losada	Cambio Climático MVOTMA IH Cantabria IH Cantabria

---

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	3
2	Configuración del modelo .....	4
2.1	Compilación.....	4
2.2	Grillas de cálculo. ....	4
2.3	Batimetría y línea de costa.....	5
2.4	Obstáculos sub-grilla. ....	9
2.5	Forzantes y condición inicial. ....	11
3	Calibración.....	12
4	Base de datos generada .....	19
5	Conclusiones y pasos futuros.....	21
6	Referencias.....	21

---

## 1 INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el nuevo *hindcast* de oleaje para Uruguay realizado por el IMFIA en el marco del proyecto “Herramientas tecnológicas para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay”.

El *hindcast* cubre un período de 32 años comprendido entre el 1/1/1985 y el 31/12/2016. Los productos generados tienen una resolución temporal horaria y consisten en campos de los principales parámetros descriptores del oleaje y las series temporales de 77 espectros direccionales distribuidos en toda el área de estudio. Los detalles sobre la base de datos generada se presentan en la sección 4.

El modelo numérico de oleaje utilizado se implementó en la plataforma de modelación de oleaje WAVEWATCH III® versión 5.16 (WW3DG, 2016), en la modalidad multi-grilla. Se utilizaron 5 grillas, partiendo de una grilla global de baja resolución espacial ( $O(1^\circ)$ ) y alcanzando a cubrir toda la faja costera y todo el Río de la Plata medio e interior con una resolución espacial un poco menor a 1km. Los detalles de las grillas y toda la información relativa a la configuración del modelo se presentan en la sección 2.

Los datos de entrada del modelo de oleaje son los campos de viento en superficie obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución; y los campos de niveles y corrientes obtenidos de un *hindcast* regional realizado en base al modelo TELEMAC (Hervouet, 2007). La validación de los datos de viento mencionados a los efectos de su uso en el *hindcast* de oleaje, así como el el *hindcast* de niveles y corrientes se reportaron en informes previos del presente proyecto.

Para la calibración y validación del *hindcast* se recurrió a datos altimétricos de altura de ola significativa. Estos datos fueron obtenidos de la misma base de datos multi-misión procesada en IFREMER (Queffeulou y Croizé-Fillon, 2013) que fuera utilizada para validar los vientos en superficie y cuyas características en el área de estudio se presentaron en el informe correspondiente. La metodología y resultados de la calibración se presentan en la sección 3.

Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se describen las actividades que actualmente se están realizando y contribuirán a la evaluación del *hindcast*.

## 2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

### 2.1 Compilación.

En la Figura 1 se presenta el archivo *switch* utilizado para compilar el WAVEWATCH III. El significado de cada opción se encuentra en las páginas 256 a 264 del respectivo manual (WWDG, 2016). En particular se hace notar la elección de la opción ST4. Esta opción establece como modelar la parte del término fuente de la ecuación de acción del oleaje correspondiente al aporte de energía del viento y la disipación por rotura (i.e. *whitecapping*). Las referencias bibliográficas a esta parametrización son: Ardhuin et al. (2010), Ardhuin et al. (2009), Leckler et al. (2013) y Rasche y Ardhuin (2013). Junto con la parametrización que se activa con la opción ST6 y cuyas referencias son: Babanin (2006), Babanin (2011), Rogers et al. (2012) y Zieger et al. (2015); constituyen el estado del arte en cuanto a la modelación de estos procesos.

Se optó por ST4 en base a los resultados de Stopa et al. (2016) y Campos y Alves (2013). El primero muestra una comparación entre cuatro *hindcast* globales que se diferencian por la parametrización que utilizan (i.e. ST2, ST3, ST4 y ST6). Se observa que para la región occidental del Atlántico Sur, ST4 es la que presenta la mejor performance (ver figuras 3 y 4 de Stopa et al. 2016). Por su parte, Campos y Alves (2013) constituye un antecedente exitoso de modelación de oleajes extremos en el Atlántico Sur con ST4.

```
F90 NOGRB NOPA LRB4 SHRD PR3 UQ FLX0 LN1 ST4 STAB3 NL1 BT1 DB1 MLIM TR0 BS0 IC0  
REF1 XX0 WNT1 WNX1 CRT1 CRX1 IS0 00 01 02 03 04 05 06 07 011 014 016 OMPG OMPX
```

Figura 1.- Archivo *switch* con el que se compiló el WAVEWATCH III

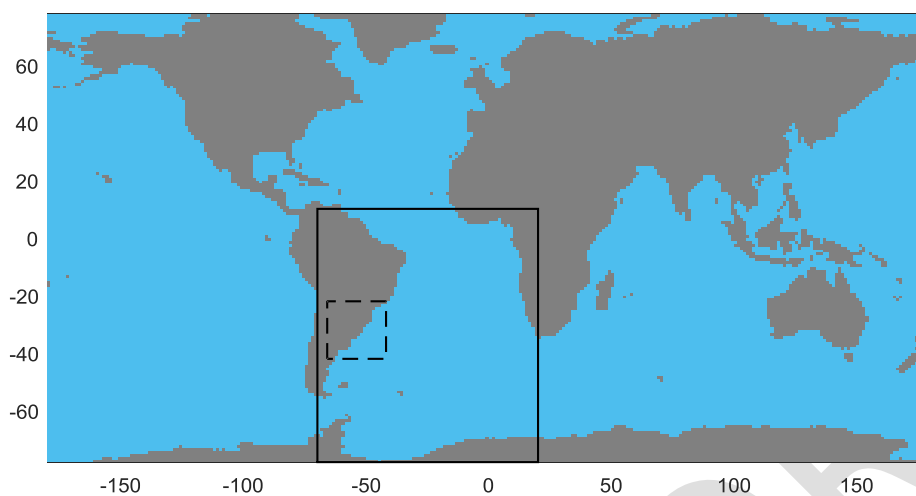
### 2.2 Grillas de cálculo.

El modelo se implementó en la modalidad multi-grilla, empleando 5 grillas regulares que en los casos de las grillas 4 y 5 no cubren dominios rectangulares debido a que se inactivan puntos de la misma.

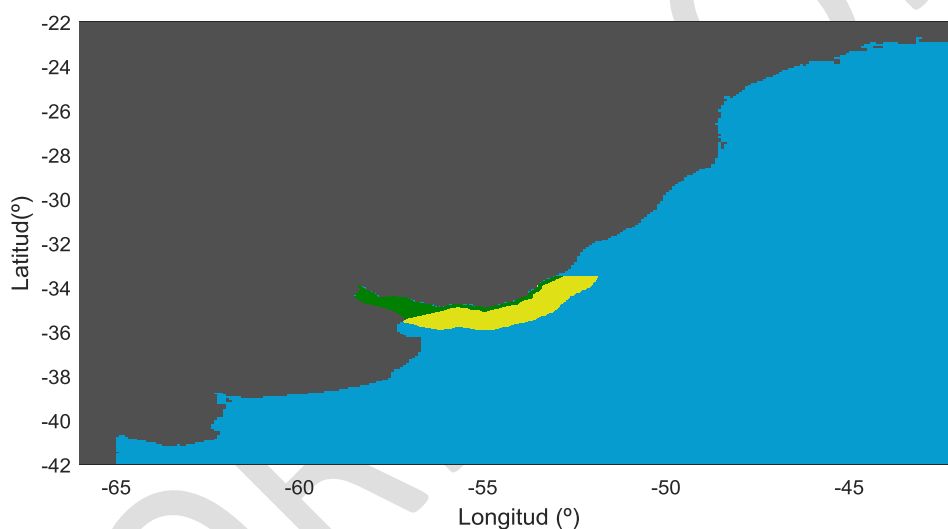
La grilla de menor resolución (Grilla 1) es de cobertura global a los efectos de prescindir de condiciones de borde. De esta forma todo el oleaje es generado dentro del modelo. La que le sigue (Grilla 4) abarca el Atlántico Sur con una resolución que se asimila a los campos de viento utilizados como forzante. Luego la Grilla 3, es una grilla intermedia, implementada con el objetivo de ir aumentando la resolución espacial hacia el área de estudio de forma gradual. Finalmente, las grillas 4 y 5 cubren el área de estudio. La grilla 4 abarca la plataforma continental Atlántica de Uruguay y el Río de la Plata exterior con una resolución de 2' (~3km), mientras que la grilla 5 cubre una faja costera de ~15 km de ancho y el Río de la Plata medio e interior con una resolución de 40'' (~1km). En la Tabla 1 se presentan los detalles de las grillas y en las figuras 2 y 3 se delimitan las regiones que abarcan.

Tabla 1.- Grillas de cálculo

	Nombre	Rango de Longitudes	Rango de Latitudes	$\Delta lon$	$\Delta lat$	Nlon	Nlat	# Puntos	# Puntos activos
Grilla 1	Global	-180° / 180°	-78° / 78°	1.25°	1°	288	157	45216	29085
Grilla 2	AtlSur4	-70° / 20°	-78° / 10°	0.5°	0.5°	181	179	32399	23304
Grilla 3	Region32	-66° / - 42°	-42° / -22°	10'	10'	145	121	17545	7828
Grilla 4	localF12	-59° / -51.5°	-36.5° / -33.5°	2'	2'	226	91	20556	5692
Grilla 5	costaF12	-59° / -51.5°	-36.5° / -33.5°	40''	40''	676	271	183196	14548



**Figura 2.- Delimitación de los dominios de las grillas 2 y 3**



**Figura 3.- Dominio de la Grilla 3 (celeste), Grilla 4 (amarillo) y Grilla 5 (verde).**

Originalmente se buscó llegar a toda la faja costera (Atlántico y Río de la Plata) con una resolución espacial de 15", la cual intercambiaba información con una grilla que abarcaba la plataforma continental y el Río de la Plata con una resolución de 1'. Este esquema fue abandonado por el alto costo computacional que requirió, disminuyéndose la resolución a la mitad, i.e. faja costera con una resolución de 30" y plataforma continental y Río de la Plata con una resolución de 2'. Este esquema resultó viable por su costo computacional pero se observó sensibilidad a la malla en el Río de la Plata interior. Es decir, se constató que 2' es una resolución demasiado gruesa para el Río de Plata interior. Esto derivó en la configuración final que fue presentada y que implicó, aumentar la resolución del Río de la Plata medio e interior incluyéndolos en la grilla más fina (i.e. costera, grilla 5) a costa de disminuir la resolución de la misma a 40" a los efectos de mantener el costo computacional.

