



“ESTUDIO DEL RECURSO ENERGÉTICO MARINO DE LA
PATAGONIA AUSTRAL”
INFORME FINAL

Decano de la Facultad de Ingeniería

Ing. Marcos D. Actis

Director del Departamento de Hidromecánica

Ing. Sergio O. Liscia

Equipo de Trabajo: Grupo Hidráulica Marítima

Coordinador: Ing. Roberto M. Cecotti

Dr. Ing. Raúl A. Cáceres

Ing. Nicolás Tomazín

Ing. Nicolás Buono

Ing. Federico Zabaleta

Ing. Evangelina Garavento

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: Generalidades	1
1.1. Marco del Estudio	1
1.2. Objetivo del estudio	1
CAPÍTULO II: Antecedentes e información de base	2
2.1. Introducción	2
2.2. Descripción General	4
2.3. Hidrografía	6
2.4. Clima	10
2.5. Vientos	11
2.6. Geología / Suelos	27
2.7. Caracterización del oleaje	30
2.7.1. Estudios Antecedentes	30
2.7.2. Modelos globales de olas. Generalidades	34
2.7.3. Modelos globales de olas. Resultados del análisis	36
2.7.4. Análisis espectral y paramétrico	45
2.8. Mareas	57
2.8.1. Modelos globales de mareas	58
CAPÍTULO III: Modelación Hidrodinámica	60
3.1. Modelos a Utilizar	60
3.2. Configuración del modelo hidrodinámico	61
3.3. Calibración y Validación	63
3.4. Potencial Hidrocinético	70
3.5. Corrientes y energía disponible en el estuario de Río Gallegos	75
3.5.1. Velocidad Instantánea	75
3.5.2. Densidad de Potencia Instantánea	76
3.5.3. Densidad de Potencia con garantías	77
3.5.4. Potencia por metro de ancho	80
3.6. Potencial energético extraíble del estuario	81
3.7. Respuesta del sistema con obras	91
CAPITULO IV: Estudio de oleaje	95

TABLA DE CONTENIDOS

4.1. Modelo Matemático _____	95
4.2. Caracterización general _____	97
4.3. Análisis complementario de oleaje _____	107
CAPITULO V: Evaluación morfológica _____	113
CAPITULO VI: Resumen y Conclusiones _____	123
BIBLIOGRAFÍA _____	130
Anexo I: Caracterización Espectral del Oleaje _____	134
Anexo II: Base de datos de vientos. Comparación entre fuentes de información. _____	152
Anexo III: Mapas. Resultados modelación _____	155

CAPÍTULO I: Generalidades

1.1. Marco del Estudio

El presente estudio tiene su origen en un requerimiento de YPF Tecnología S.A. (Y-TEC) al Laboratorio de Hidromecánica del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, para realizar estudios sobre el potencial hidrocínético de las corrientes de marea en distintos sitios de la costa patagónica, a los efectos de su utilización como generadoras de energía de tipo renovable.

Uno de los objetivos clave de Y-TEC es investigar y desarrollar tecnologías orientadas a la obtención y almacenamiento de energías de fuentes no agotables, que contribuyan a fortalecer la matriz energética actual, haciendo hincapié en la sustentabilidad y el cuidado del medio ambiente. En el amplio espectro de fuentes de energía renovable disponibles en la naturaleza, el aprovechamiento de las energías que aportan los océanos ocupa un lugar preponderante.

El potencial energético del mar de la Patagonia austral, tanto de corrientes oceánicas como de mareas, es considerado uno de los más importantes del mundo. Entre los sitios más destacados se encuentran la región del Estrecho de Magallanes y el estuario del Río Gallegos.

1.2. Objetivo del estudio

El objetivo del presente trabajo de investigación es alcanzar una descripción del potencial de generación de energía de las corrientes generadas por las mareas, de tal manera que permita la elección de los mejores sitios para la instalación de equipos con las tecnologías que mejor se adapten a las condiciones locales y que están siendo objeto de investigación.

El trabajo consistió en un detallado análisis del estuario del Río Gallegos como área potencial para desarrollos de sistemas hidrocínéticos. En etapas posteriores, este tipo de estudios podría extenderse a otros sitios de interés como la Desembocadura del Estrecho de Magallanes y otras zonas donde la geomorfología local y las condiciones hidrodinámicas, contribuya a generar corrientes de flujo y reflujos de una magnitud beneficiosa para los objetivos planteados.

CAPÍTULO II: Antecedentes e información de base

2.1. Introducción

Con un litoral marítimo de 3.500 km de extensión, la Costa Patagónica representa un excelente campo para el aprovechamiento de la energía oceánica, un recurso renovable que se produce por el movimiento de las mareas, las olas y las corrientes en los océanos. La presencia de estrechos, bahías y estuarios naturales, combinada con la gran amplitud de marea característica de la zona, genera altas velocidades de corrientes de flujo y reflujos, que podrían ser aptas para la instalación de turbinas hidrocinéticas, capaces de aprovechar la enorme cantidad de energía que este movimiento trae aparejado.

Hasta el presente esta poderosa fuente de energía limpia no ha sido aprovechada significativamente. Asimismo, las mareas son predecibles en el tiempo y su variación por efectos meteorológicos sólo ocurre en cortos períodos, lo cual presenta una ventaja adicional frente a otros aprovechamientos energéticos renovables.

Los recientes avances en la tecnología aplicada a la obtención de energía de las mareas y la necesidad de zonas adecuadas de implantación, justifican la investigación del potencial del litoral patagónico para la generación de energía, así como de las características propias de la dinámica costera en esta zona. Esta información es indispensable para la toma de decisiones relacionadas con el diseño de equipos, selección de sitios convenientes de instalación de las turbinas y los problemas que pueden presentarse en la explotación. Por otra parte, estos estudios y el desarrollo de proyectos de equipos generadores que aprovechen la energía hidrocinética, en forma complementaria contribuirán a la generación de empleos, la estimulación de economías locales y permitirán una reducción de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y CO₂.

La selección del sitio es fundamental para los proyectos de energía hidrocinética, dado que la energía cinética de una corriente está relacionada con su velocidad elevada al cubo. Esto significa que un flujo de la marea en movimiento, que se desplaza el doble de rápido que otra corriente de marea de igual volumen, generará ocho veces más energía. Debido a que las zonas a evaluar para la instalación de equipos generadores representan extensiones muy importantes, estudios basados en modelación matemática se presentan como una herramienta ventajosa de aplicación en cuanto a plazos razonables de estudio. En efecto, un modelo matemático hidrodinámico permite evaluar diversos escenarios y condiciones de clima marítimo, para diferentes puntos de la zona costera. Asimismo, la representatividad de estos resultados puede ser mejorada considerablemente a partir de mediciones de campo en zonas determinadas. Esta modelación debe efectuarse de manera tal de poder integrar con éxito y con precisión los modelos de macro

escala con los de pequeña escala y predecir en forma fiable los campos de corrientes adecuados que permitan definir los lugares óptimos para la instalación de equipos.

Cabe mencionar también que en el Estuario de Río Gallegos se desarrolla un importante proceso de transporte, remoción y re-depósito de sedimentos arenosos. Los sedimentos costeros provienen de los ríos que se originan en el macizo cordillerano, y por efecto de las corrientes de deriva costera se depositan a lo largo de la costa. Asimismo, el proceso constante de erosión a que se ven sometidos los acantilados, principalmente por acción del oleaje incidente, aporta más sedimentos al sistema. Vientos y tormentas activan el sistema integrándolo con los médanos, generando alternativamente procesos de remoción y depósito, tanto en sentido longitudinal como transversal a la línea de costa.

Todo lo anterior indica la necesidad de realizar un análisis hidrodinámico y morfológico de la zona de estudio, que incluya además estrategias para determinar las zonas más aptas para la instalación de equipos de generación de energía hidrocínética.

En el presente capítulo se presenta una descripción de las principales características físicas y ambientales de la zona de estudio. Dicho análisis fue realizado en base a una recopilación y procesamiento de estudios antecedentes y datos de variables físicas que serán aplicados en etapas posteriores del presente estudio.

2.2. Descripción General

Río Gallegos es la capital de la provincia de Santa Cruz, y se asienta sobre la margen sur del estuario homónimo. La ciudad de Río Gallegos, con más de 90.000 habitantes, se conecta con el resto del país hacia el norte por la Ruta Nacional N° 3, hacia el sudoeste mediante la Ruta Nacional N° 40, y la Ruta Provincial N° 5 la conecta con los centros turísticos El Calafate y El Chaltén (Figura 2.1).

La ciudad está fundada sobre terrazas fluviales formadas por sedimentos fluvio-glaciares, con pendiente de sudoeste a noreste. El Estuario de Río Gallegos posee una orientación dada por la erosión glaciaria y eólica, sobre algunos paleocauces rellenos por arcillas, limos y arenas.

El estuario en estudio posee una extensión aproximada de 30 km y cuenta con un ancho variable de 2 km en su parte superior hasta unos 5 km en la zona exterior, en su desembocadura al mar, delimitada por la línea imaginaria entre punta Loyola y punta Bustamante.

Desde el punto de vista ambiental, se identifica a la región como zona de pastizales inundables, con predominio de coirones, arbustales de mata verde y hacia la costa se evidencia la presencia de marismas con vegetación escasa y extensas planicies intermareales fangosas (Decristóforo et al., 2014).

Es para destacar que el estuario de Río Gallegos forma parte también de la categorización como Sitio de Importancia Internacional según la Red Hemisférica de Reservas de Aves Playeras (RHRAP) y como un Área de Importancia para la Conservación de Aves en Argentina (AICA) por BirdLife International, la cual protege porcentajes significativos de las poblaciones mundiales de algunas especies de aves en riesgo, como lo son el Macá Tobiano y el Chorlito Ceniciento. Otras de las aves que se encuentran dentro de la región y se ven caracterizada por ellas son el Playero Rojizo y el Ostrero Austral (Ferrari et al., 2005).



Figura 2.1. Provincia de Santa Cruz

2.3. Hidrografía

La cuenca del río Gallegos pertenece a los sistemas de ríos patagónicos (Figura 2.2). Comparte la cuenca con el río Chico, atravesando la provincia de Santa Cruz de oeste hacia el este. La superficie de la cuenca es de 9.554 km² (Figura 2.3). Aguas arriba, el río Gallegos escurre por un valle estrecho y encajonado. En su curso medio e inferior crece hasta los 2 o 3 km de ancho. En esta área las márgenes presentan barrancas con alturas variables. La longitud del río es de unos 300 km, de los cuales los últimos 45 km están influenciados por las mareas oceánicas (Valladares, 2004).

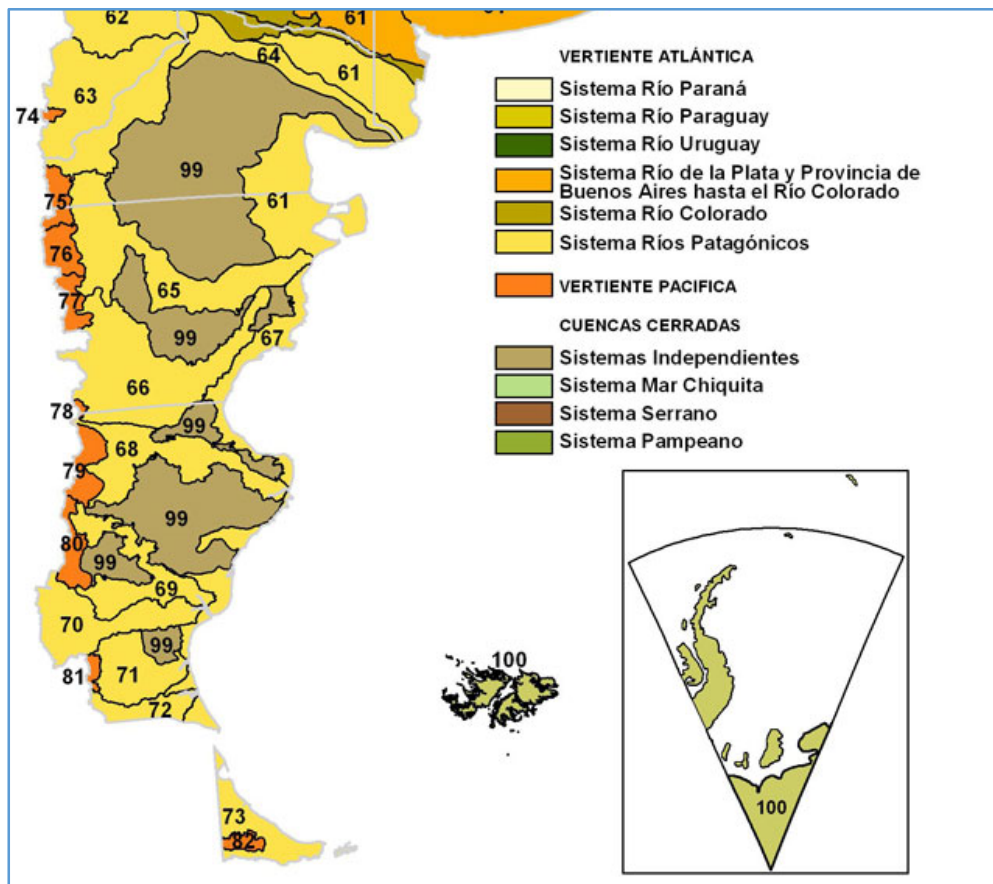


Figura N° 2.2 Cuencas hidrográficas (Fuente: Mapa Recursos Hídricos de la Nación)

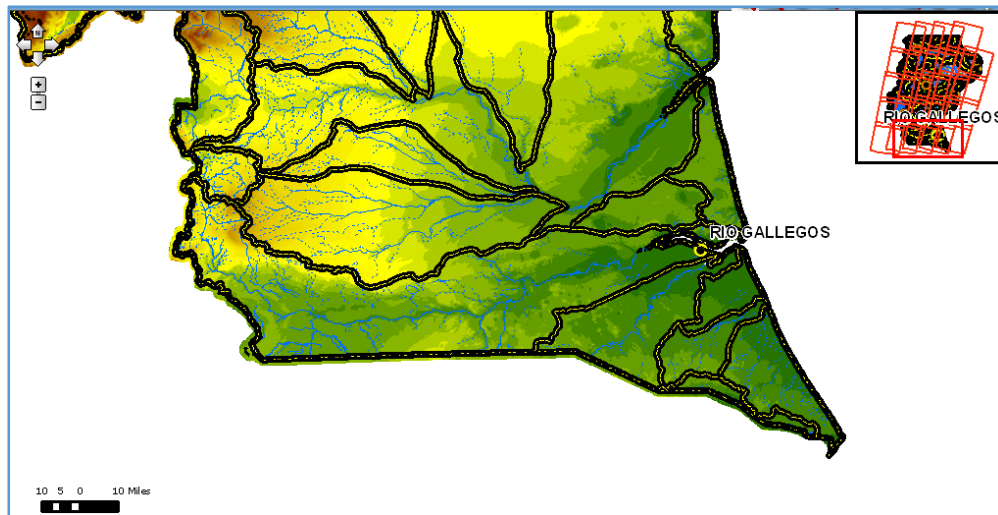


Figura N° 2.3 Cuenca Río Gallegos (Fuente: Mapa Recursos Hídricos de la Nación)

El río Gallegos presenta su nacimiento en el río Turbio, el cual fluye hacia el sur bordeado hacia el oeste por la cordillera de los Andes y hacia el norte y el este por la cordillera Chica y la meseta Latorre. En su primer tramo y desde la margen derecha recibe afluentes que provienen de territorio chileno, uno de ellos es el Penitentes. Antes de cruzar la frontera recibe aguas de los ríos Medio y Vegas Malas. Ya en territorio argentino, el Penitentes se transforma en un río meandroso, recibiendo por margen izquierda el aporte de río Rubens. En su curso medio recibe aportes del río Zurdo (Valladares, 2004).

Hacia aguas abajo, la separación de los escalones mesetarios permite la ampliación del valle del río Gallegos, a partir de donde continúa su curso de forma meandrosa. Luego de recibir la confluencia del río Chico, los escalones comienzan a estrecharse. Desde aquí diferentes ríos intermitentes aportan al río Gallegos en ambas márgenes a través de cañadones.

A partir de información recopilada del Sistema Nacional de Información Hídrica, Base de Datos Hidrológica Integrada, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se realizó un análisis descriptivo del río Gallegos. En las Figuras 2.4 a 2.6 se muestran los caudales medios diarios, gráfico de frecuencia de excedencia y caudales medios mensuales. El caudal módulo del río es de $34 \text{ m}^3/\text{s}$, con caudales máximos de 250 a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de octubre, y algunos eventos en Julio con caudales superiores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$ segundo.

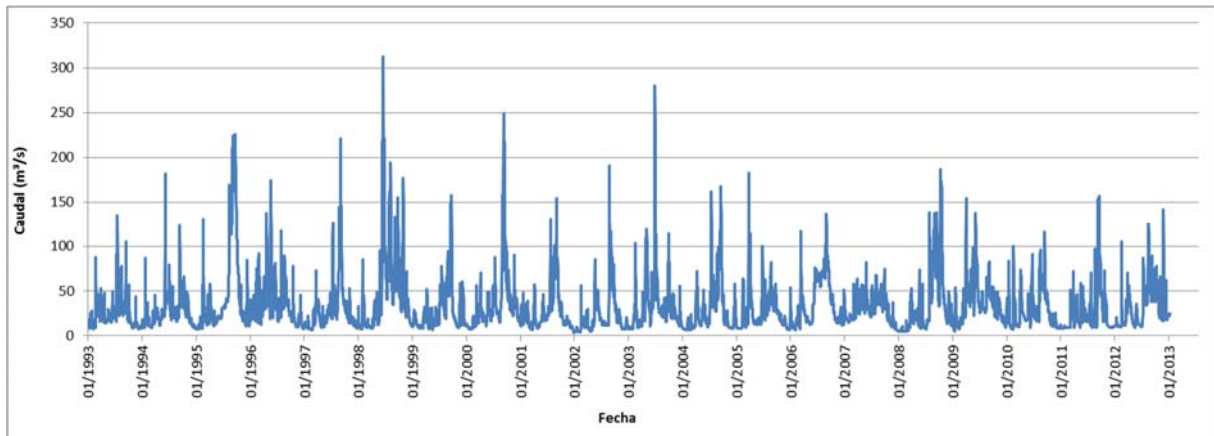


Figura N° 2.4. Caudales medios diarios en el río Gallegos, estación Puente Blanco (Fuente: elaborado en base a la información de la SSRH, 2014)

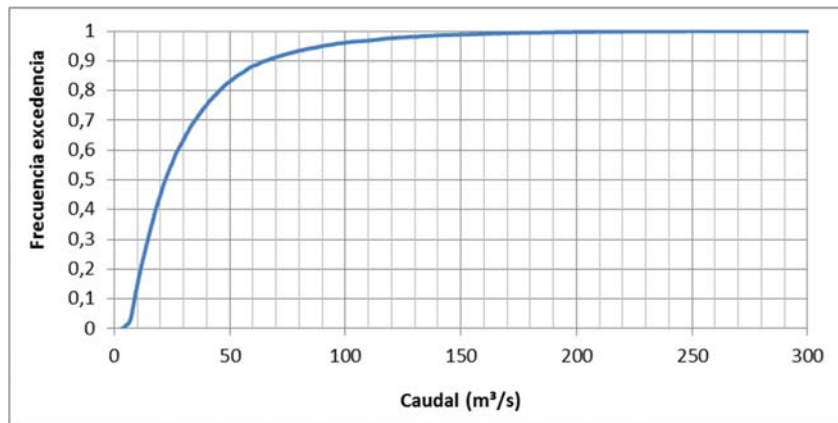


Figura N° 2.5. Frecuencia de excedencia en el río Gallegos, estación Puente Blanco (Fuente: elaborado en base a la información de la SSRH, 2014)

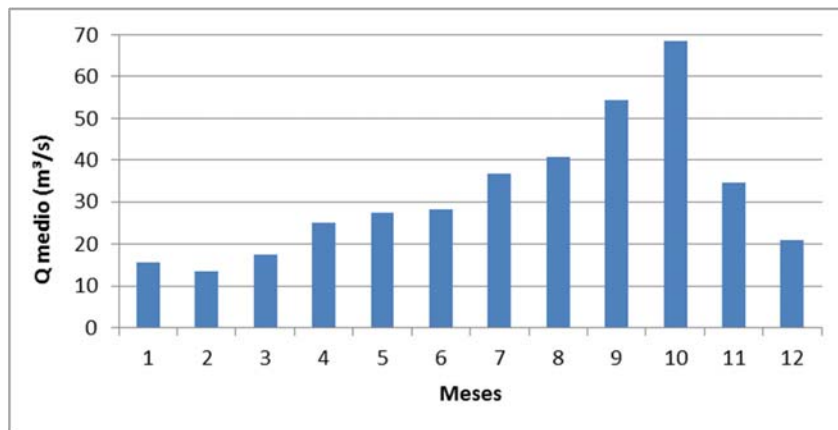


Figura N° 2.6. Caudales medios mensuales en el río Gallegos, estación Puente Blanco (Fuente: elaborado en base a la información de la SSRH, 2014)

Adicionalmente, se ha obtenido una serie de caudales medida en la estación “Las Buitreras”, ubicada a 40 km del puente de Guer Aike de la Ruta Nacional Nº 3, próximo a la desembocadura del río Gallegos. Dicha estación no recibe aportes fluviales significativos aguas abajo, de manera que puede considerarse como la descarga directa sobre el Estuario.

Esta base de datos fue obtenida para el período 1993-1998, y por su correlación con la estación Puente Blanco del Sistema Nacional de Información Hídrica de la SSRHN, fue posible extender la serie de caudales hasta el año 2013. El caudal medio anual es del orden de 40 m³/s. A continuación se presentan la serie de caudales, gráfico de excedencia y valores medios mensuales.

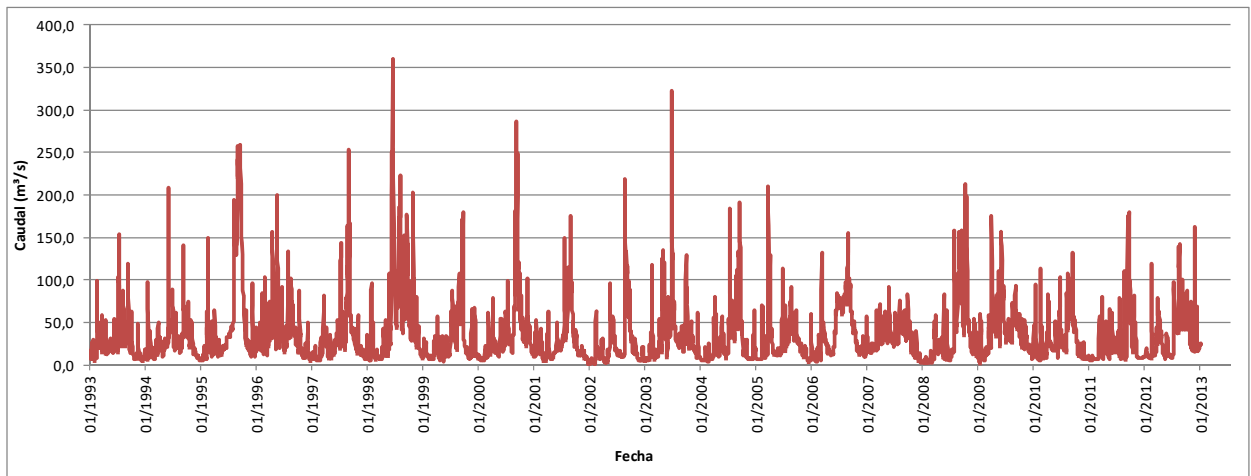


Figura 2. 7. Caudales medios diarios en el río Gallegos, estación Las Buitreras

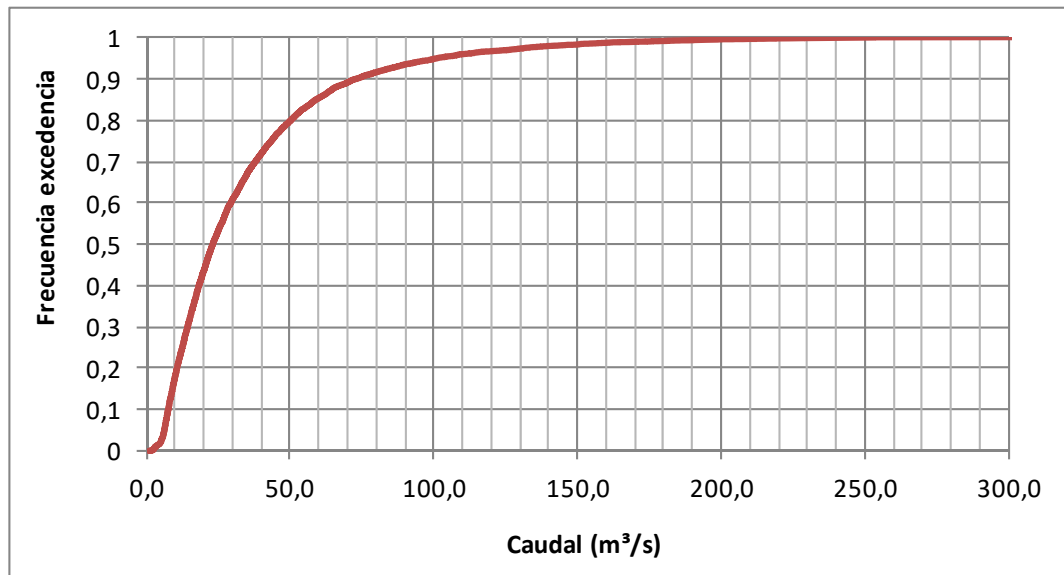


Figura 2. 8. Frecuencia de excedencia en el río Gallegos, estación Las Buitreras

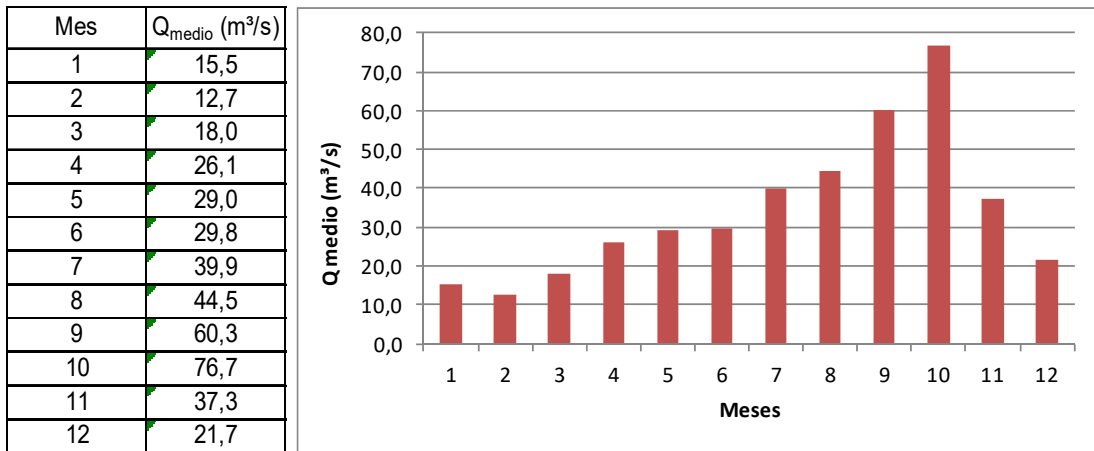


Figura 2. 9. Caudales medios mensuales en el río Gallegos, estación Las Buitreras

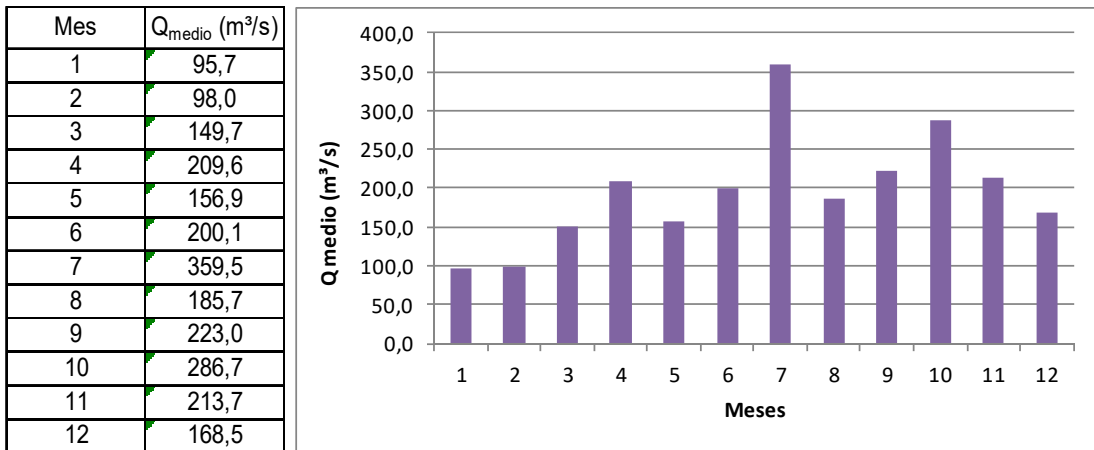


Figura 2. 10. Caudales máximos históricos por mes en el río Gallegos, estación Las Buitreras

2.4. Clima

Los paisajes de Santa Cruz son muy similares a los del resto de la región patagónica. La mayor parte de la provincia pertenece a la región del semidesierto patagónico, donde el clima es frío y seco, y los vientos constantes.

La temperatura promedio es de 13° C en verano y 3° C en invierno. En los meses más fríos (mayo, junio, julio y agosto) la mínima puede alcanzar 25° C bajo cero. En la meseta central las precipitaciones son reducidas: varían entre 150 y 200 mm anuales. La zona que corresponde a los Andes se caracteriza por su clima nival. En Santa Cruz soplan vientos de distintos sectores. Los que corren de noroeste a sudeste, cargados de humedad, favorecen al norte de la Patagonia. Los vientos del oeste, aunque soplan durante todo el año, predominan en primavera y verano.

La temperatura promedio de la ciudad de Río Gallegos en invierno es de 5°C en el día y -2°C en la noche, mientras que en verano el promedio es de 19°C, y en la noche suele bajar hasta los 7°C. La temperatura media anual de la ciudad es de 7,6°C. La precipitación anual es de 270 mm, en promedio (Figura 2.11).

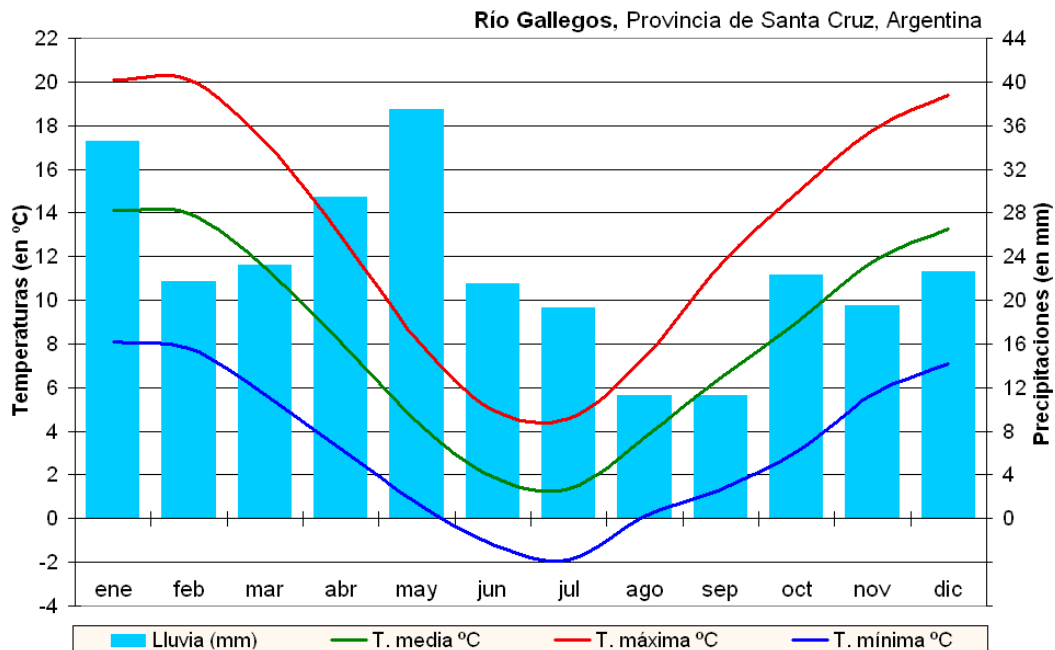


Figura N° 2.11. Temperaturas y precipitaciones promedio anuales en Río Gallegos (Fuente: Mapa Recursos Hídricos de la Nación)

La presión atmosférica media anual es de 1.001,2 hPa. El valor máximo se registra en mayo con 1.002,6 hPa y el menor en enero con 998,8 hPa. Por su parte, La media anual de humedad relativa ambiente es del 66 %.

2.5. Vientos

Los vientos intensos son una característica distintiva del clima patagónico en general y de la provincia de Santa Cruz en particular. A partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional, se obtuvieron representaciones de distribución de vientos por dirección e intensidad.

La representación más utilizada para analizar la distribución de direcciones es la Rosa de los Vientos, que consiste en un diagrama circular que muestra los puntos cardinales, sobre los que se representan la frecuencia porcentual del viento y la distribución de velocidades medias para cada intervalo direccional durante determinados periodos de tiempo.

En la presente sección se realiza un análisis detallado de los datos de vientos disponibles en el área de influencia del Estuario de Río Gallegos. Asimismo, se realizó una validación de los datos provenientes de modelos meteorológicos globales, para su posterior implementación en los modelos SWAN y Delft3D.

En el análisis se utilizaron datos provenientes de dos fuentes. La primera fue la base de datos pública NCEP/NCAR, cuya información fue generada por un modelo meteorológico global. El NCEP (National Center of Environmental Prediction) y el NCAR (National Center of Atmospheric Research) han trabajado en conjunto en el marco del proyecto “NCEP/NCAR 40-years Reanalysis” para crear un registro de gran duración de parámetros atmosféricos globales, con el fin de proveer a las comunidades científicas y de monitoreo climático, una base de datos confiable para el trabajo y la investigación. Estos datos fueron validados con información provista por numerosos organismos de distintas regiones del mundo. La segunda fuente utilizada fueron los datos medidos por el Servicio Meteorológico Nacional en la estación meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos.

En el presente análisis se consideraron las direcciones e intensidades de vientos correspondientes a dos nodos del Modelo Global NCEP/NCAR: $51^{\circ}40'12''S$; $69^{\circ}03'36''O$ y $51^{\circ}40'12''S$; $67^{\circ}30'00''O$ (Figura 2. 12). La serie de datos tiene una longitud de 10 años, medidos cada una hora, desde el 01/01/1999 al 31/12/2009.



Figura 2. 12: Nodos analizados del Modelo Global NCEP/NCAR. Fuente de Imagen de fondo: Google Earth

Se realizó un análisis direccional de vientos, basados en una clasificación de 16 cuadrantes y con rangos de intensidad de 10 km/h. Los resultados obtenidos fueron representados en rosas de vientos y tablas de frecuencia de Dirección-Intensidad (Figuras 2.13 y 2.14, Tablas 2.1 y 2.2).

En ambos nodos puede observarse una distribución muy similar de direcciones, con una gran concentración de datos en W y WSW (42% del total) y casi la totalidad de los datos en el cuadrante SW, NW (aproximadamente el 70%). Esto muestra una orientación muy clara de los vientos predominantes. Por otro lado, puede verse también una presencia importante de vientos provenientes de las direcciones N-NE, que si bien tienen frecuencias menores a los provenientes del SW (14%), tienen un peso importante en el conjunto total.

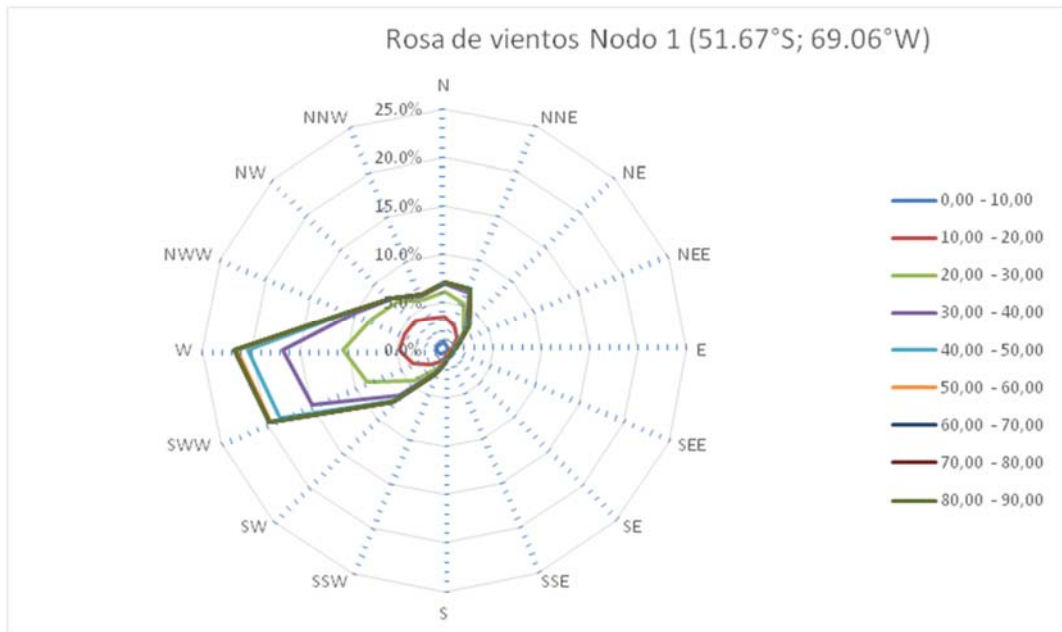


Figura 2. 13: Rosa de vientos Nodo 1. Intensidades de viento en km/h. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

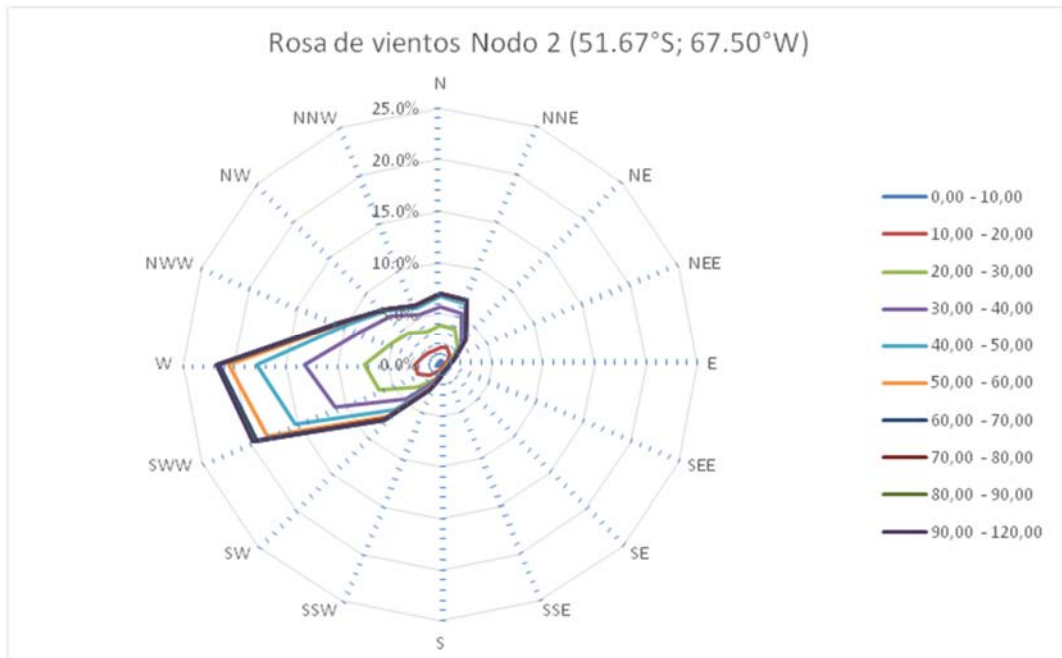


Figura 2. 14: Rosa de vientos Nodo 2. Intensidades de viento en km/h. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

Intensidad	Dirección																Ocurrencia
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0,00 - 10,00	0,70	0,53	0,47	0,33	0,27	0,24	0,26	0,24	0,29	0,36	0,55	0,72%	0,87	0,88%	0,85	0,77%	8%
10,00 - 20,00	2,81	2,17	1,23	0,57	0,33	0,28	0,24	0,32	0,55	0,94	1,68	2,86%	3,83	3,58%	3,43	2,86%	28%
20,00 - 30,00	2,58	2,51	1,01	0,47	0,25	0,20	0,17	0,19	0,35	0,85	2,29	5,08%	5,79	3,83%	2,77	2,09%	30%
30,00 - 40,00	0,83	1,26	0,51	0,13	0,08	0,08	0,07	0,08	0,12	0,40	2,06	6,13%	6,21	1,70%	0,62	0,49%	21%
40,00 - 50,00	0,13	0,35	0,22	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,07	0,89	3,63%	3,64	0,51%	0,06	0,05%	10%
50,00 - 60,00	0,02	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,13	1,05%	1,13	0,11%	0,01	0,00%	3%
60,00 - 70,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,16%	0,23	0,01%	0,00	0,00%	0%
70,00 - 80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02%	0,05	0,01%	0,00	0,00%	0%
80,00 - 90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0%
Ocurrencia	7%	7%	3%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	3%	8%	20%	22%	11%	8%	6%	

Tabla 2.1: Distribución Intensidad – Dirección Nodo 1. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

Intensidad	Dirección																Ocurrencia
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0,00 - 10,00	0,37	0,42	0,38	0,19	0,12	0,10	0,10	0,09	0,14	0,19	0,29	0,36%	0,30	0,23%	0,23	0,28%	4%
10,00 - 20,00	1,31	1,41	0,97	0,50	0,28	0,23	0,22	0,25	0,33	0,57	1,21	1,98%	2,11	1,63%	1,37	1,21%	16%
20,00 - 30,00	2,15	2,00	0,97	0,41	0,30	0,22	0,19	0,23	0,33	0,74	1,60	4,07%	4,96	3,36%	2,76	1,97%	26%
30,00 - 40,00	1,85	1,64	0,66	0,28	0,15	0,17	0,14	0,15	0,29	0,54	1,66	4,58%	5,81	3,23%	2,33	1,80%	25%
40,00 - 50,00	0,98	0,93	0,32	0,12	0,09	0,08	0,07	0,07	0,14	0,40	1,46	4,22%	4,73	1,52%	0,86	0,74%	17%
50,00 - 60,00	0,31	0,34	0,13	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,08	0,15	0,97	2,99%	2,66	0,50%	0,17	0,21%	9%
60,00 - 70,00	0,08	0,10	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,35	1,14%	0,89	0,12%	0,02	0,04%	3%
70,00 - 80,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,24%	0,23	0,03%	0,00	0,00%	1%
80,00 - 90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07%	0,05	0,00%	0,00	0,00%	0%
90,00 - 120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01	0,00%	0,00	0,00%	0%
Ocurrencia	7%	7%	3%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	3%	8%	20%	22%	11%	8%	6%	

Tabla 2.2: Distribución Intensidad - Dirección Nodo 2. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

Se realizó también un análisis de las intensidades de vientos (Figura 2.15), en donde se puede observar una zona con un clima de vientos muy severo con valores muy elevados y durante un largo período del año (superiores a 20 km/h el 64% del tiempo).