### **2.3 Batimetría y línea de costa.**

Para cada una de las grillas, la batimetría, la definición de cada tipo de nodo en un *mask file* y los obstáculos sub-grilla, se definieron recurriendo al paquete *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (Chawla y Tolman, 2007) desarrollado para MATLAB®.

La información de base fue obtenida de base de datos globales de batimetría y línea de costa, y de una base de datos local generada a partir de las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Armada de Uruguay (SOHMA).

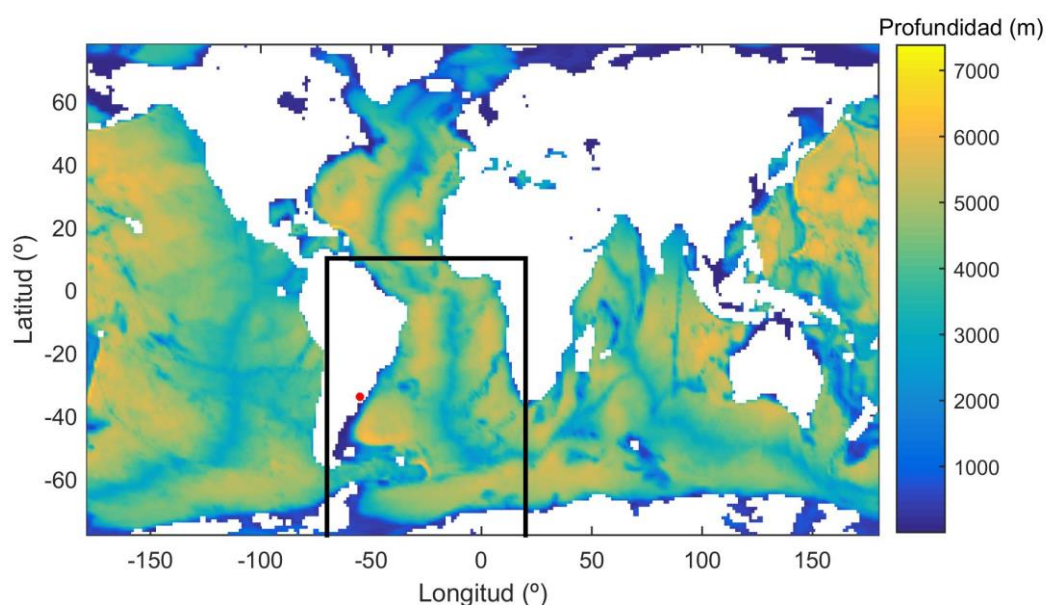
La base de datos global de batimetría utilizada es la ETOPO1 (Amante y Eatkins, 2009), mientras que la de línea de costa es la GSHHS (Wessel y Smith, 1996).

La base de datos local se generó georreferenciando, digitalizando y llevando a un mismo cero de referencia las cartas náuticas del SOHMA. Esto se realizó en el software QGIS, generándose una línea de costa local de alta resolución y una grilla batimétrica regular de 0.002° de resolución que abarca el dominio  $[-58.5^\circ -51.5^\circ] \times [-39^\circ - 33.5^\circ]$ .

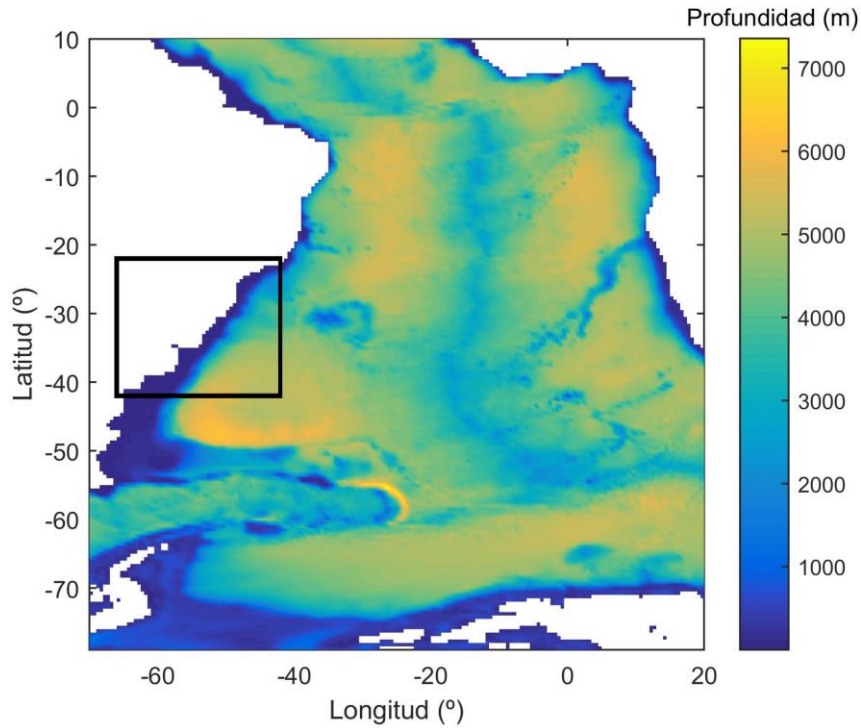
En la Tabla 2 se indica la información de base que se utilizó en cada grilla para definir su batimetría y línea de costa. Mientras que en las figuras 4 a 9 se presentan los mapas batimétricos en la resolución de cada una de las grillas de cálculo.

**Tabla 2.- Información de base para definir batimetría y línea de costa.**

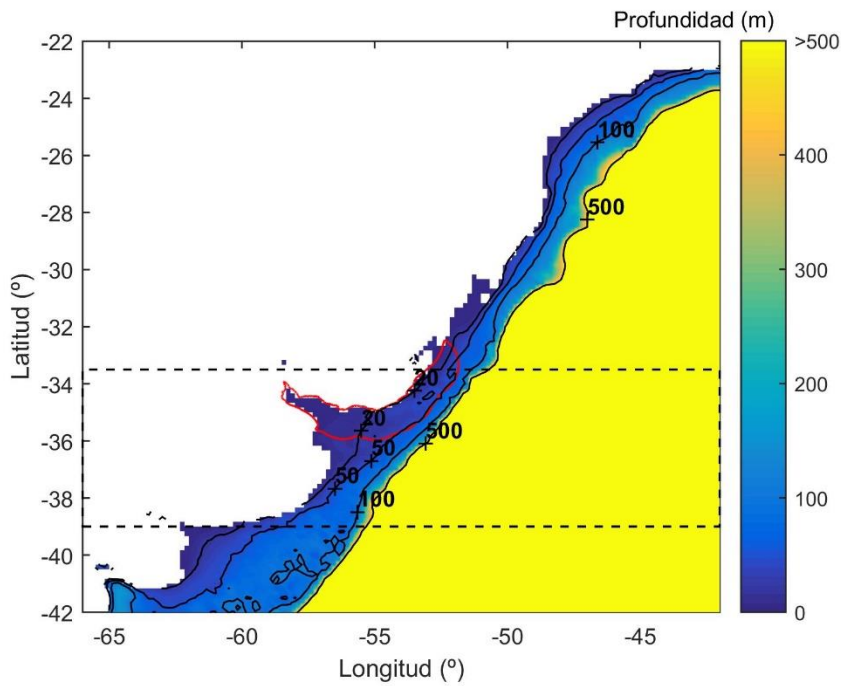
	Batimetría	Línea de costa
<b>Grilla 1</b>	ETOPO1	GSHHS high resolution
<b>Grilla 2</b>	ETOPO1	GSHHS full resolution
<b>Grilla 3</b>	ETOPO1 + SOHMA	GSHHS full resolution
<b>Grilla 4</b>	SOHMA	SOHMA
<b>Grilla 5</b>	SOHMA	SOHMA



**Figura 4.- Batimetría de la grilla Global (Grilla 1). El marco negro es el dominio de la grilla correspondiente al Atlántico Sur (Grilla 4). En rojo Uruguay.**

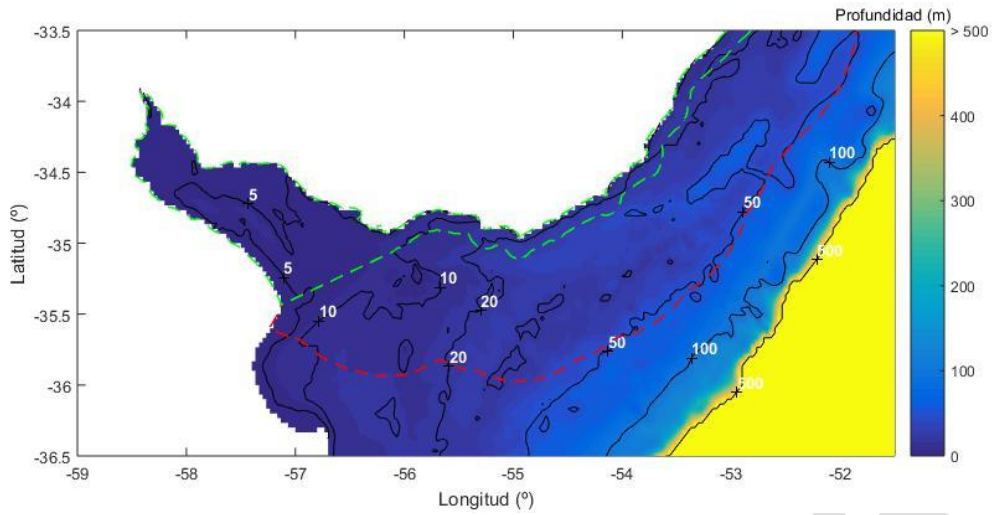


**Figura 5.-** Batimetría de la grilla correspondiente al Atlántico Sur (Grilla 2). El marco negro es el dominio de la Grilla 3 (Region32).

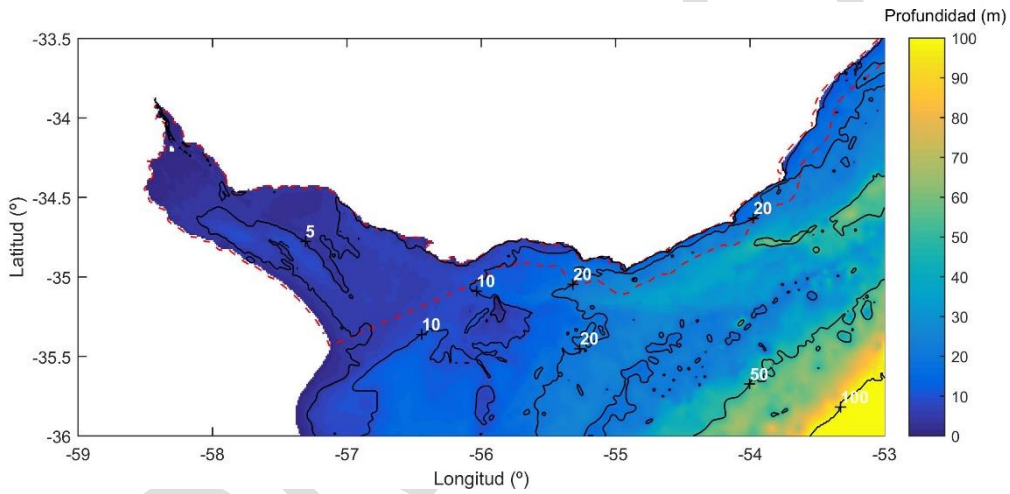


**Figura 6.-** Batimetría de la Grilla 3. El marco negro punteado delimita el área donde la información de referencia es la del SOHMA. Fuera de la línea punteada se utilizó ETOPO1 y GSHHS. La línea roja delimita la región de puntos activos correspondiente a la Grilla 4 (localF12).

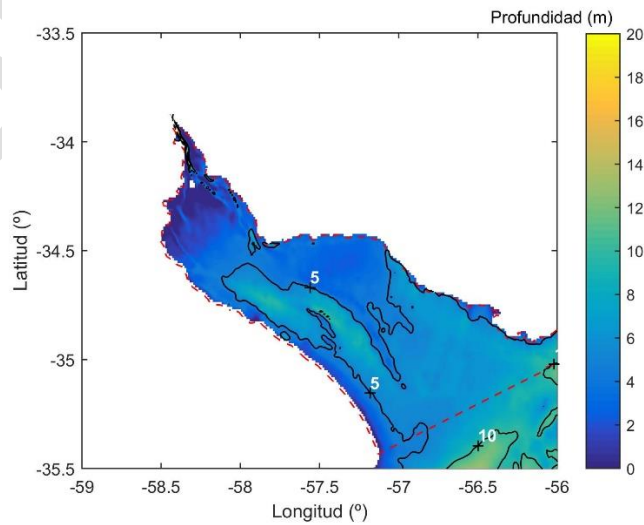




**Figura 7.- Batimetría de la Grilla 4 (localF12). La línea roja punteada delimita la región de puntos activos de esta grilla, mientras que la línea verde punteada delimita la región de puntos activos de la Grilla 5 (CostaF12).**



**Figura 8.- Batimetría de la Grilla 5 (costaF12). La línea roja punteada delimita la región de puntos activos de esta grilla.**



**Figura 9.-Acercamiento para el Río de la Plata medio e interior en la batimetría de la Grilla 5 (costa F12).**

## 2.4 Obstáculos sub-grilla.

Los porcentajes de obstrucción según x e y debido a obstáculos de menor tamaño que una celda de cálculo fueron también definidos en base al paquete *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (Chawla y Tolman, 2007). Las líneas de costa de las islas fueron obtenidas de GSHHS en el caso de las grillas 1, 2 y 3, mientras que para las grillas 4 y 5 se obtuvieron de las cartas del SOHMA. En este último caso se definieron 51 islas, donde la mayoría se encuentran en el Río de la Plata interior y están dentro del dominio ocupado por la Grilla 5

Para cada una de las regiones delimitada en la Figura 10, en las figuras 11 a 15 se presenta un acercamiento de los campos de porcentaje de obstrucción en x ( $S_x$ ) e y ( $S_y$ ) considerados por la Grilla 5.

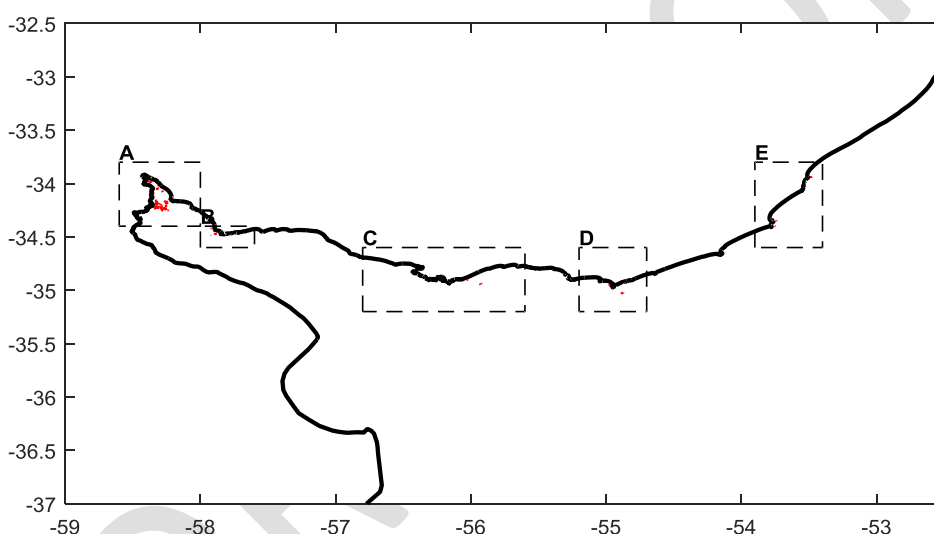


Figura 10.- Regiones en donde se hace un acercamiento para mostrar los obstáculos sub-grilla

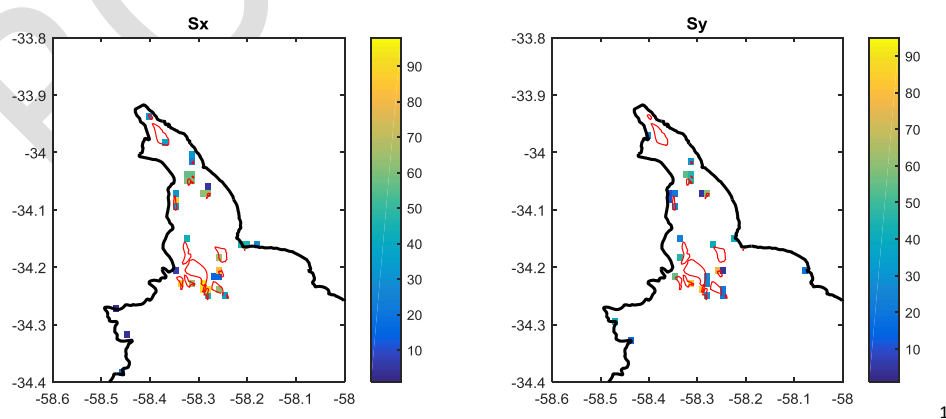
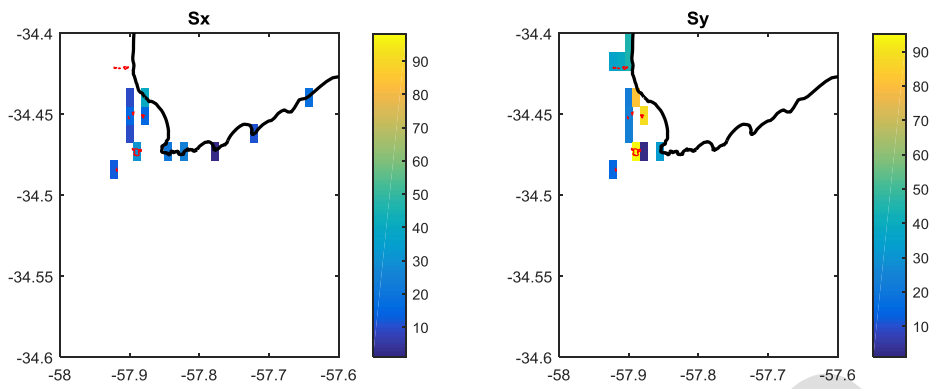
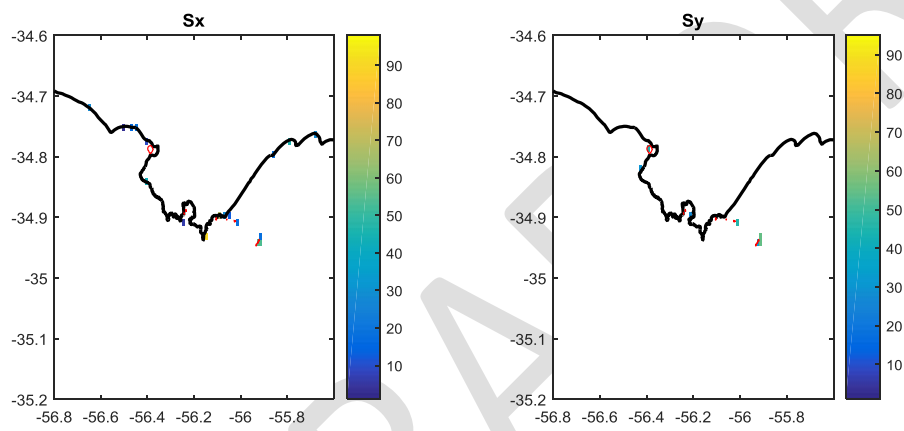


Figura 11.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región A.

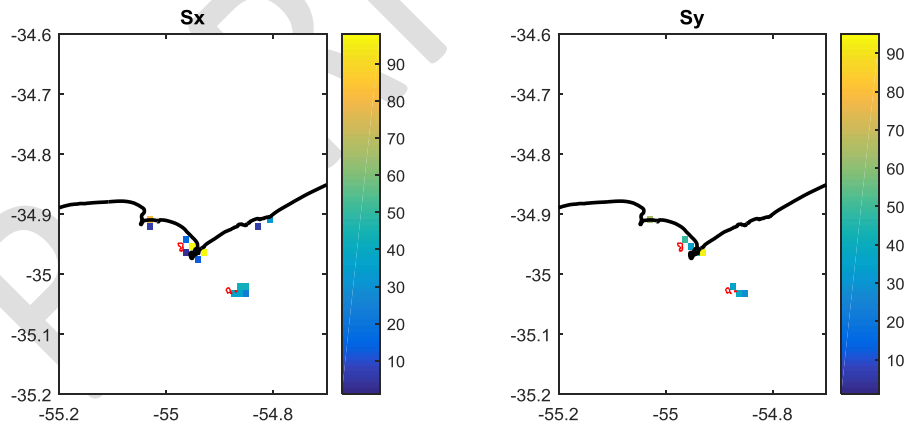
<sup>1</sup> El color blanco es 0% de obstrucción. No hay obstáculos sub-grilla. Lo cual no estaría coincidiendo con la barra de colores en donde 0 está indicado en azul.