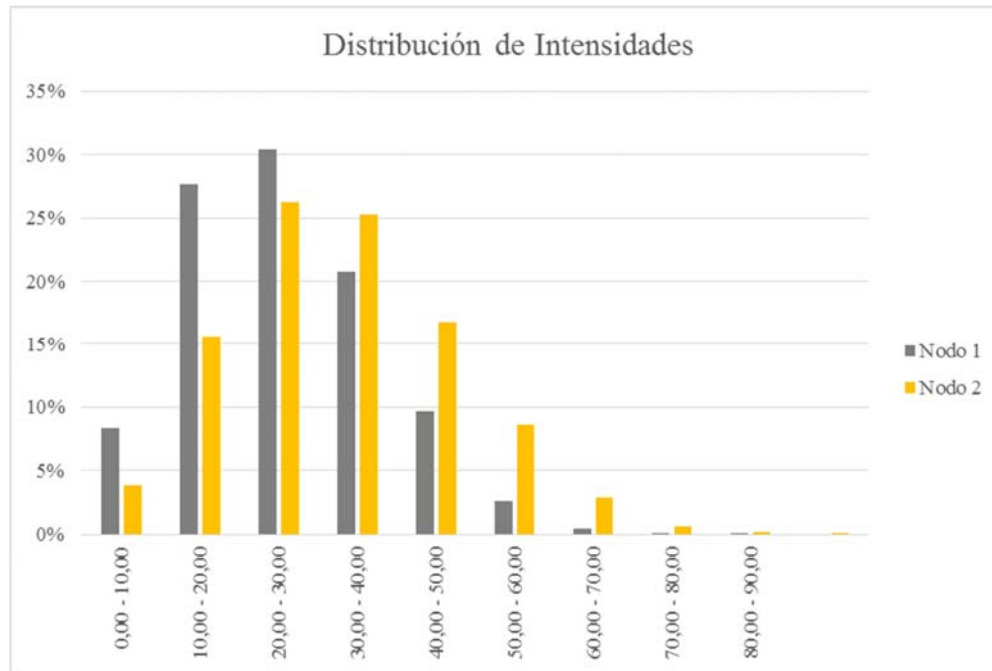


Figura 2. 15: Distribución de Intensidades Nodo 1 y 2. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

Respecto a los nodos 1 y 2, si bien encontramos casi la misma distribución de frecuencia en ambas, podemos observar que el conjunto de datos del nodo 2 poseen una distribución más amplia de intensidad, mientras que en el nodo 1 la tendencia es concentrarse más en las intensidades bajas.

Se realizó también un análisis de frecuencias relativas, clasificadas por dirección e intensidad (Figura 2. 16). Se observa un leve aumento de la intensidad del viento al ingresar en el océano, el cual probablemente responde a la modificación del perfil de velocidades debido a un cambio en las condiciones de rugosidad superficial.

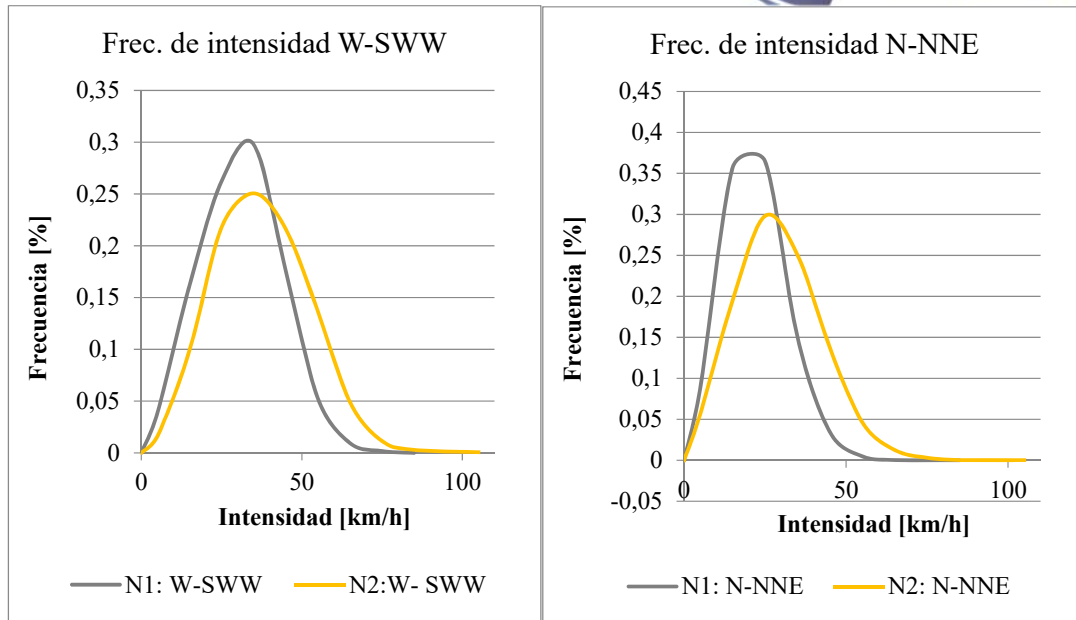


Figura 2. 16: Distribución Frecuencia - Intensidad en dirección W-SWW y N-NNE. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Modelo Global NCEP/NCAR

Por otra parte, se realizó un análisis similar al anterior con los datos de vientos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La estación meteorológica se encuentra en el Aeropuerto Internacional Piloto Civil Norberto Fernández, ubicado unos 8 km al noreste del centro de la ciudad de Río Gallegos.

Los datos provistos por esta entidad abarcan desde el 01/01/2000 hasta el 31/12/2014 en intervalos de una hora. Dichos datos constan de mediciones de intensidad en km/h y dirección en decargados (10°).

Durante la medición, se registraron errores distribuidos aleatoriamente en los distintos parámetros. Dichos vacíos fueron procesados y según las condiciones de los datos vecinos, rellenados o descartados. En el análisis de los datos provistos por el SMN, se observaron 512 datos con un error en la dirección. Estos representaban aproximadamente el 0,4% de las mediciones. En el tratamiento de estos se buscó ver en qué caso era posible estimarlos, y en cuáles la única opción era descartarlos. Por un lado se buscó la distribución temporal de los mismos, y se analizó cuáles estaban aislados y cuáles correspondían a mediciones consecutivas:

- 1 error aislado: 297 casos
- 2 errores consecutivos aislados: 64 casos
- 3 errores consecutivos aislados: 16 casos
- 4 o más errores consecutivos aislados: 13 casos

Podemos ver que 1 y 2 errores aislados representan el 81% de los mismos, y que si estos son sustituidos, la cantidad de datos con error solo pasará a ser un 0.03% del total de mediciones,

por lo cual se optó por descartar los conjuntos de errores que vengan de a 3 o más consecutivos, y reemplazar los datos erróneos aislados o aislados de a pares. El método utilizado fue reemplazarlo por la bisectriz de los mismos.

Posteriormente se realizó el análisis direccional de los vientos, clasificados en 16 cuadrantes y por rangos de intensidad de 10km/h (Figura 2. 17).

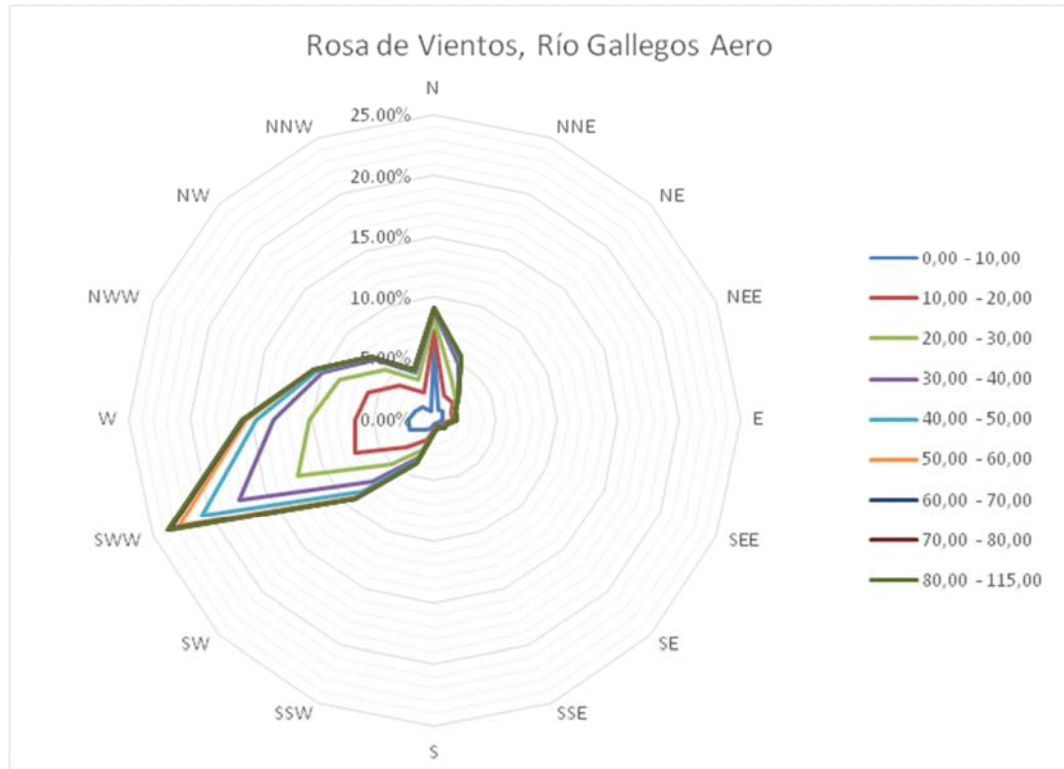


Figura 2. 17: Rosa de viento en la estación meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos. Intensidades de viento en km/h. Fuente: Elaboración propia en base a datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Puede observarse que, similarmente con lo ocurrido con los datos del modelo del NCEP, en las direcciones SW-W-SW se concentran el 49% de las mediciones y en el N-NNE el 15% de las mismas. Asimismo, se observa que las direcciones predominantes están entre el SW y el W.

En el análisis de las intensidades se observan vientos superiores a 60 km/h durante el 4% del tiempo y superiores a 20 km/h el 52% del tiempo (Figura 2. 18).

Por lo tanto, se observa una gran concordancia entre los datos observados en la Estación Meteorológica del SMN y los datos provenientes del modelo del NCEP/NCAR. Con el fin de validar los datos de vientos provenientes del modelo global NCEP/NCAR, se realizó un análisis comparativo entre las curvas de duración de intensidad (Figura 2. 19). Se observa que las curvas presentan un buen ajuste, tendiendo el modelo a subestimar los valores de intensidades extremas y sobreestimar los vientos más frecuentes.

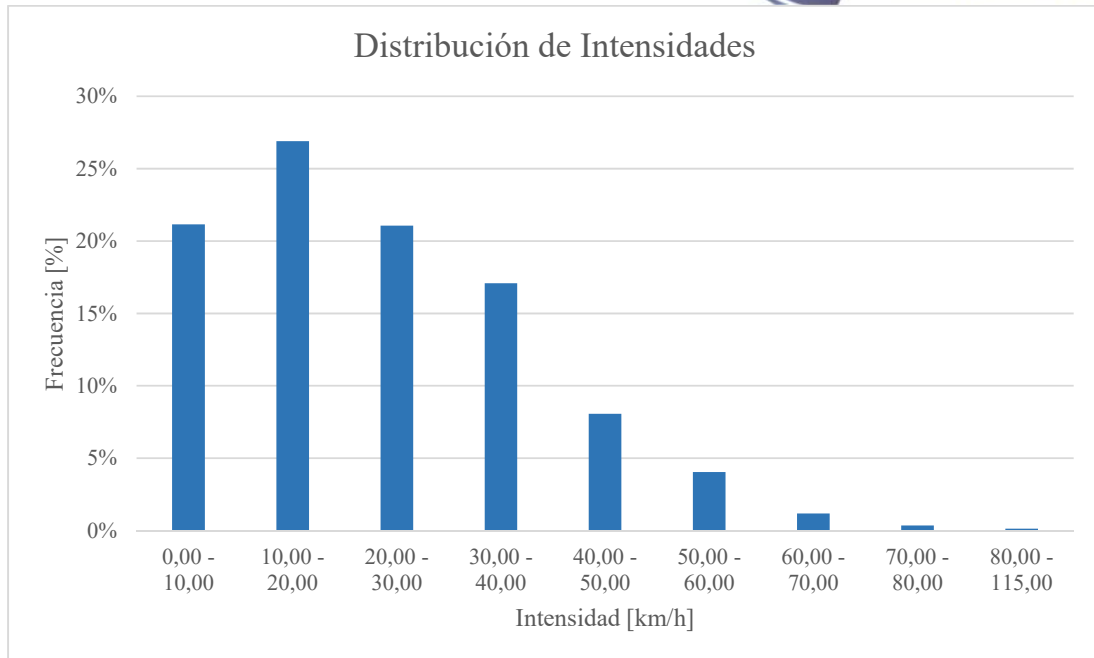


Figura 2. 18: Distribución de frecuencia de intensidades en la estación meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos. Fuente: Elaboración propia en base a datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Intensidad [km/h]	Dirección																Ocurrencia [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0,00 - 10,00	6,10%	0,82%	0,95%	0,68%	0,63%	0,50%	0,48%	0,31%	0,43%	0,80%	1,21%	2,18%	2,12%	1,77%	1,38%	0,79%	21%
10,00 - 20,00	1,12%	1,27%	1,07%	0,76%	0,78%	0,31%	0,34%	0,26%	0,40%	1,02%	2,01%	4,88%	4,40%	4,10%	2,60%	1,58%	27%
20,00 - 30,00	1,03%	1,51%	0,47%	0,32%	0,33%	0,16%	0,14%	0,10%	0,18%	0,82%	1,91%	5,02%	3,71%	2,51%	1,73%	1,15%	21%
30,00 - 40,00	0,67%	1,33%	0,17%	0,08%	0,09%	0,05%	0,04%	0,03%	0,09%	0,73%	2,11%	5,32%	3,00%	1,55%	1,20%	0,64%	17%
40,00 - 50,00	0,17%	0,53%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,33%	1,16%	3,30%	1,42%	0,55%	0,33%	0,18%	8%
50,00 - 60,00	0,04%	0,13%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,13%	0,62%	2,00%	0,81%	0,20%	0,07%	0,04%	4%
60,00 - 70,00	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,18%	0,69%	0,23%	0,05%	0,01%	0,00%	1%
70,00 - 80,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,04%	0,21%	0,09%	0,01%	0,00%	0,00%	0%
80,00 - 115,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,08%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0%
Ocurrencia [%]	9%	6%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	4%	9%	24%	16%	11%	7%	4%	

Tabla 2.3: Distribución Intensidad – Dirección en la estación meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos. Fuente: Elaboración propia en base a datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

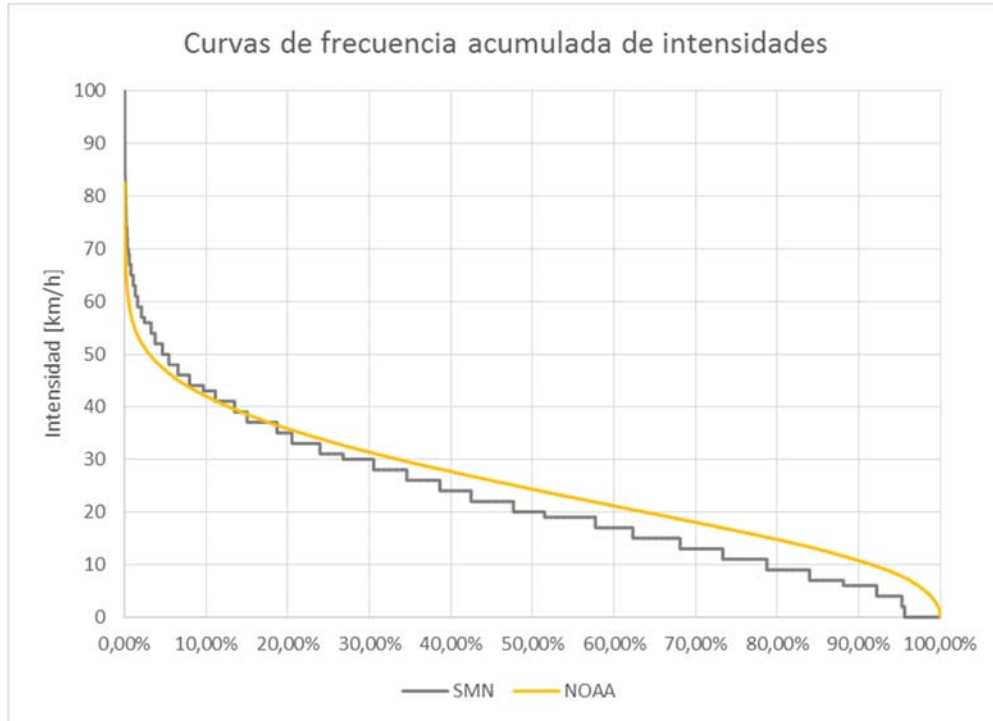


Figura 2. 19: Curva de frecuencia acumulada de intensidades con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

Adicionalmente se realizó un análisis comparativo en situaciones de tormentas registradas por la estación meteorológica y las modeladas por el NCEP/NCAR. Para esto se seleccionaron siete tormentas provenientes del cuadrante NW (aunque en ocasiones las mismas giran al cuadrante SW) y seis tormentas provenientes del cuadrante NE (que en algunas ocasiones giran al cuadrante NW), y se graficaron las intensidades y las direcciones tanto para el modelo como para los datos medidos.

Tormentas provenientes del cuadrante NW

1. 02/03/2001
2. 20-21/10/2004
3. 04-05/03/2005
4. 16-17/01/2005
5. 26-27/02/2007
6. 22-23/10/2007
7. 16-17/01/2009
8. 02-03/06/2000
9. 01-02/03/2001

Tormentas provenientes del cuadrante NE

1. 06-07-08/08/2002
2. 15-16/08/2003
3. 25-26/09/2006
4. 27-28/04/2006

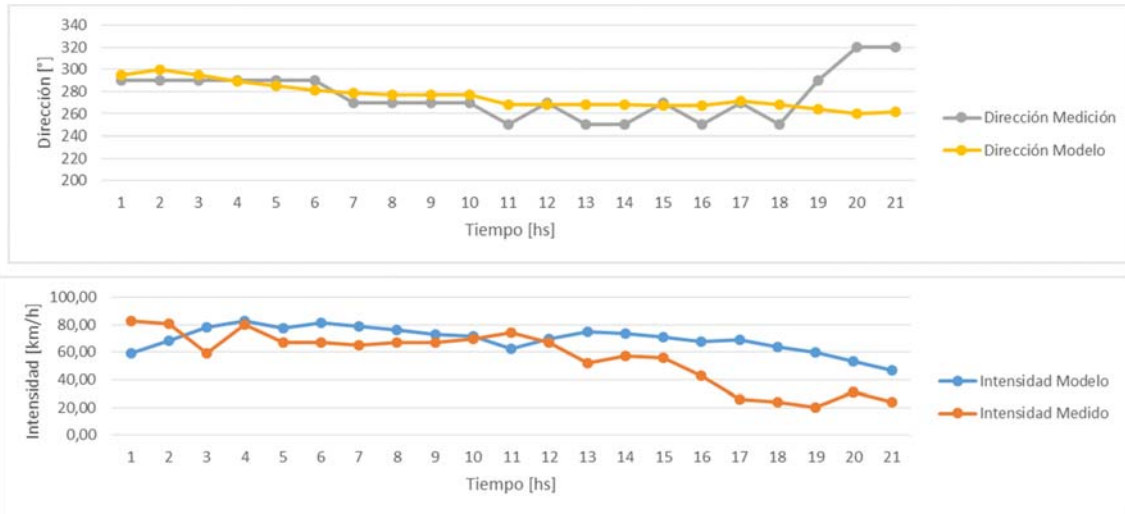


Figura 2. 20: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 02/03/2001. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

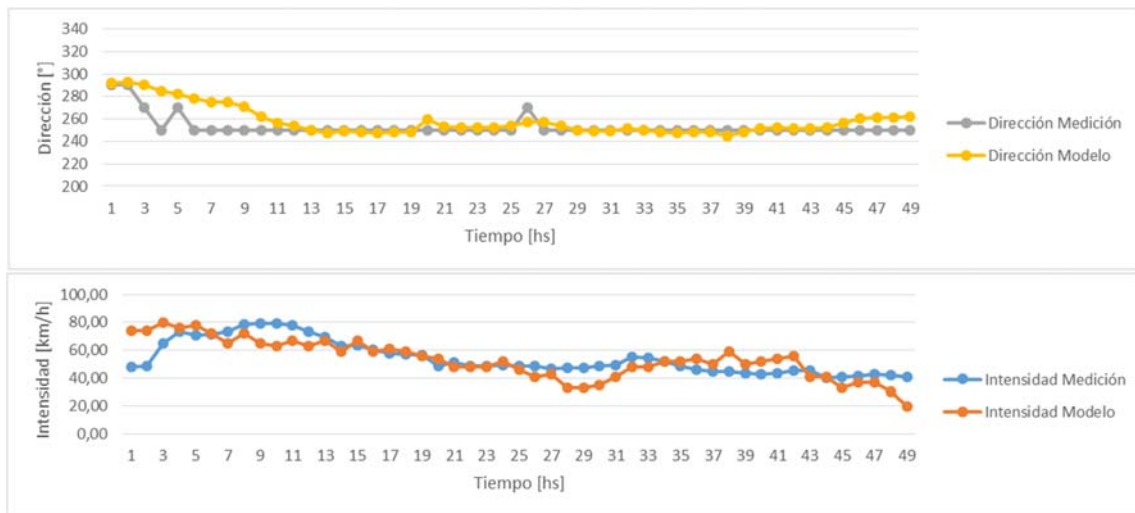


Figura 2. 21: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 20-21/10/2004. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

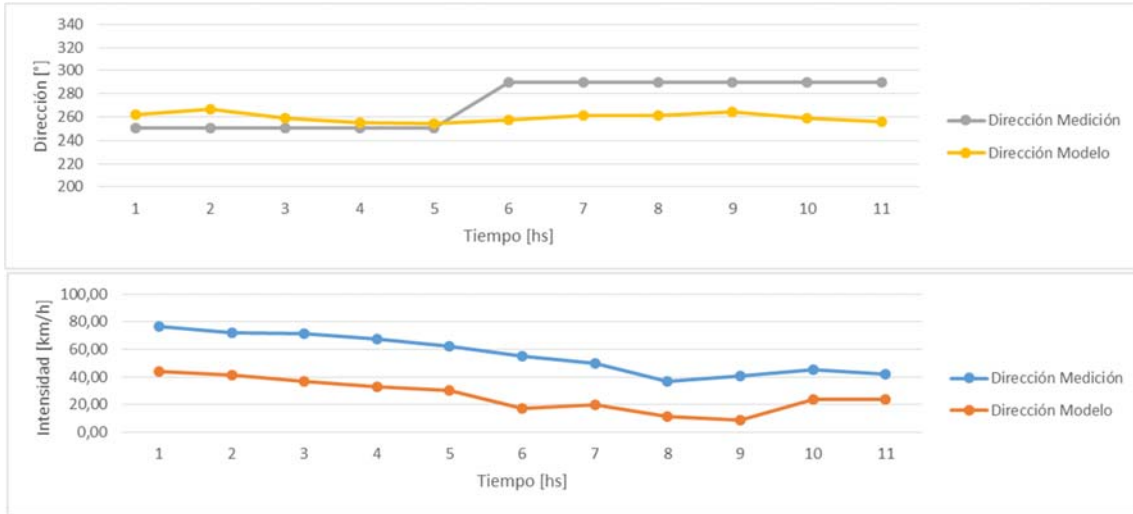


Figura 2. 22: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 04-05/03/2005. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

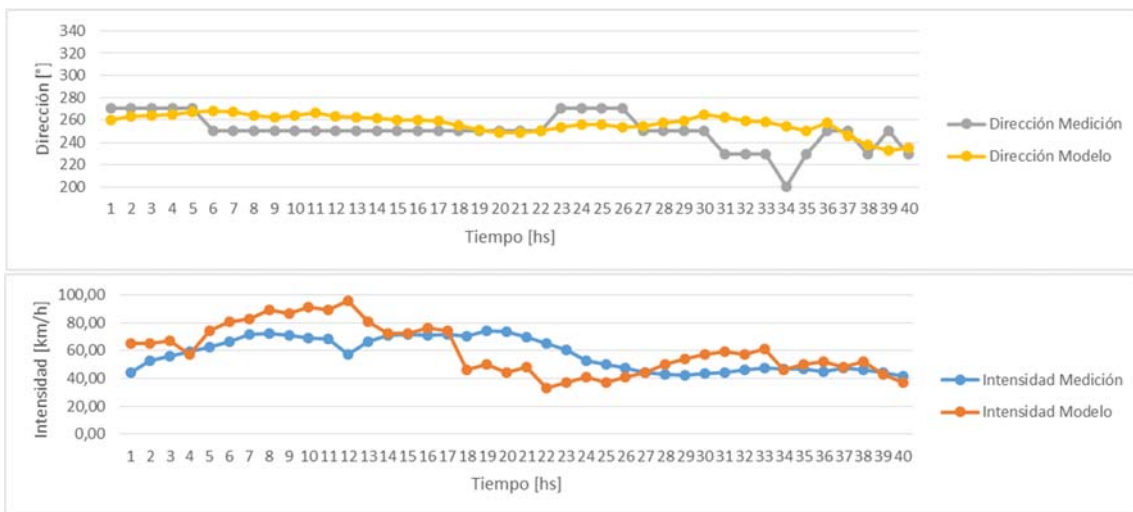


Figura 2. 23: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 16-17/01/2005. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

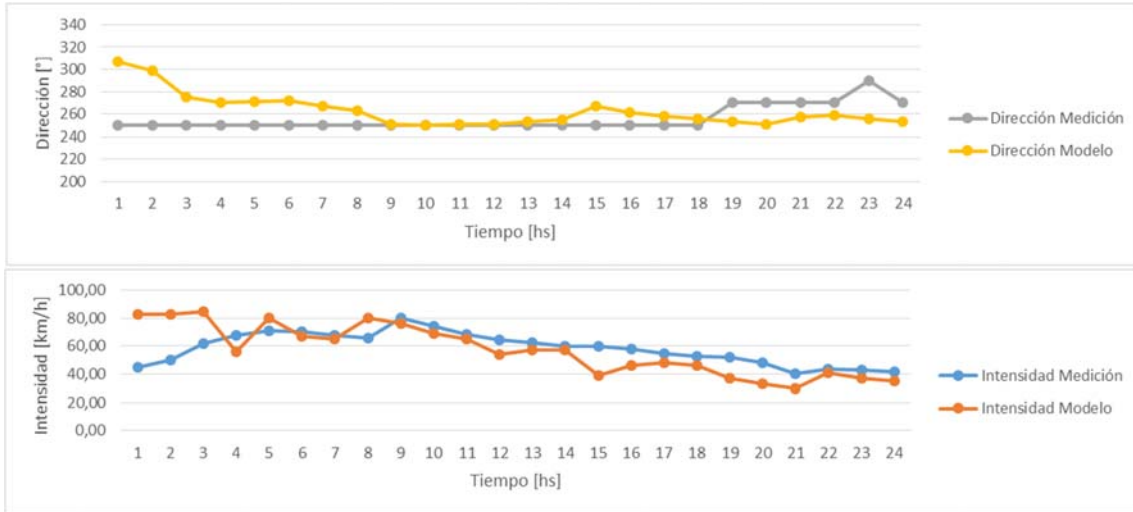


Figura 2. 24: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 26-27/02/2007. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

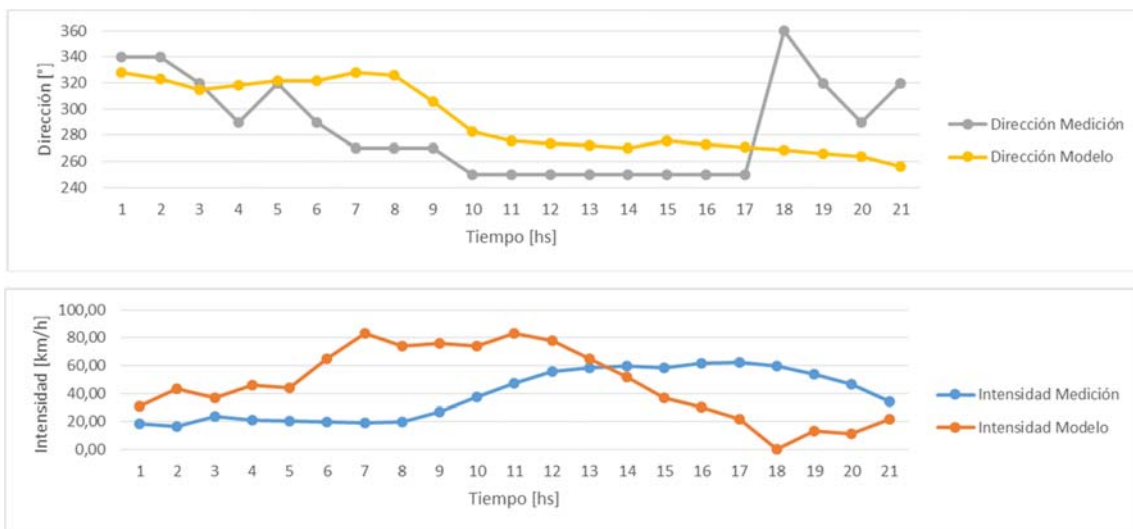


Figura 2. 25: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 22-23/10/2007. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

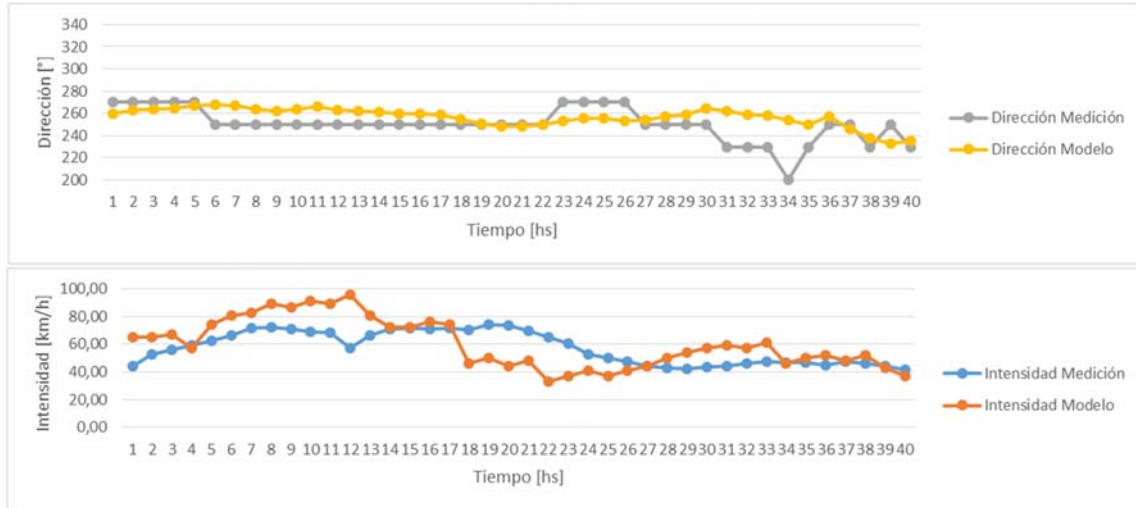


Figura 2. 26: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 16-17/01/2009. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

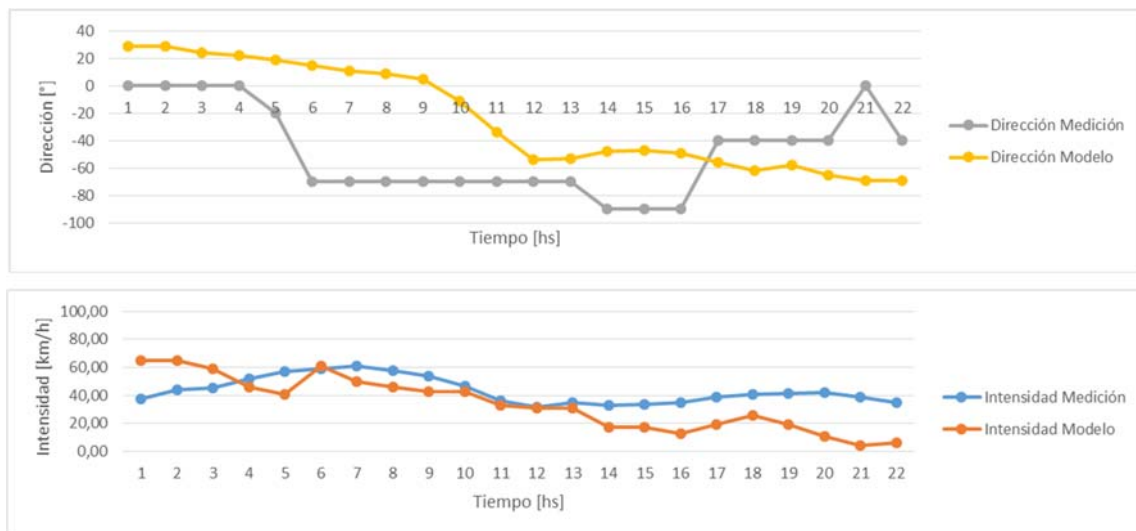


Figura 2. 27: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 02-03/06/2000. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

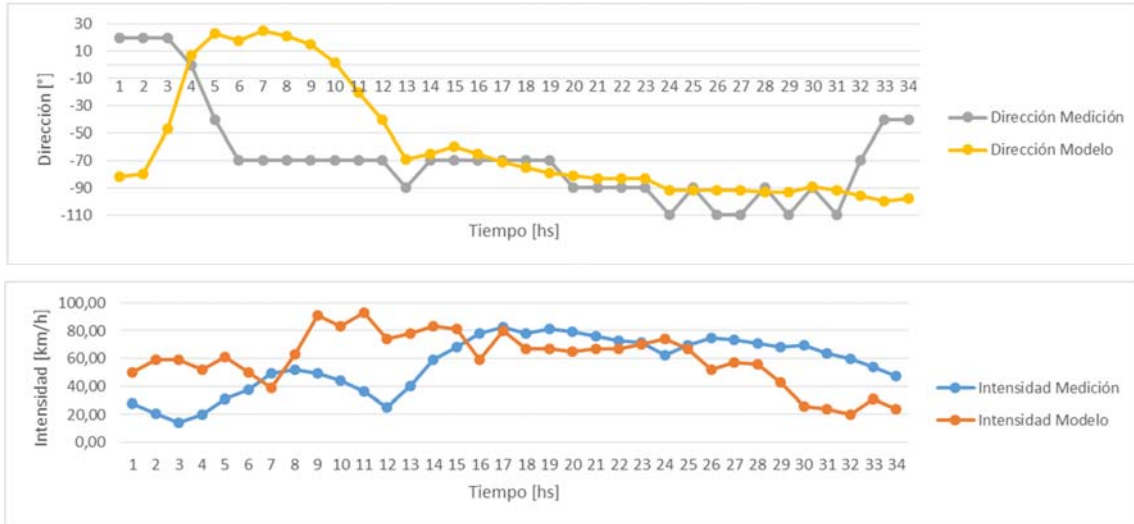


Figura 2. 28: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NW: 01-02/03/2001. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

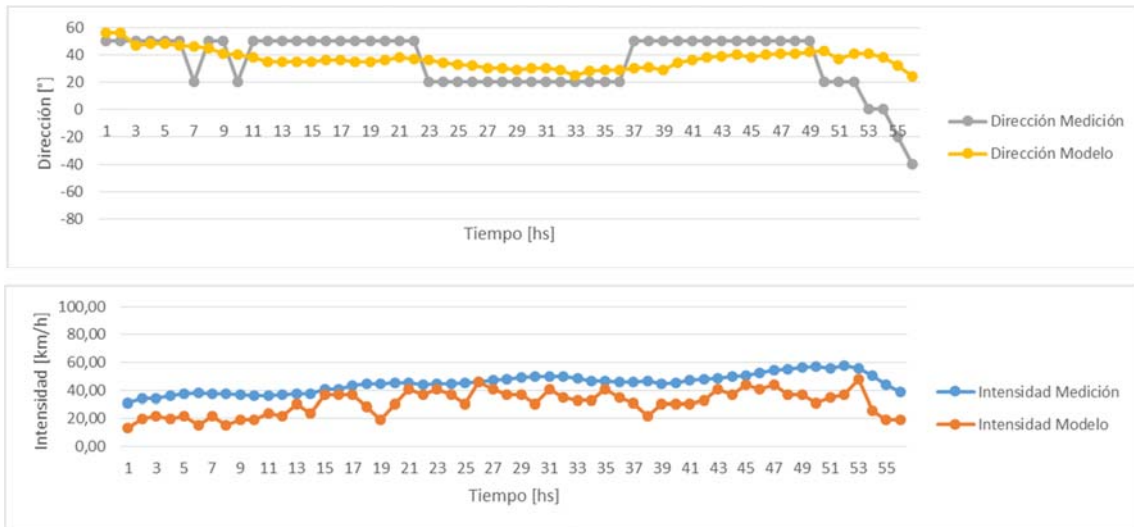


Figura 2. 29: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NE: 06-07-08/08/2002. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

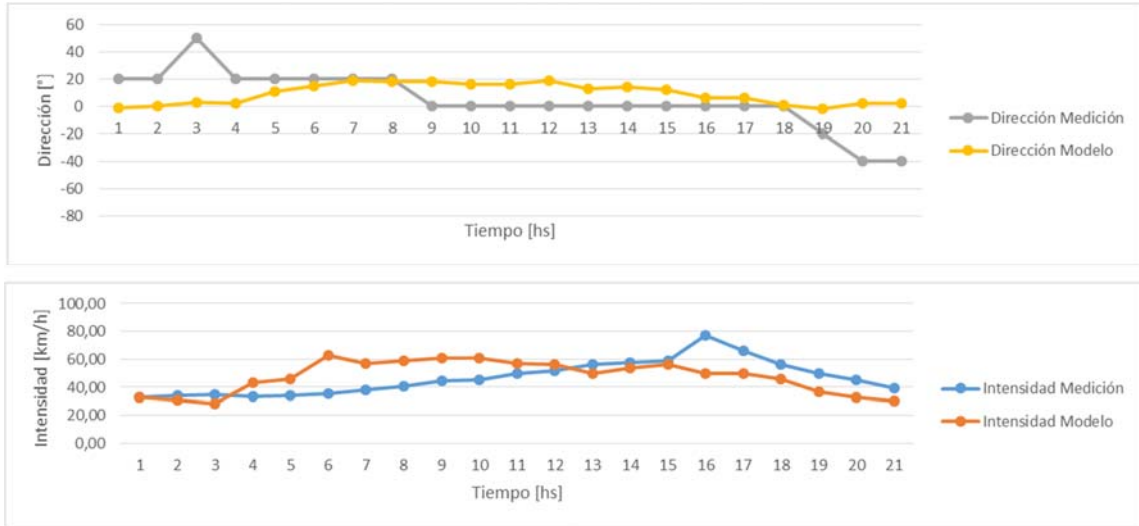


Figura 2. 30: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NE: 15-16/08/2003. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

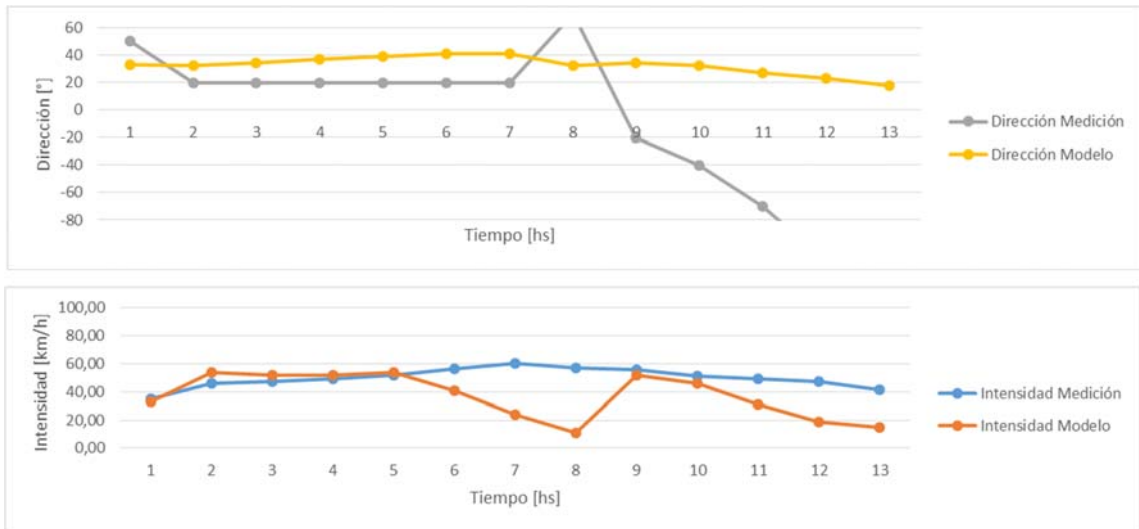


Figura 2. 31: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NE: 27-28/04/2006. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

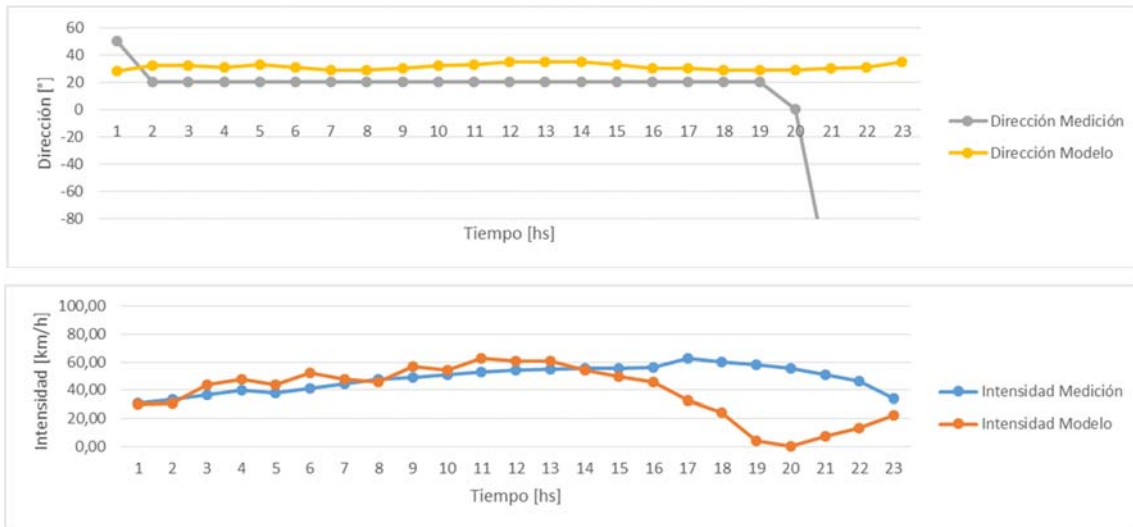


Figura 2. 32: Evolución horaria de dirección e intensidad de viento. Evento extremo con dirección NE: 25-26/09/2006. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

Puede observarse que también para condiciones de tormenta existe una buena concordancia entre datos medidos y datos provenientes del modelo global meteorológico del NCEP/NCAR. Si nos remitimos a la curva de duración de vientos, dado que nos encontramos en los vientos de mayor intensidad, estaríamos en el inicio de la curva donde las mediciones son superiores que los datos modelados, confirmando esta tendencia general de intensidades mayores medidas a las modeladas durante las tormentas.

En cuanto a la distribución de direcciones, en la Figura 2.33 se presenta una comparación de frecuencia relativa. Puede observarse que los datos medidos tienden a concentrarse en una dirección en la zona de las direcciones predominantes, mientras que el modelo los distribuye en dos o tres direcciones. De cualquier forma, vemos que la correlación es muy buena y podemos aceptar entonces que el modelo representa adecuadamente el campo de vientos de la zona de estudio.