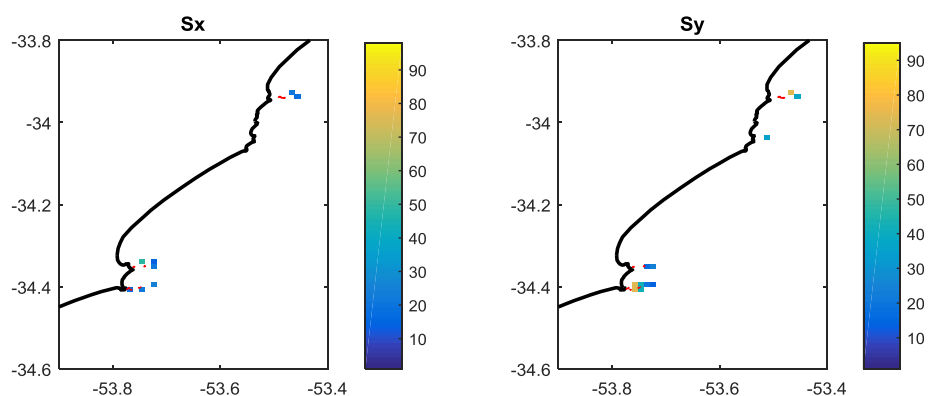
**Figura 12.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región B.**



**Figura 13.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región C.**



**Figura 14.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región D.**

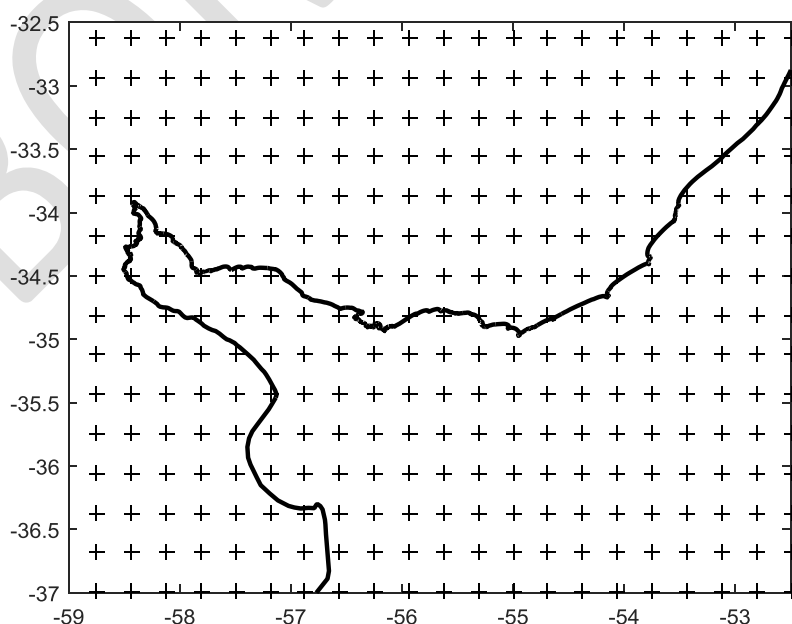


**Figura 15.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región E.**

### **2.5 Forzantes y condición inicial.**

Los campos de viento en superficie utilizados corresponden al reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución. Debido a que hay un aumento de la resolución espacial entre CFSR (1979 -2010) y CFSv2 (2011 – Actualidad) y a los efectos de mantener la misma resolución a lo largo de todo el período analizado, los campos de CFSv2 se llevaron mediante interpolación bilineal por componentes los a la resolución de CFSR.

En las 5 grillas de cálculo se usaron los mismos campos de vientos. Los cuales están definidos en una grilla global regular de  $0.3125^\circ \times 0.3122^\circ$ . Debido a que los datos originales están en una grilla Gaussiana, que si bien presenta una resolución similar, fue necesario interpolar bilinealmente por componentes para el pasaje a la grilla regular utilizada. La cual quedó definida por el origen de coordenadas:  $-180^\circ$ ,  $-89.7575^\circ$ , y la resolución mencionada anteriormente. A modo de referencia, en la Figura 16 se presentan los nodos de la grilla del campo de viento en lo que respecta a la zona en estudio.



**Figura 16.- Nodos de la grilla en donde se definen los campos de viento utilizados como forzante**

---

La validación del uso de estos campos de viento se presentó en un informe previo del presente proyecto.

Los campos de niveles y corrientes utilizados fueron generados a partir de un *hindcast* regional realizado en base al modelo TELEMAT (Hervouet, 2007) y que fuera reportado en un informe anterior. Estos campos son utilizados para el cálculo en las grillas 4 y 5.

Los resultados del modelo hidrodinámico están en una grilla no estructurada. Por lo que, al igual que para el caso de los datos de viento, se pasaron a grillas regulares. Ambas ocupan una región rectangular definida entre las longitudes  $-59^{\circ}$  y  $-51.5^{\circ}$ , y las latitudes  $-36.5^{\circ}$  y  $-33.5^{\circ}$ , pero que se diferencian en su resolución. Los campos de corrientes se definieron con una resolución de  $1'$ , mientras que para los de niveles se usó una resolución de  $2'^2$ .

En cuanto a la condición inicial, en todas las simulaciones se partió del reposo y se descartaron los resultados correspondientes al primer mes. Típicamente las simulaciones fueron anuales, arrancando el 1 de diciembre del año anterior y guardando los resultados a partir del 1 de enero.

### **3 CALIBRACIÓN**

La calibración se realizó tomando como referencia los datos de altura de ola significativa obtenidos de la base de datos altimétrica cuya descripción y análisis se presentó en el informe de validación de los campos de viento. De las subregiones descritas en dicho informe, se consideraron aquellas que tenían un borde costero. Por otra parte, las subregiones correspondientes al Río de la Plata medio (Med) e interior (Int) se agruparon en una sola (RDP Med e Int) debido a que la última contenía muy pocos datos. En la Figura 17 se presentan las 4 subregiones consideradas.

Para la elección del período de calibración se cuantificó la cantidad de datos altimétricos disponibles para cada año por subregión. A su vez, como los eventos extremos son de particular importancia para este estudio, para cada subregión se calculó el percentil 90 (H90) considerando todos los años, y para cada año se cuantificó la cantidad de datos mayores que dicho H90. Estos resultados se presentan en la Tabla 3, en la cual para cada subregión se marca con verde aquellos años que presentan más datos que su promedio, tanto para el total de los datos (tabla superior) como para los mayores al H90 respectivo (tabla inferior). En base a este análisis, se aprecia que el año 2002 presenta para todas las subregiones más datos altimétricos que el promedio de todos los años, tanto para el total de los datos, como para los mayores a H90. En base a este resultado se definió el 2002 como período de calibración.

---

<sup>2</sup> El modelo presentó problemas si se definían campos de niveles con mayor resolución que la grilla de cálculo. De esta forma  $2'$  coincide con la resolución de la grilla 4.

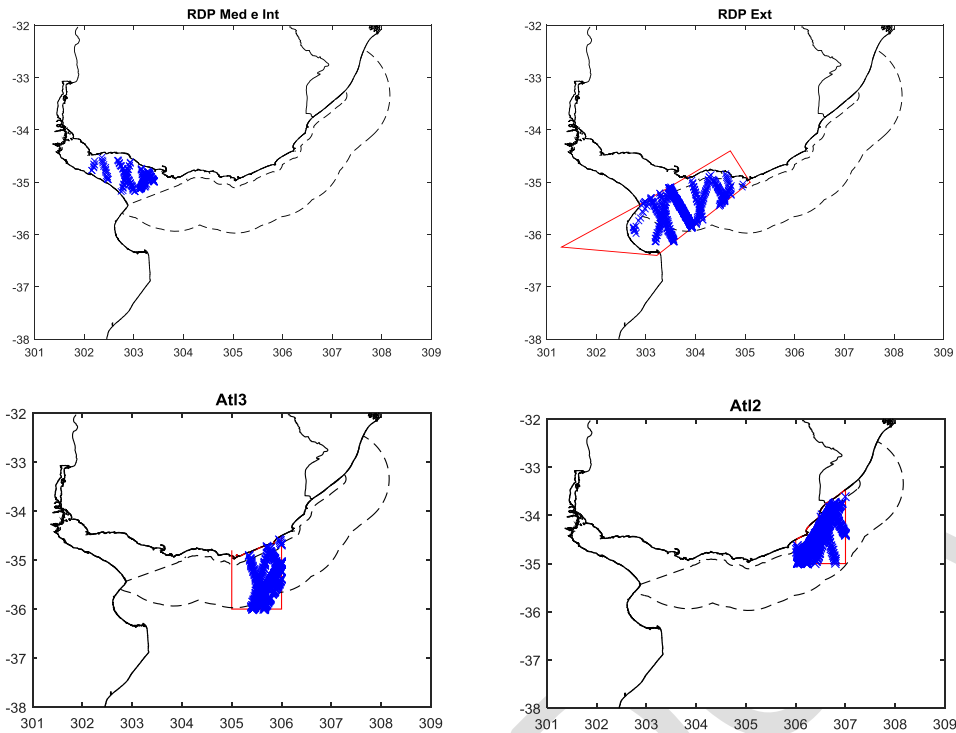


Figura 17.- Subregiones consideradas en la calibración del modelo de oleaje con datos altimétricos.

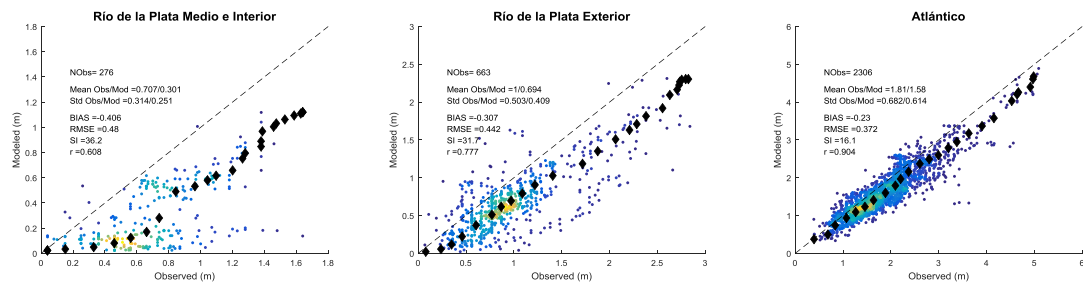
Tabla 3.- Cantidad de datos por año y por región (arriba). En verde cuando hay más datos que la media. Cantidad de datos mayores al percentil 90 (H90) por año y por región (abajo). En verde también se indica cuando hay más datos que el promedio anual de datos mayores a H90.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	LAverage
Int2	0	52	102	91	167	158	64	84	93	108	117	121	210	108	155	102	121	109	203	29	55	201	41	109
Med2	0	241	570	598	723	734	625	617	610	666	730	1011	766	768	740	646	751	572	741	673	676	918	134	649
EstU	0	257	561	461	763	736	581	587	542	662	784	1007	1234	715	1016	603	558	666	918	932	883	872	147	674
EstA	0	378	640	605	932	914	689	720	691	896	1017	1152	1057	967	971	831	838	961	742	671	737	1164	169	771
Atl1	88	1166	857	1547	1137	1024	814	752	821	871	988	1389	1405	1168	1196	1041	1091	1252	1058	978	897	1470	315	1015
Atl2	19	892	1460	1689	1672	1691	1440	1536	1470	1998	2113	2325	2357	2202	2330	2069	1907	2437	1830	1826	1840	2272	286	1750
Atl3	0	474	1072	1092	1393	1234	1037	1139	1082	1335	1482	2237	2114	1470	1921	1424	1270	1607	1575	1638	1698	1892	310	1326
Atl4	0	219	385	257	588	559	352	386	393	652	918	1110	1410	915	1249	753	623	540	784	826	896	720	113	633
Atl5	0	254	451	328	673	609	485	460	453	811	1013	1368	1730	943	1535	861	733	645	1073	1108	1165	812	122	767
Atl6	0	303	457	370	836	719	471	491	498	855	1017	1454	2384	928	1989	828	774	619	1704	1817	1835	1221	200	947
rec1	0	666	1659	1495	1998	1914	1621	1677	1672	2168	2447	3228	2507	2338	2354	2172	1968	2465	1732	1682	1628	2182	288	1820
rec2	0	329	757	700	1051	926	745	781	762	950	1101	1525	1731	1048	1500	988	849	1004	1168	1218	1332	1424	232	961
rec3	34	825	576	958	912	809	587	569	593	826	968	1521	2142	928	1725	856	751	703	1378	1383	1467	1149	219	951
rec4	37	959	1705	1961	2049	1926	1798	1807	1752	2269	2484	3506	2557	2362	2519	2272	2153	2608	1898	1809	1843	2389	315	1956
rec5	0	513	1347	1367	1540	1546	1309	1379	1372	1454	1562	2225	1722	1523	1602	1418	1466	1839	1449	1445	1452	2028	288	1389
rec6	0	535	1096	830	1498	1312	1032	1134	1087	1659	1824	2406	2627	1723	2326	1838	1388	1893	1833	1845	1895	1808	254	1410
rec7	26	763	558	1078	876	709	596	578	598	973	1219	1780	2096	1165	1828	1077	906	859	1295	1344	1563	1292	204	1016
rec8	67	1083	1420	1902	1724	1683	1477	1491	1472	1774	1591	2394	1760	1549	1596	1491	1543	1899	1519	1486	1533	2068	313	1509
rec9	27	952	1324	1479	1676	1572	1342	1377	1379	1610	1755	2436	2189	1673	1869	1576	1518	1839	1542	1468	1382	1640	278	1481
rec10	76	921	496	1037	750	669	491	460	498	994	1174	1629	2187	1083	1895	1032	863	693	1188	1361	1367	1077	205	965
rec11	81	1127	483	1372	762	670	513	474	514	752	884	1429	2350	817	1850	731	671	569	1578	1750	1911	1163	228	986
Total	465	12929	17926	21254	23773	22093	18069	18499	18358	24033	27188	37863	38476	26303	34166	24389	22744	26085	26999	27107	27826	29762	4671	

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Int2	0	3	14	17	9	29	27	11	19	12	17	11	9	4	5	4	14	5	12	3	8	10	3	11
Med2	0	16	81	49	50	37	36	94	48	77	114	85	76	61	121	43	73	118	74	76	61	56	12	63
EstU	0	30	49	32	116	54	28	46	35	31	42	111	135	109	96	51	52	42	131	161	98	93	5	67
EstA	0	17	105	61	81	86	50	82	74	102	123	73	75	103	109	53	61	124	97	73	86	96	14	76
Atl1	2	107	51	114	117	55	51	86	103	73	165	307	93	173	66	88	101	126	90	95	91	94	59	100
Atl2	0	77	154	166	182	154	145	117	106	283	235	271	268	201	159	132	184	294	170	159	284	216	24	173
Atl3	0	13	138	88	159	91	99	117	104	141	154	208	250	170	193	118	109	124	122	160	286	183	15	131
Atl4	0	44	91	19	115	57	34	29	43	64	74	108	120	99	75	98	47	30	79	97	99	51	4	63
Atl5	0	45	57	18	137	88	26	38	60	60	111	111	115	122	161	59	53	61	144	129	103	84	0	77
Atl6	0	26	46	14	130	90	54	40	55	78	78	106	243	117	147	80	42	55	113	246	149	148	0	93
rec1	0	43	239	143	261	124	108	183	133	222	275	222	371	310	217	250	183	228	102	129	224	177	20	181
rec2	0	43	107	81	196	72	82	81	44	67	112	105	196	168	135	84	95	83	71	38	115	134	32	96
rec3	0	59	59	103	137	41	56	26	83	66	78	144	264	131	238	84	75	71	127	112	116	76	42	95
rec4	0	78	173	185	265	168	200	157	170	242	296	353	258	221	278	183	161	259	210	168	166	269	34	195
rec5	0	53	233	144	192	107	130	119	121	116	159	142	236	223	142	132	112	205	111	102	181	216	7	138
rec6	0	34	132	76	233	108	109	119	98	176	181	193	278	173	152	198	151	81	106	125	288	160	53	140
rec7	0	62	49	110	100	29	41	48	53	89	113	202	209	217	238	96	66	101	123	110	121	132	24	101
rec8	0	91	147	208	213	138	126	104	144	181	198	253	147	148	145	134	173	181	154	113	151	218	35	148
rec9	0	116	121	178	151	122	121	130	102	183	173	256	229	225	157	103	159	173	150	157	152	171	34	147
rec10	0	102	58	113	109	51	39	19	71	84	161	230	169	134	208	43	86	105	101	119	84	82	34	96
rec11	0	128	63	133	108	42	38	15	79	98	110	240	231	195	188	60	79	76	127	131	136	84	31	98
Total	2	1179	2158	2052	3061	1734	1600	1667	1750	2395	2969	3731	3931	3234	3211	2079	2076	2542	2414	2663	2988	2756	482	

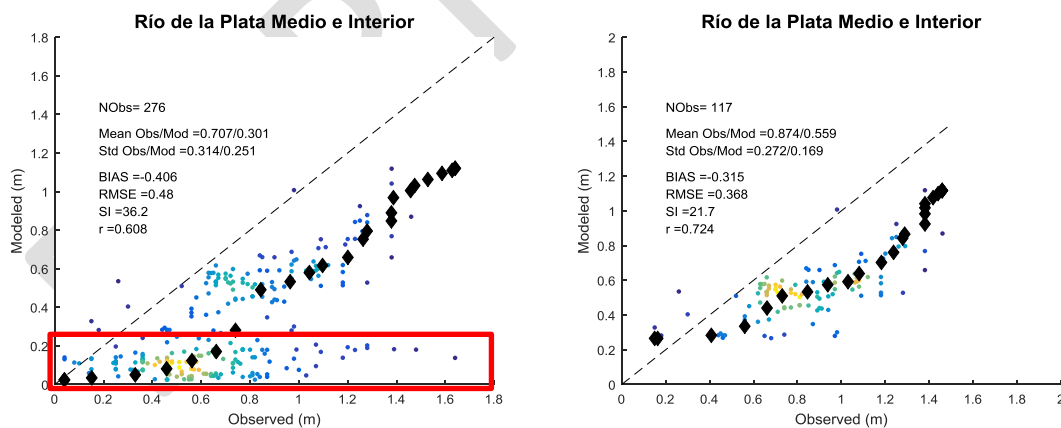
En la Figura 18 se presentan los resultados obtenidos al simular 4 meses (enero -diciembre 2012) con los parámetros por defecto.



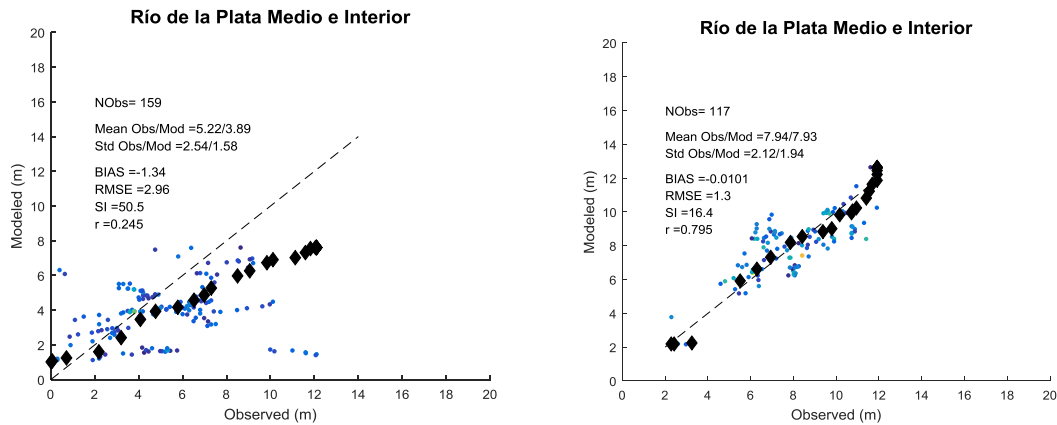
**Figura 18.- Resultados con los parámetros del modelo por defecto. Para el atlántico (derecha) se agruparon las dos regiones Atl3 y Atl2.**

Se observa una tendencia a la subestimación de  $H_s$  en las tres regiones, agravándose para el Río de la Plata, particularmente en su región media e interior. Por otra parte, para esta última región se observan grandes diferencias entre resultado del modelo y dato observado cuando  $H_s$  obtenida del modelo es menor a 0.25m (Figura 19, gráfico de la izquierda). Sacando estos datos (Figura 19, gráfico de la derecha) la dispersión disminuye y la correlación aumenta. Las comparaciones de la Figura 20, demuestran que la mala representación de los puntos recuadrados en rojo se debe a una mala representación del viento. En lo que sigue, en lo que respecta al Río de la Plata medio e Interior y a los efectos de la calibración, se descartan los datos en los que  $H_s$  del modelo es menor a 0.25m. Se trata de un filtro simple que busca que en la calibración del modelo no se consideren eventos en donde el viento está mal representado.