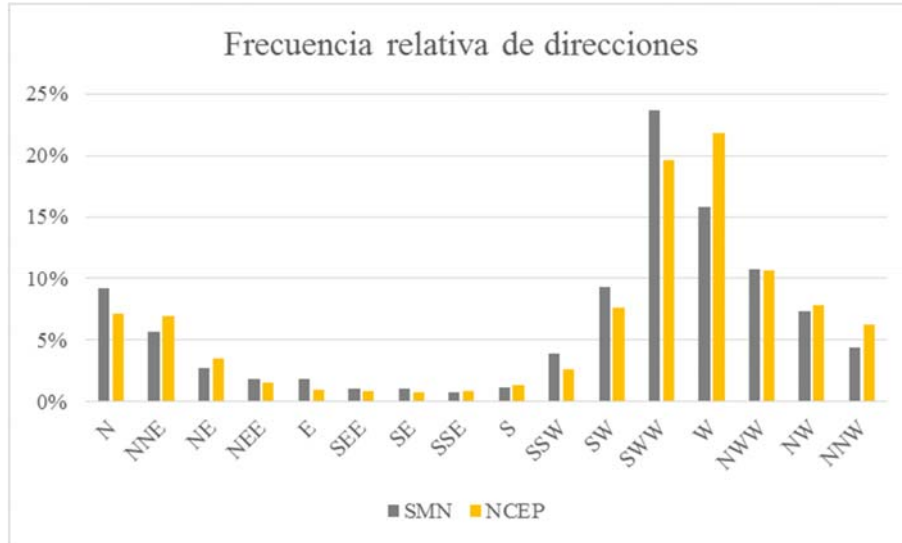


Figura 2.33: Comparación de distribución de frecuencias relativas. Fuente: elaboración propia con datos del modelo global del NCEP/NCAR y datos medidos por el SMN

2.6. Geología / Suelos

La morfología del valle es resultado de la acción conjunta de procesos fluviales, glaciales y volcánicos. El rasgo geomorfológico más importante es un complejo sistema de terrazas escalonadas labrado, en su mayor parte, en rocas sedimentarias continentales del Mioceno medio (Formación Santa Cruz). Estos estratos, dispuestos en forma sub-horizontal, se encuentran cubiertos por extensos mantos de gravas "rodados patagónicos" de probable origen glacio-fluvial depositados con anterioridad al Plioceno Tardío. En el valle, los sucesivos eventos glaciarios del Pleistoceno depositaron gruesos mantos de tillitas y gravas. El activo vulcanismo que tuvo lugar en la región desde el Plioceno superior produjo el derrame de coladas basálticas, las que frecuentemente cubren o se interstratifican con los depósitos glaciogénicos (Santaolara, 2010).

La costa Norte del río, es conocida como "pampas altas", altiplanicies que raramente superan los 100 m de altura. Las barrancas costeras van disminuyendo su altura desde el Cabo del Buen Tiempo (105 m) y terminan en Punta Bustamante (32 m), desprendiéndose, a partir de la misma, una lengua baja de pedregullo de unos 1400 m de largo, límite Norte del río Gallegos. Al caer hacia la costa del mar, estas pampas son cortadas a pique y presentan el aspecto de frontones verticales, cuyas bases son afectadas por el agua en las pleamares, dejando a veces en bajante una pequeña playa, como en cabo Buen Tiempo, que hace peligrosa la permanencia de personas en las últimas horas de creciente (Santaolara, 2010).



Figura 2.34. Formaciones geológicas en el área de estudio

Dado que los flancos de esos frontones sufren continuos desmoronamientos, la vegetación termina bruscamente. La pampa alta del fondo, desde los barrancos interiores de punta Bustamante, toma la dirección Este-Oeste y forma un frontón negruzco, de formación análoga a la anteriormente descrita. En algunos sectores, en los cuales la pendiente es menos abrupta el desarrollo de vegetación atenúa los procesos de desmoronamiento. Hacia el oeste, hasta más allá del meridiano de la ciudad de Río Gallegos, la costa es baja y está formada por pedregullo. La pampa alta corre algunos kilómetros hacia el interior, aproximadamente paralela a ella, formando ondulaciones que van disminuyendo en altura hasta confundirse con la costa.

La costa sur del río, como la del mar al sur de Punta Loyola, está formada por tierras bajas de pedregullo, cubiertas por un capa de tierra gredosa de aproximadamente 1 m de espesor. Bajo esta capa de tierra vuelve otra vez a encontrarse el pedregullo suelto similar al que forman las playas de las costas, aunque de menores dimensiones. Hacia el interior, a unos 20 o 25 km, la planicie es bruscamente interrumpida por una serie de cerros de origen volcánico que forman tres grupos de colinas de roca viva: Los Frailes, Los Conventos y Colinas del Norte, característicos desde el mar que ofrecen enfilaciones

útiles para la navegación. La ribera Sur del río, entre Punta Loyola y Punta Río Chico, está interrumpida debido a la formación de lodazales en terrenos anegadizos que forman el lecho y valle del Río Chico, los cuales son cubiertos por la marea alta y están surcados por canalizos, grietas, zanjones cubiertos por aguas salobres y depósitos de sales, producto de la evaporación del agua de mar (Santaolara, 2010).

En cuanto al lecho del estuario de Río Gallegos, se presentan bancos irregulares formados de pedregullo y arena. Sobre la barra y los pasos someros el fondo es de pedregullo, mientras que en los bancos exteriores el suelo es de arena, presentando ondulaciones. La barra está formada por el Banco del Cabo Buen Tiempo, que despiende al cabo del mismo nombre, y el Banco Oliver, que cierra el acceso a la Ría Gallegos. Dichos obstáculos pueden ser sorteados a través de dos canales naturales, el Norte, entre los bancos del Cabo Buen Tiempo y el Oliver, y el Sur, entre el Banco Oliver y la costa. El Banco Oliver se cubre, aproximadamente, durante la media marea, y su extremo Oeste se extiende sobre el embancamiento del Canal Sur frente a Punta Loyola.

Los bancos y canales interiores del estuario, entre punta Loyola y la ciudad de Río Gallegos han sufrido también grandes alteraciones. Las fuertes corrientes alteran constantemente el lecho del río, uniéndose a esta acción la de los fuertes vientos que soplan en verano. En los fuertes temporales del Oeste y Sur-Oeste, que suelen durar hasta 4 días, se ha visto en Punta Loyola alteraciones notables originadas por grandes transportes de pedregullo, que dejan surcos profundos en la playa. La misma acción tiene lugar sobre los bancos que son azotados por los vientos reinantes, como son todos los del centro y la costa Norte del río. El fondo de los mismos es de arena fina y pedregullo.

El Canal Norte es exclusivamente usado para la navegación por ser el más recto, con mayores profundidades y mejor señalización. El Canal Sur puede ser usado en casos especiales. Ambos canales tienen enfilaciones naturales (señaladas en las cartas náuticas) que sirven para indicar los veriles de los bancos, las que con ayuda de la sonda, aseguran la navegación. El Canal Sur (interior) no es recomendable dado que los veriles de los lodazales al Sur-Este de Punta Loyola y los de la Costa del Pueblo son a pique. Por otro lado la costa es baja y se ubica lejos del canal en las pleamares, dificultando la apreciación de las distancias (Consejo Portuario Argentino, 2011).

Ambos canales de acceso, Norte y Sur, conducen a una hoya situada entre Punta Bustamante y Punta Loyola. El Canal Sur no es aconsejable por la existencia de sondajes negativos sobre la enfilación de entrada. Sin embargo, es útil como fondeadero de espera, por ser más abrigado y por contar con gran cantidad de puntos notables en tierra para verificar posición (Consejo Portuario Argentino, 2011).

2.7. Caracterización del oleaje

2.7.1. Estudios Antecedentes

Entre los estudios antecedentes sobre estudios de olas en el entorno de Río Gallegos, se encuentra el trabajo de Lifschitz (2010). En este trabajo se investigó el clima de olas en la plataforma fueguina con el objetivo de evaluar cuantitativamente su potencial energético. Dado que las observaciones directas de olas poseen una cobertura espacio-temporal limitada, este estudio se realizó utilizando un modelo de generación, propagación y transformación de olas reconocido (SWAN) forzado con vientos provenientes de la base pública NCEP/NCAR. El modelo fue convenientemente implementado y validado con las observaciones de campo disponibles en el Servicio de Hidrografía Naval. El período modelado se extiende desde enero de 1971 hasta diciembre de 2005.

En la Figura 2.35 se presenta el campo medio de altura significativa de ola (H_s) para todo el período de simulaciones (1971-2005). En la misma se aprecia un monótono crecimiento de la altura media a medida que aumenta la distancia a la costa, desde un poco más de 1 m hasta casi 3 m.

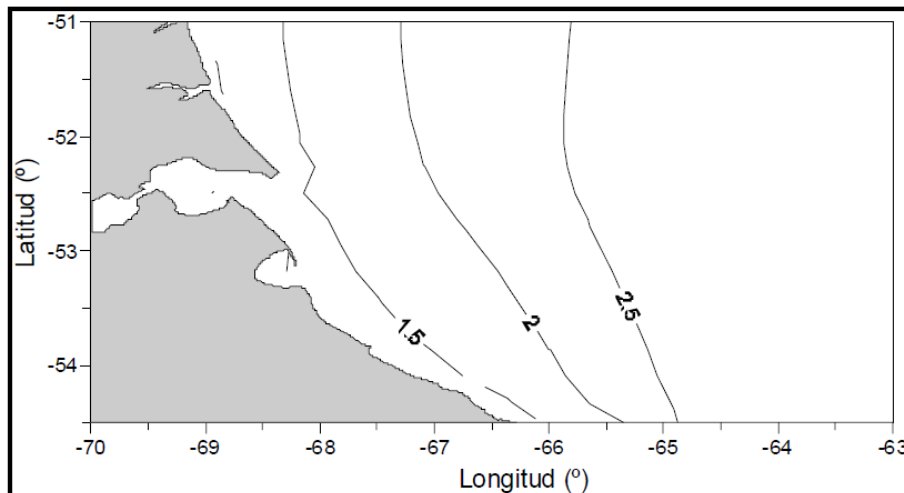


Figura 2.35. Altura significativa media (valores en metros). Período (1971-2005). Fuente: Lifschitz (2010)

En cuanto al período medio (Figura 2.36) su valor aumenta desde un poco más de 5 s, cerca de la costa, hasta valores cercanos a 9 s. Se aprecia, además, que el gradiente zonal de períodos al sur del dominio (alrededor de 54° S) es mayor que en la parte norte de la región. El aumento de H_s y T hacia el E se condice con los patrones climatológicos de viento ya que en estas latitudes predominan los vientos fuertes y sostenidos provenientes del sector oeste. Esta constancia en la dirección de los vientos se manifiesta en la formación de oleaje proveniente principalmente del SW, con una dirección media de $240^\circ \pm 31.5^\circ$ (Figura 2.37) en casi toda la región (“off-shore”) estudiada. En el océano

abierto, el “fetch” (distancia de generación del oleaje) está pautado por la geometría de los sistemas sinópticos. En la región litoral fueguina, la presencia de la costa limita el “fetch” para el viento dominante que sopla de tierra hacia el mar.

Los resultados obtenidos muestran una muy escasa variabilidad estacional, con una tendencia a alturas levemente mayores en primavera, pero pudiendo presentarse los mayores valores de altura significativa de ola, en cualquier momento del año. Respecto a la direcciones, hay un cambio de la dirección predominante de 240° en primavera verano hacia 230° en otoño invierno. Asimismo, la variabilidad mensual es baja, observándose en los campos mensuales ligeros apartamientos respecto del campo medio correspondiente al período 1971-2005. Se puede ver por ejemplo, un cambio de 220° a 240° de junio a agosto.

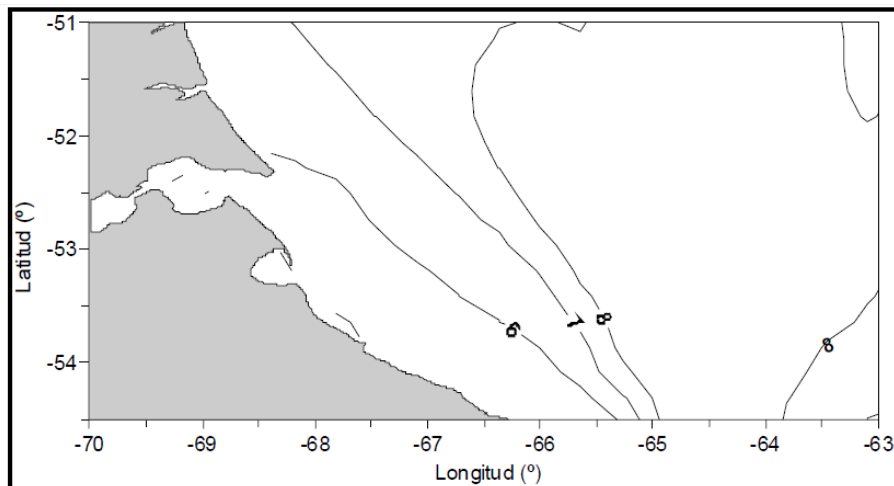


Figura 2.36. Período del pico espectral medio (valores en segundos). Período (1971-2005)

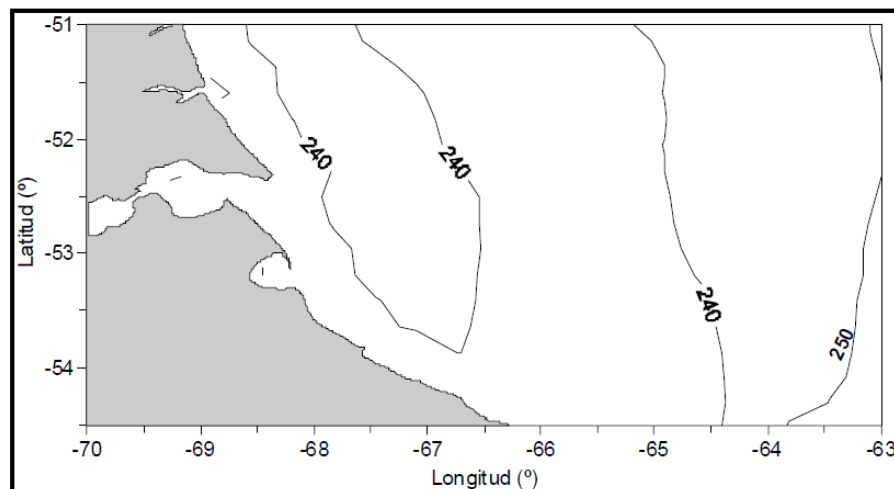


Figura 2.37. Dirección media de las olas (valores en grados). Período (1971-2005)

Otro estudio antecedente es el desarrollado por Atria Baird Consultores S.A. (1999), en el marco del Proyecto Portuario en Caleta La Misión. En dicho trabajo se ha tomado la información que se presenta a continuación:

- Resultados de un Modelo Global de oleaje de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, UKMO) obtenidos entre el 12/06/91 y el 8/05/99 (8 años) con datos cada 6 horas.
- Resultados de un modelo de oleaje de la Armada Argentina desde el 10/05/76 al 30/09/96 (20 años).
- Resultados de mediciones directas direccionales en dos sitios frente al área costera de Caleta la Misión uno a unos 50 Km de la costa y otro en isobata -12 m con datos cada 4 hs durante 1 año.

A partir de estos resultados se determinaron las condiciones en aguas profundas y las condiciones en la zona costera. En términos generales, se observa claramente la influencia de los vientos que provienen del continente, principalmente el cuadrante W-SW, y los vientos del NE – ENE que generan olas con influencia directa sobre al área costera (Figuras 2.38 y 2.39). Asimismo, se ha elaborado una caracterización del oleaje en función del período medio, determinándose que la mayoría de las olas que llegan a la costa son de generación local (más del 80 %) (Tabla 2.4).

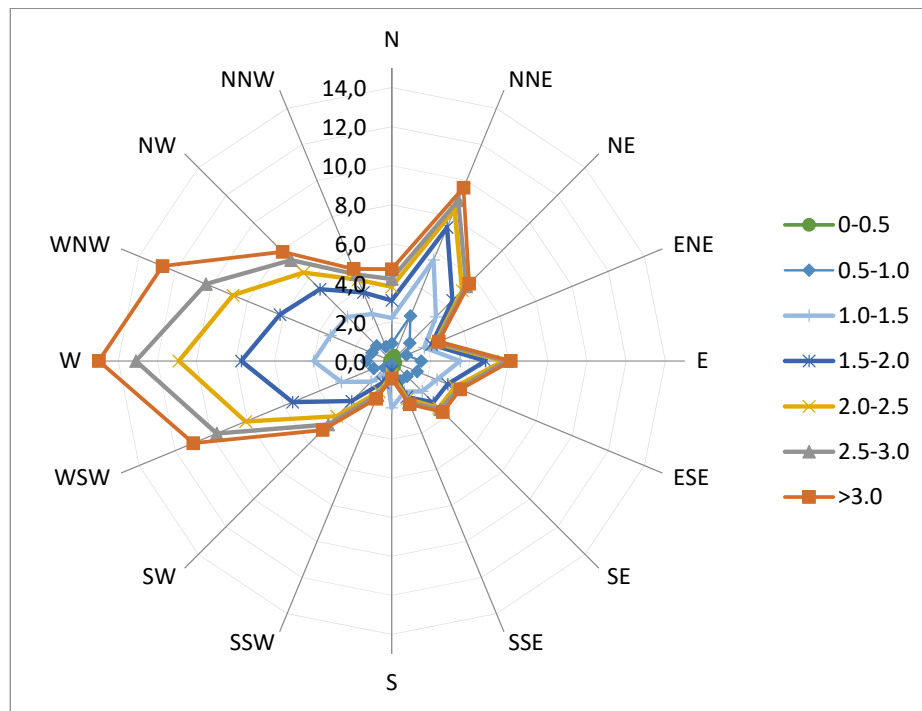


Figura 2.38. Rosa de olas en la zona exterior al puerto Caleta La misión, Río grande (Fuente: elaborado en base a datos del estudio de Atria Baird Consultores S.A., Julio de 1999)

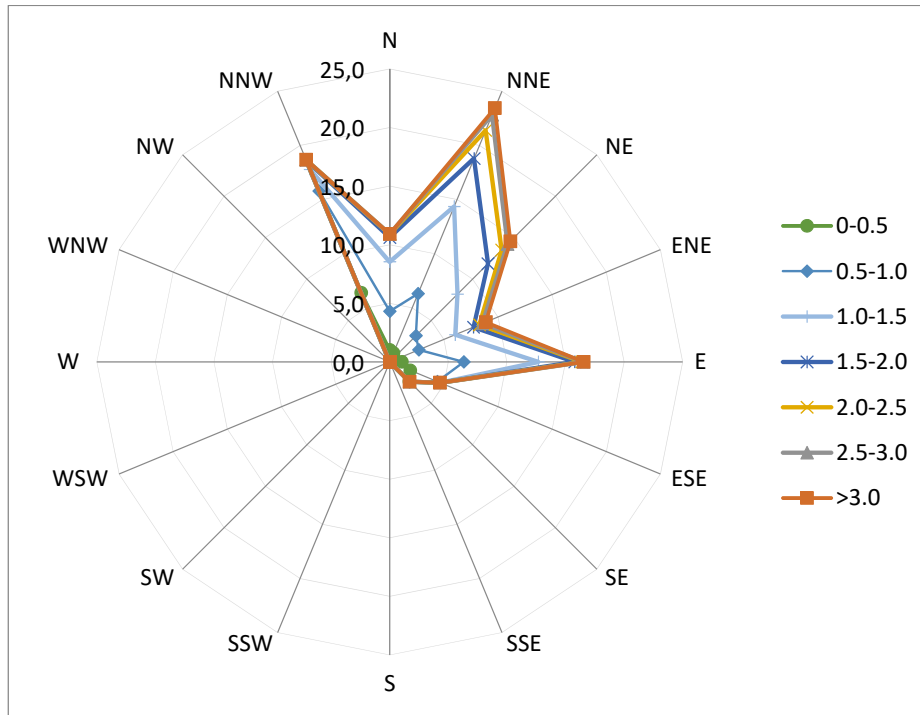


Figura 2.39. Rosa de olas en la zona costera cerca al puerto Caleta La misión, Río grande (Fuente: elaborado en base a datos del estudio de Atria Baird Consultores S.A., Julio de 1999)

<i>Hs (m)</i>	<i>Tm (seg)</i>								total
	0 a 2	2 a 4	4 a 6	6 a 8	8 a 10	10 a 12	12 a 14		
0 - 0.5	0.9	3.4	1.9	2.1	0.9	0.2	0.0	9.4	
0.5 - 1	0.0	9.2	12.7	5.2	1.7	0.2	0.1	29.0	
1 - 1.5	0.0	0.0	16.0	15.9	3.2	0.4	0.1	35.5	
1.5 - 2	0.0	0.0	3.2	8.0	2.8	0.3	0.1	14.4	
2 - 2.5	0.0	0.0	0.7	3.5	3.5	0.1	0.1	8.0	
2.5 - 3	0.0	0.0	0.0	0.2	1.8	0.2	0.0	2.2	
3 - 3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	0.0	1.0	
3.5 - 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	
4 - 4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	
4.5 - 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5 - 5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5.5 - 6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6 - 6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6.5 - 7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7 - 7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
total	0.9	12.7	34.5	34.8	14.8	1.9	0.4	100.0	

Tabla 2.4: Distribución de olas en la zona costera cerca al puerto Caleta La misión, Río grande (Fuente: elaborado en base a datos del estudio de Atria Baird Consultores S.A., Julio de 1999)

2.7.2. Modelos globales de olas. Generalidades

Dado que no existe un estudio de olas específico para el Estuario de Río Gallegos, se ha recurrido a datos provenientes de modelos Globales de Oleaje. Este tipo de información es frecuentemente utilizada como alternativa en sitios donde no se dispone de registros prolongados de olas. Aplicaciones de este tipo se pueden encontrar en los trabajos realizados por diferentes Agencias Europeas y de Estados Unidos para el pronóstico de olas, planeamiento portuario y costero, para usos recreativos y otras operaciones marítimas (Papadopoulos et al., 2002; Alves et al., 2005; Chini et al., 2010; Durrant and Greenslade, 2011; Etala et al., 2012).

En los últimos años, los modelos numéricos han alcanzado progresos significativos en pronósticos de olas a escalas regionales y globales. En efecto, este progreso puede observarse en los modelos exitosos de tercera generación como WAM, SWAN, WAVEWATCH-III (De Jong, 1997; Booij et al., 1999; Padilla Hernández et al., 2007; Dragani et al., 2008; Chawla et al., 2013) y MIKE 21 SW-FM (Kofoed-Hansen et al., 2001; Sørensen et al., 2004). Asimismo, estos modelos se apoyan en la precisión y confiabilidad de datos meteorológicos recopilados durante décadas por parte de organizaciones internacionales como la ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) y el NCEP (National Center for Environmental Prediction) (Saha, 2010).

De esta manera, los datos de olas de modelos globales, que están calibrados y validados mediante diferentes tipos de mediciones, se han vuelto habituales en estudios de ingeniería de puertos y costas a lo largo del mundo y en Argentina. Algunas aplicaciones pueden observarse en Scott et al. (2000), Sclavo et al. (2000), Calverely (2002), Castellano et al. (2009), Chini et al. (2010), Camarena Calderón (2012) y Kassem et al. (2012).

Para el presente trabajo se utilizaron series temporales de olas provenientes del proyecto IOWAGA (Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications), desarrollado por el instituto de investigación IFREMER (Francia) (<http://www.ifremer.fr/iowaga/Products>). Este proyecto tiene como propósito proveer información de alta calidad en lo referente a oleaje.

IOWAGA provee información sobre más de 50 parámetros relacionados con las olas en todo el mundo, entre ellos la altura significativa, la dirección de propagación, el periodo, etc. Esto lo hace a través de la aplicación de un modelo numérico global denominado WAVE-WATCH III. La grilla utilizada en este modelo varía según la zona, existiendo desde la grilla GLOBAL con una resolución de $0,5^\circ$ tanto en longitud como en latitud, hasta la grilla de la costa atlántica francesa con una resolución de $1/30^\circ$.

Validaciones mensuales con mediciones de boyas han demostrado una confiabilidad excelente de este modelo. En la Figura 2.40 se puede ver el ECM para los resultados del

modelo de la altura significativa de ola, comparados con los datos de los altímetros Jason-1, Jason-2 y Envisat.

Calibration of the “Iowaga” Global Wave Hindcast (1991-2011). Using ECMWF and CFSR Winds. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai'i. 13pp.

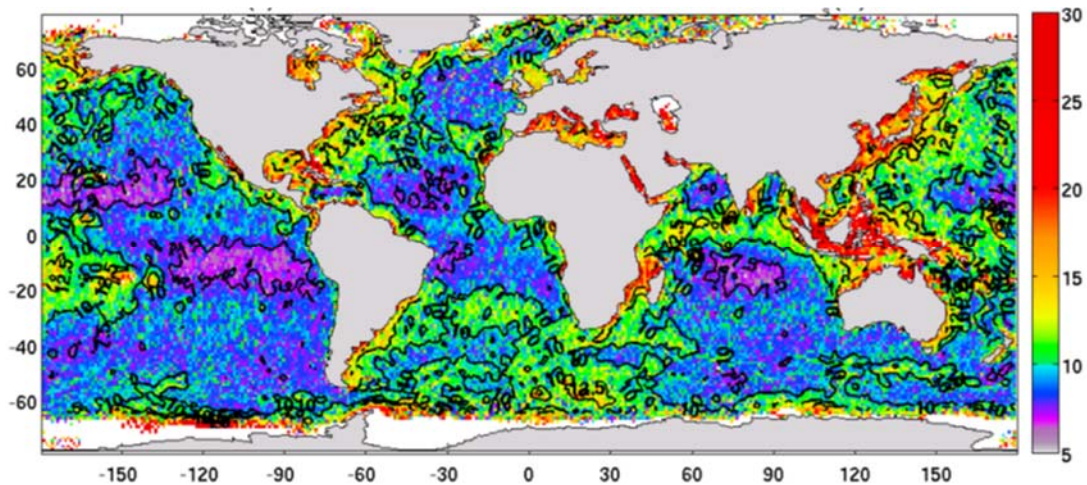


Figura 2.40. Error cuadrático medio porcentual para altura significativa de ola modelada, en función de datos de los altímetros Jason-1, Jason-2 y Envisat (Ardhuin, 2011)

Los datos provistos por el programa IOWAGA son de libre uso, y están disponibles a través de un servidor FTP en formato NetCDF. Los datos están organizados por mes y con un intervalo de tiempo de 3 horas. Dicha información está conformada por valores de altura significativa, período medio espectral, período pico espectral, y dirección del oleaje. Las series utilizadas en el presente trabajo corresponden a 3 puntos cercanos al estuario de Río Gallegos (Figura 2.41), para el período enero 2012 – diciembre 2013:

1. 68°W 51°S
2. 68°W 51,5°S
3. 67,5°W 52°S



Figura 2.41. Imagen Satelital Google Earth (Landsat). Nodos Grilla Global WAVE-WATCH III.

La información disponible fue procesada con el propósito de poder describir sintéticamente las características del oleaje generado por el Modelo Global, evaluando en primer lugar la distribución de frecuencias de las variables características (dirección de propagación, altura significativa y períodos). En la siguiente sección se muestran los resultados mencionados.

2.7.3. Modelos globales de olas. Resultados del análisis

En primer término se analizó la distribución de olas por altura significativa, H_s . En los histogramas de frecuencia podemos ver que entre el 71% y 81% de los registros se encuentran entre 1,00m y 2,50m de altura, tendiendo en el punto 3 a concentrarse en menores alturas de ola (Tabla 2.5 – 2.7 y Figuras 2.42 a 2.44). Por otro lado, podemos ver que alturas superiores a 2,50m sólo presentan una ocurrencia superior al 16% en el punto 1 y sólo 9% en el punto 2.

H_s (m)	Frecuencia. Relativa
< 1	3%
1.0 - 1.5	25%
1.5 - 2.0	33%
2.0 - 2.5	23%
2.5 - 3.0	11%
3.0 - 3.5	4%
> 3.5	1%

Tabla: 2.5 Distribución de olas totales en zona exterior, para el nodo W068N515

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

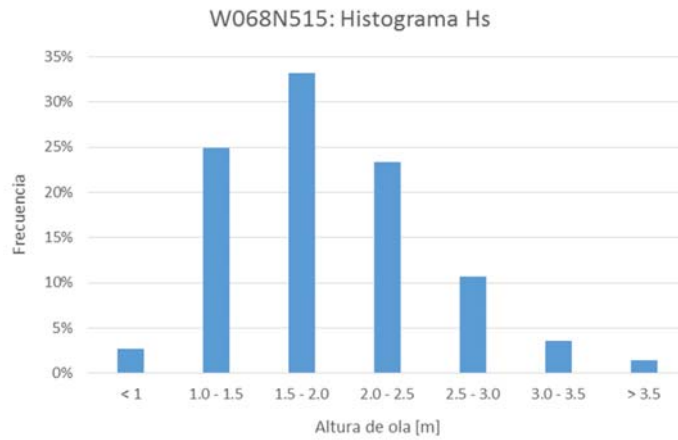


Figura 2.42. Histograma de Altura Significativa de Olas para el nodo W068N515.

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

$H_s (m)$	Frecuencia. Relativa.
< 0.5	3%
0.5 - 1	29%
1 - 1.5	32%
1.5 - 2.0	20%
2.0 - 2.5	10%
2.5 - 3.0	4%
3.0 - 3.5	1%
> 3.5	1%

Tabla: 2.6 Distribución de olas totales en zona exterior, para el nodo W068N510

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

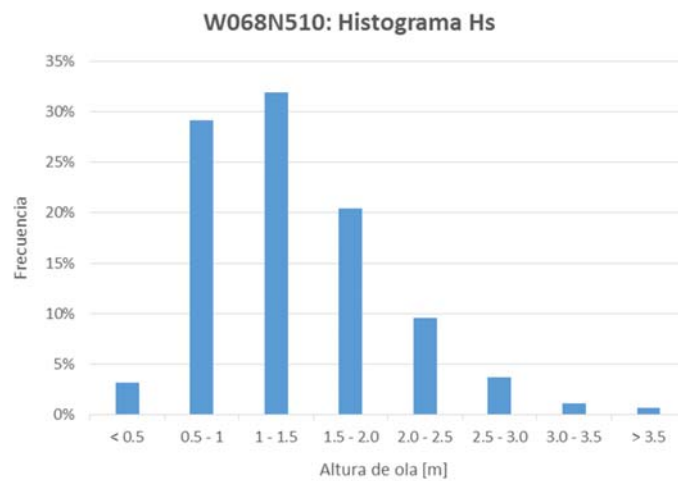


Figura 2.43. Histograma de Altura Significativa de Olas para el nodo W068N510.

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

H_s (m)	Frecuencia. Relativa.
< 1	19%
1.0 - 1.5	31%
1.5 - 2.0	26%
2.0 - 2.5	15%
2.5 - 3.0	6%
3.0 - 3.5	2%
> 3.5	1%

Tabla: 2.7 Distribución de olas totales en zona exterior, para el nodo W675N520
Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

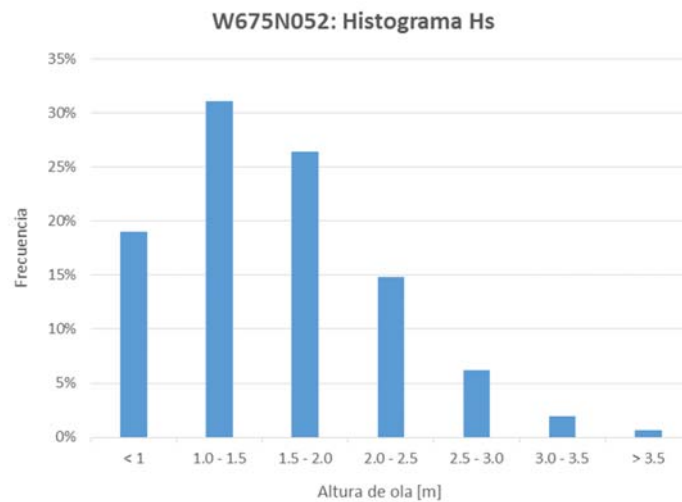


Figura 2.44. Histograma de Altura Significativa de Olas para el nodo W675N520.
Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

En cuanto a la distribución de olas por período, se observa un predominio marcado de olas con períodos inferiores a 8 segundos (casi el 80 % de las olas), ver Figuras 2.45 a 2.47. Para entender mejor la caracterización por períodos, se graficaron diagramas de dispersión de olas (Figuras 2.48 a 2.50).

Dichos gráficos de dispersión son muy coherentes con la realidad de la zona, lo que muestra que la mayor parte de las olas son de tipo “locales” o “sea”. Es decir que, cuando la altura de ola es baja, los períodos son bajos, dado que las olas no han llegado a desarrollarse completamente por distancia de generación o duración del viento. Luego en temporales, con mayores alturas de olas, los períodos crecen de acuerdo a una función aproximadamente lineal. Por su parte, hay un grupo de olas menores a 1.5 m de altura en los cuales tienen períodos superiores a 6 segundos y llegan hasta 12 segundos en su gran mayoría. Estas olas son de tipo “oceánico” o “swell” y, dependiendo su dirección, probablemente ingresen al estuario de Río Gallegos.

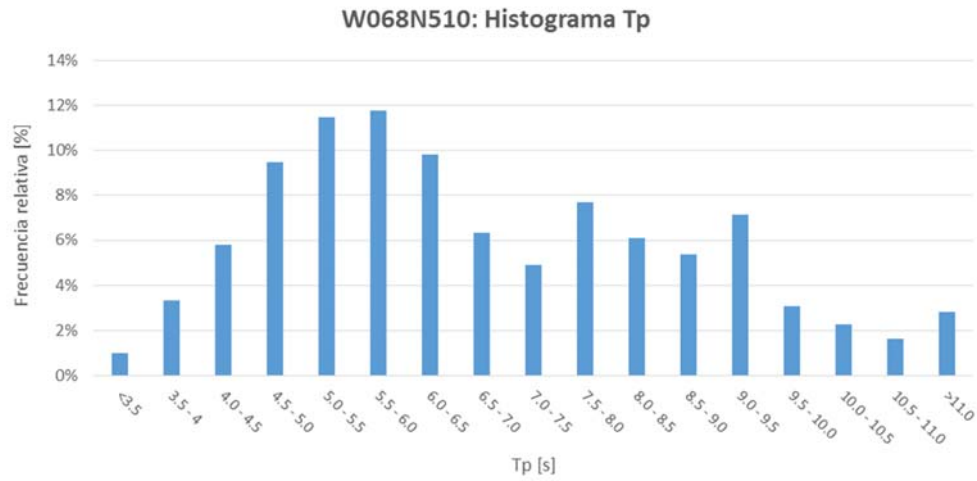


Figura 2.45. Histograma de Frecuencia Pico para el nodo W068N510. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

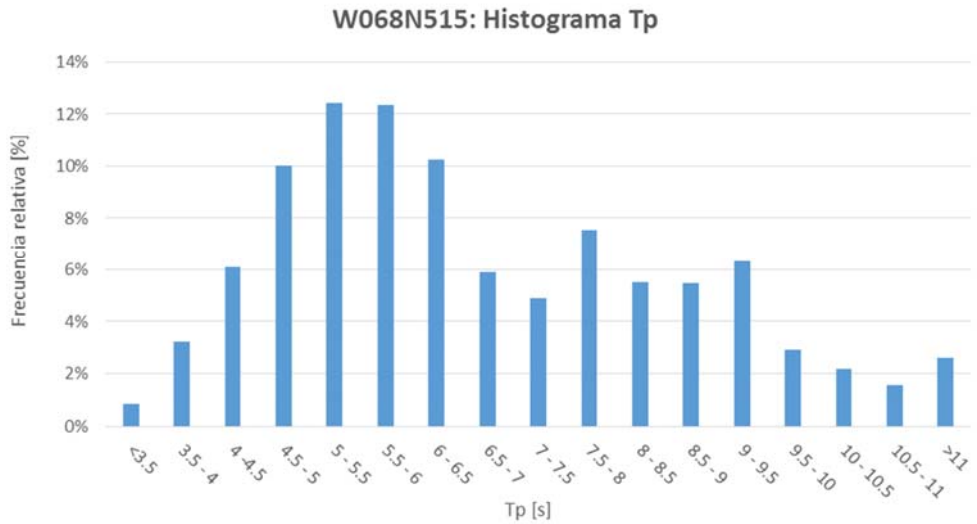


Figura 2.46. Histograma de Frecuencia Pico para el nodo W068N515. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

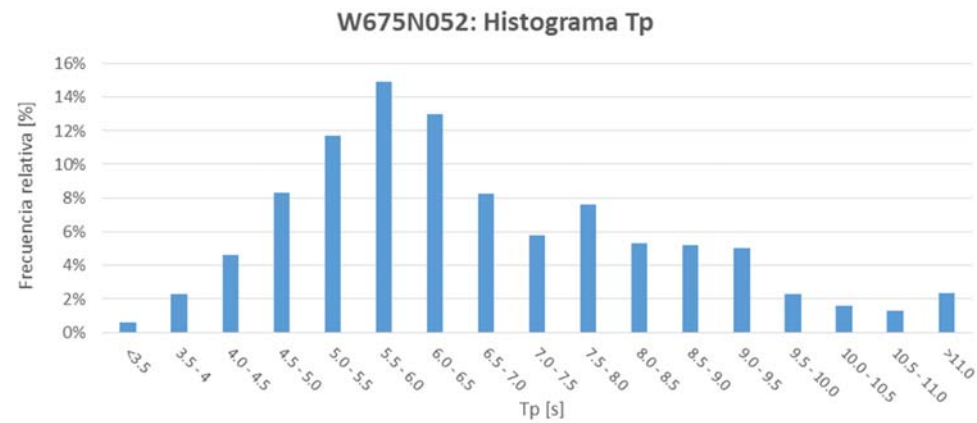


Figura 2.47. Histograma de Frecuencia Pico para el nodo W675N052. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

W068N510: Dispersión de Oleaje

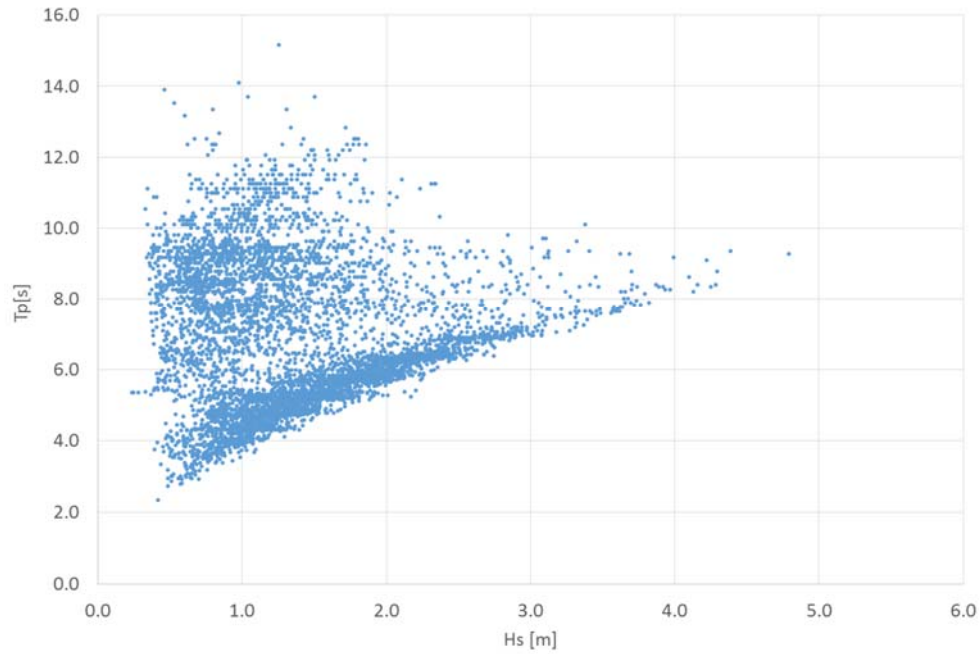


Figura 2.48. Dispersión del oleaje para el nodo W068N510. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Distribución Hs - Tp (Nodo W068N510)								
Hs [m]	Tp [s]							
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
0-0.5	0.00%	0.19%	0.51%	0.99%	1.33%	0.15%	0.02%	0.00%
0.5-1	0.00%	3.64%	7.35%	6.36%	9.42%	1.95%	0.21%	0.02%
1-1.5	0.00%	0.24%	17.34%	4.87%	5.88%	3.54%	0.19%	0.02%
1.5-2	0.00%	0.00%	12.19%	4.33%	2.87%	0.70%	0.26%	0.00%
2-2.5	0.00%	0.00%	1.37%	7.30%	0.92%	0.15%	0.00%	0.00%
2.5-3	0.00%	0.00%	0.00%	3.18%	0.60%	0.00%	0.00%	0.00%
3-3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.82%	0.34%	0.02%	0.00%	0.00%
3.5-4	0.00%	0.00%	0.00%	0.27%	0.29%	0.00%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%
4.5-5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla: 2.8 Distribución Hs-Tp en zona exterior, para el nodo W068N510

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

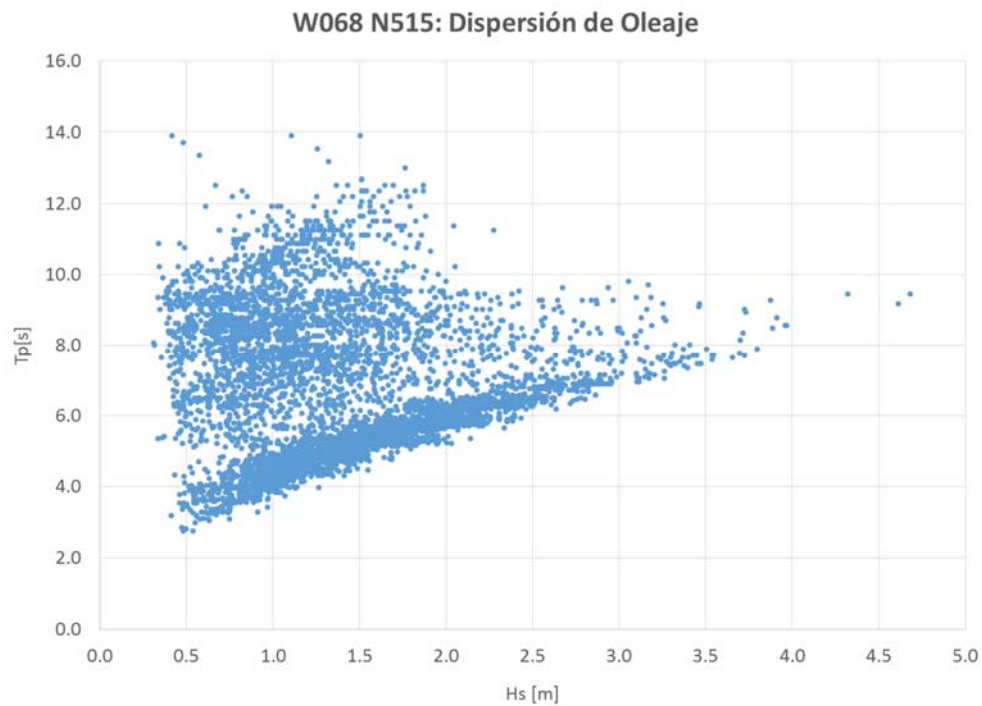


Figura 2.49. Dispersión del oleaje para el nodo W068N515. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Distribución Hs - Tp (Nodo W068N515)								
Hs [m]	Tp [s]							
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
0-0.5	0.00%	0.15%	0.24%	0.96%	1.13%	0.10%	0.03%	0.00%
0.5-1	0.00%	3.47%	5.69%	5.88%	8.00%	1.76%	0.09%	0.00%
1-1.5	0.00%	0.24%	18.21%	5.80%	5.61%	3.32%	0.15%	0.00%
1.5-2	0.00%	0.00%	14.83%	3.90%	3.37%	0.92%	0.32%	0.00%
2-2.5	0.00%	0.00%	2.10%	7.42%	1.15%	0.05%	0.00%	0.00%
2.5-3	0.00%	0.00%	0.00%	3.06%	0.58%	0.00%	0.00%	0.00%
3-3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.75%	0.36%	0.00%	0.00%	0.00%
3.5-4	0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.15%	0.00%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
4.5-5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla: 2.9 Distribución Hs-Tp en zona exterior, para el nodo W068N515
Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

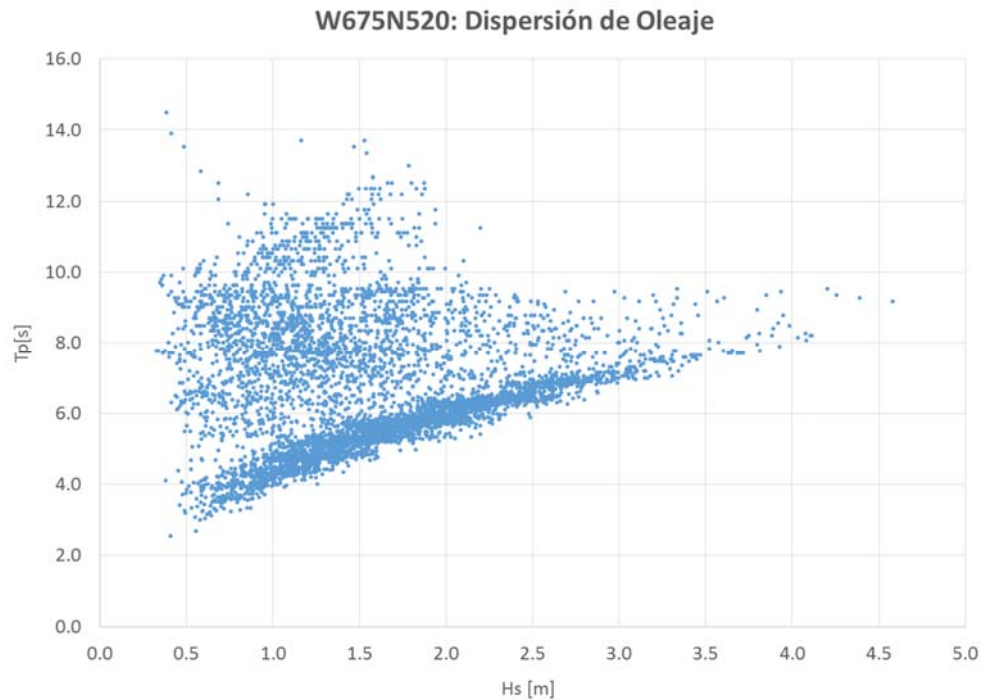


Figura 2.50. Dispersión del oleaje para el nodo W675N520. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Distribución Hs - Tp (Nodo W675N520)							
Hs [m]	Tp [s]						
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
0-0.5	0.00%	0.10%	0.07%	0.53%	0.48%	0.02%	0.03%
0.5-1	0.00%	2.51%	4.43%	4.43%	5.11%	1.06%	0.07%
1-1.5	0.00%	0.07%	16.79%	5.93%	5.22%	2.99%	0.12%
1.5-2	0.00%	0.00%	16.35%	5.11%	3.74%	0.84%	0.38%
2-2.5	0.00%	0.00%	2.03%	10.91%	1.76%	0.03%	0.00%
2.5-3	0.00%	0.00%	0.00%	5.34%	0.91%	0.00%	0.00%
3-3.5	0.00%	0.00%	0.00%	1.49%	0.50%	0.00%	0.00%
3.5-4	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%	0.27%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.00%	0.00%
4.5-5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%

Tabla: 2.10. Distribución Hs-Tp en zona exterior, para el nodo W675N520

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Por último, se realizó una caracterización de olas por dirección y altura (Figuras 2.51 a 2.53 y Tablas 2.11 a 2.13). Se observa que el predominio de olas en la zona exterior corresponde a los cuadrantes SW, SSW y NE. Sin embargo, del sector NE las olas son levemente inferiores. Los tres nodos de información presentan comportamientos similares entre sí.