Se seleccionó BETAMAX de la parametrización del aporte de energía por parte del viento y GAMMA de la parametrización JONSWAP de la disipación por fondo (Haselmann et al. 1973) como los dos parámetros de calibración. Se realizaron 9 simulaciones correspondientes a las combinaciones de BETAMAX y GAMMA que se presentan en la Tabla 4. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 21 a 24 y en las tablas 5 a 12.



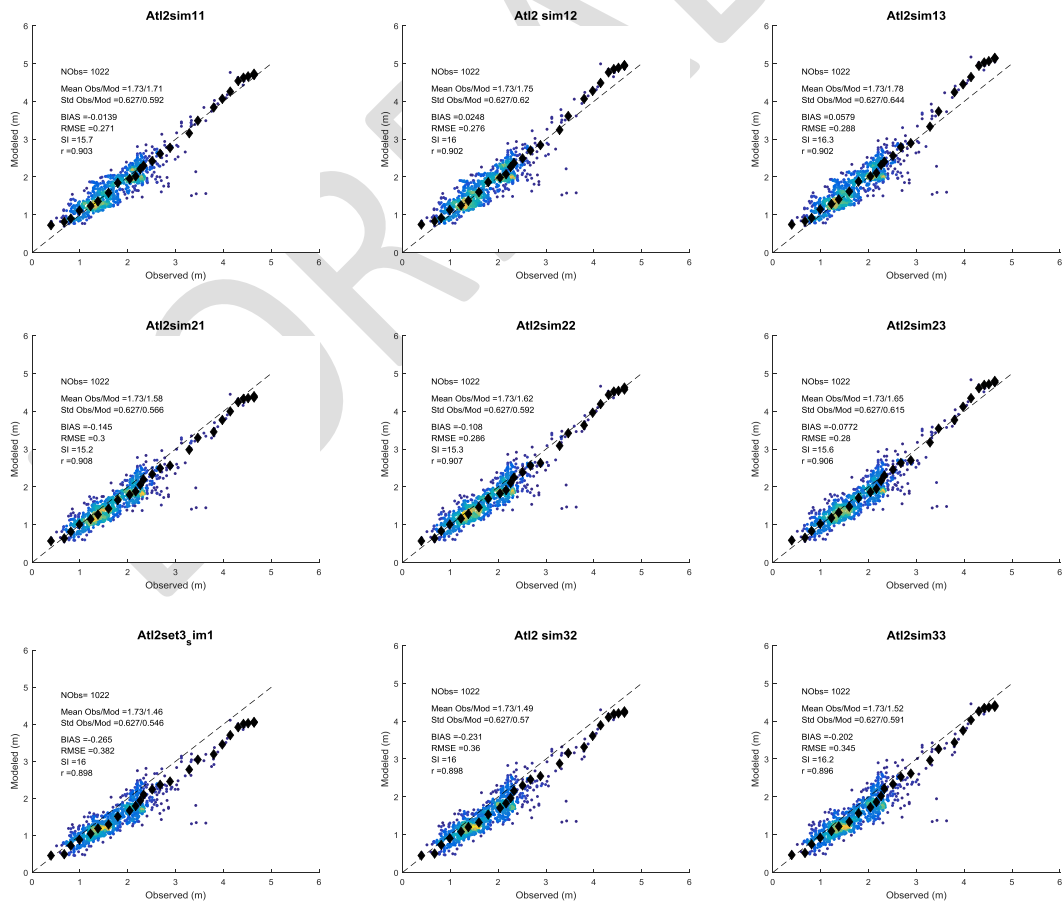
**Figura 19.- Comparación entre resultados del modelo y medición altimétrica de  $H_s$ . Río de la Plata medio e interior. Período simulado: Enero-Abril 2012. En el gráfico de la derecha no se eliminaron los puntos recuadrados en rojo en el gráfico de la izquierda (i.e.  $H_s$  modelo <0.25m).**



**Figura 20.- Comparación entre viento CFSR (Modeled) y medición altimétrica (Observed). El gráfico de la izquierda muestra los eventos correspondientes a  $H_{s_{mod}} < 0.25m$  (recuadro rojo de la Figura 19), mientras que el de la derecha muestra los eventos correspondientes a  $H_{s_{mod}} > 0.25m$  (fuera del recuadro rojo de la Figura 19). Las unidades son m/s.**

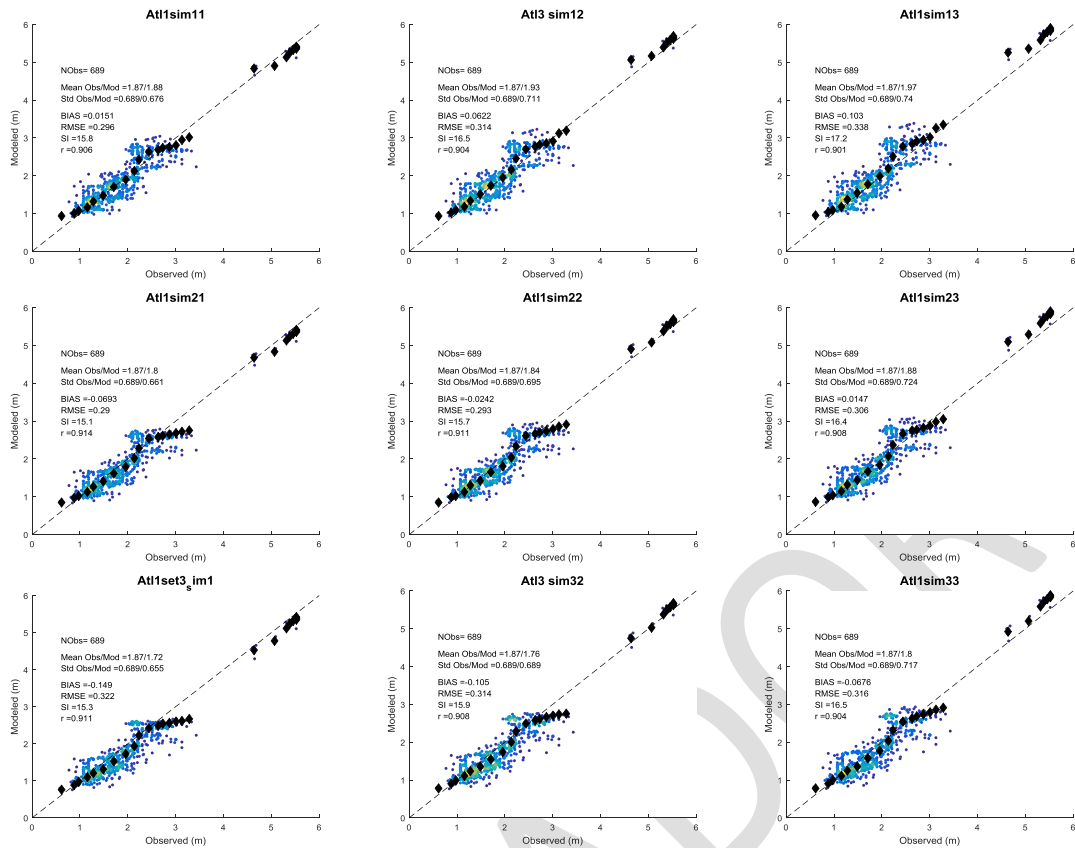
**Tabla 4.- Combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.**

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	SIM 11	SIM 12	SIM 13
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	SIM 21	SIM 22	SIM 23
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	SIM 31	SIM 32	SIM 33