Por otra parte, se destaca la concordancia de este análisis, con los dos estudios antecedentes para la zona de Tierra del Fuego.

Distribución Olas-Dirección																	
Hs	Dirección																Ocurrencia [%]
	N	NNE	NE	NEE	E	SEE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	NWW	NW	NNW	
0.00 - 0.50	0.19%	0.22%	0.68%	0.60%	0.44%	0.44%	0.17%	0.07%	0.03%	0.09%	0.09%	0.02%	0.02%	0.03%	0.05%	0.05%	3%
0.50 - 1.00	1.35%	2.94%	6.99%	3.92%	1.44%	1.01%	0.84%	0.74%	0.62%	1.16%	2.38%	1.49%	1.01%	0.97%	0.99%	1.11%	29%
1.00 - 1.50	1.35%	3.28%	4.84%	2.21%	0.91%	0.82%	1.50%	0.75%	0.75%	1.30%	3.88%	4.22%	2.15%	1.45%	1.28%	1.37%	32%
1.50 - 2.00	0.79%	1.73%	1.57%	0.70%	0.53%	0.44%	0.60%	0.65%	0.46%	1.25%	3.40%	4.51%	1.59%	0.82%	0.63%	0.67%	20%
2.00 - 2.50	0.21%	0.85%	0.48%	0.15%	0.17%	0.10%	0.19%	0.26%	0.34%	0.91%	1.90%	2.68%	0.94%	0.21%	0.12%	0.24%	10%
2.50 - 3.00	0.03%	0.26%	0.14%	0.09%	0.09%	0.02%	0.21%	0.19%	0.10%	0.53%	1.01%	0.87%	0.22%	0.02%	0.00%	0.02%	4%
3.00 - 3.50	0.00%	0.05%	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.03%	0.12%	0.15%	0.17%	0.36%	0.24%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1%
3.50 - 20.00	0.00%	0.00%	0.07%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.07%	0.17%	0.32%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1%
Ocurrencia [%]	4%	9%	15%	8%	4%	3%	4%	3%	3%	6%	13%	14%	6%	4%	3%	3%	

Tabla: 2.11 Distribución de alturas de Oleaje y Dirección en zona exterior a 100 Km de la costa, para el nodo W068N510. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Distribución de Olas - Dirección																	
Hs	Dirección																Ocurrencia [%]
	N	NNE	NE	NEE	E	SEE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	NWW	NW	NNW	
0.00 - 0.50	0.19%	0.32%	0.29%	0.31%	0.46%	0.26%	0.19%	0.05%	0.05%	0.03%	0.05%	0.05%	0.14%	0.05%	0.07%	0.10%	3%
0.50 - 1.00	1.97%	4.07%	5.34%	1.73%	0.97%	0.96%	0.80%	0.50%	0.34%	0.58%	0.89%	1.76%	1.61%	1.13%	0.96%	1.30%	25%
1.00 - 1.50	1.69%	3.25%	5.03%	1.76%	0.67%	1.08%	1.66%	0.60%	0.74%	0.96%	2.00%	4.75%	3.61%	2.29%	1.66%	1.59%	33%
1.50 - 2.00	0.99%	2.09%	1.57%	0.51%	0.36%	0.62%	0.79%	0.50%	0.51%	1.33%	2.22%	5.34%	3.35%	1.62%	0.82%	0.72%	23%
2.00 - 2.50	0.32%	1.01%	0.43%	0.24%	0.14%	0.02%	0.22%	0.17%	0.34%	0.75%	1.44%	2.58%	1.92%	0.55%	0.22%	0.38%	11%
2.50 - 3.00	0.09%	0.43%	0.14%	0.12%	0.10%	0.02%	0.21%	0.14%	0.14%	0.38%	0.62%	0.79%	0.36%	0.05%	0.03%	0.05%	4%
3.00 - 3.50	0.00%	0.07%	0.12%	0.03%	0.00%	0.00%	0.09%	0.07%	0.10%	0.21%	0.31%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1%
3.50 - 20.00	0.02%	0.03%	0.03%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.03%	0.02%	0.10%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0%
Ocurrencia [%]	5%	11%	13%	5%	3%	3%	4%	2%	2%	4%	8%	15%	11%	6%	4%	4%	

Tabla: 2.12 Distribución de alturas de Oleaje y Dirección en zona exterior a 70 Km de la costa, para el nodo W068N515. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

Distribución de Olas - Dirección																	
Hs	Dirección																Ocurrencia [%]
	N	NNE	NE	NEE	E	SEE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	NWW	NW	NNW	
0.00 - 0.50	0.09%	0.05%	0.14%	0.15%	0.24%	0.26%	0.05%	0.05%	0.05%	0.02%	0.00%	0.02%	0.05%	0.02%	0.02%	0.05%	1%
0.50 - 1.00	1.66%	3.10%	2.91%	0.94%	0.39%	0.70%	0.56%	0.32%	0.31%	0.51%	0.53%	1.09%	1.15%	1.27%	1.11%	1.06%	18%
1.00 - 1.50	2.70%	4.91%	3.64%	1.01%	0.38%	1.01%	1.39%	0.51%	0.32%	0.56%	1.59%	3.78%	3.88%	2.33%	1.69%	1.42%	31%
1.50 - 2.00	1.64%	3.11%	1.42%	0.79%	0.21%	0.62%	0.53%	0.46%	0.44%	0.62%	1.85%	4.14%	4.84%	3.04%	1.54%	1.18%	26%
2.00 - 2.50	0.72%	1.33%	0.46%	0.19%	0.19%	0.05%	0.19%	0.36%	0.24%	0.56%	1.54%	2.96%	3.23%	1.54%	0.62%	0.56%	15%
2.50 - 3.00	0.22%	0.55%	0.14%	0.10%	0.10%	0.03%	0.17%	0.10%	0.24%	0.27%	0.77%	1.56%	1.04%	0.51%	0.19%	0.24%	6%
3.00 - 3.50	0.03%	0.36%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.07%	0.12%	0.09%	0.12%	0.36%	0.51%	0.21%	0.02%	0.02%	0.03%	2%
3.50 - 20.00	0.07%	0.02%	0.07%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	0.02%	0.03%	0.15%	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1%
Ocurrencia [%]	7%	13%	9%	3%	2%	3%	3%	2%	2%	3%	7%	14%	14%	9%	5%	5%	

Tabla: 2.13 Distribución de alturas de Oleaje y Dirección en zona exterior a 120 Km de la costa, para el nodo W675N520. Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

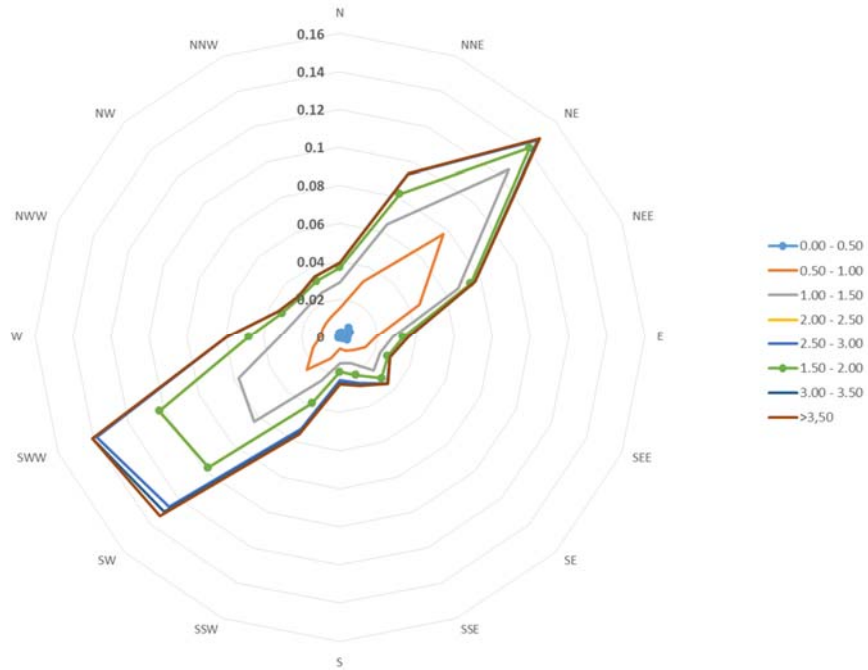


Figura 2.51. Rosa de Olas para el nodo W068N510. Distancia a costa: 100Km.

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

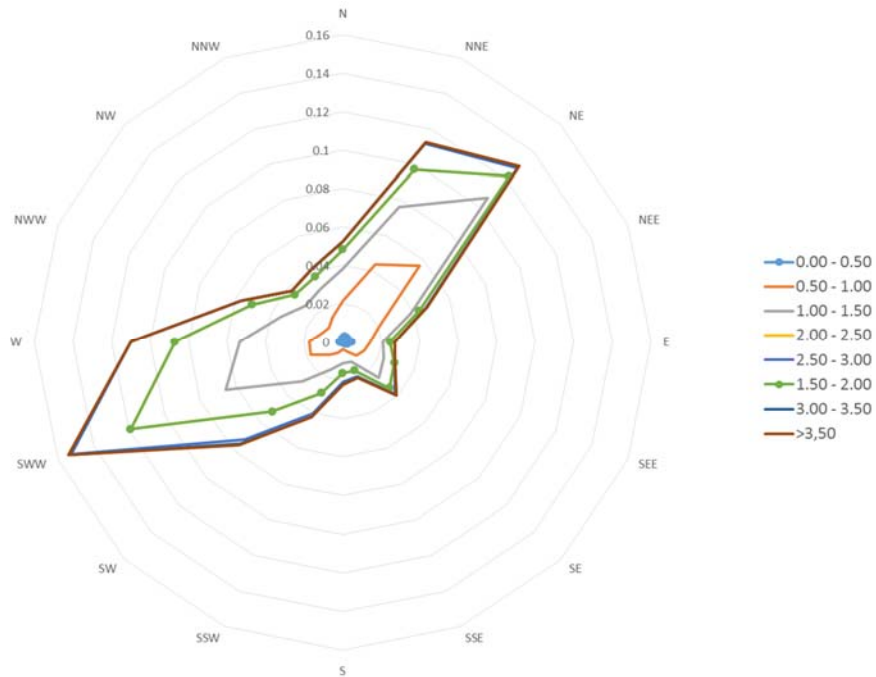


Figura 2.52. Rosa de Olas para el nodo W068N515. Distancia a costa: 70Km.

Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

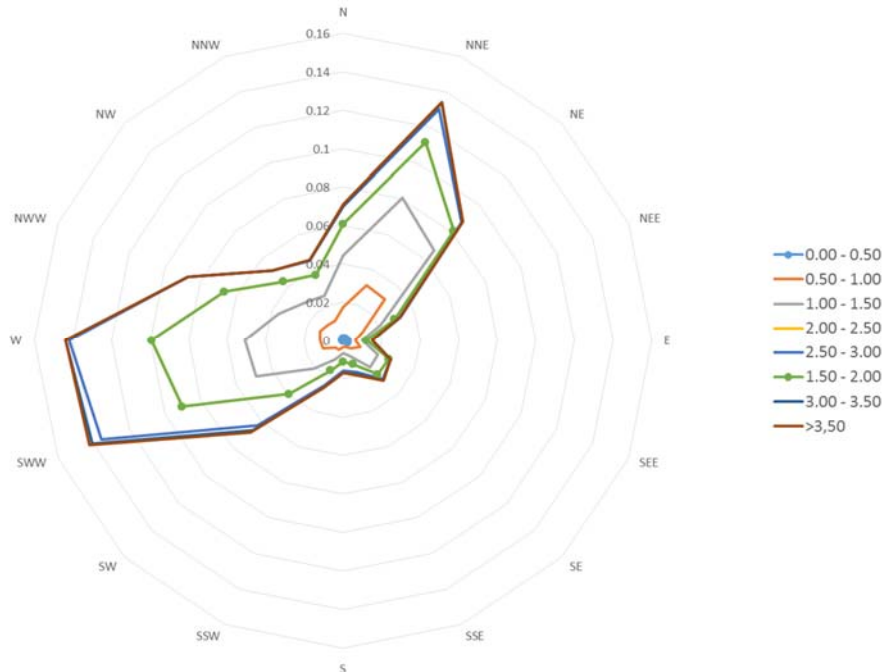


Figura 2.53. Rosa de Olas para el nodo W675N052. Distancia a costa: 120Km.
 Fuente: datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER

2.7.4. Análisis espectral y paramétrico

El oleaje se manifiesta como un fenómeno de carácter estocástico e irregular, por lo cual su correcta interpretación requiere de un estudio detallado de sus diversas características. El análisis o aproximación espectral es uno de los mecanismos más utilizados, y para tal fin existen diferentes modelos analíticos disponibles para el estudio del oleaje, basados en la superposición de ondas regulares de período constante desplazándose en una dirección determinada.

Resulta necesario destacar que la fuente de estos fenómenos proviene básicamente de una transferencia de energía del viento, el cual incide directamente sobre el campo de oleaje. Existen tres factores fundamentales que influyen en la formación de olas por tales efectos:

- La velocidad del viento.
- La distancia recorrida por el viento en aguas abiertas, denominada fetch.
- La duración del viento.

A su vez, pueden observarse principalmente tres tipos o estados de oleaje:

- Rizos u olas capilares
- Olas sea
- Olas swell

Rizos u olas capilares

Los rizos u olas capilares se manifiestan por obra de las tensiones friccionales generadas por el viento. La fuerza que permite su propagación es la tensión superficial. Cuando la superficie pierde su lisura, el efecto de fricción se intensifica y los pequeños rizos iniciales dejan paso a olas de gravedad, clasificadas como olas sea u olas swell. En general, para el estudio del oleaje, se desprecia la contribución de las olas capilares dado que su altura máxima no supera los 2 cm. Por otra parte, estos rizos no son posibles de detectar con los métodos convencionales por la alta frecuencia que tienen en comparación con las olas mayores.

Olas Tipo Sea

Las olas tipo sea se caracterizan por ser de carácter irregular, donde predomina una gran dispersión tanto en intensidad como en dirección. Dicha situación produce que su espectro frecuencial sea de banda ancha. Las mismas se forman en condiciones de viento sostenido, pero su duración se extiende de forma prolongada una vez finalizado el aporte de energía.

Las olas sea son de distinta altura y se desplazan a distintas velocidades. Como el viento transfiere mejor la energía a las olas más grandes, las de mayor altura también se desplazan a mayor velocidad. Como consecuencia de esta diversidad en los frentes, las olas mayores alcanzan a las menores y las incorporan a su masa, aumentando así su tamaño.

El resultado de este estado es un mar agitado con olas que pueden avanzar en cualquier dirección, si bien, en aguas profundas, la resultante general coincide con la dirección del viento.

Olas Tipo Swell

A medida que las olas se propagan y se alejan de su centro de generación, se separan naturalmente de acuerdo a su dirección y longitud de onda. Cada una de las componentes en las que se separa la ola original se disipa muy lentamente. La atenuación no actúa simultáneamente en todo el rango de frecuencias. Mientras el viento se va debilitando, este todavía es capaz de sustentar el equilibrio de energía en las frecuencias de la parte más alta del espectro, mientras que las olas de baja frecuencia se convierten en olas de superficie libres. Así pueden observarse olas regulares de gran altura en ausencia del viento. Estas son las olas tipo swell, las cuales se alejaron de su zona de creación.

Este estado se caracteriza por presentar olas que provienen de centros de generación situados a veces a miles de kilómetros del sitio de observación. A su vez, las mismas se

desplazan con notable regularidad en todas sus variables (altura, longitud de onda, período y dirección).

Estados Combinados

Concretamente, es muy difícil encontrar estados de olas puros como los descritos anteriormente. A pesar de su baja probabilidad, la relativa simpleza conceptual de los estados puros los hace útiles al momento de estudiar estados más realistas.

Formalmente, es usual descomponer a los estados combinados en los dos estados elementales (sea y swell), para luego calcular parámetros significativos. Identificar y separar las componentes del oleaje provee una descripción más realista del estado de las olas y es de gran interés tanto en aplicaciones científicas como ingenieriles.

Espectros de Energía Característicos

El espectro es una de las formas más habituales de describir las propiedades del oleaje irregular. El mismo representa la distribución energética sobre un rango de frecuencias y direcciones: la distribución de energía en el dominio de frecuencias se representa por el espectro de energía $S(\omega)$, mientras que la distribución de la energía en el dominio de la dirección se representa por la función de dispersión direccional $D(\omega, \theta)$. A continuación se muestran ejemplos de los espectros de energía que caracterizan los diversos estados de oleaje.

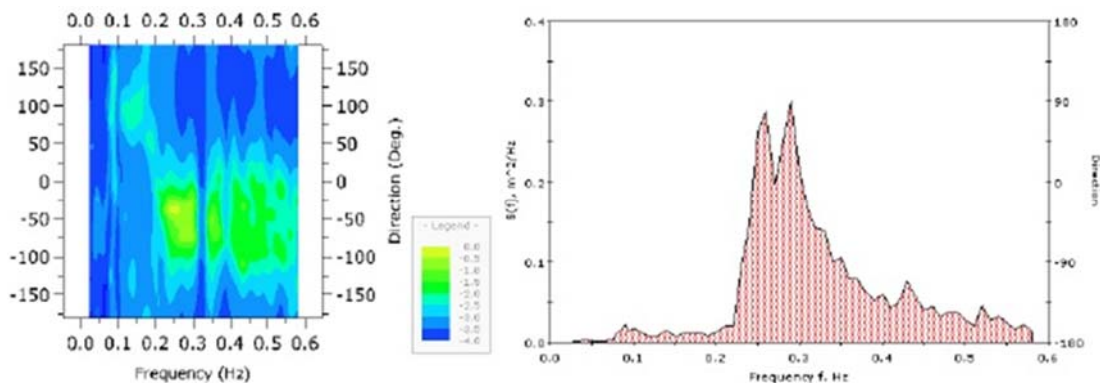


Figura 2. 54 Espectros de energía característicos para oleaje wind sea (Tarroija, 2003)

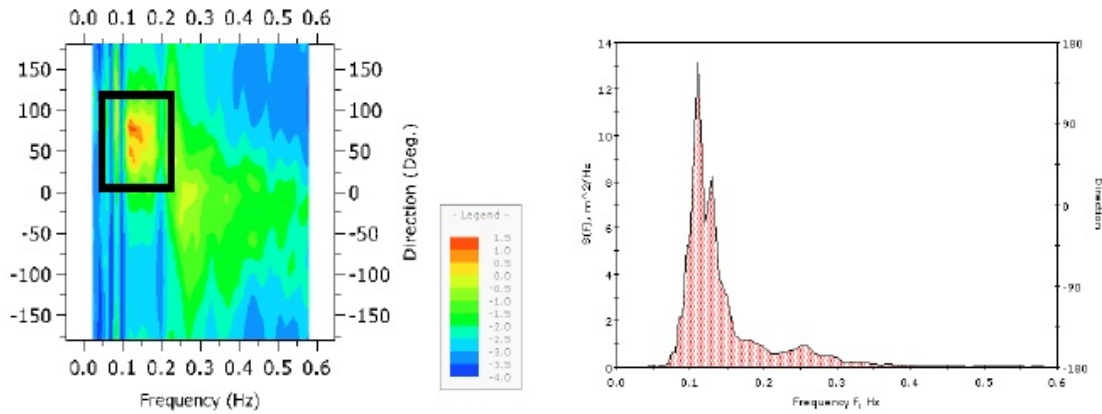


Figura 2. 55. Espectros de energía característicos para oleaje swell (Tarroija, 2003)

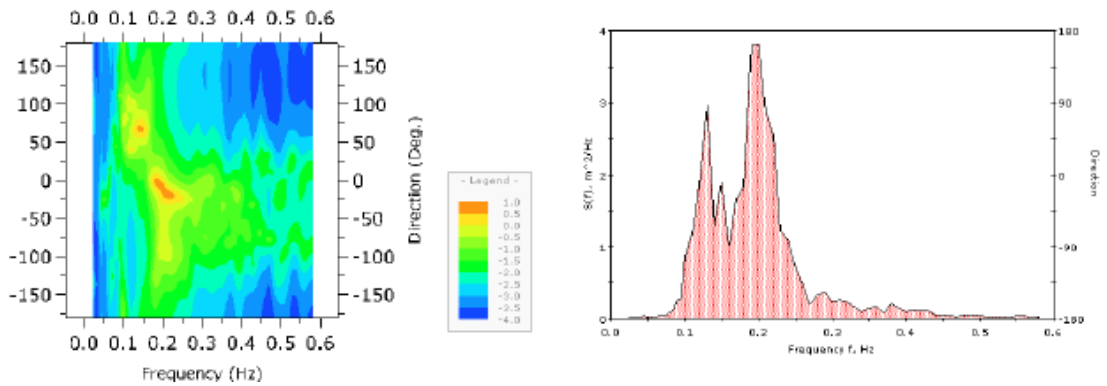


Figura 2. 56. Espectros de energía característicos para estados multimodales (Tarroija, 2003)

La introducción y análisis de las características espectrales como dato de entrada en la modelación matemática permite materializar mejoras sustanciales en los resultados finales obtenidos. La definición paramétrica de los espectros escalares de energía y la incorporación de estados de oleaje multimodales se manifiesta como instrumentos necesarios a implementar en la simulación numérica, más aun teniendo en cuenta las particularidades que presenta el clima de olas en la región de estudio.

Si bien ciertas propiedades como la altura significativa, periodo pico y dirección media son habitualmente utilizadas en la caracterización del oleaje, la descripción de las variables espectrales se materializa como una herramienta fundamental para el conocimiento e interpretación de las características hidrodinámicas en la región del estuario del Río Gallegos.

Para la caracterización espectral se ha realizado el procesamiento de información recopilada en el Informe 1, proveniente del proyecto IOWAGA (Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications), desarrollado por el instituto de investigación IFREMER (Francia). Se muestra a continuación la ubicación de los nodos y el listado de parámetros implementado en el análisis.

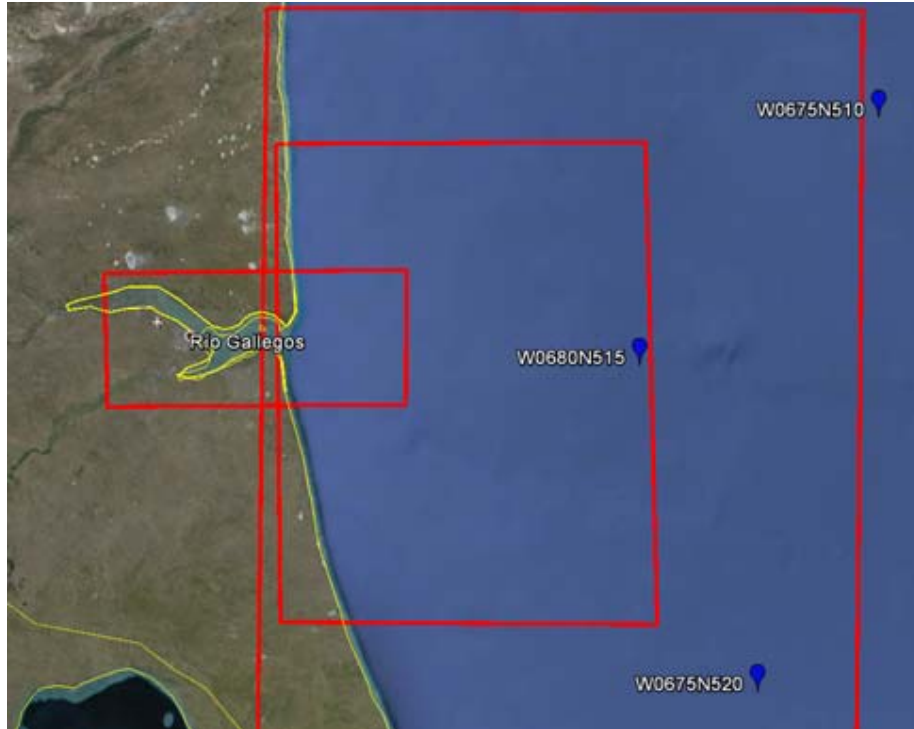


Figura 2. 57. Ubicación nodos procesados y dominios de análisis (Fuente Imagen de fondo: Google Earth)

Punto	Latitud	Longitud
W0675S510	51° S	67.5° O
W0675S520	52° S	67.5° O
W0680S515	51.5° S	68° O

Tabla 2.14. Listado de nodos analizados.

Se destaca que la información suministrada por esta base de datos contempla no solo la descripción del espectro total de energía correspondiente a cada instante de registro, sino que además entrega información sobre la componente energética aportada por el oleaje generado por vientos locales (sea) y por las dos componentes principales asociadas al oleaje oceánico propagado desde diferentes zonas de generación (swell_1 y swell_2).

Parámetro	Unidades	Descripción	Periodo
hs	m	Altura Significativa (Espectro Completo)	2012-2013
fp	s-1	Frecuencia Pico (Espectro Completo)	2012-2013
dir	° (Nautical)	Dirección Media (Espectro Completo)	2012-2013
spr	°	Dispersión Direccional (Espectro Completo)	2012-2013
pdir0	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SEA)	2012-2013
pdir1	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SWELL_1)	2012-2013
pdir2	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SWELL_2)	2012-2013
phs0	m	Altura Significativa (Componente SEA)	2012-2013
phs1	m	Altura Significativa (Componente SWELL_1)	2012-2013
phs2	m	Altura Significativa (Componente SWELL_2)	2012-2013
ptp0	s	Periodo Pico (Componente SEA)	2012-2013
ptp1	s	Periodo Pico (Componente SWELL_1)	2012-2013
ptp2	s	Periodo Pico (Componente SWELL_2)	2012-2013
pspr0	°	Dispersión Direccional (Componente SEA)	2012
pspr1	°	Dispersión Direccional (Componente SWELL_1)	2012
pspr2	°	Dispersión Direccional (Componente SWELL_2)	2012

Tabla 2.15. Listado de parámetros procesados y periodo de análisis.

A partir de la información indicada, se presentan a continuación los resultados obtenidos del análisis espectral para el nodo W0680S515. El procesamiento para los nodos W0675S52 y W0675S51 se encuentra adjunto en el Anexo I.

Intervalo phs (m)	Frecuencia Relativa (%)		
	phs0	phs1	phs2
<0.5	13.27%	50.51%	94.46%
0.5-1	25.75%	33.15%	5.43%
1-1.5	26.28%	11.79%	0.11%
1.5-2	19.11%	3.62%	0.00%
2-2.5	9.87%	0.84%	0.00%
2.5-3	3.75%	0.07%	0.00%
3-3.5	1.43%	0.02%	0.00%
3.5-4	0.43%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.06%	0.00%	0.00%
>4.5	0.04%	0.00%	0.00%

Tabla 2.16. Distribución de alturas significativas de olas por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

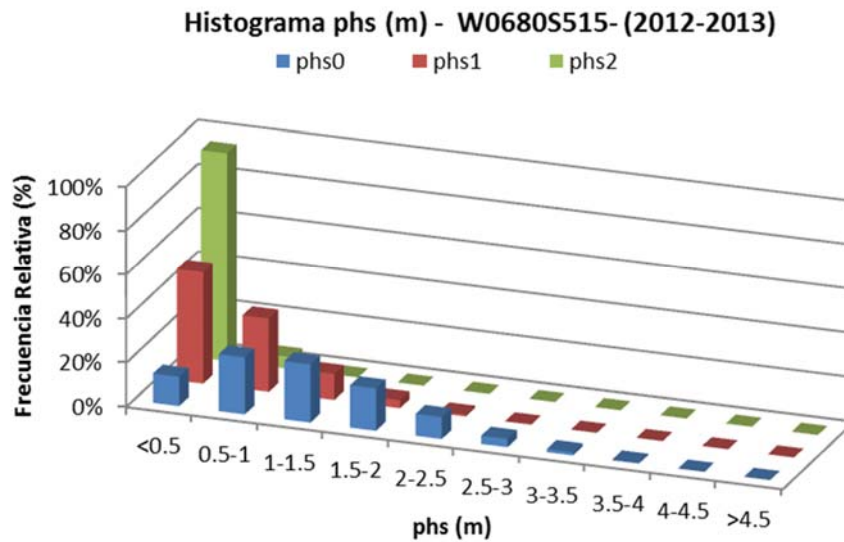


Figura 2. 58. Histograma de altura significativa por componentes, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

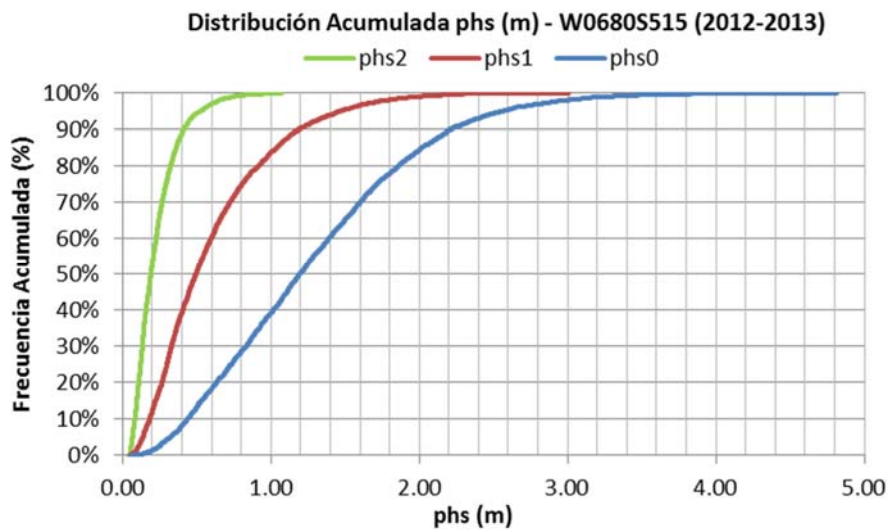


Figura 2. 59. Diagrama de distribución acumulada por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Se observa claramente la diferenciación entre los rangos de altura significativa que caracteriza a cada componente. El oleaje generado por vientos locales (SEA), presenta alturas significativas mayores, así como también una mayor dispersión en su distribución. Por otro lado, el oleaje de tipo oceánico (SWELL) manifiesta un rango estrecho y de menor magnitud de alturas.

Intervalo ptp (seg)	Frecuencia Relativa (%)		
	ptp0	ptp1	ptp2
<2	0.59%	0.00%	0.00%
2-4	25.06%	1.74%	5.47%
4-6	55.16%	10.49%	10.48%
6-8	17.09%	30.43%	21.71%
8-10	2.10%	41.01%	35.54%
10-12	0.00%	13.72%	18.45%
12-14	0.00%	2.23%	6.43%
>14	0.00%	0.37%	1.92%

Tabla: 2.17. Distribución de periodos pico por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

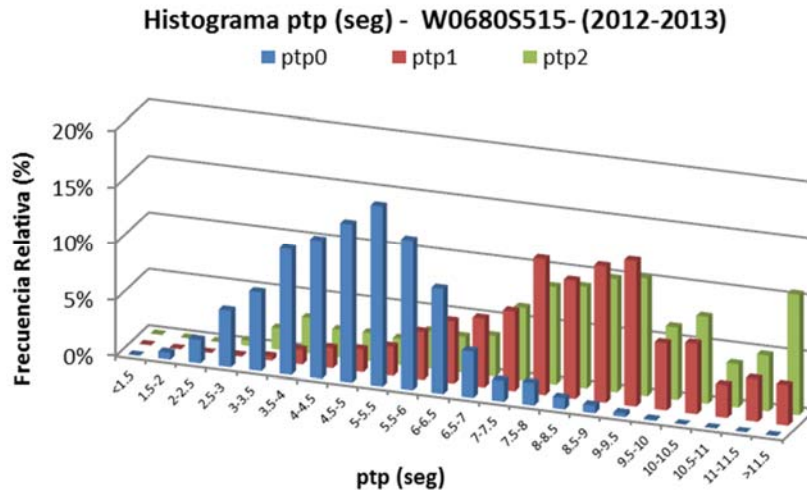


Figura 2.60. Histograma de periodos pico por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Se observa el contraste existente en la distribución del periodo pico para cada componente. El oleaje generado por vientos locales manifiesta periodos de menor magnitud (80% entre 2-6 segundos; 97% entre 2-8 segundos) así como también una distribución con mayor dispersión. Por otro lado, el SWELL se caracteriza por presentar mayores periodos (85% entre 6-12 segundos) y una distribución comparativamente más regular, poniendo en manifiesto los mecanismos de generación de oleaje que caracterizan a cada componente.

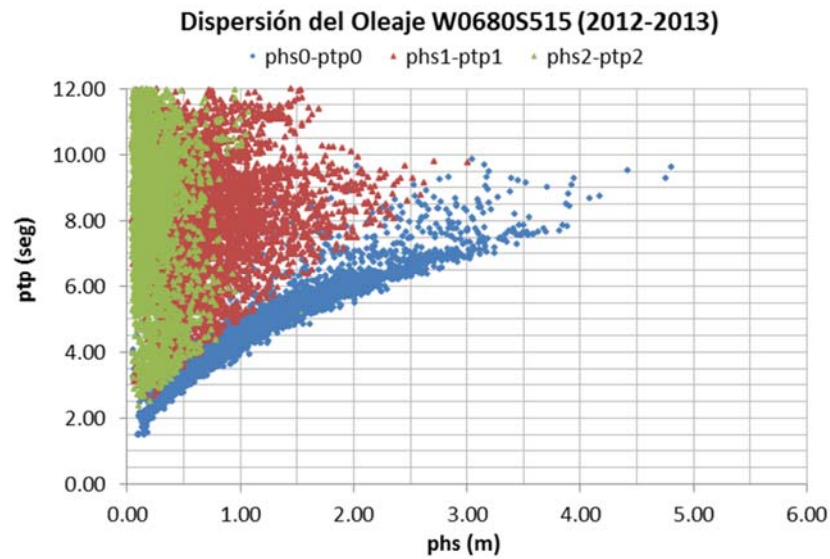


Figura 2.61. Dispersión del oleaje por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Se observa claramente la coherencia de los valores procesados a partir de la base de datos implementada. La componente tipo SEA presenta una regresión aproximadamente lineal entre la altura significativa y el periodo, concordando con los mecanismos que caracterizan la generación por vientos. Por otro lado, el análisis correspondiente al SWELL presenta una distribución irregular, manifestando una dispersión característica para este tipo de oleaje.

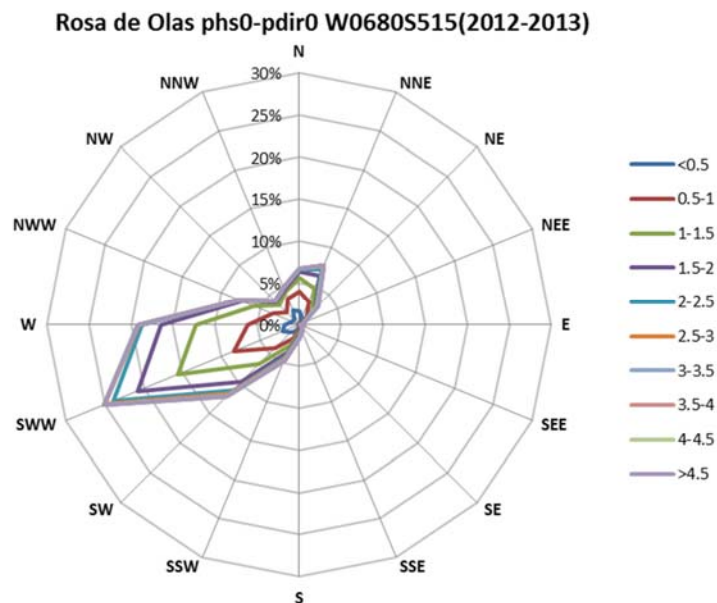


Figura 2.62. Rosa de Olas componente SEA, nodo W0680S515. Alturas de ola en m. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs1-pdir1 W0680S515 (2012-2013)

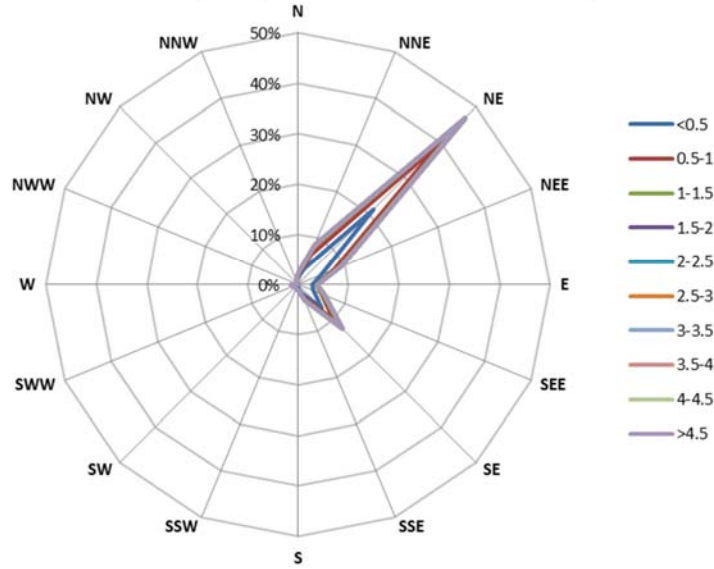


Figura 2.63. Rosa de Olas componente SWELL_1, nodo W0680S515. Alturas de ola en m. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs2-pdir2 W0680S515 (2012-2013)

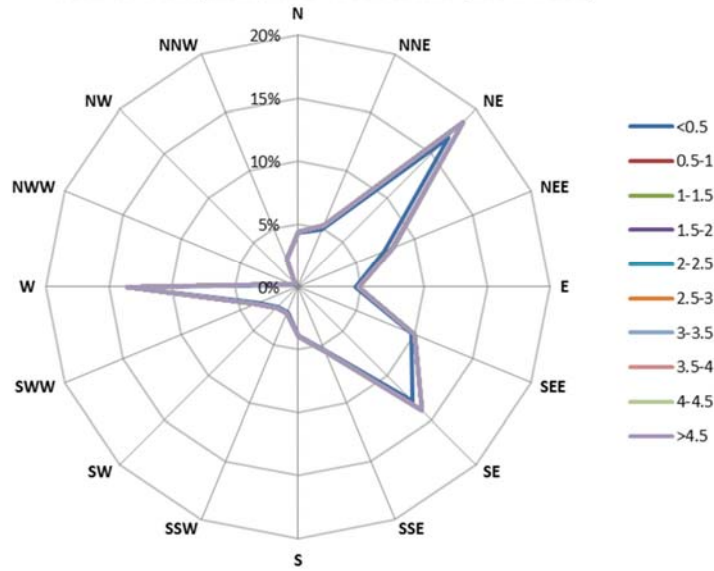


Figura 2.64. Rosa de Olas componente SWELL_2, nodo W0680S515. Alturas de ola en m. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs-pdir W0680S515 (2012-2013)

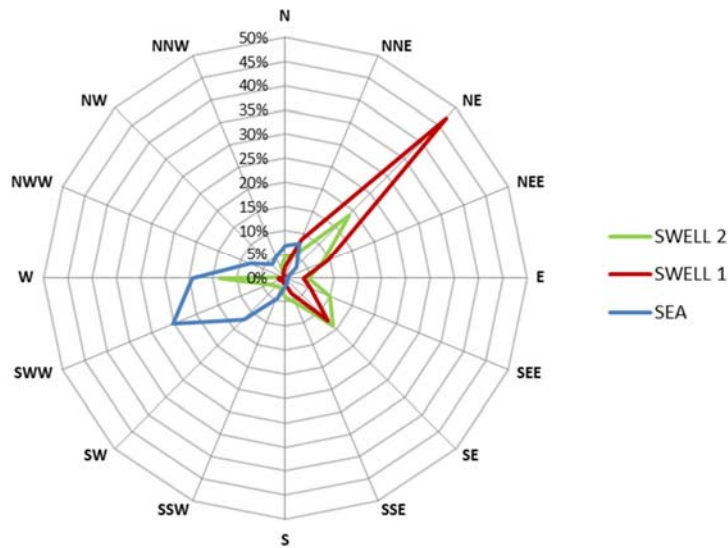


Figura 2.65. Rosa de Olas por componente, nodo W0680S515. Alturas de ola en m. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Vientos W0680S515 (2012-2013)

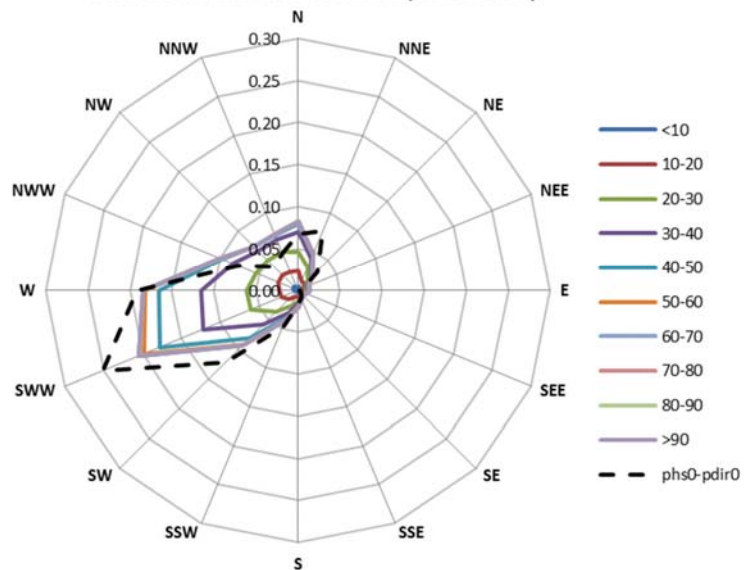


Figura 2.66. Rosa de Vientos vs Rosa de Olas para componente SEA, nodo W0680S515. Alturas de ola en m. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Se observa el contraste en la dirección de propagación del oleaje incidente para cada componente del espectro. La componente tipo SEA manifiesta direcciones predominantes del W-SWW-SW, ajustando cualitativamente con la rosa de vientos procesada a partir de los modelos ECMWF/NCEP y los datos registrados en la estación del SMN. Por otro lado, las olas tipo SWELL presentan direcciones predominantes del NE

y en menor proporción del SE, lo cual concuerda con la propagación de dicha componente sobre la región.