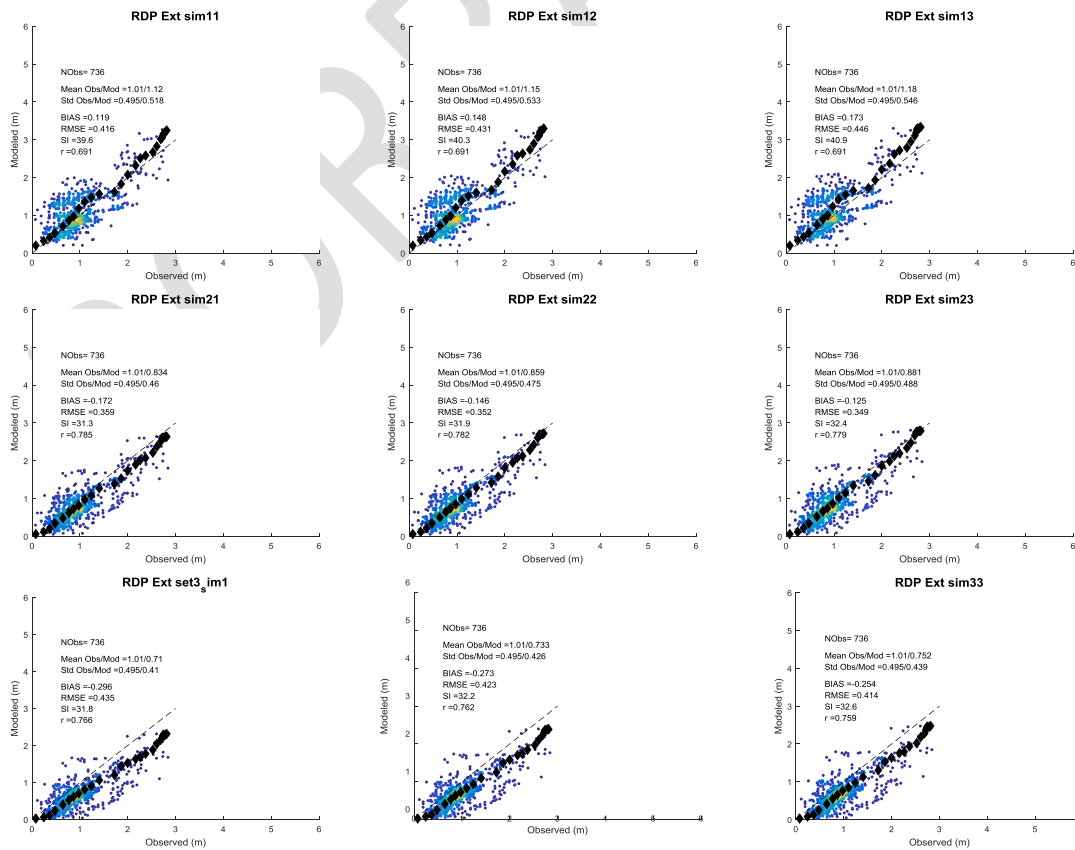


**Figura 21.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región de la costa Atlántica AtI2.**





**Figura 22.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región de la costa Atlántica At13.**



**Figura 23.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región exterior del Río de la Plata.**

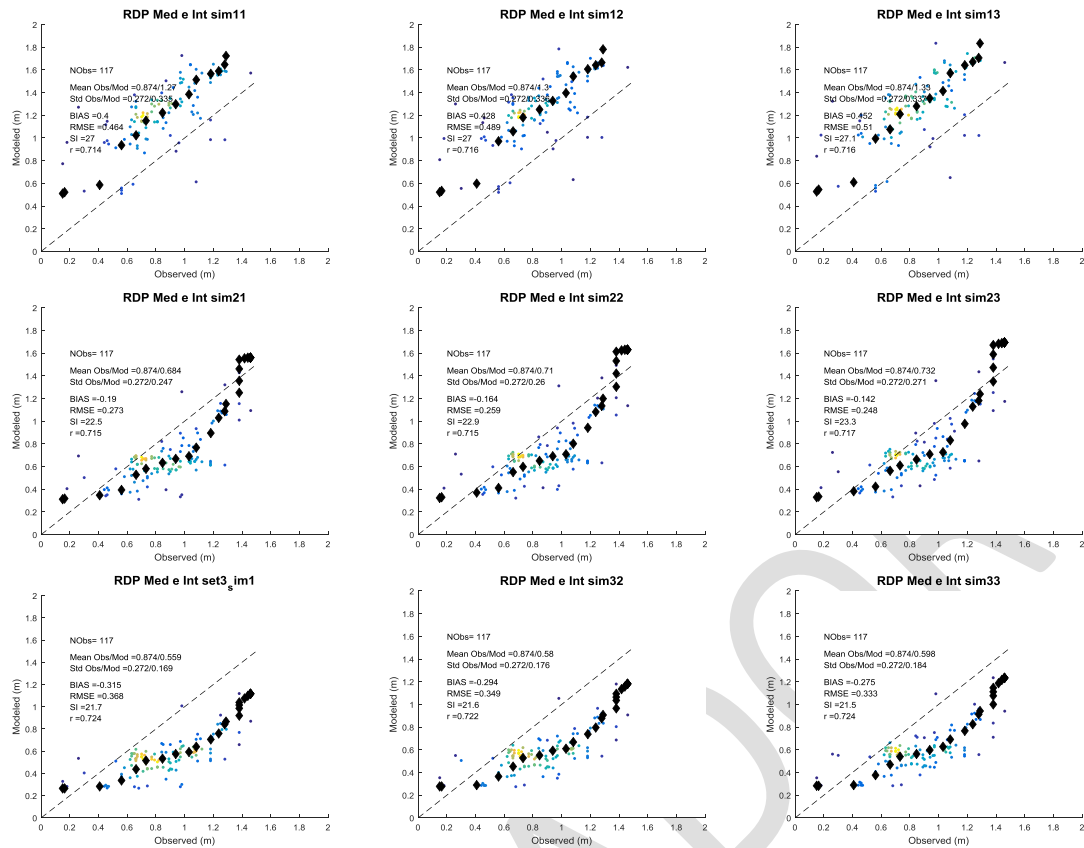


Figura 24.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región media e interior del Río de la Plata.

Tabla 5.- BIAS (m) obtenido en la región de la costa atlántica AtI2 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.01	0.02	0.06
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.1	-0.11	-0.08
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.26	-0.23	-0.20

Tabla 6.- BIAS (m) obtenido en la región de la costa atlántica AtI3 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas..

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	0.02	0.06	0.10
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.07	-0.02	0.01
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.15	-0.11	-0.07

Tabla 7.- BIAS (m) obtenidos en el Río de la Plata exterior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	0.12	0.15	0.17
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.17	-0.14	-0.12
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.30	-0.27	-0.25

Tabla 8.- BIAS (m) obtenidos en el Río de la Plata medio e interior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	0.4	0.43	0.45
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.19	-0.16	-0.14
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	-0.32	-0.29	-0.27

**Tabla 9.- Índice de dispersión (SI) obtenido en la región de la costa atlántica Atl2 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.**

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	15.7	16	16.3
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	15.2	15.3	15.6
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	16	16	16.2

**Tabla 10.- Índice de dispersión (SI) obtenido en la región de la costa atlántica Atl3 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.**

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	15.8	16.5	17.2
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	15.1	15.7	16.4
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	15.3	15.9	16.5

**Tabla 11.- Índice de dispersión (SI) obtenidos en el Río de la Plata exterior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.**

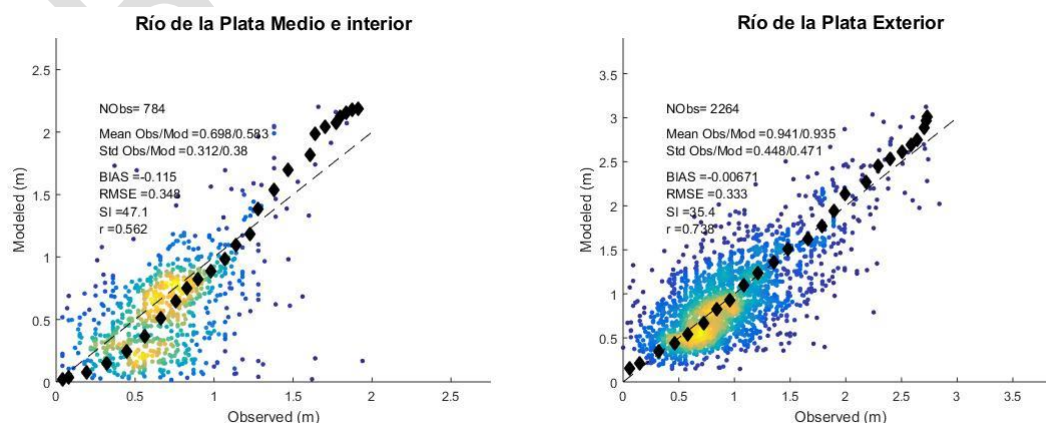
	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	39.6	40.3	40.9
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	31.3	31.9	32
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	31.8	32.2	32.6

**Tabla 12.- Índice de dispersión (SI) obtenidos en el Río de la Plata medio e interior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.**

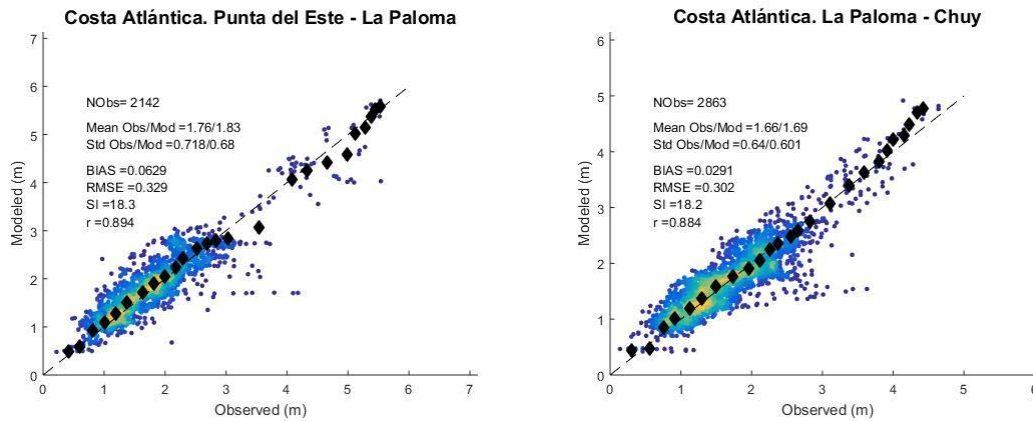
	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	27	27	27.1
GAMMA = -0.03 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	22.5	22.9	23.3
GAMMA = -0.067 m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	21.7	21.6	21.5

Se observa que los resultados obtenidos son muy sensibles al valor de GAMM. Esto pone de manifiesto el rol importante de la disipación por fondo en los procesos de transformación del oleaje en la zona de estudio, particularmente en lo que respecta al Río de la Plata. Por su parte, la sensibilidad ante el parámetro BETAMAX en los rangos considerados es menor.

Se fijó BETAMAX en 1.55 por presentar una mejor performance para los cuantiles altos y se procedió a ajustar GAMMA procurando anular el BIAS en las cuatro regiones. Esto se obtuvo por GAMMA = -0.012m<sup>2</sup>s<sup>-3</sup>. Los resultados finales para GAMMA=-0.012 m<sup>2</sup>s<sup>-3</sup> y BETAMAX=1.55, para todo el 2002 y considerando todos los datos (i.e. sin aplicar el filtro de H<sub>smod</sub> < 0.25m) se presentan en las Figuras 25 (regiones del Río de la Plata) y la Figura 26 (regiones del Atlántico).



**Figura 25.- Resultados obtenidos con BETAMAX=1.55 y GAMMA=-0.012m<sup>2</sup>s<sup>-3</sup> en la regiones del Río de la Plata (zona media e interior gráfico de la izquierda y zona exterior gráfico de la derecha ).**



**Figura 26.- Resultados obtenidos con  $BETAMAX=1.55$  y  $GAMMA=-0.012m^2s^{-3}$  en la regiones de la costa atlántica (Atl3 izquierda y Atl2 derecha ).**

#### 4 BASE DE DATOS GENERADA

Con la configuración del modelo descrita en los capítulos precedentes se simuló el período 1985 – 2016. Generándose información de dos tipos. Por un lado, campos de los distintos parámetros que describen al oleaje definidos en las grillas de cálculo y por otro, espectros bidireccionales en los puntos que se indican en la Figura 27 y la Tabla 13.

Ambos tipos de información se presenta en archivos netcdf que se contienen un mes de datos. En el caso de los campos, la nomenclatura del archivo es GNyyyyymm\_VN.nc. En donde GN es el nombre de la grilla (i.e. Region32, localF12, costaF12); yyyyymm es la fecha (e.g. junio del 2000 = 200006) y VN es el nombre de la variable. Las variables que se brindan son: velocidad de la corriente (CUR, input del modelo), velocidad del viento (WND, input del modelo), nivel del mar (WLV, input del modelo), altura de ola significativa (HS, salida del modelo), períodos medios (T02, T01, T0m1, salidas del modelo), frecuencia pico (FP), dirección media (DM), dispersión direccional (SPR, salida del modelo) y dirección pico (DP, salida del modelo). En el caso de los espectros se almacenan por mes en archivos con la siguiente nomenclatura “ww3.yyyyyymm\_spec.nc” en donde yyyyymm define el mes correspondiente.