Además de analizar en forma individual el registro de cada una de las componentes energéticas que aportan al oleaje total resulta de interés, como complemento de la caracterización general, la estimación porcentual de la cantidad de casos para los cuales puede observarse el predominio de los diferentes estados característicos. Es decir, interesa conocer los porcentajes de tiempo que corresponden a situaciones en los cuales el oleaje total registrado en la zona de estudio puede considerarse como un estado de SEA, SWELL, o de oleaje combinado.

La caracterización de los diversos tipos de oleaje y la evaluación de los distintos estados que se manifiestan en la región establecen una herramienta fundamental para argumentar la selección de escenarios destinados al desarrollo de las simulaciones numéricas. A su vez, la incorporación de estados multimodales a través de modelos paramétricos espectrales permite representar con mayor fidelidad la complejidad que presenta el clima de olas en la zona de influencia del estuario del Río Gallegos.

Para verificar el aporte e incidencia de cada estado característico resulta necesario clasificar el tipo de oleaje en base a las variables espectrales procesadas. Los criterios de clasificación pueden basarse en el análisis de dos parámetros: el ancho de banda espectral ϵ y la relación de energía R_{m_0} . Dado que la base datos procesados no dispone información del ancho de banda espectral, el presente estudio aplica un criterio de clasificación basado únicamente en el segundo parámetro.

La relación de energía se define como el cociente entre el área de la componente generada por vientos y el área del espectro total, es decir:

$$R_{m_0} = \frac{m_{0sea}}{m_{0total}}$$

El parámetro m_0 se obtiene indirectamente a través de la siguiente expresión, la cual se aplica tanto para el oleaje generado por viento (phs_0) como para la evaluación del espectro completo (hs).

$$H_s = 4\sqrt{m_0}$$

Luego, se consideran los siguientes rangos para la clasificación:

- Estado de swell predominante: $R_{m_0} < 0.4$
- Estado de oleaje combinado: $0.4 < R_{m_0} < 0.65$
- Estado de wind sea predominante: $R_{m_0} > 0.65$

Mediante la aplicación de estos conceptos se desarrolló un análisis consistente en la evaluación del registro cronológico de olas totales considerando el aporte simultáneo de las distintas componentes de energía en cada situación.

Los resultados del procesamiento realizado sobre los distintos nodos establecen como conclusión que existe un marcado predominio del oleaje generado por vientos locales, los cuales manifiestan una ocurrencia del 65%. En segundo lugar, resulta interesante destacar la presencia de estados combinados de wind sea y swell, los cuales aportan un 20%. Finalmente, tan sólo el 15% de la totalidad de los casos corresponde a estados de swell predominante.

2.8. Mareas

Las mareas en el Estuario de Río Gallegos presentan un régimen semidiurno, caracterizado por grandes amplitudes, las cuales se deben a la posición global respecto a las ondas de marea y las amplificaciones que sufren las ondas por la geomorfología local. Las ondas semidiurnas principales de marea que afectan nuestra plataforma se propagan en la cuenca del Atlántico Sur alrededor de dos puntos anfidrómicos, como se denomina a los puntos de marea nula, situados uno entre 30° y 40° S y entre 20° y 30° W, con rotación anticiclónica y el otro, ciclónico, aproximadamente en 60° S y el meridiano de Greenwich. Asimismo, la presencia de las Islas Malvinas genera una modificación en la propagación de las ondas de marea hacia el continente.

Como puertos de referencia para la determinación de las mareas, el Servicio de Hidrografía Naval presenta al muelle El Turbio como puerto secundario, refiriéndose todos sus valores al Puerto de Río Gallegos (Tabla 2.18). Asimismo, se encuentra la tabla de mareas correspondiente a Punta Loyola (Tabla 2.19).

MUELLE EL TURBIO (Puerto Río Gallegos)
 Carta argentina: H-452
 Lat.: 51o 37' S Long.: 69o 13' W
 Huso Horario + 3
 Régimen de marea: Semidiurno.
 Establecimiento de puerto medio: IXh 11min
 Nivel medio: 6,80 m

Las alturas están en metros y referidas al plano de reducción que pasa 6,80 m debajo del nivel medio. Para utilizar la carta náutica de referencia H-452, donde se indica que el nivel medio de muelle el Turbio (Puerto Río Gallegos) pasa 7,00 m por debajo del nivel medio, se les deberá sumar a estas predicciones 0,20 m para aplicarlos a los sondajes indicados en la misma.

Pleamar		Bajamar		Amplitud	
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
13,62	11,25	0,12	2,59	13,45	8,66

Tabla 2.18. Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2014. Río Gallegos El turbio

PUNTA LOYOLA (Río Gallegos)
 Carta argentina: H-451 A y B
 Lat.: 51o 36' S Long.: 69o 01' W
 Huso Horario + 3
 Régimen de marea: Semidiurno.
 Establecimiento de puerto medio: IXh 11min
 Nivel medio: 6,80 m

Las alturas están en metros y referidas al plano de reducción que pasa 6,80 m debajo del nivel medio. Para utilizar la carta náutica de referencia H-452, donde se indica que el nivel medio de muelle el Turbio (Puerto Río Gallegos) pasa 7,00 m por debajo del nivel medio, se les deberá sumar a estas predicciones 0,20 m para aplicarlos a los sondajes indicados en la misma.

Pleamar		Bajamar		Amplitud	
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
12,91	11,05	0,11	2,68	12,67	8,37

Tabla 2.19 Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2014. Río Gallegos Punta Loyola

En cuanto a la influencia del viento sobre los niveles de marea astronómicos, puede decirse que para las direcciones W y SW, con velocidades hasta 20 Km/h, no retardan ni aceleran sensiblemente la propagación de la marea, ni influyen en su amplitud. Sin embargo, con vientos superiores a 20 km/h, tanto en pleamar como las bajamares pueden modificarse con retardos de hasta 45 minutos sobre los valores astronómicos (Consejo Portuario Argentino, 2011).

2.8.1. Modelos globales de mareas

La marea es un fenómeno global y ésta es la manera en que puede ser tratada más rigurosamente. Los modelos globales de marea consideran el efecto de todos los forzantes astronómicos y representan su propagación alrededor de la Tierra. Para el presente trabajo los niveles de mareas serán obtenidos a partir de la aplicación de un modelo de generación global, el cual presenta calibraciones y validaciones para zonas costeras. Este modelo se denomina DTU10 y fue desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca. El mismo está basado en los sistemas FES2004 (Finite Element Solutions) (Lyard et al., 2006) y “response method” (Munk y Cartwright, 1966). Este modelo fue calibrado y validado con 17 años de mediciones (Andersen y Knudsen, 2009).

DTU10 provee los principales constituyentes armónicos (M2, S2, K1, O1) con una resolución de grilla de 0.125°, lo cual es 2 a 4 veces más densa que el resto de los modelos existentes (FES2004, EOT10a, TPX07.2, GOT4.7). Asimismo, el modelo presenta un muy buen ajuste respecto de las mediciones a nivel global y respecto a los resultados con herramientas similares.

El modelo DTU10 fue aplicado al Estuario de Río Gallegos, de donde se obtuvieron los constituyentes M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2 y Q1.

A partir de ello se determinó una serie de alturas de mareas para el período 2000 – 2014. Este modelo fue contrastado con los datos de las tablas de pronóstico de mareas elaboradas para Punta Loyola, Río Gallegos (Figura 2.67).

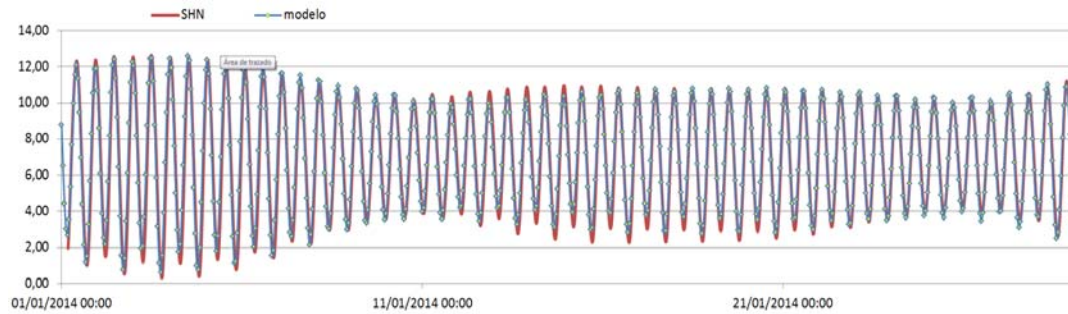


Figura 2.67. Extracto de la serie de niveles de marea modelada con DTU10 y datos de la tabla de marea del SHN para Punta Loyola

CAPÍTULO III: Modelación Hidrodinámica

3.1. Modelos a Utilizar

Los estudios a desarrollar en el presente trabajo estuvieron basados en simulaciones numéricas, a fin de comprender la dinámica costera en los sitios seleccionados. Se analizaron corrientes de marea, distribuciones del oleaje y dinámica del transporte de sedimentos para diferentes condiciones climáticas y de marea.

Los modelos numéricos a utilizados fueron DELFT3D y SWAN, desarrollados por Delft University of Technology de Holanda. Delft3D es un sistema de modelación acoplado compuesto por varios módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, de transporte de sólidos, de calidad de agua y de transporte de sustancias en general. Para este estudio se aplicó el módulo Delft3D-Flow (hidrodinámico) que incluye el módulo D-Morphology para transporte de sedimentos y análisis morfológico.

El módulo D-Flow es capaz de resolver de forma tridimensional flujos impermanentes incluyendo los efectos de mareas, vientos, presión atmosférica, diferencias de densidad (ocasionadas por temperatura o salinidad), olas, turbulencia y áreas inundables. El mismo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno, es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el k-l o el k- ϵ . La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial (horizontal) del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, estados combinados en estuarios) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de los ríos, estructuras hidráulicas, portuarias o costeras).

La integración temporal usada por el esquema de solución numérica (método Cyclic) se basa en el método ADI (Alternating Direction Implicit). Este esquema no impone restricciones al intervalo temporal de cálculo. En el problema examinado se considerará un intervalo temporal apropiado y estimado con el cálculo del número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL number).

El módulo de transporte de sedimentos (D-Morphology) puede calcular el transporte de fondo y en suspensión de sedimentos y computar los cambios morfológicos para sedimentos cohesivos y no-cohesivos. El método predeterminado que utiliza el Delft3D está asociado a las fórmulas de van Rijn (1993) pudiéndose especificar otro tipo de formulación como por ejemplo las ecuaciones de Meyer-Peter-Müller (1948), entre

otras, e inclusive fórmulas propias. Las fórmulas del método de Van Rijn utilizadas en este trabajo distinguen las siguientes componentes del transporte de fondo:

- a) Carga de fondo debido a la corriente (S_{bc}).
- b) Carga de fondo debido a las olas (S_{bw}).
- c) Carga suspendida debido a las olas (S_{sw}).

Las fórmulas del método Van Rijn distinguen entre la carga de fondo y la de suspensión mediante la altura de referencia “ a ”. La concentración de la carga de fondo es calculada según Delft3D a partir del método de Van Rijn:

$$S_b = 0.006 \rho_s w_s D_{50} M^{0.5} M_e^{0.7} \quad [1]$$

Donde S_b es la concentración de la carga de fondo en m^3/sm , ρ_s la densidad del sedimento, w_s la velocidad de caída para material no cohesivo, D_{50} el tamaño medio del material erosionable y M el número de movilidad del sedimento debido a las olas y a la corriente, M_e es el número de movilidad del sedimento excedente.

3.2. Configuración del modelo hidrodinámico

La implementación del modelo requiere previamente de la construcción de una o más grillas de cálculo diseñadas convenientemente de manera tal de poder representar con un adecuado nivel de detalle el desarrollo de los procesos físicos de interés para el estudio, al mismo tiempo de mantener acotado el costo computacional demandado por las simulaciones numéricas. Es decir, la extensión del dominio debe ser suficientemente grande como para eliminar los efectos de borde o fronteras exteriores en los modelos. De esta manera, se busca que los modelos tengan espacio suficiente para ajustarse a las fuerzas dinámicas actuantes en sus fronteras abiertas y llegar a una solución que represente con un grado de aproximación aceptable la situación real en la zona de interés.

Dados los condicionamientos geomorfológicos y físicos que caracterizan al área de estudio, la construcción de una grilla de cálculo que resulte eficiente para la implementación del modelo requiere de un largo proceso de ajuste y evaluación, que permitan converger hacia una solución satisfactoria en la simulación del sistema real. Por su parte, la densidad de una grilla determina el tamaño y separación de los elementos, lo cual indica el límite entre la zona resuelta y la no resuelta. Asimismo, modelos con elementos de mayor tamaño tienden a ser más difusivos y, por lo tanto, introducen mayor incertidumbre en sus predicciones.

De esta manera, se determinó que la zona a representar se extiende prácticamente en todo el interior del estuario y hasta unos 30 km en aguas abiertas. La grilla curvilínea

tiene alrededor de 96000 elementos, de aproximadamente 500 m en la zona exterior y 25 m como mínimo en la zona interior.

Para la elaboración del modelo digital de elevación se utilizó información de las cartas náuticas H-451b, H-451a, H-416 y H-413 del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Asimismo dicho set de datos fue complementado con datos provenientes de la base global GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). Todos los valores de profundidades fueron referidos al nivel medio del mar.

De forma complementaria, se utilizó información correspondiente a Topografía de Radar del modelo digital de elevaciones denominado SRTM. La Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM) es un proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial, NGA, y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA. Si bien esta información tiene una menor precisión en zonas costeras, permitió la estimación de las líneas isobatas en el área intermareal y de bajas profundidades en la parte superior del estuario.

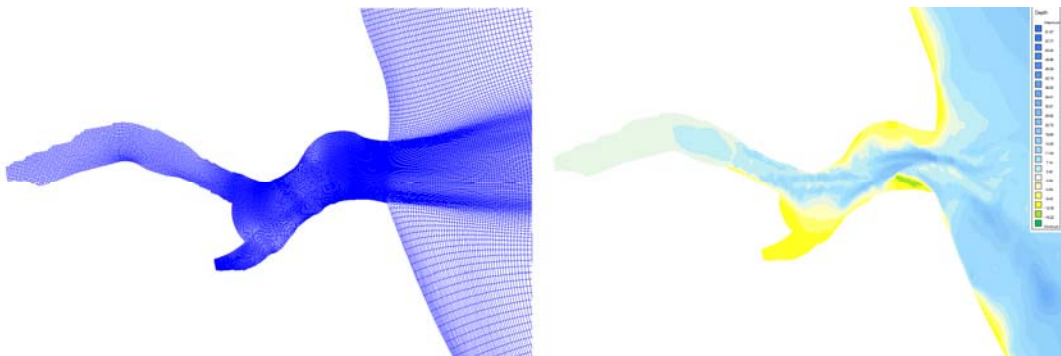


Figura 3.1. Malla curvilínea de cálculo y modelo digital de elevación implementado para la modelación del estuario de Río Gallegos

De acuerdo con la estrategia de modelación, y las características del problema a representar, sobre el borde oceánico (al Este de la grilla) se impuso como forzante la onda de marea representativa de la zona (a partir de un modelo global de mareas que permite determinar las 12 principales constantes armónicas), y sobre los bordes oceánicos Norte y Sur se consideró una condición de Neuman, la cual permite irradiar ondas hacia el exterior del área modelada sin que esto afecte la resolución del problema.

Los bordes Oeste de la grilla coinciden con la zona de ubicación de los Ríos Gallegos y Chico, y sobre ellos se estableció un caudal entrante que genera una componente adicional a la condición hidrodinámica del estuario.

3.3. Calibración y Validación

En el marco del presente estudio resulta de carácter fundamental efectuar mediciones de campo que involucren todas las variables de interés. La información obtenida, una vez tratada estadísticamente, permite generar una base de datos esencial para la calibración del modelo matemático y de esta manera, validar las predicciones y resultados que brinda la simulación numérica.

Como una primera etapa del trabajo proyectado para las tareas de campo, se efectuaron mediciones hidrodinámicas en las inmediaciones del muelle situado en Punta Loyola. El instrumento fue ubicado entre medio de dos líneas de pilotes separadas 40 metros y fondeado a una profundidad de 17 metros respecto al cero local.



Figura 3.2: Sector de fondeo ADCP – Muelle Punta Loyola. Fuente imagen de fondo: Google Earth.

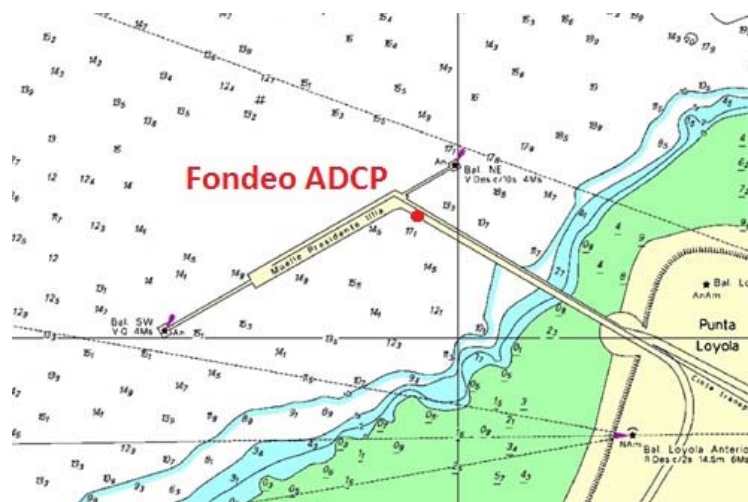


Figura 3.3: Sector de fondeo ADCP – Muelle Punta Loyola. Fuente imagen de fondo: Cartas SHN.



Figura 3.4: Sector de fondeo ADCP – Muelle Punta Loyola. Fuente: Relevamiento Fotográfico.

El equipo implementado, conocido genéricamente como ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) permite obtener registros de niveles, velocidad y dirección de la corriente en tiempo real para distintas capas a lo largo del tirante de agua.

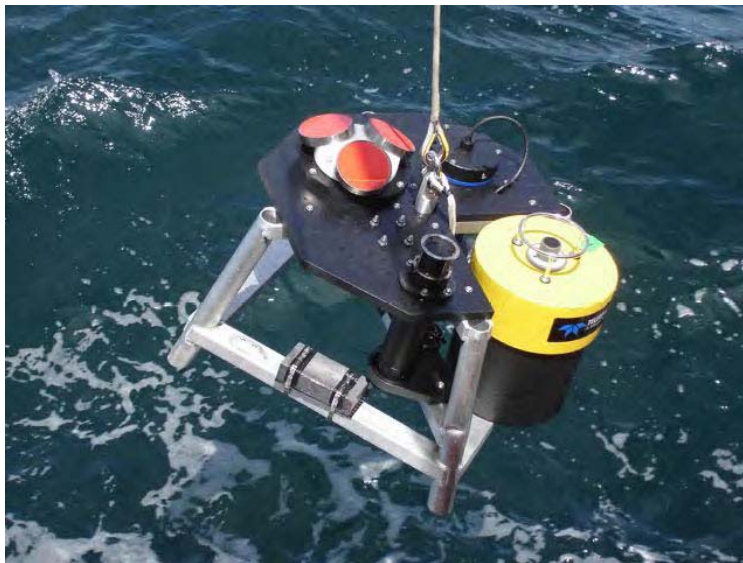


Figura 3.5: Fondeo ADCP Nortek Continental. Fuente: Relevamiento Fotográfico.

El principio de funcionamiento del ADCP se basa en el efecto Doppler. El equipo emite pulsos cortos de sonido a través de sus transductores, los cuales se reflejan en partículas inmersas en el medio tales como sedimentos en suspensión, zooplancton o incluso burbujas. Las ondas, una vez reflejadas son captadas nuevamente por el instrumento, el cual registra la variación en la frecuencia de dichos ecos para determinar la magnitud y velocidad de la corriente.

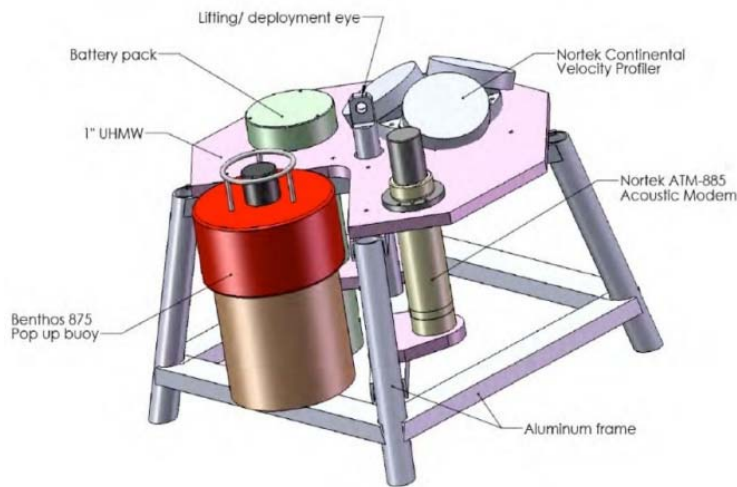


Figura 3.6: Componentes del ADCP. Fuente: Manual ADCP Nortek Continental.

El instrumento cuenta con tres transductores distribuidos uniformemente a lo largo del plano horizontal e inclinados 25° respecto a la vertical, los cuales emiten haces sonoros de 3° de amplitud. Cada haz es capaz de registrar únicamente la componente de velocidad paralela al mismo, por lo cual resulta necesario contar con todos los transductores trabajando simultáneamente y apuntados en distintas direcciones para obtener las tres componentes de velocidad. El ADCP opera a través de celdas de medición, permitiendo obtener registros de velocidad y dirección de la corriente para distintas alturas dentro del tirante de agua. El instrumento es capaz de registrar con fidelidad corrientes de hasta 10 m/s con una precisión del 1% sobre el valor medido. El rango máximo de medición se extiende entre los 150-250 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones locales del medio.

Por su parte, el equipo cuenta con un sensor de presión, el cual permite determinar indirectamente el nivel de marea conociendo la profundidad de fondeo. A su vez, posee un sensor de inclinación local (tilt sensor) y una brújula interna (compass), los cuales permiten referir la dirección de la corriente en coordenadas geográficas.

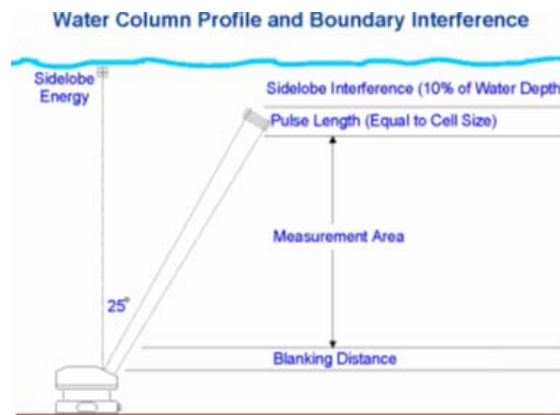


Figura 3.7: Regiones esquemáticas de medición. Fuente: Manual ADCP Nortek Continental.

El instrumento instalado registró valores de presión en intervalos temporales de 10 minutos durante el período que se extiende entre los días 24/09/2015 y 15/10/2015. Cabe señalar que el sensor presentó desperfectos durante la medición, por lo cual ciertos valores fueron descartados.

A partir de la malla de cálculo definida anteriormente y considerando un coeficiente de rugosidad uniforme en el estuario (n de Manning), se ejecutó una simulación para el período de mediciones. A continuación se presenta la comparación de los datos medidos con los resultados obtenidos, para niveles de marea y velocidades.

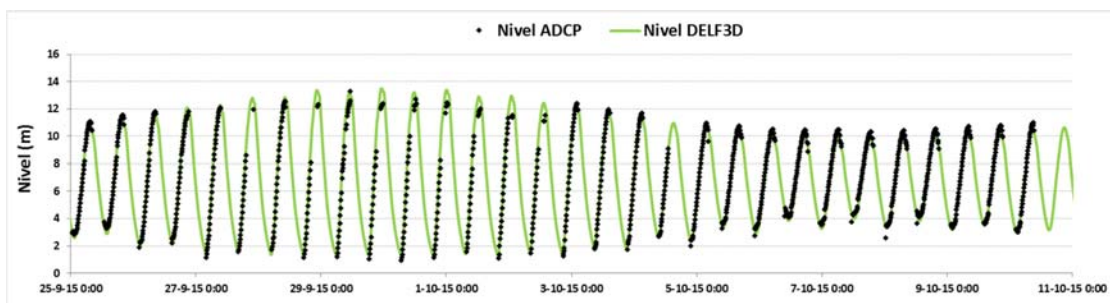


Figura 3.8: Comparación de niveles medidos y resultados del modelo. Fuente: Procesamiento de datos ADCP y resultados modelo DELFT3D.

Se observa en la figura una correlación muy buena entre los datos medidos respecto a los resultados del modelo. Cabe destacar que los registros del ADCP fueron filtrados de manera tal de eliminar aquellas mediciones consideradas no satisfactorias, las cuales se manifestaron sistemáticamente durante el periodo de bajantes debido a problemas de instalación del equipo.

Si bien es recomendable contar con un periodo de medición más extenso y la calidad de datos mejorada, se concluye que los resultados del modelo permiten predecir razonablemente la variación de amplitud y fase de la onda de marea dentro del estuario.

Asimismo, el instrumento instalado registró valores de velocidad y dirección de la corriente en intervalos temporales de 10 minutos durante el período que se extiende entre los días 24/09/2015 y 15/10/2015.

Cabe señalar que los registros presentaron una dispersión direccional entre capas significativa durante ciertos periodos de medición. Este fenómeno se manifestó particularmente durante los periodos de bajamares y las transiciones entre flujos y reflujos dentro del estuario. Se estima que la incidencia del muelle u otra interferencia en las inmediaciones podría ser causante de esta problemática, alterando la hidrodinámica local del sector.

Por otro lado, los resultados generales de la modelación matemática indican que el sector de medición se encuentra ubicado en una zona con tendencia a presentar recirculaciones de corrientes, los cuales se generan predominantemente durante los reflujos causando variaciones bruscas en el patrón direccional de las velocidades. A su vez, los análisis de sensibilidad efectuados sobre el modelo matemático revelan que Punta Loyola se caracteriza por presentar una evolución temporal irregular en su patrón de corrientes y particularmente sensible respecto a las condiciones geomorfológicas, en comparación con otros sectores dentro del estuario.

De esta manera, los datos fueron filtrados de modo tal de respetar aquellos registros con dispersión direccional acotada. Por su parte, dado que el instrumento arroja valores para todas las capas de medición independientemente del tirante de agua presente, los datos fueron depurados teniendo en cuenta el nivel de marea y la profundidad de fondeo. Ambos procedimientos permiten disminuir el ruido presente en las mediciones y de esta manera mejorar la calidad de los resultados obtenidos.

Se presenta a continuación la comparación (por periodos) de los datos medidos con los resultados obtenidos a partir de la modelación matemática, tanto en términos de velocidades como direcciones.

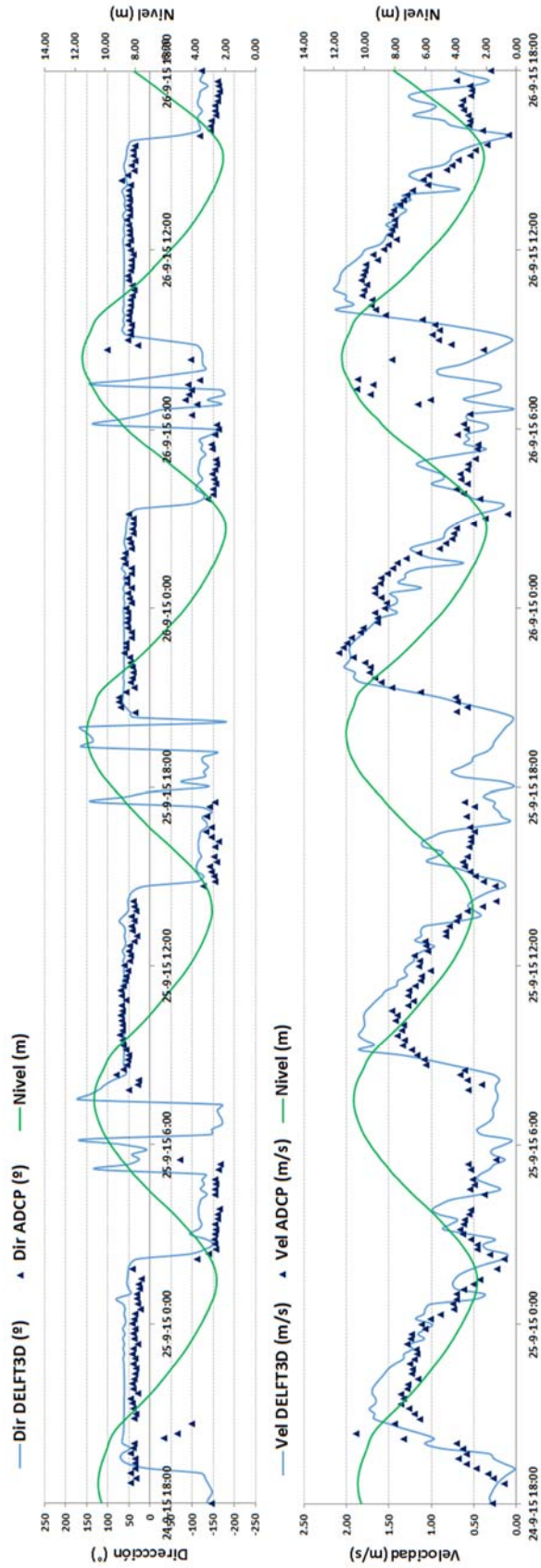


Fig.3.9: Comparación de velocidades/direcciones medidas y resultados del modelo. Fuente: Procesamiento de datos ADCP y resultados modelo DELFT3D.

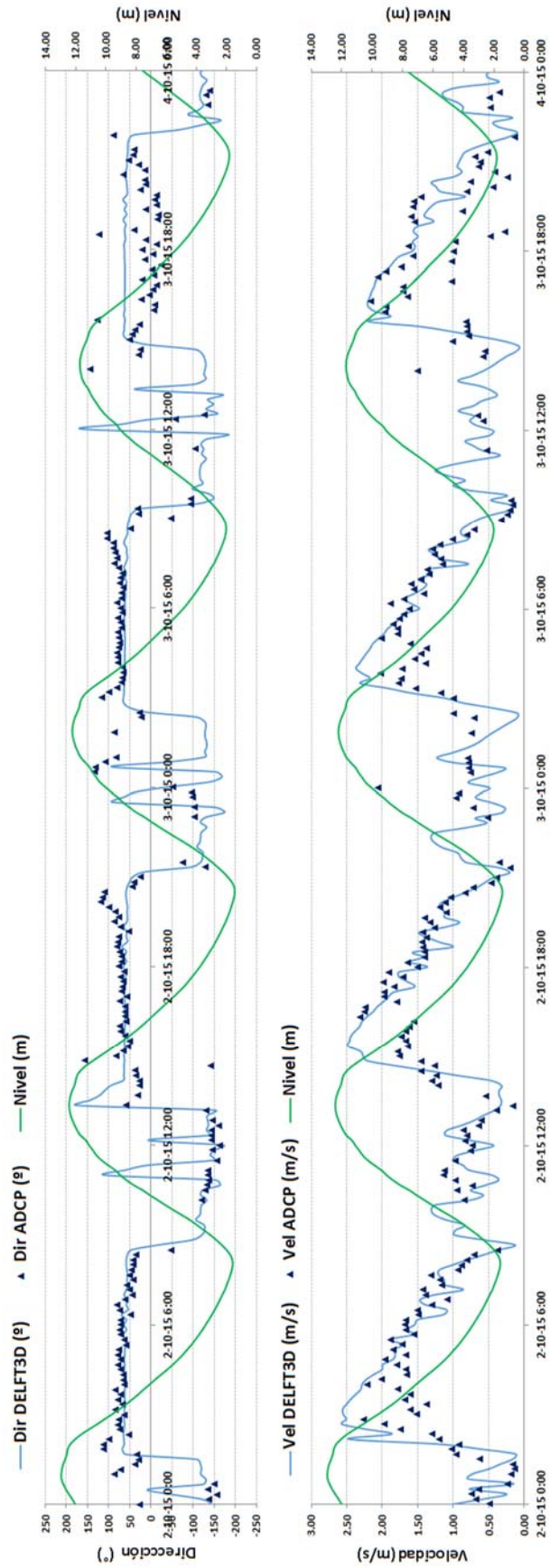


Fig.3.10: Comparación de velocidades/direcciones medidas y resultados del modelo. Fuente: Procesamiento de datos ADCP y resultados modelo

Se observa en las figuras anteriores una buena correlación entre las mediciones procesadas y los resultados de la modelación matemática durante un periodo de 48 horas. Se señala la concordancia en términos de evolución temporal y magnitud de la velocidad y dirección de la corriente.

3.4. Potencial Hidrocinético

En la actualidad, existen principalmente dos formas de producir energía a partir de las mareas. La primera de ellas se materializa a través del embalse de un recinto natural, tal como un estuario o bahía. Dicha modalidad, conocida como aprovechamientos mareomotrices, funciona análogamente a una central hidroeléctrica convencional, explotando la energía potencial a partir de la amplitud de marea disponible. La tecnología asociada a este tipo de producción recurre a turbogrupos lentos y de bajo salto, tales como las turbinas Bulbo y los equipos tubulares. Si bien esta clase de proyectos muestran un potencial energético de gran magnitud, en varias ocasiones existen implicaciones ambientales significativas que dificultan su implementación.

Otra alternativa de producción consiste en aprovechar la energía cinética de las corrientes. Las variaciones de nivel producidas a partir del movimiento de las mareas generan ingresos y egresos de grandes masas de agua dentro del recinto natural, promoviendo corrientes de flujo y reflujo de gran magnitud. Esta modalidad, conocida como aprovechamientos hidrocinéticos, presenta una tecnología de reciente desarrollo basada principalmente en los diseños existentes de turbinas eólicas.

En comparación con los proyectos hidroeléctricos convencionales y mareomotrices, los aprovechamientos hidrocinéticos presentan las siguientes ventajas potenciales (Bahaj y Myers, 2003):

- No requieren obras de cierre, evitando generar zonas de inundación.
- Requieren estructuras de fundación y soporte más sencillas, en comparación con la infraestructura requerida por los aprovechamientos de embalse.
- No obstruyen el paso de especies migratorias.
- No generan impacto visual.
- No producen contaminación auditiva.
- Menores periodos de gestación y construcción.
- Posibilidad de aplicar sistemas modulares, facilitando el mantenimiento y prolongando la vida útil de los turbogrupos (Bedard, 2005). Debido a la naturaleza modular de algunos diseños de turbinas, resulta posible una

renovación de las unidades mediante el reemplazo o actualización de piezas con desgaste crítico, proporcionándole una vida útil prolongada.

- Reaseguro local de suministro de energía ante contingencias temporales. En algunos proyectos de baja/media potencia el sistema inyectora de forma independiente o bien tiene la capacidad de desconectarse de la red cuando hay bajas en las líneas de transmisión o estaciones transformadoras principales (por nieve, tormentas, etc.) De esta manera, se puede asegurar el suministro a instalaciones esenciales.

A su vez, cabe agregar las ventajas propias que caracterizan a la generación hidroeléctrica, las cuales son comunes a todos los aprovechamientos afines.

- Se presenta como una fuente renovable de energía.
- Generación energética limpia, sin necesidad de consumo de combustibles de ningún tipo.
- Libre de emisión de gases de efecto invernadero.
- Disponibilidad energética con alto grado de previsibilidad.
- Constituyen una interesante oportunidad de negocios dentro del marco del mercado mundial de bonos de carbono establecido por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM) previsto en el Protocolo de Kyoto.

En cuanto a la magnitud del recurso hidroenergético disponible, el mismo puede ser descrito a partir de la siguiente expresión (Hagerman y Polagye, 2006):

$$P_{eléctrica} = A \cdot \rho_{Pot} \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_e$$

Donde,

A : Área del rotor de la turbina, respecto al flujo incidente.

$\rho_{Potencia}$: Densidad de potencia del flujo incidente sobre el rotor.

η_t : Rendimiento de la turbina (Valor medio: 45%). Dicho valor varía en función del diseño del turbogruppo y del TSR (Tip Speed Ratio), parámetro que evalúa la relación entre la velocidad tangencial en el extremo del álabe del rotor y la velocidad del flujo incidente.

$$TSR: \frac{\omega \cdot R}{v}$$

Siendo ω la velocidad de rotación angular del rotor, R el radio del rotor y v la velocidad del flujo.

η_m : Rendimiento mecánico del acoplamiento turbina-generador (Valor Medio: 96%). Incluye las pérdidas derivadas del multiplicador, requerido para compatibilizar la frecuencia mecánica con la del generador.

η_g : Rendimiento del generador eléctrico (Valor Medio: 95%).

η_e : Rendimiento asociado al acondicionamiento de fase y voltaje de la energía generada en función de los requerimientos del sistema interconectado (Valor Medio: 98%).

Vale señalar que la eficiencia de este tipo de turbogrupos alcanza un valor máximo teórico del 59.3%, según indica la teoría de Lanchester-Betz (Betz A., 1966).

Por su parte, existen expresiones para la eficiencia máxima que tienen en cuenta la componente angular de velocidad del rotor. El rendimiento obtenido a partir de estas deducciones resulta menor al límite propuesto por Betz, y se acerca asintóticamente a medida que aumenta el TSR (H. Glauert, 1935).

Desarrollos posteriores introducen modelos que consideran una distribución de presión no uniforme y flujo curvilíneo a través del plano del rotor. La máxima eficiencia obtenida según esta teoría es de 30,1% (Gorban, Gorlov y Silantyev, 2001).

Las eficiencias óptimas calculadas mediante modelos CFD se encuentran entre los valores de Betz y los modelos posteriores (Hartwanger y Horvat, 2008), aunque vale destacar que los diseños actuales permiten obtener rendimientos superiores a dichos límites a través del uso de ductos (Shahsavari, 2015).

De esta manera podemos decir que existe una eficiencia media de transformación del orden del 40%. Sin embargo, el rendimiento de la turbina y el conjunto mecánico-generador varían según la densidad de potencia incidente y la direccionalidad del flujo.

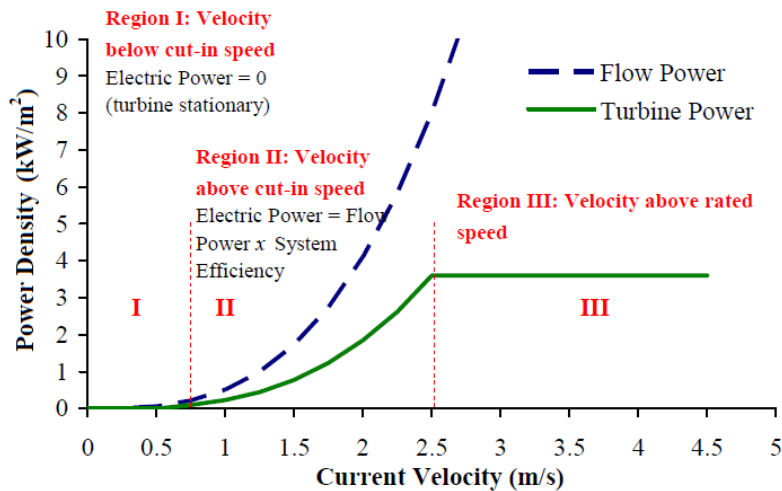


Figura 3.11. Esquema de generación eléctrica en función de la intensidad del flujo incidente (Hagerman y Polagye, 2006).

Pueden identificarse en la figura tres regiones fundamentales.

- Región I: la velocidad incidente se encuentra por debajo del valor de arranque. Es decir, no se dispone de energía suficiente para comenzar a movilizar el rotor. La potencia eléctrica generada es nula.
- Región II: la velocidad del flujo se encuentra por encima del valor de arranque y por debajo del valor de diseño. La potencia eléctrica generada varía en función de la intensidad de la corriente y los rendimientos asociados a la misma.
- Región III: La velocidad incidente supera el valor nominal. La potencia generada se mantiene constante e igual a la potencia de diseño de la turbina. Vale señalar que la velocidad o potencia nominal del equipo es determinada a través de consideraciones técnico-económicas.

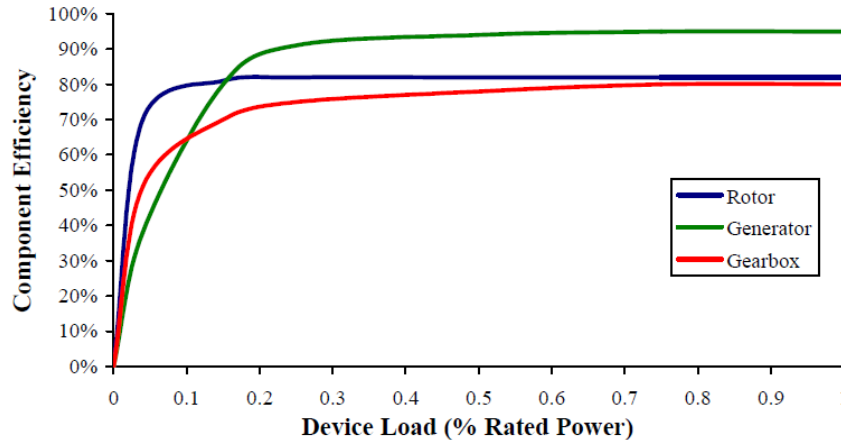


Figura 3.12. Variación del rendimiento de distintos componentes en función de la intensidad del flujo incidente (Hagerman y Polagye, 2006).

Vale señalar que los rendimientos mencionados varían según la direccionalidad del flujo, dadas las características que presentan los componentes de la turbina y sus condiciones de instalación. De este modo, la asimetría en la eficiencia de generación eléctrica debe ser tenida en cuenta al momento de proyectar el esquema de producción y posterior inserción dentro del sistema de consumo.

El análisis de la energía disponible de un flujo de agua se muestra a continuación, partiendo con la forma básica de la energía cinética, según la ecuación:

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Donde m es la masa y v es la velocidad de la corriente.

De esta manera, la densidad de potencia para un flujo puede expresarse a través de la siguiente expresión:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3$$

Donde A es el área de flujo interceptada por la turbina, ρ es la densidad del agua y P es la potencia del flujo.

Dado que la densidad de potencia es proporcional a la velocidad de la corriente al cubo, resulta de carácter fundamental conocer y predecir tal variable de la manera más fiel posible, tanto espacial como temporalmente. El estudio en detalle de la hidrodinámica del estuario a través de la modelación numérica, se manifiesta como un proceso esencial para lograr dicho análisis.

Debido a que el agua es alrededor de 832 veces más densa que el aire, existe un gran contraste entre la densidad de potencia del recurso eólico y la originada por las corrientes de marea para una misma velocidad de flujo, lo cual resalta el enorme potencial asociado a este tipo de aprovechamientos.