Los puntos en donde se sacaron los espectros se agrupan en 6: A, B, C, D, E, F; y luego hay puntos singulares que se definieron debido a que hay registros de mediciones in-situ (HV, PB, GS, PQ2 y PT) o bien se los consideraron estratégicos (i.e. PN y ME). Dentro de cada grupo los puntos son numerados en sentido de este a oeste.

El grupo A comprende la costa Atlántica al este de Cabo Polonio e incluye 2 puntos en la costa de Brasil (A1 y A2). El grupo B comprende el resto de la costa Atlántica, i.e desde Punta del Este a Cabo Polonio. El grupo C comprende la costa del Río de la Plata Exterior. El grupo D abarca la costa del Río de la Plata medio comprendida entre Montevideo y la desembocadura del arroyo Cufre. El grupo E abarca la costa del Río de la Plata medio entre la desembocadura del arroyo Cufre y Colonia. Mientras que el grupo F abarca la costa del Río de la Plata superior (i.e. al oeste de Colonia).

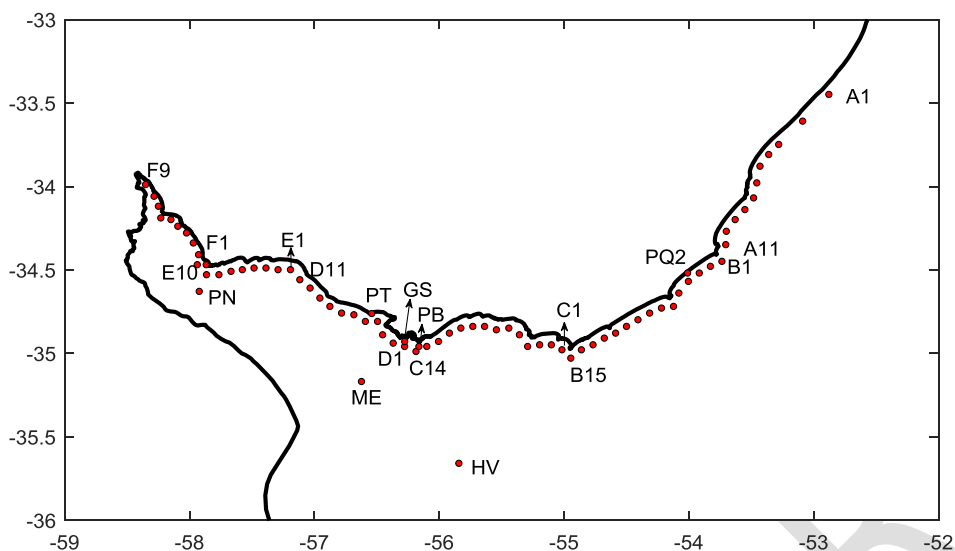


Figura 27.- Puntos en donde se generaron series temporales de espectros direccionales..

Tabla 2.- Coordenadas de los puntos en donde se sacaron los espectros.

A1	-52,876	-33,452	Costa de Brasil
A2	-53,087	-33,609	Costa de Brasil
A3	-53,278	-33,751	Chuy
A4	-53,358	-33,811	
A5	-53,428	-33,883	
A6	-53,453	-33,975	
A7	-53,479	-34,068	
A8	-53,549	-34,136	
A9	-53,627	-34,199	
A10	-53,698	-34,270	
A11	-53,702	-34,354	Valizas
B1	-53,733	-34,447	Cabo Polonio
B2	-53,825	-34,479	
B3	-53,914	-34,524	
B4	-54,001	-34,574	El Palenque
B5	-54,078	-34,636	
B6	-54,121	-34,720	La Paloma
B7	-54,217	-34,726	
B8	-54,312	-34,759	
B9	-54,405	-34,795	
B10	-54,497	-34,836	
B11	-54,584	-34,882	
B12	-54,675	-34,906	
B13	-54,765	-34,949	
B14	-54,859	-34,983	
B15	-54,943	-35,033	Punta del Este
C1	-55,014	-34,978	
C2	-55,099	-34,948	
C3	-55,193	-34,949	
C4	-55,289	-34,958	Piriápolis
C5	-55,355	-34,886	
C6	-55,440	-34,852	
C7	-55,539	-34,857	
C8	-55,634	-34,838	
C9	-55,728	-34,836	
C10	-55,824	-34,847	
C11	-55,916	-34,885	
C12	-56,003	-34,934	
C13	-56,097	-34,961	
C14	-56,184	-34,993	Montevideo.
D1	-56,274	-34,964	Montevideo
D2	-56,366	-34,940	
D3	-56,451	-34,891	
D4	-56,491	-34,810	
D5	-56,589	-34,812	
D6	-56,681	-34,774	
D7	-56,779	-34,755	
D8	-56,873	-34,725	
D9	-56,953	-34,673	
D10	-57,032	-34,611	
D11	-57,114	-34,556	Cufré
E1	-57,189	-34,503	Cufré
E2	-57,288	-34,497	
E3	-57,385	-34,487	
E4	-57,481	-34,493	
E5	-57,574	-34,503	
E6	-57,665	-34,508	
E7	-57,762	-34,530	
E8	-57,861	-34,533	
E9	-57,935	-34,471	
E10	-57,864	-34,473	Colonia
F1	-57,925	-34,409	
F2	-57,967	-34,343	
F3	-58,021	-34,281	
F4	-58,091	-34,244	
F5	-58,146	-34,197	
F6	-58,227	-34,188	
F7	-58,247	-34,116	
F8	-58,281	-34,060	
F9	-58,349	-33,994	
HV	-55,840	-35,660	Hidrovia
PB	-56,160	-34,960	Punta Brava
GS	-56,274	-34,930	Gas Sayago
PQ2	-54,008	-34,520	ADCP Palenque
PT	-56,538	-34,763	Punta Tigre
PN	-57,920	-34,628	Pilote Norden
ME	-56,620	-35,170	

---

## 5 CONCLUSIONES Y PASOS FUTUROS.

Se desarrolló un *hindcast* de oleaje que provee resultados a lo largo de toda la costa de Uruguay con una resolución espacial de 40'' (~1 km) y temporal de 1h. A su vez, todo el Río de la Plata medio e interior es también resuelto con 40'' de resolución mientras que el Río de la Plata exterior y la plataforma continental Atlántica es resuelta con una resolución espacial de 2' (~3 km).

El modelo de oleaje utilizado fue calibrado y validado con datos altimétricos de altura de ola significativa, mostrando una muy buena performance en el Atlántico. Si bien la performance desmejora en el Río de la Plata, esta se la considera aceptable y mejora significativamente los resultados antecedentes (Alonso et al. 2015), ya que se obtuvieron BIAS próximos a cero y curvas cuantil-cuantil que se ajustan a la recta identidad.

La calibración del modelo dejó en evidencia el rol clave de la disipación de energía por fricción de fondo entre los distintos procesos de transformación del oleaje que ocurren en el Río de la Plata. Este proceso fue modelado con la parametrización JONSWAP y el parámetro involucrado en la misma fue uno de los considerados en la calibración del modelo. Por lo tanto, se entiende que se lograron los mejores resultados posibles utilizando esta parametrización.

Las tareas futuras en el corto plazo consisten en realizar análisis comparativos de los resultados del *hindcast* con todos los registros de mediciones in-situ disponibles. Mientras que en el mediano plazo, se procurará mejorar los resultados en el Río de la Plata a partir de usar una parametrización de disipación por fondo más apropiada a las características del estuario, así como a partir de una mejora en los campos de viento forzante. Se entiende que estos son los dos motivos principales que explican la diferencia entre la performance obtenida en el Atlántico respecto a la obtenida en el Río de la Plata, ya que en el primero el viento está mejor representado por los datos CFSR y la disipación por fondo no tiene tanto peso relativo como en el estuario.

## 6 REFERENCIAS.

- Alonso, R., Solari, S., & Teixeira, L. (2015). Wave energy resource assessment in Uruguay. *Energy*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.114>
- Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [access date].
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., ... Collard, F. (2009). Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation, (1). <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
- Babanin, A. V., Chalikov, D., Young, I. R., & Savelyev, I. (2010). Numerical and laboratory investigation of breaking of steep two-dimensional waves in deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 644(February 2010), 433–463. <https://doi.org/10.1017/S002211200999245X>

- 
- Babanin, A. V., & Haus, B. K. (2009). On the Existence of Water Turbulence Induced by Nonbreaking Surface Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 39(10), 2675–2679. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4202.1>
- Babanin, A. V. (2006). On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer. *Geophysical Research Letters*, 33(20), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL027308>
- Babanin, A. V., Ganopolski, A., & Phillips, W. R. C. (2009). Wave-induced upper-ocean mixing in a climate model of intermediate complexity. *Ocean Modelling*, 29(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.04.003>
- Campos, R. M., & Alves, J. (2013). Estimating Extreme Waves in the South Atlantic Ocean Using Regional Frequency Analysis and Wave Model Hindcast Data, 2013.
- Chawla, A. and H. L. Tolman, 2007: Automated grid generation for WAVEWATCH III. Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 71 pp.
- Filipot, J. F., & Ardhuin, F. (2012). A unified spectral parameterization for wave breaking: From the deep ocean to the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2011JC007784>
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 95 pp
- Hervouet (2007): Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method. Jhon Wiley & Sons Ltd, chichester, UK.
- Leckler, F., Ardhuin, F., Filipot, J. F., & Mironov, A. (2013). Dissipation source terms and whitecap statistics. *Ocean Modelling*, 70, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.03.007>
- QGIS Development Team, 2009. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.osgeo.org>
- Queffelec P. & Croizé-Fillon D. (2013). Global altimeter SWH data set. IFREMER internal technical report.
- Saha, S., Moorthi, S.; Pan, H.-L.; Wu, X.; Wang, J. (2010). *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. Bulletin American Meteorological Society, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1058.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Stopa, J. E., Ardhuin, F., Babanin, A., & Zieger, S. (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models. *Ocean Modelling*, 103(July), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>

---

Wessel, P. and W. Smith, 1996: A global self-consistent hierarchical high resolution shoreline database. *J. Geophys. Res.*, 101(B4), 8741 { 8743.

WW3DG, The WAVEWATCH III® Development Group (2016). "User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 5.16". Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.

Zieger, S., Babanin, A. V., Erick Rogers, W., & Young, I. R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Modelling*, 96(August 2016), 2–25. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.014>

BORRADOR