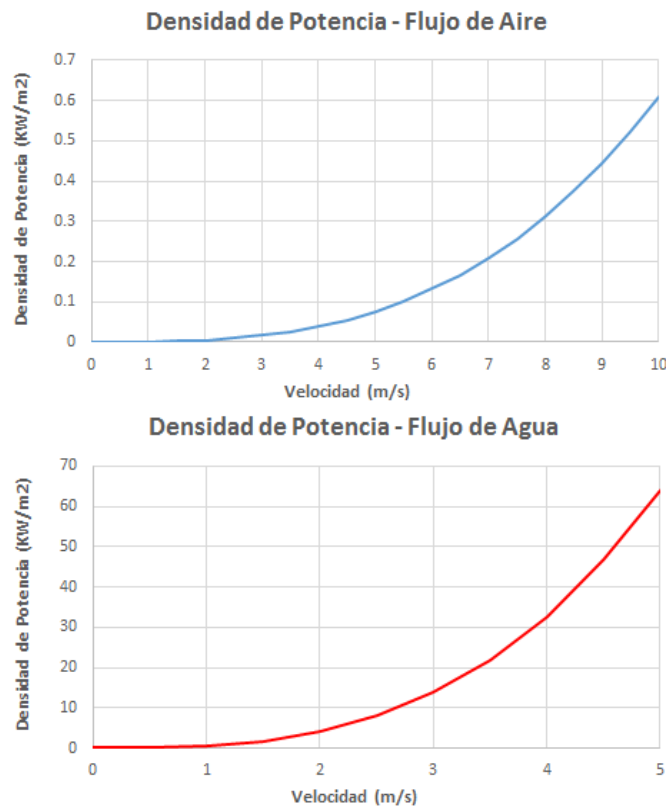


Figura 3.13. Comparación entre densidades de potencia para flujos de aire y agua

3.5. Corrientes y energía disponible en el estuario de Río Gallegos

A partir de la calibración y validación del modelo hidrodinámico, se realizó una simulación de 1 año de duración a fin de determinar las características de las corrientes de marea. Los forzantes principales fueron las componentes armónicas de la marea en el borde oceánico y un caudal medio de descarga del río Gallegos en el estuario. Como resultado se elaboraron una serie de mapas que se indican a continuación, y los cuales se encuentran en el Anexo III:

- Mapa Batimétrico
- Mapas de Velocidad Instantánea
- Mapas de Densidad de Potencia Instantánea
- Mapas de Densidad de Potencia con Garantías
- Mapas de Profundidad útil
- Mapas de Potencia por metro de ancho
- Mapas de diferencia de velocidad con y sin obra

Estos mapas fueron elaborados a partir de las herramientas que brinda el modelo utilizado, en conjunto con Sistemas de Información Geográfica. El modelo Delft3D almacena los resultados en dos tipos de archivos, los *trih.dat* y los *trim.dat*. El archivo *trih* almacena los resultados de la modelación en los puntos de control predefinidos por el usuario, mientras que el archivo *trim* hace lo mismo, pero lo hace para todos los puntos de la malla. Los resultados almacenados en el archivo *trim* se pueden extraer en mapas que poseen para cada celda numérica, un valor del parámetro hidráulico que se esté analizando. El módulo QuickPlot elaborará un mapa por cada intervalo, el cual a su vez puede ser exportado en distintos formatos (entre ellos un *shapefile*).

A partir del procesamiento de los resultados, se obtuvieron imágenes ráster donde cada pixel posee el valor de la velocidad para cada intervalo de tiempo. A partir del tratamiento de las imágenes ráster se obtuvieron distintos mapas que caracterizan al estuario y que se presenta su descripción en las secciones siguientes.

3.5.1. Velocidad Instantánea

Con el procesamiento indicado anteriormente, se obtuvieron imágenes ráster donde cada pixel posee el valor de la velocidad para cada intervalo de tiempo. Para una onda de marea con una amplitud de 8,50 m, se elaboraron mapas de velocidad en el interior del estuario, para condiciones de flujo, reflujo, pleamar y bajamar. Estos mapas fueron superpuestos con vectores que indican la direccionalidad de las corrientes y con una imagen de Google Earth (mapas 2 a 5, Anexo III).

A partir de dichos mapas se puede ver que las mayores velocidades se presentan en flujos y reflujos, mientras que durante pleamares y bajamares las mismas disminuyen considerablemente, apareciendo recirculaciones dentro del estuario. En el flujo, las líneas de corriente tienden a concentrarse en los canales de acceso, presentándose velocidades de hasta 3,9 m/s durante las mareas de sicigia. En el reflujo, las velocidades se reparten más uniformemente en el estuario, con una concentración parcial en el canal sur, alcanzando velocidades máximas de 3,4 m/s.

Dentro del estuario, las velocidades disminuyen, alcanzando valores máximos de 2,70 m/s. Las mismas se concentran en dos corredores principales (tanto para flujo como para reflujo), mientras que cerca de la costa y en los alrededores de la Isla Deseada las velocidades son prácticamente nulas.

3.5.2. Densidad de Potencia Instantánea

Estos mapas indican la densidad de potencia que posee cada lugar del estuario en un determinado instante. Los mismos pueden ser elaborados a partir de mapas de velocidades instantáneas aplicando la ecuación de densidad de potencia:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [kW/m}^2\text{]}.$$

Se elaboraron seis mapas (mapas 6 a 11, Anexo III), para tres amplitudes de marea (cuadratura, media y sicigia) y para flujo y reflujo. Los instantes seleccionados dentro de la onda de marea fueron los que poseían velocidad promedio máxima en la boca del estuario, tal como se muestra en las siguientes figuras.

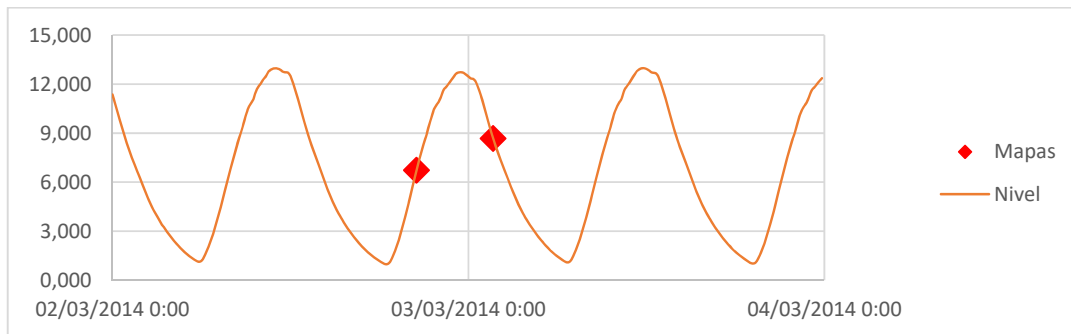


Figura 3.14: Niveles del mar para una amplitud de marea de 12,00m. Instante seleccionado para la elaboración del mapa

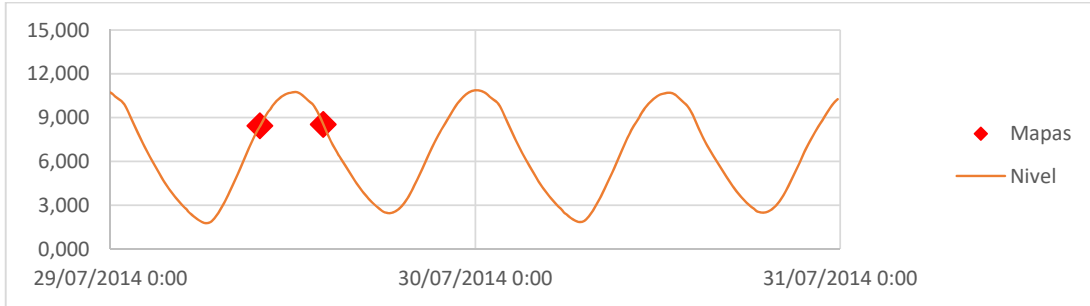


Figura 3.15: Niveles del mar para una amplitud de marea de 8,50m. Instante seleccionado para la elaboración del mapa

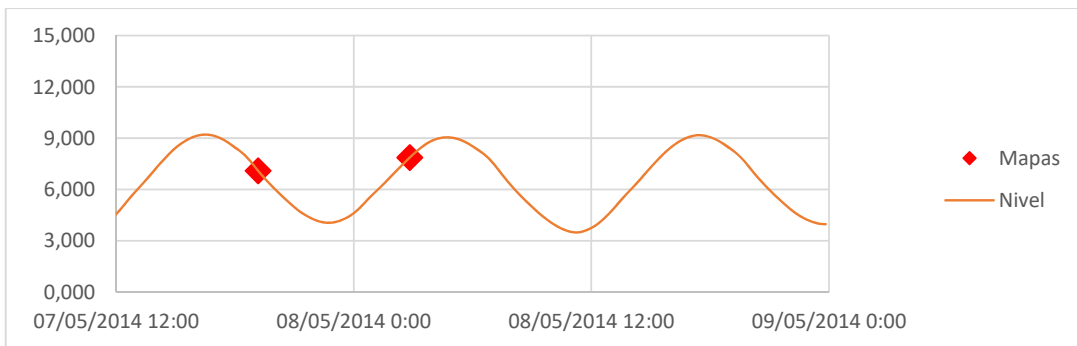


Figura 3.16: Niveles del mar para una amplitud de marea de 5,05m. Instante seleccionado para la elaboración del mapa

3.5.3. Densidad de Potencia con garantías

Los mapas de densidad de potencia instantánea dan una idea del potencial de las distintas zonas del estuario, pero no permiten hacer un análisis de la verdadera potencialidad del mismo. Esto se debe a que estos mapas son representaciones de la densidad de potencia en instantes arbitrariamente definidos. Esto implica que a partir de ellos no se puede saber qué porcentaje del tiempo se mantiene determinada potencia, o cuáles son los picos de densidad de potencia máximos y mínimos. Por este motivo es necesario realizar un análisis estadístico de las velocidades (y por ende de las densidades de potencia) para determinar la verdadera potencialidad del estuario.

Para hacer este análisis se estudió una onda de marea media (28/07/2014 20:10 – 29/07/2014 08:50), extrayendo valores de velocidad en cada celda a intervalos de 10 minutos (76 datos por celda). A los 76 datos de cada celda se le realizó un análisis estadístico, extrayendo los valores máximos, con 75% de garantía, 50% de garantía y 25% de garantía. Estos valores fueron volcados en un mapa, elaborando así mapas de densidad de potencia para determinadas garantías (mapas 12 a 15, Anexo III).

Un análisis estadístico más estricto requeriría que la longitud de tiempo analizada sea mucho mayor (aproximadamente 1 año), pero esto exigiría trabajar con más de 50 mil

mapas, y más de 5 mil millones de datos (Casi 100,000 valores por mapa). Para validar la metodología, se compararon 53 puntos del estuario, en los cuales se analizaron estadísticamente velocidades para dos períodos de tiempo: una onda de marea (12,42hs) y un año. Luego se analizó la correlación entre los resultados. Los puntos analizados se pueden ver en la Figura 3.17. Para estos 53 puntos, se calculó la velocidad media, y las velocidades con 25%, 50% y 75% de garantía.



Figura 3.17: Puntos analizados mediante simulación de 1 año de duración

La comparación de los resultados se puede ver en la Figura 3.18. Se observa que los coeficientes de correlación son próximos a 1. En general, el análisis para la onda de marea sobreestima los valores de velocidad. A pesar de esto, la dispersión respecto a la recta a 45° es suficientemente baja como para concluir que los mapas de densidad de potencia para las distintas garantías, representan de manera satisfactoria la distribución de ésta en el estuario. Según este análisis los valores estarían levemente sobreestimados (aunque todos en la misma proporción), por lo que los mapas serían, de todos modos, útiles para determinar lugares con mayor densidad de potencia.

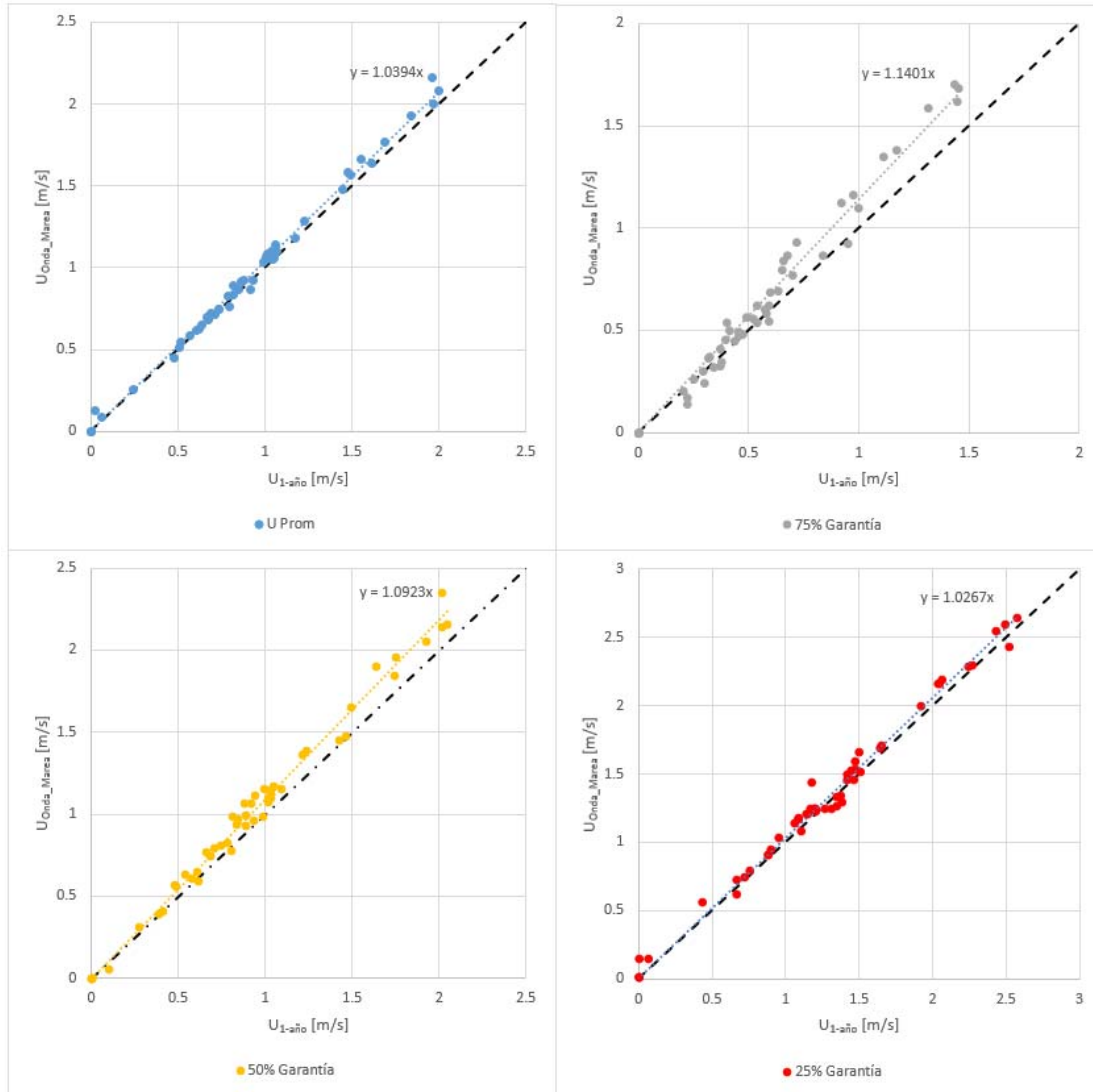


Figura 3.18: Comparación de resultados para una onda de marea simplificada y los valores de velocidad para un año de simulación.

A partir del análisis de estos mapas se puede ver que la zona que presenta las mejores condiciones en cuanto a velocidades, es el canal sur, con densidades de potencia del orden de los $7,5 \text{ kW/m}^2$ con un 50% de garantía y $3,50 \text{ kW/m}^2$ con 75% de garantía. Esto implicaría que una turbina con 10 m de diámetro podría generar aproximadamente 130 kW de potencia con una garantía del 75% (asumiendo un rendimiento global del 50%). En segundo lugar de importancia, se encuentra una zona exterior al canal norte y algunos puntos aislados en la zona media-interior del estuario.

3.5.4. Potencia por metro de ancho

La densidad de potencia no es el único parámetro del estuario que debe ser tenido en cuenta al momento de elegir un sitio para el aprovechamiento. La densidad de potencia indica la potencia extraíble por m² del rotor de la turbina, por lo que a mayor área de turbina, mayor potencia extraíble. A su vez, el diámetro máximo de la turbina depende de la profundidad útil del estuario en la zona de aprovechamiento. Por este motivo, la profundidad útil es otro factor de suma importancia que debe ser considerado al elegir una zona a explotar.

En este sentido, existe conceptualmente un tirante máximo aprovechable para cada punto del estuario, el cual se encuentra definido por la siguiente expresión (Hagerman y Polagye, 2006):

$$h_{disponible} = NBM - Nivel_{lecho} - h_{bbl} - h_{sup}$$

Donde,

NBM: Cota del Nivel de bajamar mínima, respecto al cero local.

Nivel_{lecho}: Cota de fondo del lecho, respecto al cero local.

h_{sup}: reducción superior por seguridad y clima de olas

h_{bbl}: Altura de la capa de fondo. Estimada como 1/10 del tirante disponible durante la bajamar media inferior. Es decir:

$$h_{bbl} = \frac{1}{10} \cdot (BMI - Nivel_{lecho})$$

BMI: Nivel de bajamar media inferior, respecto al cero local.

Es decir, la profundidad útil es el tirante de agua para un nivel correspondiente al promedio de las bajamares, menos una reducción en la parte superior e inferior. La reducción superior dependerá de los requerimientos para la navegación. En zonas no navegables, se podría reducir entre 5,00 m (para el paso de pequeños barcos) y 1,00 m (para considerar alteraciones en las velocidades por viento u oleaje). En la zona inferior, la turbina debe estar por encima de la capa límite, por lo que la reducción será un 10% de la profundidad para un nivel igual al promedio de las bajamares. En el mapa N° 16 del Anexo III se presentan las profundidades aprovechables en el estuario de Río Gallegos.

Si multiplicamos los valores de densidad de potencia en cada punto del estuario por los de profundidad útil, obtenemos valores de potencia por metro de ancho. Los mapas de potencia por metro de ancho indican la potencia extraíble para cada punto del estuario, ofreciendo un panorama más completo de la potencialidad del mismo.

En este estudio se realizaron mapas de potencia por metro de ancho para garantías del 1% (Potencia máxima), 25%, 50% y 75%. Este análisis se hizo para reducciones superiores de 1m y 5m (mapas 17 a 23).

En los mapas se puede ver que la mayoría del estuario posee profundidades aprovechables menores a 2 m. Esto significa que a pesar de que las densidades de potencia sean altas, la capacidad de explotación puede ser relativamente baja para equipos de generación habituales. Existen zonas relativamente estrechas en el interior con profundidades del orden de los 15 m, y recién en la boca norte se presentan profundidades mayores a 25 m

3.6. Potencial energético extraíble del estuario

Dadas ciertas limitaciones de carácter ambiental, el flujo de energía asociado a las corrientes de marea no puede ser aprovechado en su totalidad. Por su parte, existen diversos factores geomorfológicos, sedimentológicos e hidrodinámicos, los cuales generan algunas restricciones sobre el aprovechamiento total del recurso disponible.

Si bien la materia presenta un desarrollo reciente, los antecedentes disponibles indican límites de extracción en el rango de 10% - 20% sobre el flujo anual de energía (Bryden y Couch, 2004 y 2006). Esta restricción se fundamenta en evitar variaciones significativas sobre la hidrodinámica del estuario, lo cual podría afectar el transporte de sedimentos, nutrientes, oxígeno y, consecuentemente, la flora y fauna marina local. De esta manera, resulta necesario destacar la necesidad de promover estudios específicos que involucren la interacción de estas variables a través de modelación numérica, ensayos sobre modelos físicos y mediciones de campo.

A fin de estimar la energía extraíble en el estuario de Río Gallegos, se realizaron cálculos del flujo anual de energía. Para ello, se aplicó en primer término la metodología sugerida por el Electric Power Research Institute (EPRI) en la publicación de Hagerman y Polagye (2006). El procedimiento consiste en estimar la densidad media anual de potencia sobre la embocadura del estuario a través de registros disponibles de velocidad. Una vez conocida la sección transversal de referencia, es posible aproximar la potencia media anual incidente sobre el estuario, tanto para los procesos de flujo como reflujos. El método considera una sección media sobre la embocadura.

Si bien esta metodología permite brindar un orden de magnitud estimativo, vale destacar que requiere poca información para su implementación, permitiendo comparar distintos sitios potenciales sin necesidad de desarrollar estudios específicos que demanden mayor tiempo y recursos.

Dada la disponibilidad de un modelo numérico validado a través de mediciones, es posible contar con un panorama completo acerca de la hidrodinámica del estuario y brindar mayores precisiones sobre el cálculo del flujo anual de energía. De esta manera, el procedimiento efectuado tiene en cuenta la direccionalidad del flujo, la distribución no uniforme de densidades de potencia a lo largo de la embocadura y la definición de parámetros medios obtenidos a partir de un año completo de datos.

Para ello se utilizó una transecta de referencia con una orientación Norte-Sur en la boca del estuario, sobre la cual se adoptaron 20 puntos de salida para el análisis hidrodinámico (Figura 3.19). A modo de ejemplo, se muestran a continuación los resultados obtenidos a partir del procesamiento de datos de los puntos A7 y A18 para un año completo de modelación.



Figura 3.19. Transecta implementada para el análisis del flujo anual de energía. Fuente imagen de fondo: Google Earth.

Cabe destacar que el análisis paramétrico no tiene en cuenta valores de estoa, entendiendo por este término aquellos periodos donde se genera un aquietamiento de las aguas y los escurrimientos no presentan una direccionalidad manifiesta. En función de un análisis de sensibilidad de dispersión direccional en distintos puntos del estuario, se adopta un valor de referencia de 0.5 m/s.

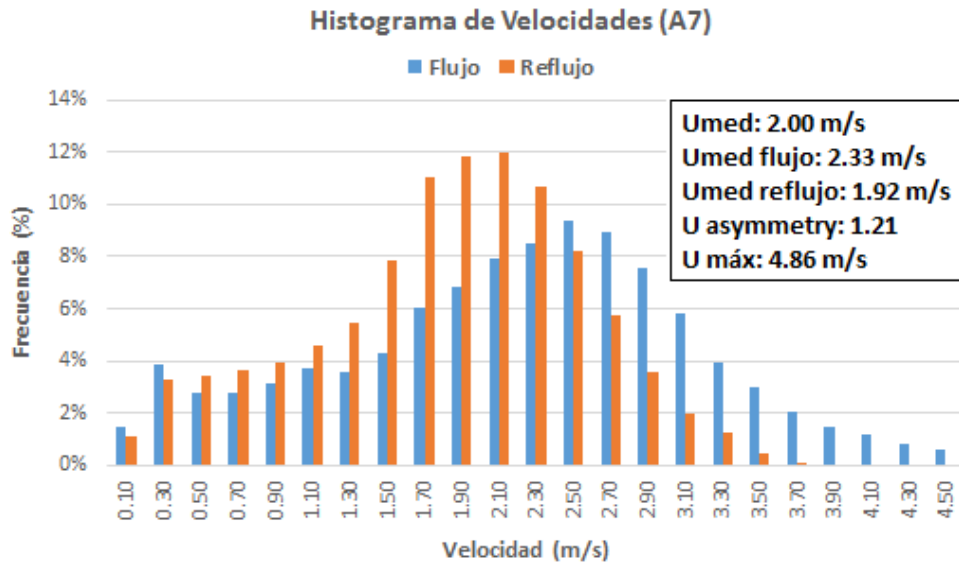


Figura 3.20. Histograma de velocidades para procesos de flujo y reflujo, punto A7.

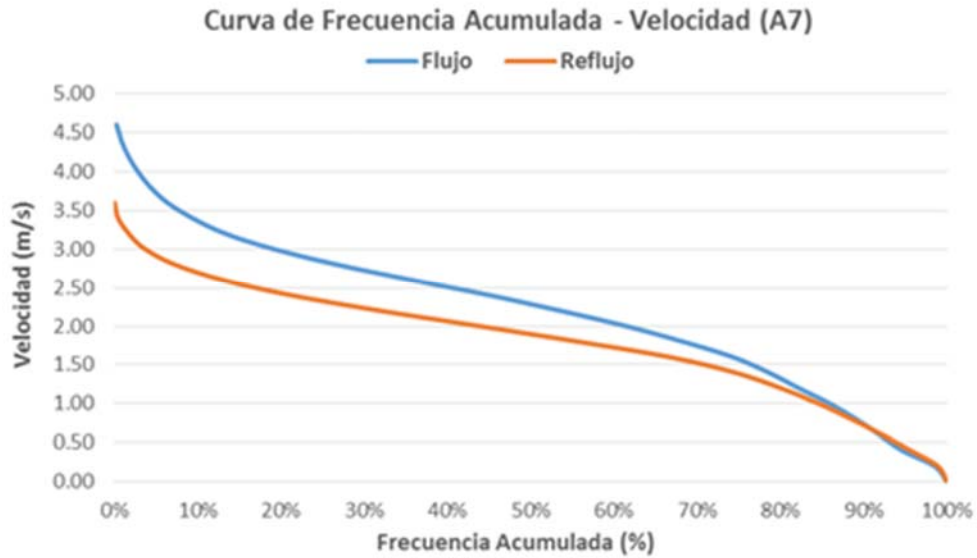


Figura 3.21. Curva de frecuencia acumulada de velocidades para procesos de flujo y reflujo, punto A7.

Distribución Direccional Acumulada (A7)

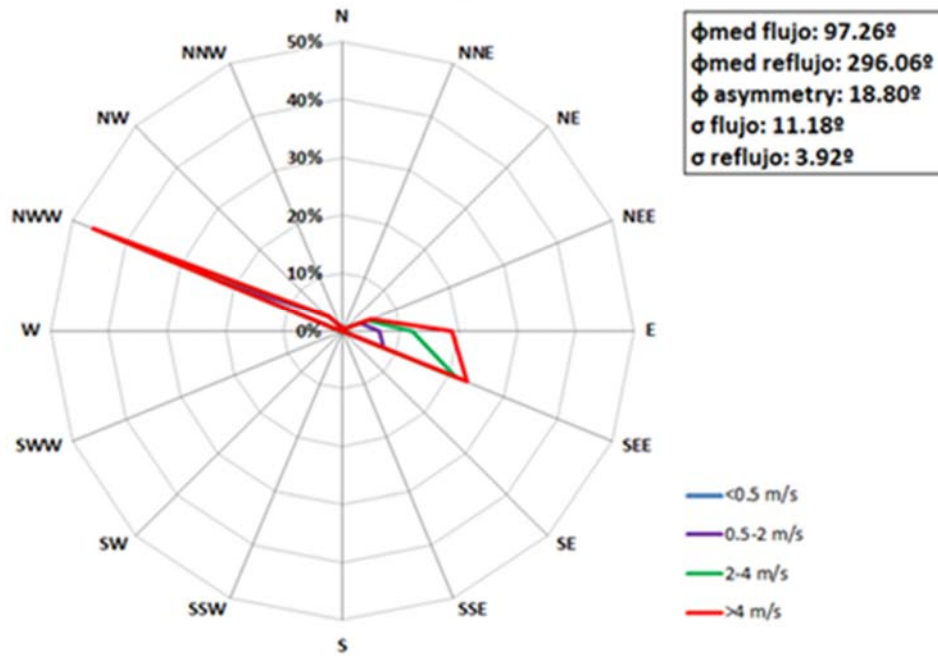


Figura 3.22. Distribución direccional acumulada para procesos de flujo y reflujos, punto A7.

Histograma de Densidades de Potencia (A7)

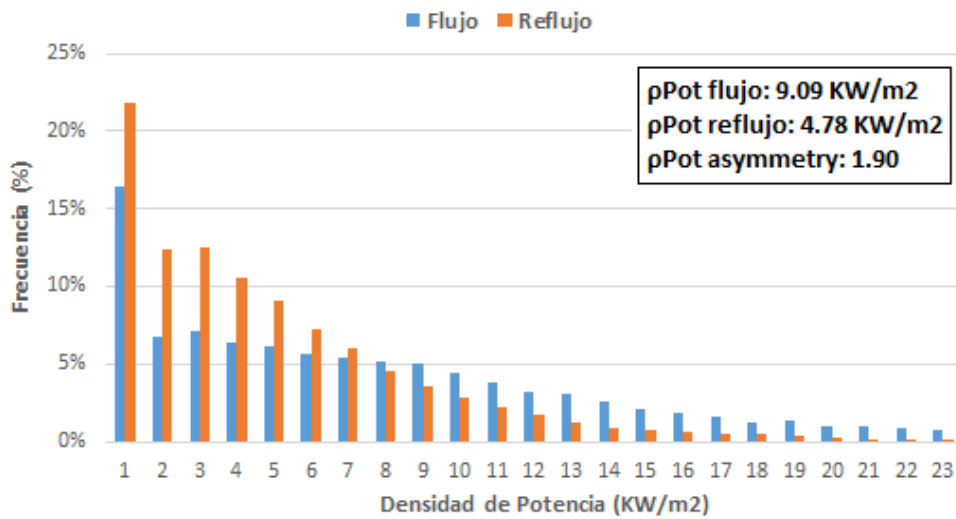


Figura 3.23. Histograma de densidades de potencia para procesos de flujo y reflujos, punto A7.

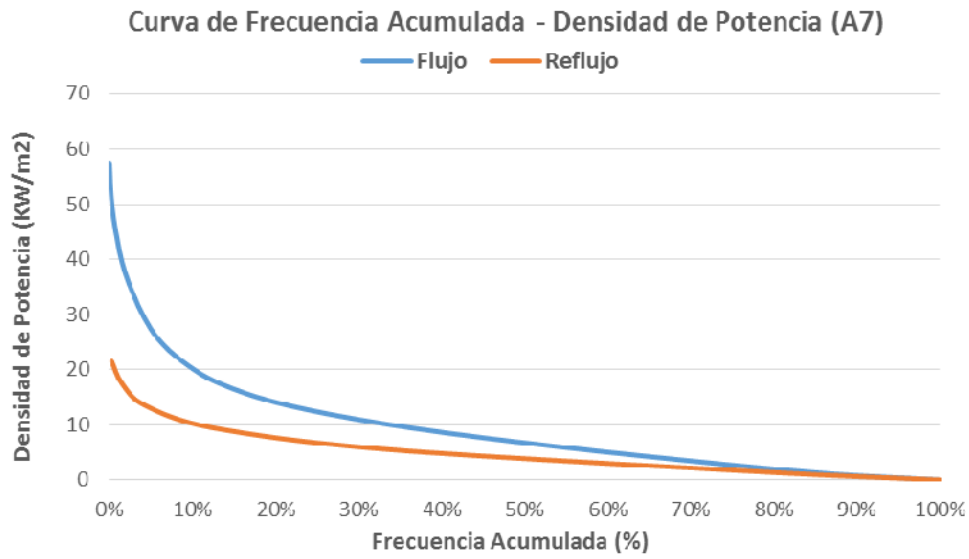


Figura 3.24. Curva de frecuencia acumulada de densidad de potencia para procesos de flujo y reflujo, punto A7.

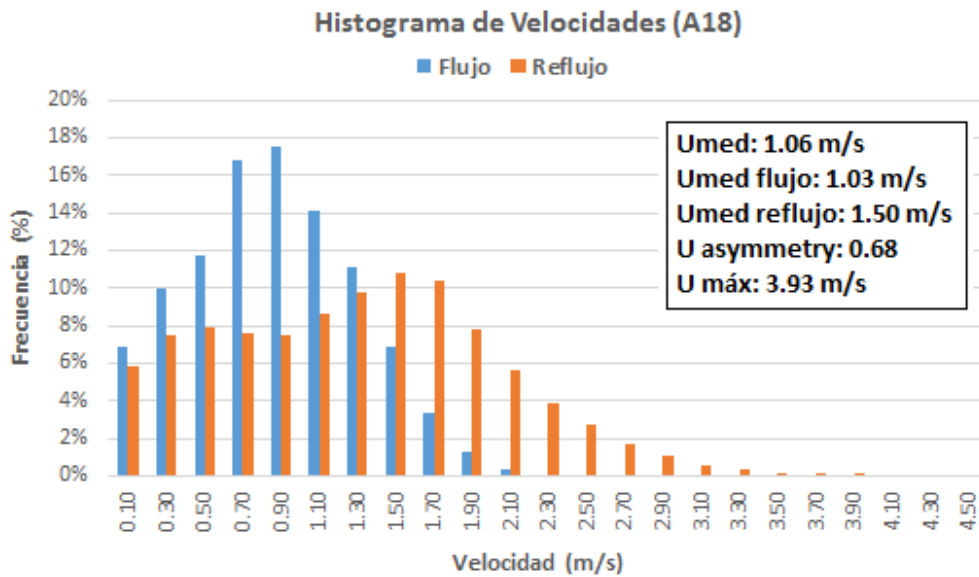


Figura 3.25. Histograma de velocidades para procesos de flujo y reflujo, punto A18.

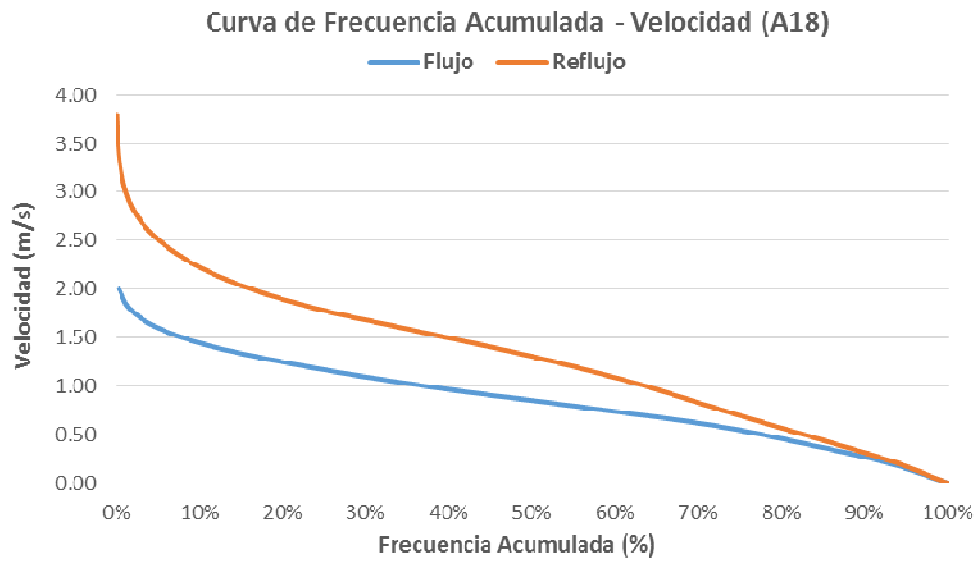


Figura 3.26. Curva de frecuencia acumulada de velocidades para procesos de flujo y reflujo, punto A18.

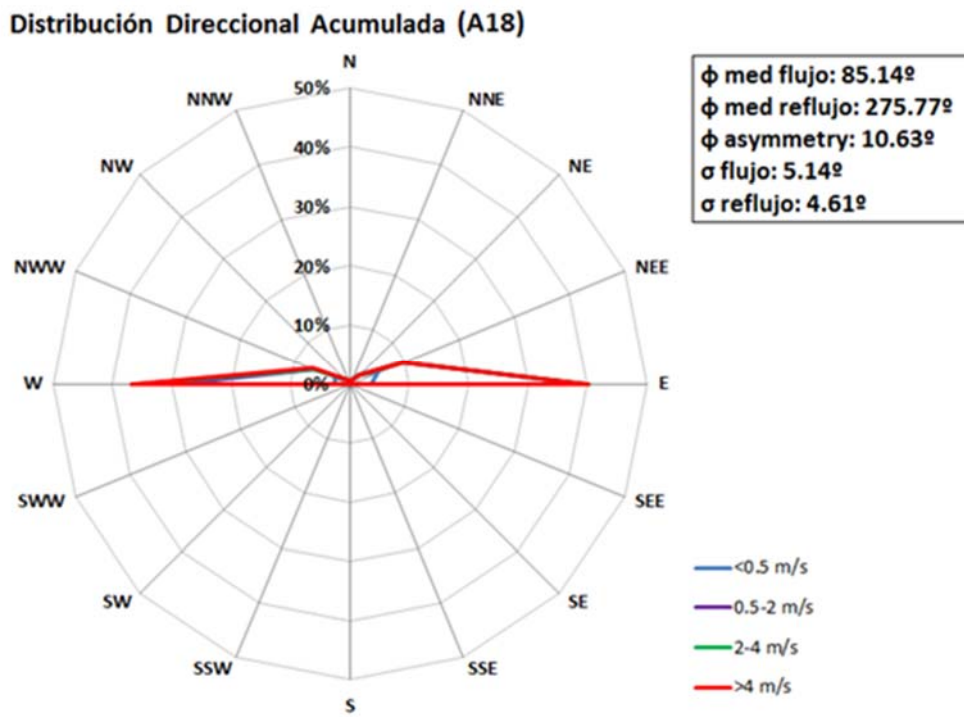


Figura 3.27. Distribución direccional acumulada para procesos de flujo y reflujo, punto A18.

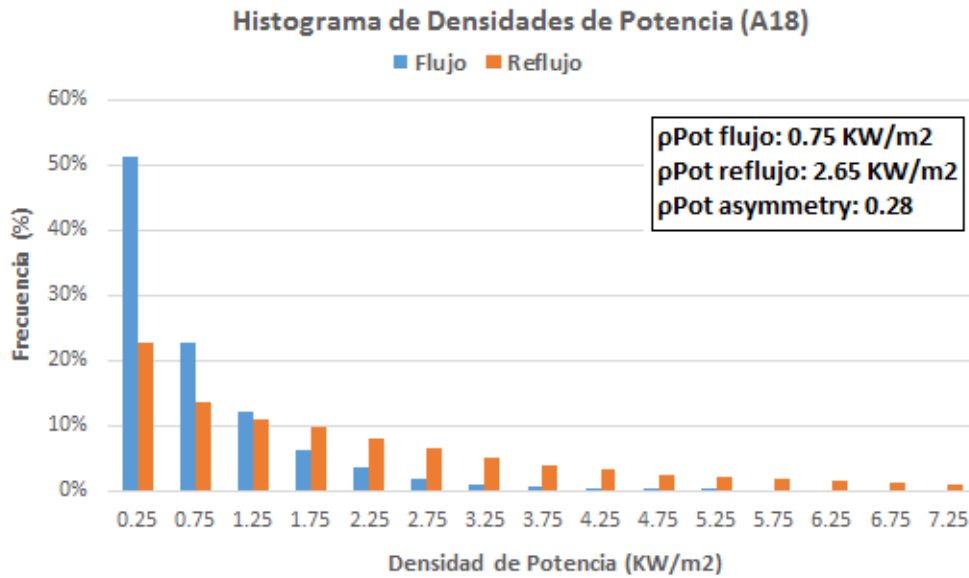


Figura 3.28. Histograma de densidades de potencia para procesos de flujo y reflujo, punto A18.

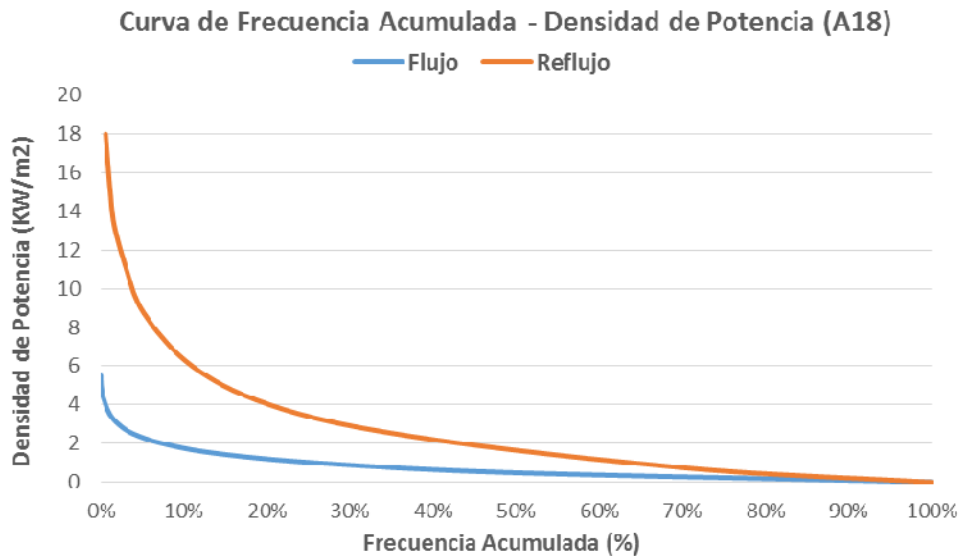


Figura 3.29. Curva de frecuencia acumulada de densidad de potencia para procesos de flujo y reflujo, punto A18.

Cabe destacar el contraste existente entre ambos puntos de análisis, lo cual exhibe la variabilidad hidrodinámica a lo largo de la embocadura. Las características geomorfológicas de los canales subfluviales, tanto en orientación como en ancho y profundidad, dan lugar a corredores preferenciales en términos de escurrimiento. Por otro lado, las asimetrías observadas en términos de velocidad y dirección son factores a considerar al momento de proyectar el parque hidrocínético.

Se muestra a continuación la distribución de densidad de potencia media anual a lo largo de la embocadura, tanto para procesos de flujo como reflujo. Vale señalar que las

densidades representadas no tienen en cuenta la dirección de incidencia respecto a la embocadura.

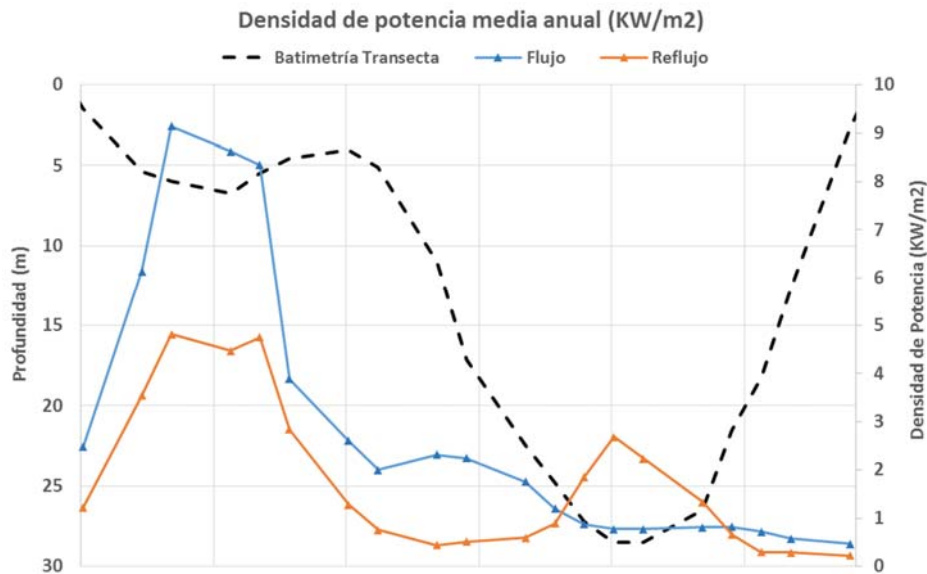


Figura 3.30. Distribución de densidad de potencia media anual a lo largo de la embocadura, para flujo y reflujo.

Puede observarse claramente la presencia de dos corredores de potencia bien diferenciados, coincidentes con los canales navegables sur y norte. El contraste entre las densidades de potencia observadas se encuentra relacionado con el ancho del corredor y su orientación respecto al avance de la onda de marea. Por este motivo, el canal sur presenta densidades de potencia mayores a lo largo de su traza. Por su parte, vale señalar la diferencia de distribución existente entre las corrientes de flujo y reflujo, lo cual demuestra que existen canales preferenciales distintos para cada proceso.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del procesamiento de 20 puntos a lo largo de la embocadura, resulta posible estimar la potencia media anual generada para los procesos de flujo y reflujo. El procedimiento consiste en la integración espacial discreta de las densidades medias anuales de potencia obtenidas a través del procesamiento de datos. Por su parte, la direccionalidad del flujo es tenida en cuenta considerando únicamente las componentes perpendiculares a la transecta de referencia a partir de valores medios anuales de dirección, tanto para procesos de flujo y reflujo.

Se muestra a continuación una tabla resumen con el proceso de cálculo y los resultados obtenidos.

Cálculo de Potencia Media Anual										Componente E-0			
Descripción	Y m	Prof m	$\rho_{Potflood}$ KW/m ²	ϕ_{flood} g	ϕ_{ebb} g	ρ_{Potebb} KW/m ²	ϕ_{flood} g	$\rho_{Potflood}$ KW/m ²	ρ_{Potebb} KW/m ²	$\Delta y-1$ m	$\Delta y+1$ m	Pot flujo MW	Pot reflujo MW
A5	4282337	1.48	2.46	96.83	295.49	1.20	96.83	2.44	1.08	111.22	222.43	0.60	0.27
A6	4282560	5.36	6.09	92.32	293.24	3.51	92.32	6.09	3.23	222.43	111.22	5.44	2.88
A7	4282671	5.98	9.09	97.26	296.06	4.78	97.26	9.01	4.29	111.22	222.42	8.99	4.28
A8	4282893	6.71	8.58	112.13	303.19	4.43	112.13	7.94	3.71	222.42	111.22	8.89	4.15
A9	4283004	5.50	8.29	121.29	306.31	4.71	121.29	7.09	3.80	111.22	111.22	4.34	2.32
A10	4283116	4.56	3.85	124.98	307.74	2.80	124.98	3.15	2.22	111.22	222.41	2.40	1.69
A11	4283338	4.03	2.57	127.87	311.23	1.25	127.87	2.03	0.94	222.41	111.22	1.37	0.63
A12	4283449	5.09	1.97	98.28	299.79	0.73	98.28	1.95	0.64	111.22	222.43	1.65	0.54
A13	4283672	11.02	2.29	79.17	274.25	0.41	79.17	2.25	0.41	222.43	111.22	4.13	0.76
A14	4283783	17.14	2.21	77.78	270.76	0.49	77.78	2.16	0.49	111.22	222.43	6.17	1.39
A15	4284005	22.50	1.73	77.79	270.40	0.57	77.79	1.69	0.57	222.43	111.22	6.35	2.13
A16	4284117	24.84	1.17	79.35	271.26	0.86	79.35	1.15	0.86	111.22	111.20	3.19	2.38
A17	4284228	27.20	0.85	82.66	274.26	1.82	82.66	0.84	1.82	111.20	111.22	2.54	5.50
A18	4284339	28.52	0.75	85.14	275.77	2.65	85.14	0.75	2.64	111.22	111.22	2.38	8.36
A19	4284450	28.52	0.75	87.31	276.95	2.20	87.31	0.75	2.18	111.22	222.41	3.57	10.38
A20	4284673	26.48	0.79	89.55	278.26	1.31	89.55	0.79	1.29	222.41	111.21	3.48	5.71
A21	4284784	21.52	0.79	91.78	280.24	0.63	91.78	0.79	0.62	111.21	111.21	1.90	1.49
A22	4284895	18.24	0.69	94.23	282.37	0.27	94.23	0.69	0.27	111.21	111.20	1.40	0.54
A23	4285006	12.64	0.55	98.55	282.93	0.27	98.55	0.55	0.26	111.20	222.43	1.16	0.55
A24	4285229	2.66	0.45	100.68	280.89	0.20	100.68	0.44	0.20	222.43	111.21	0.19	0.09
										Potencia Flujo (MW)			
										Potencia Reflujo (MW)			
										Asymmetry			
										70.14			
										56.06			
										1.25			

Tabla 3.1. Resultados del procesamiento de datos y cálculo de la potencia media anual para flujo y reflujo.

La potencia media anual generada por los flujos se estima en 70 MW, mientras que los reflujos presentan un valor de 56 MW, dando como resultado una asimetría del 25%. Vale señalar que dicha diferencia se debe al criterio implementado en términos direccionales, dado que se considera únicamente la componente E-O del flujo.

La segunda metodología implementada respeta los lineamientos anteriores, incorporando la integración de densidades de potencia y tirante para cada paso de tiempo en reemplazo de considerar una sección media sobre la embocadura. De esta manera se obtiene una mejor representación del flujo real de energía que pasa por el estuario.

Se muestra a continuación una tabla resumen con el proceso de cálculo y los resultados obtenidos.

Cálculo de Potencia Media Anual					Componente E-O			
Descripción	Y m	Prof m	$\Delta y-1$ m	$\Delta y+1$ m	Pot flujo KW/m	Pot reflujos KW/m	Pot flujo MW	Pot reflujos MW
A5	4282337	1.48	111.22	222.43	9.60	4.97	1.60	0.83
A6	4282560	5.36	222.43	111.22	27.05	16.87	4.51	2.81
A7	4282671	5.98	111.22	222.42	38.56	26.69	6.43	4.45
A8	4282893	6.71	222.42	111.22	43.12	29.68	7.19	4.95
A9	4283004	5.50	111.22	111.22	31.12	24.37	3.46	2.71
A10	4283116	4.56	111.22	222.41	14.44	11.79	2.41	1.97
A11	4283338	4.03	222.41	111.22	9.90	5.47	1.65	0.91
A12	4283449	5.09	111.22	222.43	14.46	6.21	2.41	1.04
A13	4283672	11.02	222.43	111.22	27.40	5.81	4.57	0.97
A14	4283783	17.14	111.22	222.43	33.48	8.86	5.59	1.48
A15	4284005	22.50	222.43	111.22	32.67	12.46	5.45	2.08
A16	4284117	24.84	111.22	111.20	26.66	21.44	2.96	2.38
A17	4284228	27.20	111.20	111.22	22.39	50.24	2.49	5.59
A18	4284339	28.52	111.22	111.22	21.53	77.75	2.39	8.65
A19	4284450	28.52	111.22	222.41	21.80	65.09	3.64	10.86
A20	4284673	26.48	222.41	111.21	22.28	37.76	3.72	6.30
A21	4284784	21.52	111.21	111.21	20.79	17.11	2.31	1.90
A22	4284895	18.24	111.21	111.20	16.01	6.18	1.78	0.69
A23	4285006	12.64	111.20	222.43	10.37	3.75	1.73	0.63
A24	4285229	2.66	222.43	111.21	6.10	1.73	1.02	0.29
Potencia Flujo (MW)							67.32	
Potencia Reflujo (MW)							61.48	
Asymmetry							1.09	

Tabla 3.2. Resultados del procesamiento de datos y cálculo de la potencia media anual para flujo y reflujos.

La potencia media anual generada por los flujos se estima en 67 MW, mientras que los reflujos presentan un valor de 61 MW, dando como resultado una asimetría del 9%. Cabe resaltar la concordancia entre ambos métodos, los cuales muestran un valor medio anual de potencia de 63 MW y 64 MW respectivamente.

En función de los resultados obtenidos y considerando el porcentaje de tiempo en el cual se produce la estoa de marea, se obtiene un flujo anual de energía de 466 GWh, teniendo

en cuenta conjuntamente los procesos de flujo y reflujo. Finalmente, aplicando un factor de 15% por limitaciones ambientales se estima un potencial hidrocínético anual extraíble de 70 GWh, como valor nominal de referencia.

Sin embargo, la extracción de dicho recurso hidroenergético será función de la ubicación del sector de explotación, la cantidad de equipos instalados, su velocidad de diseño, y la estrategia energética que se desee implementar con un aprovechamiento de este tipo. Asimismo, cabe recordar que las garantías de velocidad varían considerablemente entre distintas zonas del estuario, por lo cual la hidrodinámica será un factor fundamental al seleccionar el sitio de implantación de los turbogrupos. Por su parte, deberán tenerse en cuenta otras variables tales como la profundidad disponible, factores sedimentológicos, interferencias con vías navegables, incidencia del oleaje y proximidad a tierra.

3.7. Respuesta del sistema con obras

En las turbinas eólicas, la influencia de la extracción de energía cinética es tenida en cuenta estableciendo una distancia mínima para la separación entre turbinas, suponiendo de esta manera que la energía se recupera a cierta distancia detrás de la misma. Las turbinas eólicas funcionan dentro de las capas más bajas de la atmósfera, por lo que la cantidad de movimiento extraída por la turbina es recuperada por los aportes de las capas superiores, en distancias del orden del 10 veces el diámetro del rotor.

A diferencia de las turbinas eólicas, las turbinas hidrocínéticas abarcan una proporción importante de la altura de agua disponible, y es por esto que la energía cinética extraída no es recuperada rápidamente aguas abajo de la turbina. La extracción de energía puede generar modificaciones tanto en las velocidades de las corrientes, como los patrones de erosión y sedimentación, causando grandes cambios en las zonas donde están ubicadas las turbinas. Esto indica que un análisis hidrodinámico sin la presencia de estructuras, resulta insuficiente para determinar la potencialidad de la zona en estudio.

Para la modelación numérica de un sistema de este tipo, generalmente el rotor de la turbina es considerado como un disco que ejerce una fuerza retardadora del fluido, conocida como fuerza de arrastre. Esta fuerza depende del área del disco, de la velocidad de escurrimiento a través del mismo, y del coeficiente de arrastre (que representa la cantidad de potencia que es transferida del fluido al rotor). Este coeficiente varía con la velocidad del fluido. Además, siempre que sea posible, es necesario considerar la fuerza ejercida por la estructura que sostiene al rotor.

En modelos bidimensionales, las turbinas hidrocínéticas pueden ser representadas introduciendo un término adicional en las ecuaciones de cantidad de movimiento, los

cuales tienen en cuenta la extracción de cantidad de movimiento generada por la fuerza de arrastre inducida por la turbina. El modelo Delft3D ofrece la posibilidad de introducir elementos que generan una variación en la cantidad de movimiento, conocidos como “*porous plate*”. Antecedentes recientes muestran que para el caso de turbinas hidrocínicas se podrían simular sus efectos mediante esta herramienta en la malla computacional (Bastor et al., 2014; Sagar Mungar, 2014). Mediante el análisis de las ecuaciones que describen el *porous plate* y las turbinas hidrocínicas, es posible establecer una similitud entre los términos que se introducen en la ecuación de cantidad de movimiento para estas dos estructuras.

En Delft3D el término introducido en la ecuación de cantidad de movimiento es el siguiente:

$$M_{\xi} = -c_{loss} \frac{U_{m,n}|U_{m,n}|}{\Delta x}$$

El único coeficiente a definir es el c_{loss} , que puede ser calculado a partir de una similitud con las turbinas hidrocínicas. La fuerza de arrastre para N turbinas será:

$$F = N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2$$

N: Número de turbinas

C_d : Coeficiente de arrastre

A_t : Área de la turbina

La pérdida de cantidad de movimiento por unidad de volumen puede ser calculada dividiendo esta fuerza por la masa de una celda:

$$M_{\xi} = \frac{N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2}{\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot H}$$

Igualando esta ecuación con la del *porous plate*:

$$\frac{N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2}{\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = -c_{loss} \frac{u^2}{\Delta x}$$

$$c_{loss} = \frac{-N \cdot C_d \cdot A_t}{2 \cdot \Delta y \cdot H}$$

De esta manera, se podría estimar el coeficiente c_{loss} a partir de tres parámetros de las turbinas (el número de turbinas, el área ocupada por cada turbina, y el coeficiente de arrastre). No obstante, los parámetros mencionados dependen del tipo de proyecto

elegido, la configuración de los turbogrupos, así como la necesidad de realizar ensayos específicos para determinar el coeficiente de arrastre.

Por otra parte, cabe mencionar que para poder representar una sola turbina, es necesario que la misma tenga el tamaño de la celda donde será representada, por lo que las mismas deberían ser bastante pequeñas (del orden de 20 m x 20 m). Asimismo, la escala de los procesos mostrados en estos modelos es del orden de kilómetros, por lo que este tipo de modelación permitirá evaluar la influencia de la turbina en los campos de velocidades en entornos lejanos a la máquina, pero no en los campos inmediatos a ella.

Debido a que el modelo Delft3D no permite introducir coeficientes de arrastre variables, debe elegirse un único valor representativo para todas las situaciones. Se asume también que la turbina está siempre dirigida en la dirección del flujo, lo cual para algunos diseños de turbinas puede no ser cierto.

Las estructuras de soporte de las turbinas no son modeladas mediante este proceso, por lo que se debería introducir algún parámetro adicional que incluya las pérdidas causadas por estas estructuras.

Esta metodología para la determinación del coeficiente C_{loss} posee un sustento teórico, pero no ha sido validado con mediciones en situaciones reales. Por lo tanto, se han realizado simulaciones con diferentes valores del coeficiente de pérdidas, a fin de analizar los efectos en los campos de corrientes. Dado que el análisis sólo representa un ejercicio sobre el potencial impacto que generarían turbogrupos, se eligió un lugar arbitrario en el interior del estuario.

En el Anexo III se presentan los Mapas Nº 24 a Nº 39, con la representación de variaciones de velocidad para una situación con turbinas, respecto de las simulaciones sin turbinas. En los mapas se han representado diferentes condiciones de marea (flujo, reflujos, pleamar y bajamar), bajo la hipótesis de diferentes coeficientes de pérdidas en un amplio rango de posibilidades (desde $C_{loss} = 0.4$ a $C_{loss} = 10$). Si bien los valores mayores a $C_{loss} = 1$ podrían parecer grandes en base a los antecedentes y estimaciones de pérdidas, debe estudiarse para cada proyecto en particular.

En los mapas indicados puede observarse que el coeficiente más bajo genera una reducción de las velocidades en condiciones de flujo y reflujos, de hasta 0.5 m/s con una extensión del orden de los 2km, tanto hacia aguas abajo como hacia aguas arriba de la línea que representarían un conjunto de turbinas hidrocinéticas. Mientras que para un coeficiente igual a 1, las reducciones de velocidad pueden llegar hasta 1 m/s en algunos sectores.

Cabe mencionar que los cambios de patrones de velocidades en estos casos no son significativos en el período de pleamar o bajamar, en los cuales las corrientes son muy bajas. Por lo tanto, los efectos de reducción de las corrientes sólo se producen durante períodos determinados en marea creciente o bajante durante el ciclo.

Para un coeficiente de pérdidas mucho mayor, por ejemplo $C_{\text{loss}} = 5$, las reducciones pueden ser mucho más significativas, con valores de velocidades de 1.5 a 2 m/s menos. Por el contrario, se observa en la zona no intervenida y próxima a las “turbinas ficticias”, un incremento de las velocidades. Como se verá en el siguiente capítulo, esto modifica los patrones sedimentológicos en gran medida.

CAPITULO IV: Estudio de oleaje

4.1. Modelo Matemático

La gran variedad de modelos de olas existentes pone de manifiesto por un lado, la complejidad de los procesos involucrados en la generación y propagación del oleaje generado por viento, los cuales se acentúan en dificultad en las proximidades de la costa, así como la variedad de diferentes teorías y formulaciones matemáticas que explican los procesos y transformaciones que sufre el oleaje en su viaje desde el área de generación hasta su llegada a las costas.

Este hecho a su vez permite llevar a cabo un análisis de cuál es el modelo más conveniente basado en las necesidades de usuario, pero a la vez dificulta el trabajo de elección, convirtiéndolo en unos de los aspectos más importantes en un estudio de modelaje costero, ya que de ello dependerá la calidad no solo de las simulaciones sino de los resultados y por tanto la validez y precisión del estudio. Son muchos los factores que influyen en la elección, entre los que destacan: el ámbito costero de aplicación, la tipología, calidad y disponibilidad de datos de entrada del modelo, los procesos que se pretenden simular y conocer, el grado de conocimiento y experiencia del usuario, la disponibilidad de modelo (software libre o con licencia, existencia de manuales de usuario).

En el presente estudio se utilizó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) para simular la altura, el período y la dirección de las olas en el área seleccionada. SWAN es un modelo numérico de tercera generación utilizado para obtener estimaciones de los parámetros de olas en aguas someras costeras a partir del viento, la batimetría y campos hidrodinámicos (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999; Delft University of Technology, 2004).

El modelo SWAN permite la simulación de los siguientes procesos:

- Generación de olas por acción del viento
- Propagación a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.
- Disipación por descrestamiento (whitecapping).
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

SWAN es un modelo numérico que permite estimar los parámetros de oleaje en regiones costeras basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$, donde todos los procesos físicos están modelados explícitamente.

La densidad acción de ola se define como $N = E/\sigma$, donde E es la densidad energía (energía cinética más potencial por unidad de superficie), σ la frecuencia relativa y θ la dirección de propagación.

La ecuación de balance de la acción se escribe como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad [1]$$

El primer término a la izquierda expresa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción de ola, el segundo y tercero representan la propagación de la densidad de acción en el espacio con velocidades C_x y C_y . El cuarto describe los cambios de la frecuencia relativa debido a cambios en profundidad o a corrientes. El quinto término es el cambio debido a refracción.

El término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descrito como la suma de varios y diferentes procesos físicos:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad [2]$$

donde

- S_{in} es la energía transferida por el viento,
- S_{ds} es la disipación de energía
- S_{nl} representa la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales.
-

El término de disipación S_{ds} consta a su vez de tres componentes principales:

- Las “crestas blancas” o whitecapping, pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas que ocurren por un exceso de entrada de energía.
- La fricción con el fondo.
- La rompiente inducida por la disminución de la profundidad.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, y son las responsables de redistribuir la energía entre dichas componentes. En aguas profundas la transferencia de la energía se realiza desde el pico espectral, ya sea a las frecuencias más altas o más bajas (obligando al pico espectral a desplazarse en uno u otro sentido), dependiendo ello de si el oleaje está siendo disipado o no por las “crestas blancas” (whitecapping). En

aguas someras la interacción entre diferentes frecuencias transfiere energía de frecuencias bajas a altas, obligando así al pico espectral a disminuir su período.

La ecuación de balance es diferencial de primer orden, donde las cinco variables independientes son tiempo t , las coordenadas espaciales x, y , la frecuencia relativa σ y la dirección de propagación θ . La variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N .

La integración se implementa en un esquema en diferencias finitas, con paso de tiempo Δt (el mismo para los términos de propagación y el término fuente). El espacio geográfico se discretiza mediante una grilla de paso Δx y Δy . El espectro (direccional) se representa con una resolución $\Delta\theta$ en la dirección y una resolución constante $\Delta\sigma/\sigma$ en frecuencia.

La ecuación se resuelve mediante un esquema implícito que es incondicionalmente estable, lo que permite escoger pasos de tiempo prolongados. Puede ser de primer o segundo orden. El modelo está implementado en lenguaje FORTRAN.

4.2. Caracterización general

Durante el proceso de preparación e implementación inicial, se han considerado todas las ecuaciones indicadas anteriormente y se han realizado pruebas de sensibilidad de variables a fin de alcanzar la solución más satisfactoria en la explotación final del modelo.

El modelo permite la implementación en grillas rectangulares y curvilíneas, las cuales a su vez pueden ser aplicadas en dominios computacionales anidados. La técnica de anidado consiste en ejecutar el modelo SWAN, primeramente, en un dominio computacional extenso representado por un retículo de relativamente baja resolución y luego, en un retículo de mayor resolución, correspondiente a una región de interés de menor extensión contenida en el primer dominio. Los resultados obtenidos en el retículo de baja resolución se utilizan como condiciones de borde para el retículo más pequeño. El anidado puede repetirse en escalas decrecientes aumentando la resolución espacial y focalizando cada vez más la zona de interés que se desea estudiar. De esta manera se optimizan los tiempos de ejecución del modelo en función del grado de exactitud que se requiera en el área de interés, sin perder confiabilidad en los resultados obtenidos.

En el presente trabajo se utilizaron 3 grillas uniformes, anidadas (Tabla 4.1). Para su aplicación se seleccionaron coordenadas esféricas ya que son convenientes tanto para escala pequeña como grande y es la más recomendable para anidar.

	Grilla Grande	Grilla Media	Grilla Chica
Lon. vértice SW (°)	-69.197	-69.193	-69.251
Lat. vértice SW (°)	-52.704	-52.002	-51.700
Lon. vértice NE (°)	-67.293	-67.996	-68.649
Lat. vértice NE (°)	-50.994	-51.286	-51.529
Resolución en Lon. (°)	0.014	0.007	0.0014
Resolución en Lat. (°)	0.009	0.004	0.0009
Nro. Columnas	136	171	430
Nro. Filas	190	179	190
Longitud en X (°)	1.904	1.197	0.602
Longitud en Y (°)	1.71	0.716	0.171

Tabla 4.1 Resoluciones y ubicaciones de los dominios computacionales a implementar en el modelo SWAN

Por su parte, el espacio de frecuencias utilizado en el modelo tiene 20 frecuencias, comprendidas entre 0.05 y 1.00 Hz.

Como forzantes del modelo se utilizaron los datos provenientes del modelo global de olas del proyecto IOWAGA, los datos de vientos del modelo global Meteorológico NCEP/NCAR y los datos de vientos medidos en la Estación Meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos, descritos y analizados en los capítulos anteriores.

Se efectuaron simulaciones con condiciones estacionarias y no estacionarias, con combinaciones de olas como condición de borde oceánico y campos de vientos variables en el tiempo y en el dominio computacional.

En la Figura 4.1 se muestran las tres grillas computacionales, y en las Figuras 4.2 a 4.4 se presentan los resultados en las sucesivas áreas mencionadas. En la Figura 4.2 se observa el campo de olas resultante de la aplicación del modelo espectral de olas en el dominio computacional de mayor tamaño. En este dominio se puede observar el oleaje en la zona exterior y su propagación hasta la boca del Estuario de Río Gallegos y el Estrecho de Magallanes. La condición de borde fue impuesta en modo paramétrico a partir de una función espectral tipo JONSWAP con $\Gamma = 3.3$. Asimismo, se consideró el modelo en su versión de tercera generación (GEN 3) con las formulaciones de Komen et al. (1984), se mantuvo habilitada la función “Quadruplets” para las interacciones ola-ola, rotura de olas por efecto de fondo con $\alpha = 1$ (tasa de disipación) y $\Gamma = 0.78$ (máxima relación entre altura de ola y profundidad), Fricción con función tipo JOSWAP y coef. = 0.067, y la función para “TRIADAS” por efectos no lineales de interacciones ola-ola en aguas poco profundas.

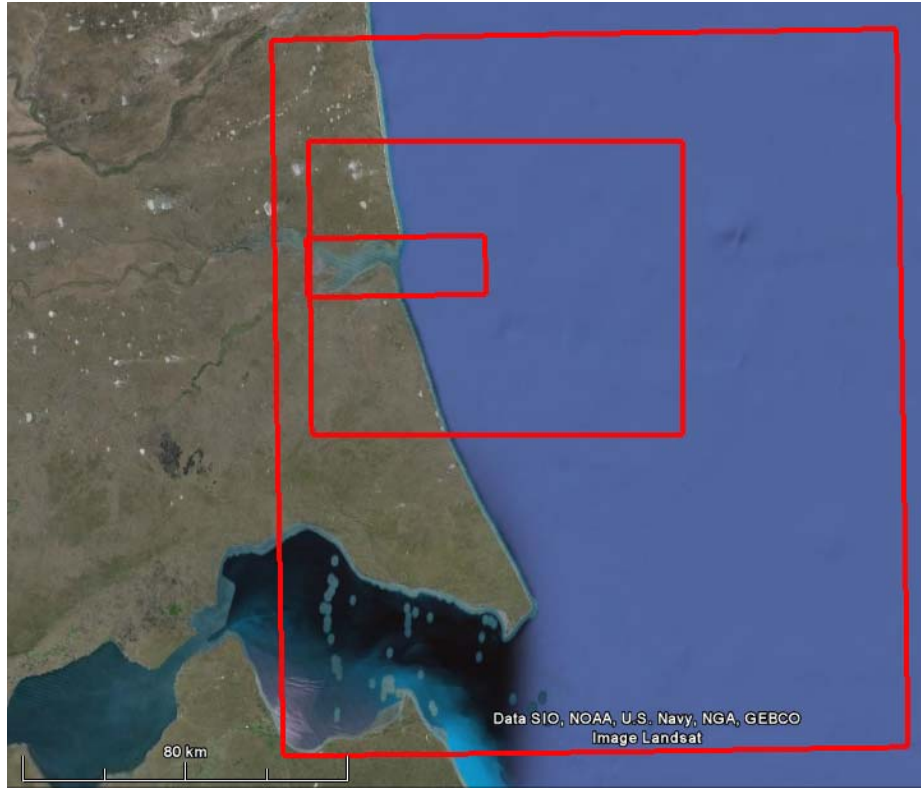


Figura 4.1. Dominios computacionales: Grilla Grande, media y chica (Fuente Imagen de fondo: Google Earth)

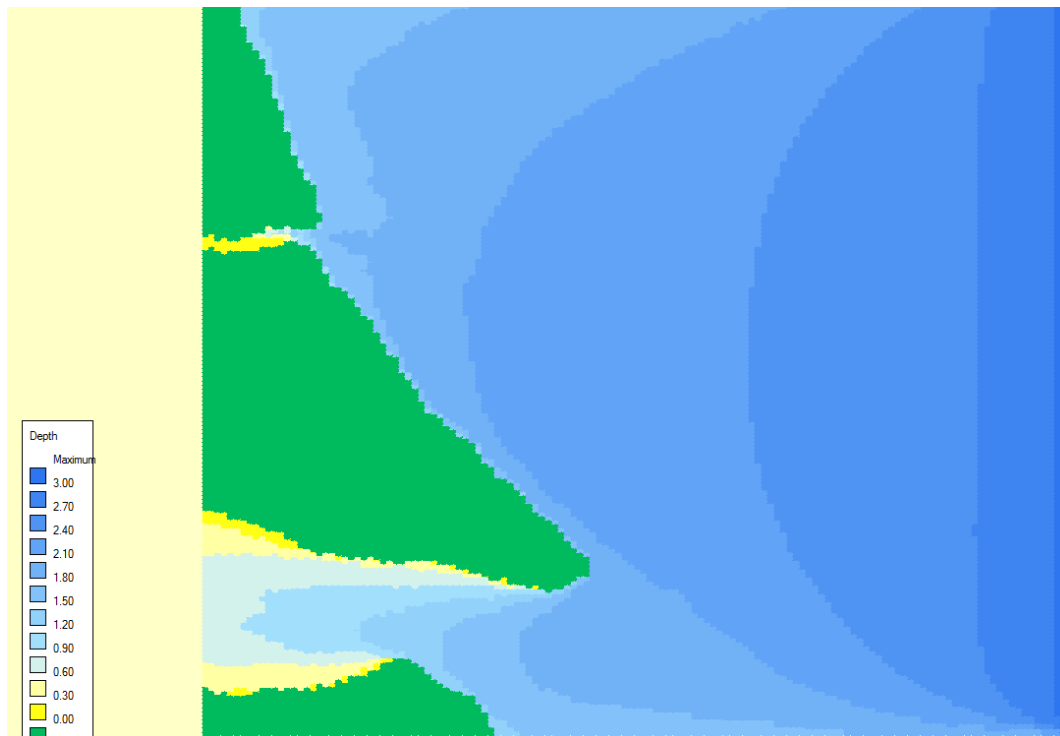


Figura 4.2: Mapa de olas. Grilla grande con $H_s = 3$ m, $T_p = 6$ s, y dir 90° en el borde oceánico. Nivel de mar constante = 6.8 m

En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestra la propagación del oleaje hasta la boca del Estuario de Río Gallegos. Las condiciones de borde de la Grilla Mediana provienen de los resultados obtenidos en la Grilla Grande y, del mismo modo, los resultados en la Grilla Chica provienen de la aplicación de las condiciones Generadas en la Grilla Mediana. De esta manera se puede obtener en detalle las condiciones de olas en la boca e interior del Estuario de Río Gallegos. Se observa que para la condición simulada con una ola de altura de 3 m y período de 6 seg en la zona exterior, al interior del estuario llegan olas menores a 1 m.

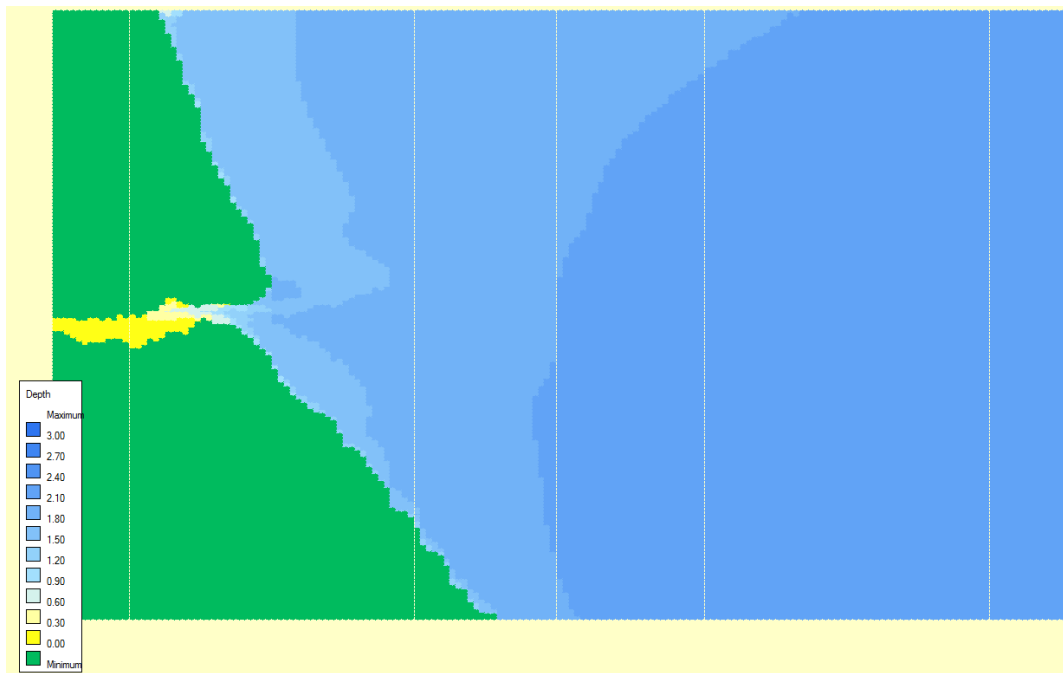


Figura 4.3. Mapa de olas: Grilla media con datos anidados de $H_s = 3$ m, $T_p = 6$ s, y dir 90° en el borde oceánico. Nivel de mar constante = 6.8 m



Figura 4.4. Mapa de olas: Grilla chica con datos anidados de $H_s = 3$ m, $T_p = 6$ s, y dir 90° en el borde oceánico Nivel de mar constante = 6.8 m

El siguiente ensayo consistió en forzar el modelo mediante un campo de vientos, variables en el tiempo y el espacio computacional. Esta condición responde a un evento de alta energía con vientos de hasta 90 km/h, con dirección ESE-SE durante 20 horas (Figura 4.5).

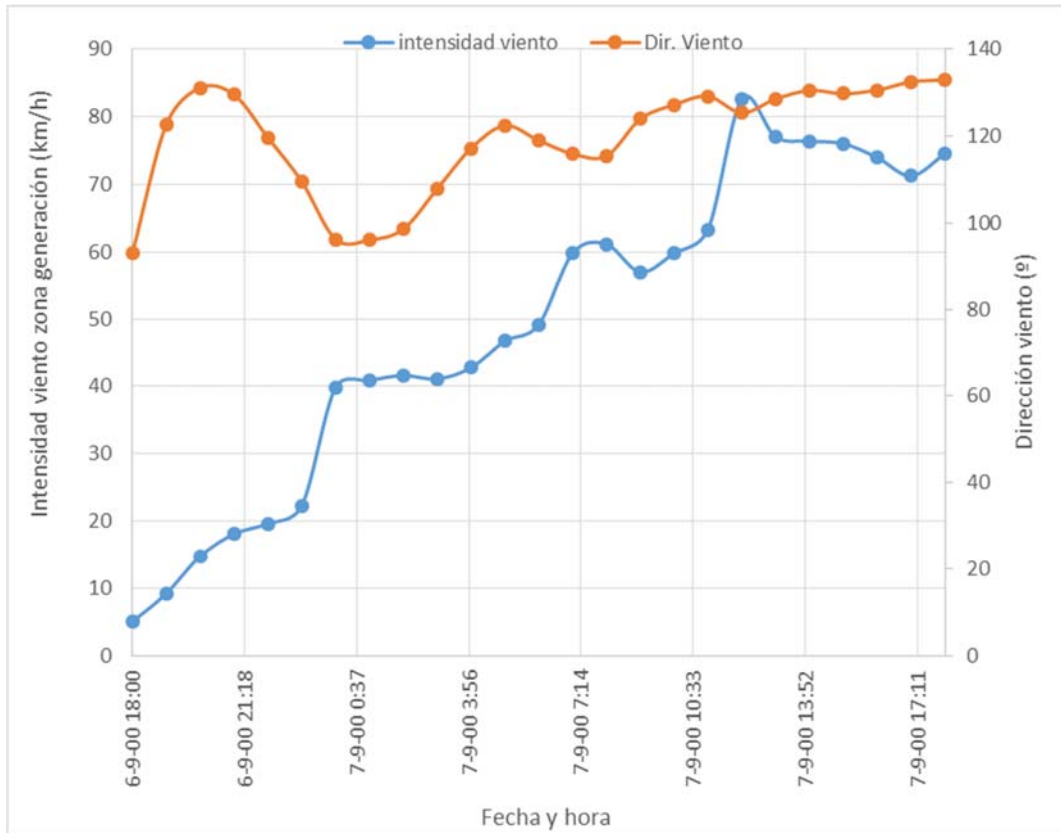


Figura 4.5. Intensidad y dirección de viento para una condición de alta energía, datos NCEP. Temporal del 6/09/2000

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran a modo ilustrativo la evolución de las olas en el dominio computacional de la Grilla Grande y la Grilla Media. Se observa que las olas de mayor altura (superiores a 3 m), dominan toda la zona exterior al estuario de Río Gallegos. Sin embargo, dentro del estuario las condiciones de oleaje son atenuadas fuertemente por la geometría del acceso y la presencia de bancos de arena que inducen la disipación de la energía incidente.

Para una mejor comprensión del fenómeno indicado anteriormente, se extrajeron datos en puntos de observación en la grilla chica (Figura 4.8), donde se muestra la evolución de la altura de ola dentro y fuera del estuario (Figura 4.9).

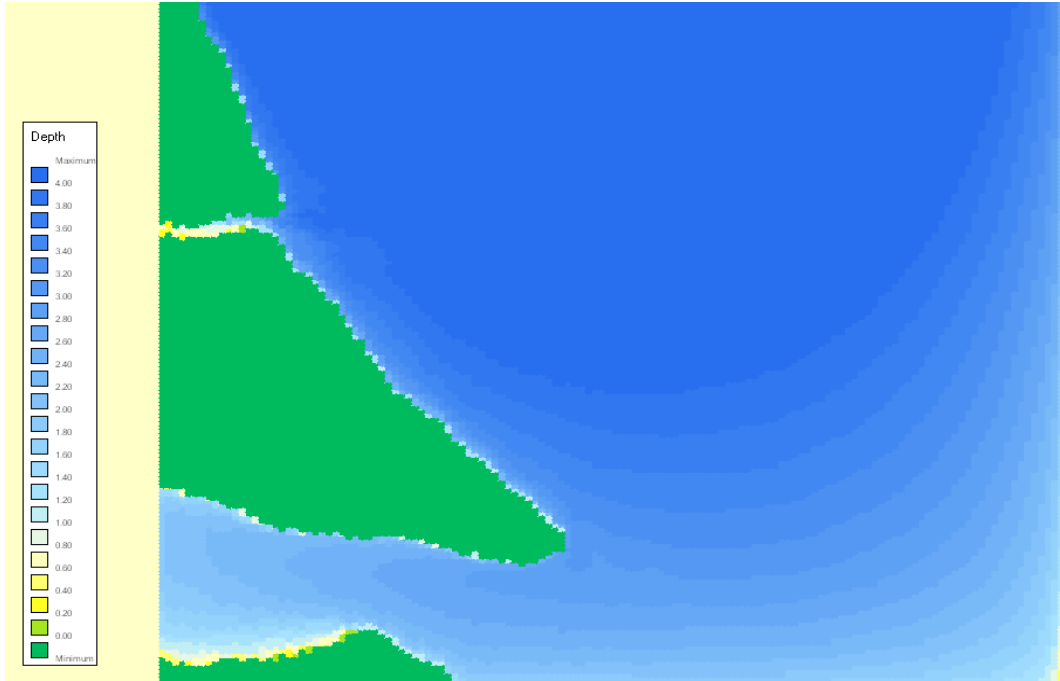


Figura 4.6. Mapa de olas: Grilla grande con malla de vientos NCEP. Temporal del 6/09/2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

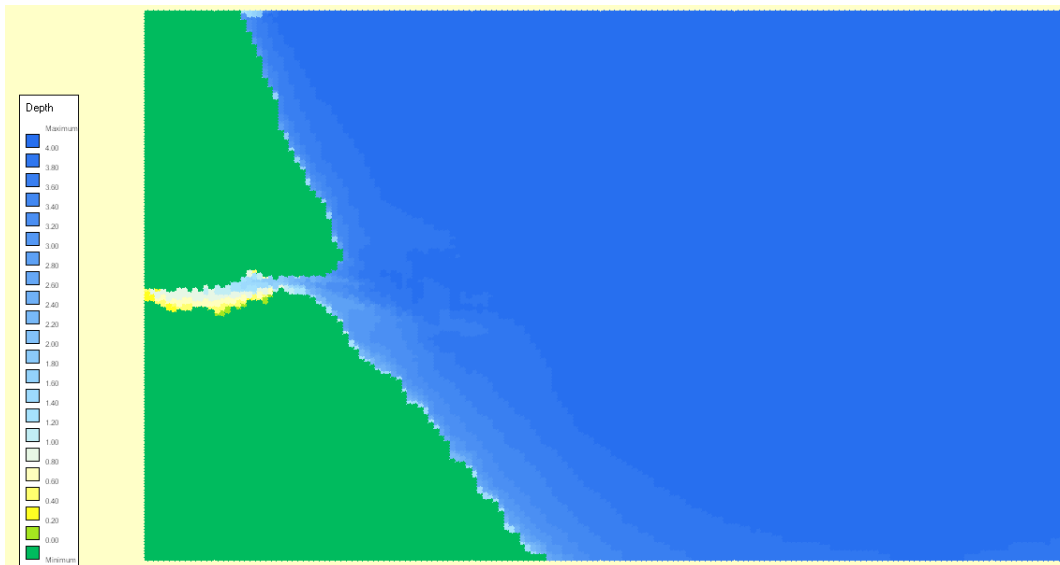


Figura 4.7. Mapa de olas: Grilla media con datos anidados y con malla de vientos NCEP. Temporal del 6/09/2000. Nivel de mar constante = 6.8 m



Figura 4.8. Puntos de observación de información dentro de la Grilla Chica (Fuente Imagen de fondo: Google Earth)

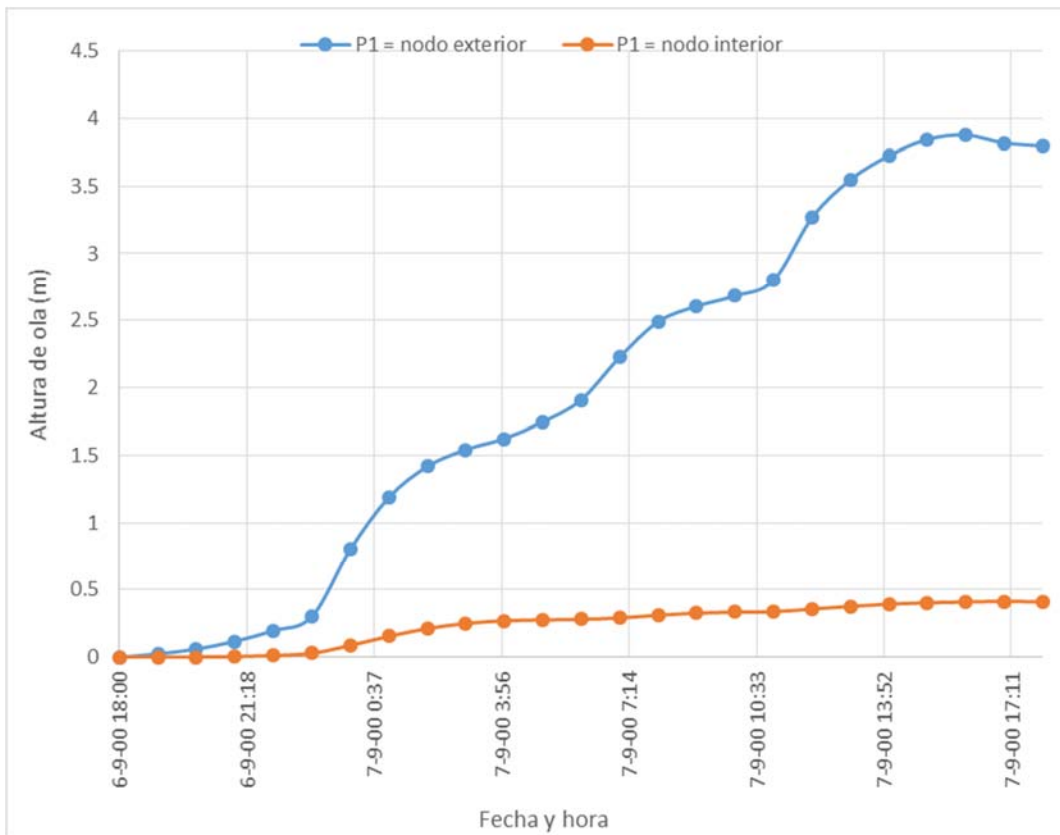


Figura 4.9. Evolución de altura de ola, dentro y fuera del estuario. Simulación realizada con un campo de vientos en 3 grillas anidadas. Datos del NCEP/NCAR para el Temporal del 6/09/2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

En la siguiente simulación se aplicó en modo paramétrico, un espectro de energía total, variable en el tiempo. Se eligió un evento de alta energía correspondiente a un temporal de 15/03/2012, en el cual las alturas de ola exteriores alcanzan los 4.5 m, con direcciones del cuadrante NE y rotando al ENE. En las Figura 4.10 y 4.11 se muestran los resultados

de la simulación mediante la representación de las condiciones de ola en la zona exterior, las olas en las proximidades de la boca del estuario y las resultantes en el interior del estuario. Puede observarse que al acceso del estuario llegan olas de hasta 2.5 m, pero en el interior no se superan los 0.5 m.

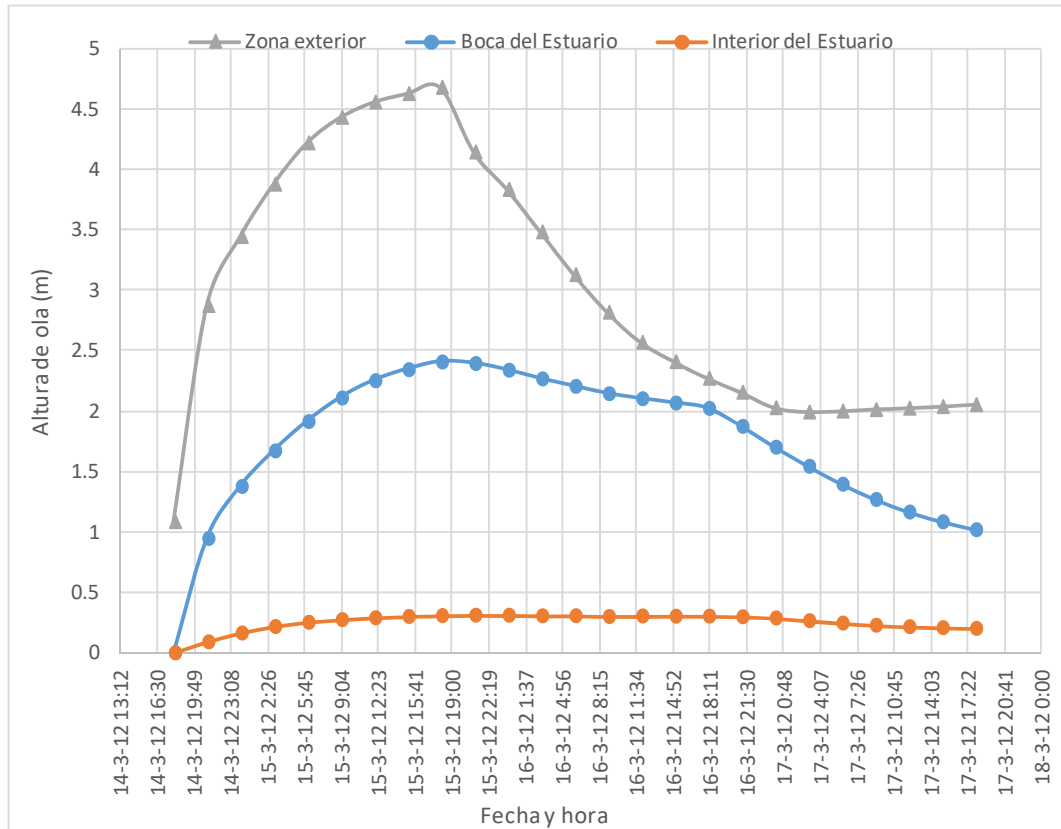


Figura 4.10. Evolución de altura de ola, dentro y fuera del estuario. Simulación realizada con datos de olas del proyecto IOWAGA – IFREMER. Condición de tormenta del 14/03/2012 al 17/03/2012. Nivel de mar constante = 6.8 m

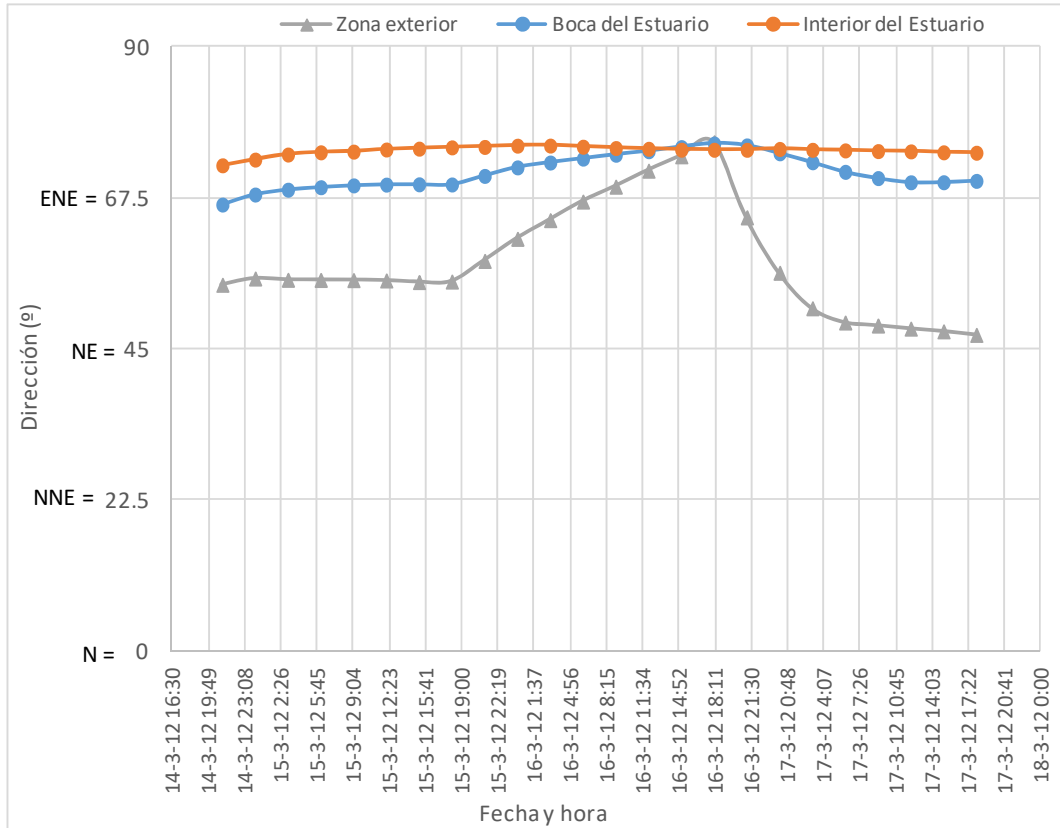


Figura 4.11. Evolución de la dirección de ola, dentro y fuera del estuario. Simulación realizada con datos de olas del proyecto IOWAGA – IFREMER. Condición de tormenta del 14/03/2012 al 17/03/2012. Nivel de mar constante = 6.8 m

Tal como puede observarse en los escenarios simulados, las condiciones de oleaje en el estuario en relación a los forzantes oceánicos, presentan relativa baja energía. Esto se debe a la fuerte atenuación que sufre el oleaje al aproximarse a la boca del estuario, el cual presenta una geomorfología que lo protege de dicha acción.

Finalmente, se realizó una simulación de 1 año de duración, con un campo de vientos variable en el espacio. En la Figura 4.12 y Tabla 4.2 se muestra la rosa de olas y distribución de olas por altura y dirección, respectivamente. Estos resultados corresponden a una zona exterior al estuario (aproximadamente a 20 km de la costa). En la misma, se observa el predominio de olas provenientes del cuadrante W-SW y olas del N-NE, y con baja energía total.

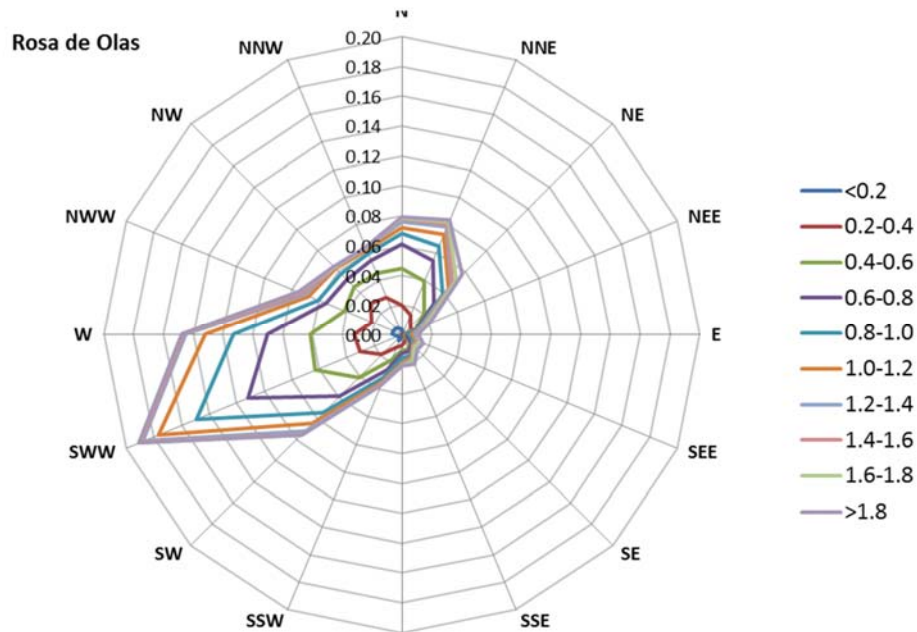


Figura 4.12. Rosa de olas en la zona exterior. Simulación realizada con un campo de vientos en 3 grillas anidadas. Datos del NCEP/NCAR para el año 2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

Distribución hs - dir																	
hs (m)	dir (° Nautical)																ΣFrec.
	N	NNE	NE	NEE	E	SEE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	NWW	NW	NNW	
<0.2	0.34	0.10	0.03	0.03	0.03	0.00	0.07	0.07	0.20	0.44	0.24	0.34	0.65	0.61	0.58	0.48	4.23
0.2-0.4	1.64	1.37	0.75	0.65	0.20	0.07	0.27	0.44	0.58	0.51	1.67	2.70	2.56	1.57	2.39	2.22	19.60
0.4-0.6	2.49	2.42	1.33	0.31	0.03	0.14	0.38	0.58	0.31	0.92	2.19	3.28	2.94	1.98	1.57	1.78	22.64
0.6-0.8	1.60	1.50	0.92	0.14	0.10	0.14	0.17	0.14	0.17	0.72	1.78	4.85	2.87	1.33	0.68	0.96	18.06
0.8-1.0	0.72	1.09	0.82	0.14	0.10	0.44	0.14	0.27	0.34	0.58	1.57	3.76	2.29	0.61	0.58	0.48	13.93
1.0-1.2	0.44	0.82	0.55	0.07	0.17	0.17	0.03	0.14	0.31	0.34	1.06	2.73	1.88	0.65	0.51	0.27	10.14
1.2-1.4	0.38	0.55	0.34	0.10	0.20	0.27	0.03	0.17	0.17	0.17	0.68	1.13	1.30	0.31	0.07	0.17	6.04
1.4-1.6	0.17	0.17	0.10	0.20	0.17	0.10	0.03	0.10	0.07	0.03	0.27	0.17	0.14	0.20	0.03	0.03	2.01
1.6-1.8	0.07	0.20	0.34	0.10	0.07	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.07	0.14	0.14	0.24	0.03	0.00	1.50
>1.8	0.07	0.14	0.55	0.34	0.03	0.20	0.27	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	1.84
ΣFrec.	7.92	8.36	5.74	2.08	1.13	1.57	1.43	2.15	2.15	3.72	9.53	19.09	14.75	7.51	6.49	6.38	100.00

Tabla 4.2. Distribución de altura de olas por dirección en la zona exterior. Simulación realizada con un campo de vientos en 3 grillas anidadas. Datos del NCEP/NCAR para el año 2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

Por su parte, en la Figura 4.13 y Tabla 4.3 se muestra la rosa de olas y distribución de olas por altura y dirección, en el interior del estuario. Allí sólo quedan olas de las direcciones W, NE y ENE, debido la forma del estuario y la condición de vientos predominante. Asimismo, la energía total de las olas es mucho menor que la zona exterior.

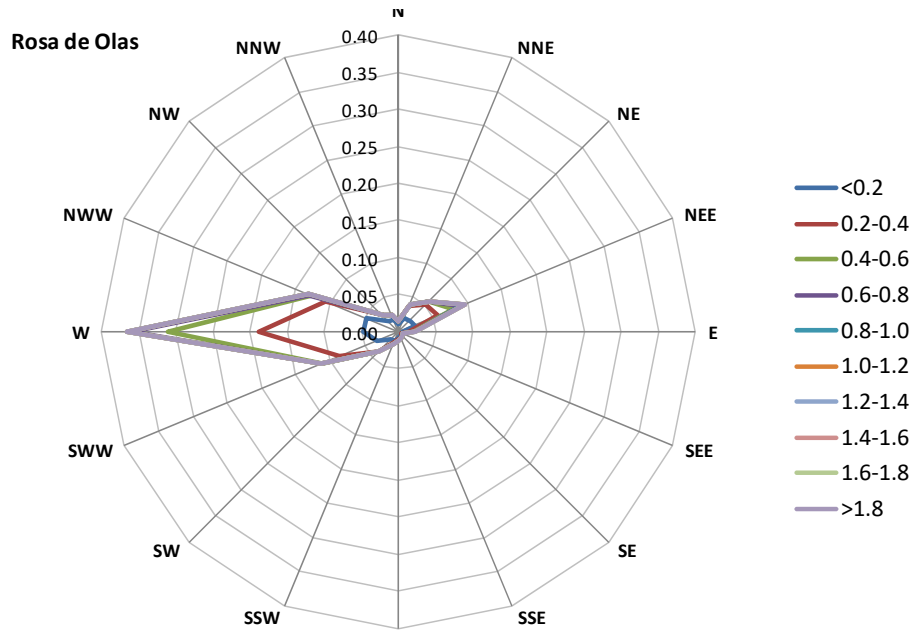


Figura 4.13. Rosa de olas en el interior del estuario de Río Gallegos. Simulación realizada con un campo de vientos en 3 grillas anidadas. Datos del NCEP/NCAR para el año 2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

Distribución hs - dir																	
hs (m)	dir (° Nautical)																ΣFrec.
	N	NNE	NE	NEE	E	SEE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	NWW	NW	NNW	
<0.2	1.09	2.08	2.08	2.32	0.55	0.31	0.51	0.61	0.79	1.33	1.50	3.24	4.68	4.61	1.95	1.78	29.43
0.2-0.4	0.27	1.74	3.14	3.31	0.82	0.17	0.07	0.20	0.31	0.31	2.25	5.46	14.20	6.08	1.13	0.55	40.01
0.4-0.6	0.00	0.07	0.55	2.25	0.51	0.07	0.07	0.10	0.07	0.03	0.10	2.32	12.12	2.05	0.03	0.03	20.38
0.6-0.8	0.00	0.00	0.03	1.06	0.07	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	5.09	0.27	0.00	0.03	7.00
0.8-1.0	0.00	0.00	0.03	0.48	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.07	0.00	0.00	1.26
1.0-1.2	0.00	0.00	0.03	0.14	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
1.2-1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
1.4-1.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.6-1.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>1.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣFrec.	1.37	3.89	5.87	9.56	2.12	0.58	0.72	0.92	1.16	1.67	3.86	11.44	36.67	13.08	3.11	2.39	98.40

Tabla 4.3. Distribución de altura de olas por dirección en el interior del estuario de Río Gallegos. Simulación realizada con un campo de vientos en 3 grillas anidadas. Datos del NCEP/NCAR para el año 2000. Nivel de mar constante = 6.8 m

4.3. Análisis complementario de oleaje

En el capítulo anterior se presentó el clima de olas para condiciones frecuentes. Esto se realizó a partir de los datos de oleaje exterior provenientes de modelos globales, y con datos de vientos del SMN como forzante para la generación de olas dentro del dominio computacional.

Se realizó un análisis complementario con una selección de temporales para evaluar su influencia sobre el entorno donde se implantaría el aprovechamiento de energía

mareomotriz. El objeto es brindar más herramientas para el diseño de las estructuras que se planean ejecutar.

Para ello se seleccionaron 16 eventos con olas exteriores ocurridas entre 2012 y 2013 a partir de la información que surge de los 3 nodos del modelo global IOWAGA. Asimismo, se seleccionaron 9 eventos con vientos de gran intensidad, los cuales provienen desde el continente pero por su magnitud pueden generar olas de relativa importancia en la zona de análisis. En las tablas siguientes se presentan a modo de resumen los eventos seleccionados, y los resultados obtenidos en las cercanías del muelle Punta Loyola.

Cabe mencionar que los eventos seleccionados poseen duraciones de 1 a 2 días, y en la tabla se muestran los valores máximos representativos. Asimismo, para los eventos con olas exteriores, en el modelo también se tuvieron en cuenta los vientos correspondientes a esa fecha para los procesos de generación de olas locales.

Escenarios	olas exteriores			Escenarios con viento			Resultados Muelle Punta Loyola			
	Hs max (m)	TP (s)	dir (°)	V max (m/s)	V max (km/h)	dir (°)	Hsig (m)	Tm01 (s)	Tpsmo (s)	Dir (°)
1	4.68	9.43	59.8				1.88	3.59	4.96	66.51
2	2.67	9.26	169.0				0.91	2.54	5.75	111.81
3	2.70	7.69	18.5				1.19	2.88	3.49	45.43
4	2.88	8.40	22.0				1.25	2.98	3.73	48.15
5	2.96	7.94	21.7				1.26	2.97	3.73	48.09
6	3.97	8.93	13.0				1.43	3.04	3.54	39.46
7	3.16	9.62	139.6				1.41	3.22	6.13	86.70
8	3.26	8.77	178.1				1.01	2.56	5.91	137.50
9	3.09	8.70	20.7				1.46	3.09	3.74	45.27
10	2.78	8.20	71.6				1.54	3.47	5.21	71.25
11	2.76	7.58	90.5				1.52	3.49	6.72	75.48
12	3.10	8.06	172.8				1.04	2.61	5.94	122.56
13	2.79	7.87	77.2				1.53	3.50	5.28	72.78
14	3.91	9.35	154.3				1.28	3.03	6.10	93.27
15	3.17	9.80	148.2				1.31	3.10	6.11	90.51
16	3.27	9.09	37.5				1.62	3.35	4.55	57.99
17				20.8	75	280.0	1.55	3.07	4.36	268.22
18				16.7	60	260.0	1.21	2.80	3.87	260.26
19				19.4	70	250.0	1.36	2.90	4.13	256.59
20				16.7	60	280.0	1.20	2.79	3.87	268.07
21				19.4	70	240.0	1.31	2.85	3.96	253.38
22				16.7	60	330.0	0.99	2.47	3.21	328.77
23				22.2	80	300.0	1.52	2.99	4.19	281.49
24				11.1	40	30.0	0.93	2.66	3.52	53.53
25				16.7	60	0.0	1.26	2.80	3.38	20.94

Tabla 4.4 Análisis de olas complementario. Eventos de gran energía con olas exteriores y campos de vientos. Escenarios simulados con el modelo SWAN y resultados en muelle Punta Loyola

A partir de las simulaciones realizadas para escenarios con temporales oceánicos, puede observarse que las olas en el entorno de Punta Loyola (interior del estuario), se encuentran entre 1 y 2 m de altura, con eventos con olas exteriores de 2.5 a 5 m de altura. Es decir, a pesar de la intensidad del oleaje exterior, la atenuación en la boca del estuario es muy significativa.

Asimismo, los períodos del oleaje se ven modificados por procesos de rotura y transformaciones en los bancos y pasos de baja profundidad en el acceso. Fuertes

interacciones no lineales afectan el desarrollo del oleaje hacia el interior del estuario. Por las mismas razones, se producen fuertes cambios de dirección de las olas que provienen de direcciones de los cuadrantes SE o NE, tratando de alinearse en la dirección E-W.

Para el caso de las simulaciones con vientos de gran intensidad, focalizado el análisis en aquellos eventos con vientos del W y del NW, se observa que las olas pueden alcanzar 1.6 m de altura con períodos de hasta 4.5 segundos. Estos vientos intensos suelen perdurar mucho tiempo, con lo cual las condiciones de agitación de este tipo en el interior del estuario son permanentes. En consecuencia, las instalaciones que se ubiquen en el agua deben estar adecuadamente verificadas y protegidas para estas condiciones.

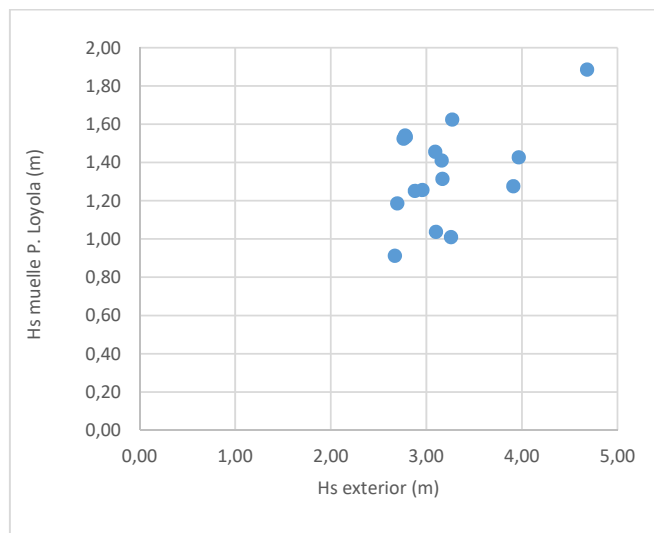


Figura 4.14: Alturas de ola máximas resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA

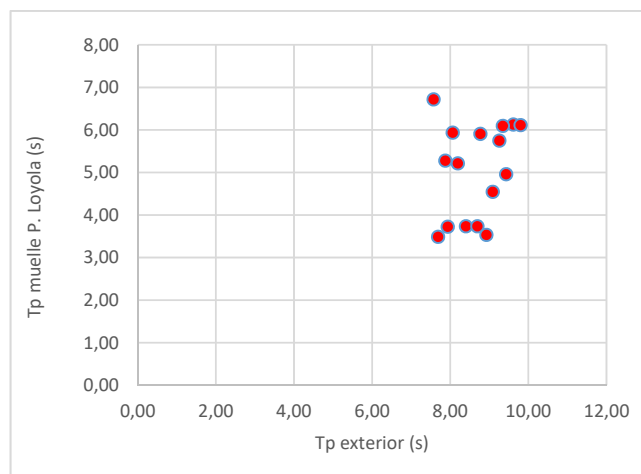


Figura 4.15: Períodos de olas resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA

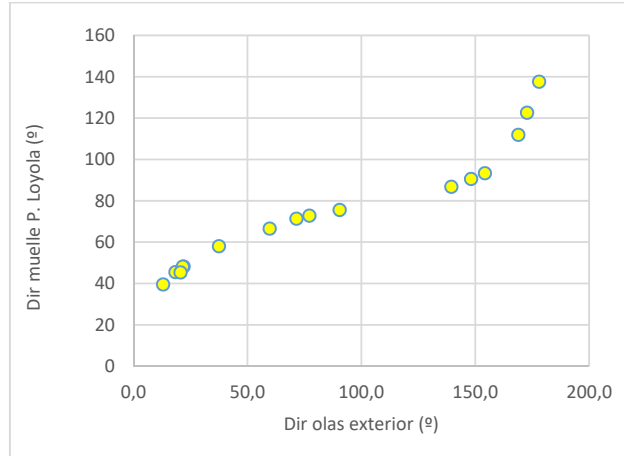


Figura 4.16: Direcciones de oleaje resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA

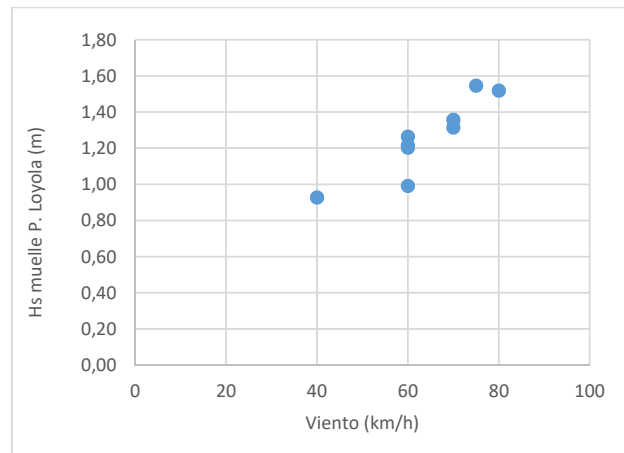


Figura 4.17: Alturas de ola máximas resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con campos de vientos en el dominio. Olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA en condiciones medias

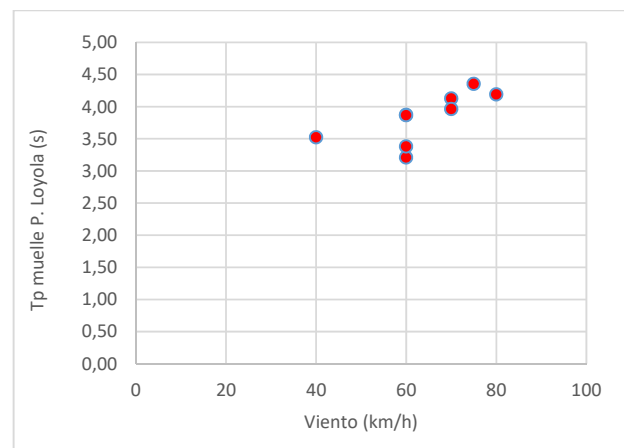


Figura 4.18: Períodos resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con campos de vientos en el dominio. Olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA en condiciones medias

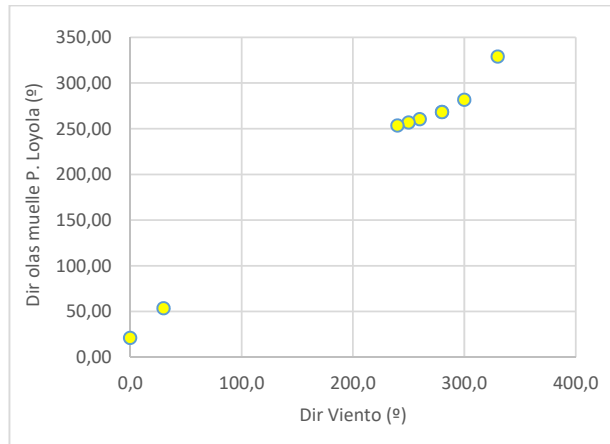


Figura 4.19: Direcciones de oleaje resultantes en muelle Punta Loyola. Eventos de gran energía con campos de vientos en el dominio. Olas exteriores generadas por el modelo global IOWAGA en condiciones medias

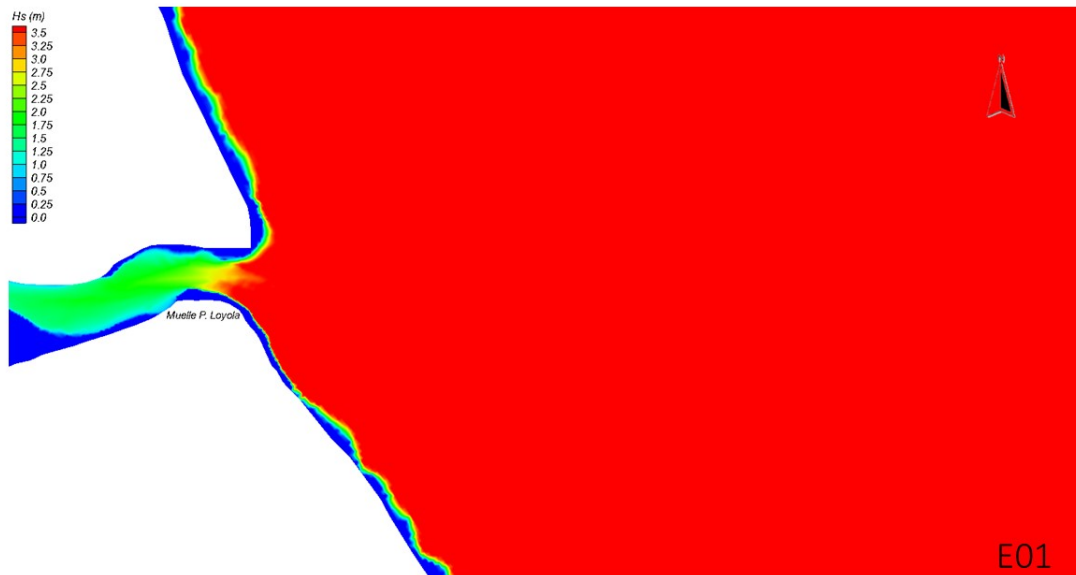


Figura 4.20: Mapa de olas en zona exterior y Estuario del río Gallegos. Escenario E01. Se observa la gran atenuación que sufre el oleaje a medida que ingresa al estuario.

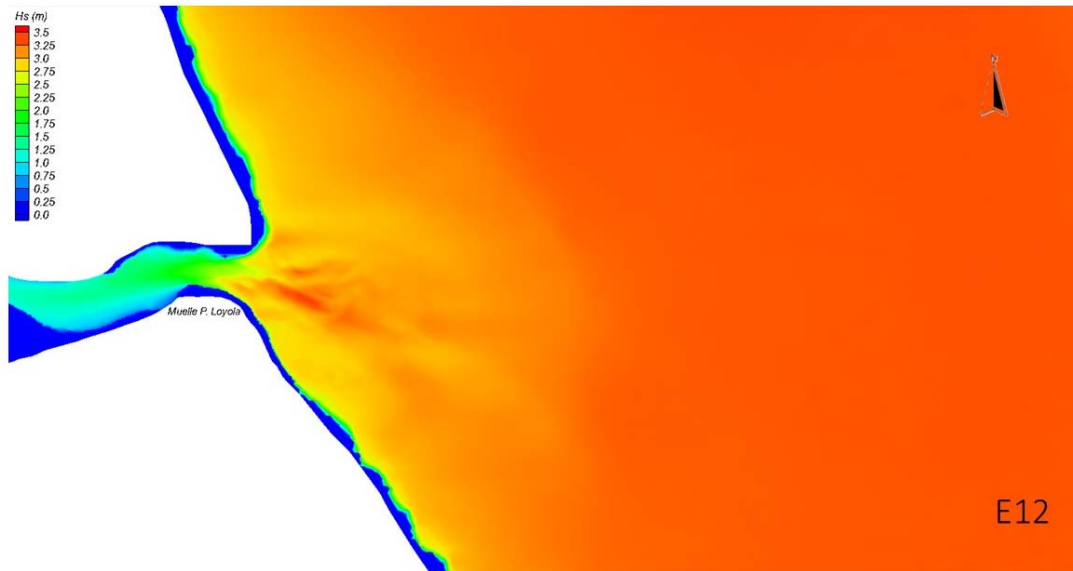


Figura 4.21: Mapa de olas en zona exterior y Estuario del río Gallegos. Escenario E12. Se observa que olas de menor altura en el exterior del estuario al propagarse hacia el interior puede causar similares efectos de oleaje que un escenario más extremo como el E01.

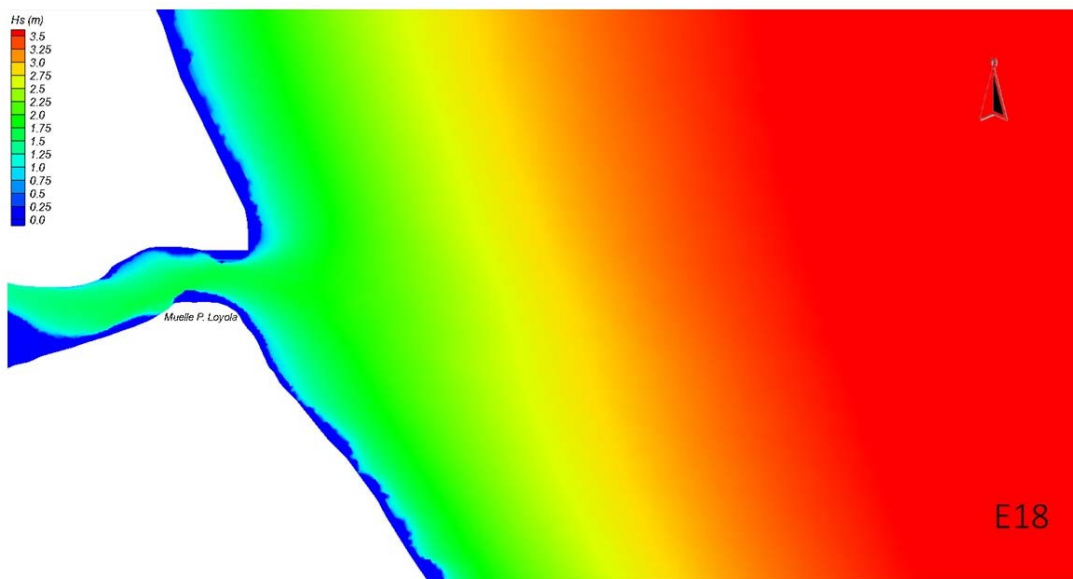


Figura 4.22: Mapa de olas en zona exterior y Estuario del río Gallegos. Escenario E18. Vientos desde el Este generan olas en el acceso del estuario de relativa importancia. En aguas abiertas las olas crecen y se propagan libremente.

CAPITULO V: Evaluación morfológica

Los estuarios son cuerpos de agua con un comportamiento altamente complejo, en donde aguas de origen continental o insular interactúan con aguas de origen oceánico. La física de estuarios está gobernada por diferentes procesos y fenómenos que involucran diferentes escalas de magnitud, desde mezcla a través de interfaces de densidad inducida por turbulencia, hasta flujos dominados por la rotación terrestre e interacción gravitacional Tierra-Luna.

El estuario del río Gallegos es un sistema macromareal que recibe los aportes de los ríos Gallegos y Chico. El sistema presenta una gran turbiedad por momentos debido a la turbulencia generada por la dinámica de las mareas y las olas. La circulación está gobernada por una onda de marea semidiurna con un rango medio de 8 a 9 m de amplitud.

Las costas del estuario son morfológicamente diferentes. La costa norte está bordeada por un acantilado de aproximadamente 80 a 120 m de altura, mientras que el sur es una costa baja, donde la cota máxima llega hasta los 20 m (Piccolo, 1997).

En el interior se presentan bajas profundidades, con extensas llanuras de marea o marismas, con numerosos canales. En general, los canales de marea juegan un rol importante, ya que controlan la dispersión del material, facilitando el intercambio de sedimentos entre las llanuras de marea y el ambiente marino. Asimismo, las amplias planicies formadas por material muy fino podrían influir en las condiciones de refluo.

El área de la desembocadura está asociada a un sistema de bancos de extensión longitudinal, alineados en forma paralela al curso del estuario. Los bancos de arena de la desembocadura son rasgos importantes del estuario. Los mismos juegan un rol significativo en la defensa natural costera, en la navegación y como fuente de sedimento marino. Son básicamente cuerpos sedimentarios elongados, cuya morfología resulta de la interacción de diversos factores (corrientes de marea, energía de ola, fuente de sedimento, clima, geometría costera).

Para la formación de los bancos es necesario que exista una adecuada fuente de arena y un régimen hidrodinámico capaz de movilizar el sedimento. Así, los sectores de canales de marea donde el transporte residual de flujo y refluo presenta direcciones opuestas son áreas óptimas para su formación. La ubicación de los bancos es determinada por la geomorfología general del estuario, la cual controla la distribución de los canales de flujo y refluo.

Como evidencia de la complejidad sedimentológica del estuario se encuentra la información recopilada de las cartas náuticas de la zona de estudio. En la figura 5.1 se muestran los tipos de fondo que surgieron de los muestreos realizados por el Servicio de

Hidrografía Naval en el momento de los relevamientos. En la zona exterior predomina la presencia de arena media y fina, pero con algunos sectores con gravilla o pedregullo. En las playas exteriores conviven afloramientos rocosos, con material fino y arena. Mientras que en el acceso al estuario se presentan combinaciones irregulares de los materiales anteriores, que posiblemente sean muy activos por las fuertes corrientes de marea en flujo y reflujo.



Figura 5.1. Mapa de suelos en el Estuario de Río Gallegos (Elaboración propia en base a la información de las cartas náuticas H-451 A y B)

A fin de comprender la dinámica hidrosedimentológica del estuario, se realizaron simulaciones acopladas con el modelo DELFT3D en sus módulos Delft3D-Flow (hidrodinámico) y el módulo D-Morphology para transporte de sedimentos y análisis morfológico.

El propósito de la modelación consistió en evaluar los cambios morfológicos del lecho marino en la totalidad del estuario, considerando como forzante principal la acción de las corrientes generadas por la onda de marea. Esta evaluación contempla el desarrollo de los procesos sedimentológicos que tienen lugar a lo largo de sucesivos ciclos de mareas constituidos por la alternancia de períodos de tiempo con flujos entrantes y salientes a través de la boca del estuario.

Se realizaron simulaciones con el objetivo de identificar tendencias generales de erosión o sedimentación en diferentes sectores del área de modelación, abarcando períodos prolongados en el tiempo con duraciones de tres meses y un año, según el propósito del análisis.

La malla de cálculo utilizada para esta tarea reúne las mismas características que las que fueron empleadas para el análisis hidrodinámico. Como condiciones de borde para los escenarios hidrodinámicos se utilizaron las componentes de marea empleadas en la etapa anterior.

Debido a la ausencia de información específica sobre la composición sedimentaria dentro del estuario de Río Gallegos el análisis se desarrolló considerando un sedimento de características estándar, realizando posteriormente algunos ensayos con el propósito de evaluar la sensibilidad de los resultados frente a los cambios del modelo sedimentológico. Consecuentemente, para este estudio se utilizaron tres sedimentos diferentes caracterizados en todos los casos por una mezcla de una fracción gruesa (arena) y una fracción fina (limo). En cada una de las simulaciones realizadas el sedimento se consideró distribuido homogéneamente en toda el área modelada. La Tabla 5.1 señala una síntesis que representa las características de los sedimentos empleados en este análisis.

Tabla 5.1. Características de los sedimentos considerados en el estudio

Denominación	Fracción Gruesa		Fracción Fina	
	Tipo	D ₅₀ (mm)	Tipo	Vel caída (mm/s)
Sedimento 1	Arena media	0.4	Limo medio	0.25
Sedimento 2	Arena fina	0.2	Limo medio	0.25
Sedimento 3	Arena media	0.4	Limo grueso	0.50

El primer análisis realizado consistió en evaluar los cambios morfológicos que podrían producirse en el interior del estuario y su boca de acceso a lo largo de un año si se considera solamente el efecto de la marea. Más allá de tratarse de una situación simplificada debido a la ausencia de los efectos de otros forzantes que podrían tener algún grado de importancia bajo determinadas circunstancias, como el viento y el oleaje, el interés por representar este escenario radica en que se trata la situación de base que perdura en forma ininterrumpida a lo largo del tiempo y, por lo tanto, puede ser considerada la responsable de inducir las tendencias que dominan los cambios morfológicos en el interior del estuario.

La Figura 5.2 muestra el resultado obtenido para una simulación que abarcó la totalidad del año 2016 considerando el modelo sedimentológico representado por el Sedimento 1. En la misma se indican alturas de erosión y sedimentación acumuladas dentro del estuario y la zona de acceso como consecuencia de los procesos sedimentológicos desarrollados a lo largo del período simulado.

Este resultado señala, en primera instancia, una significativa actividad en los procesos morfológicos inducidos por la acción de las corrientes de marea y una gran capacidad de las mismas para el transporte de los sedimentos considerados para el análisis. El mapa representado en la Figura 5.2 muestra que las zonas de erosión y sedimentación dentro del estuario se distribuyen de manera aparentemente equitativa, sin patrones que permitan determinar con claridad el predominio de uno u otro.

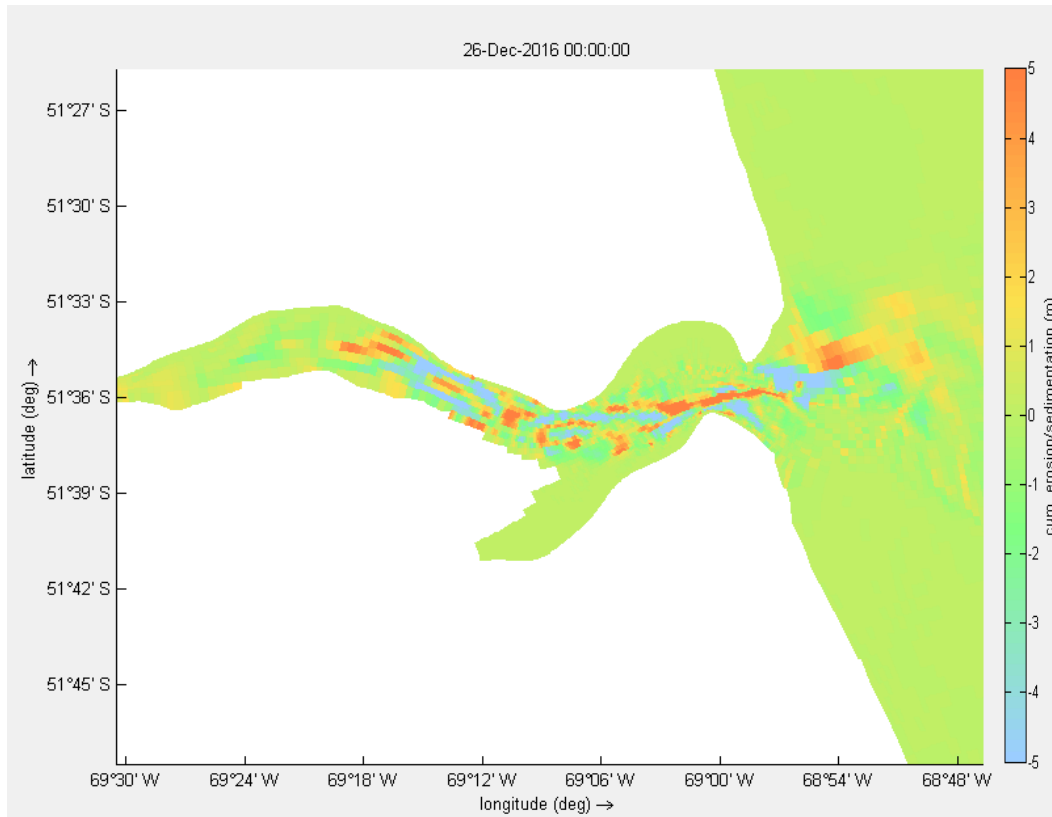


Figura 5.2. Cambios morfológicos en el área modelada para una simulación de un año

La interpretación de estos resultados puede ampliarse mediante el análisis particular de cambios producidos en ubicaciones puntuales. Para ello se seleccionaron cuatro puntos de interés que representan zonas de referencia para el estudio, estos son: un punto del exterior del estuario (P_{ext}), la boca de acceso (Boca), el muelle de Punta Loyola (P_{Loyola}), y un punto interno del estuario más próximo a la ciudad de Río Gallegos (P_{int}). Todos ellos se encuentran indicados en la Figura 5.3.

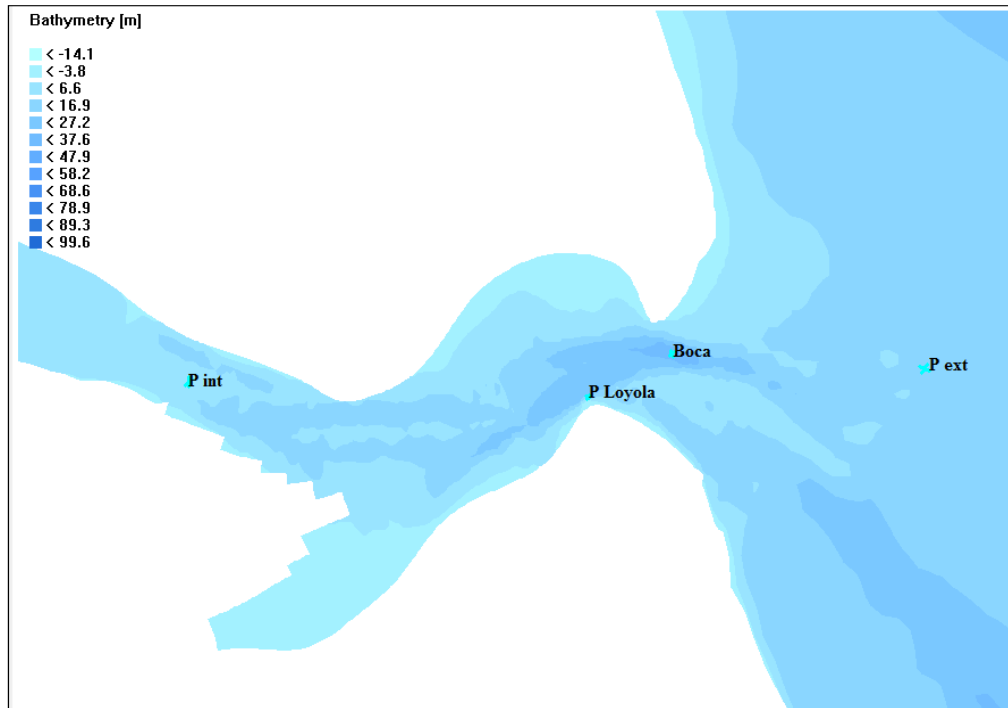


Figura 5.3. Ubicación de puntos de control para el análisis

En cada una de las ubicaciones puntuales señaladas en la Figura 5.3 se obtuvieron las series de tiempo que representan la variación de la profundidad referida a la situación inicial por efecto de la erosión o sedimentación del material transportado a lo largo de todo el año. Estos valores se encuentran representados en los gráficos de la Figura 5.4.

Las series mencionadas muestran con mayor claridad los rangos de valores que pueden obtenerse para las variaciones de profundidad en las distintas ubicaciones de referencia, al mismo tiempo que señalan el contraste entre las formas de los gráficos y magnitudes resultantes, dando cuenta de las diferencias en la evolución de los procesos morfológicos para cada sector.

Un aspecto que vale la pena señalar en el análisis resulta ser la posibilidad de un cambio de signo de los procesos a lo largo del año. En ese sentido se destaca la ubicación de Punta Loyola, donde los procesos de erosión y sedimentación muestran una clara alternancia durante el período simulado, con una variación máxima de la profundidad del orden de los 2.5 m.

Como contraparte, en la Boca y en el Punto Interior la tendencia a la erosión parece ser más clara, aunque debe señalarse que los gráficos indican una reducción en la velocidad del proceso que podría derivar en un cambio de signo si se analizara una escala de tiempo más amplia.

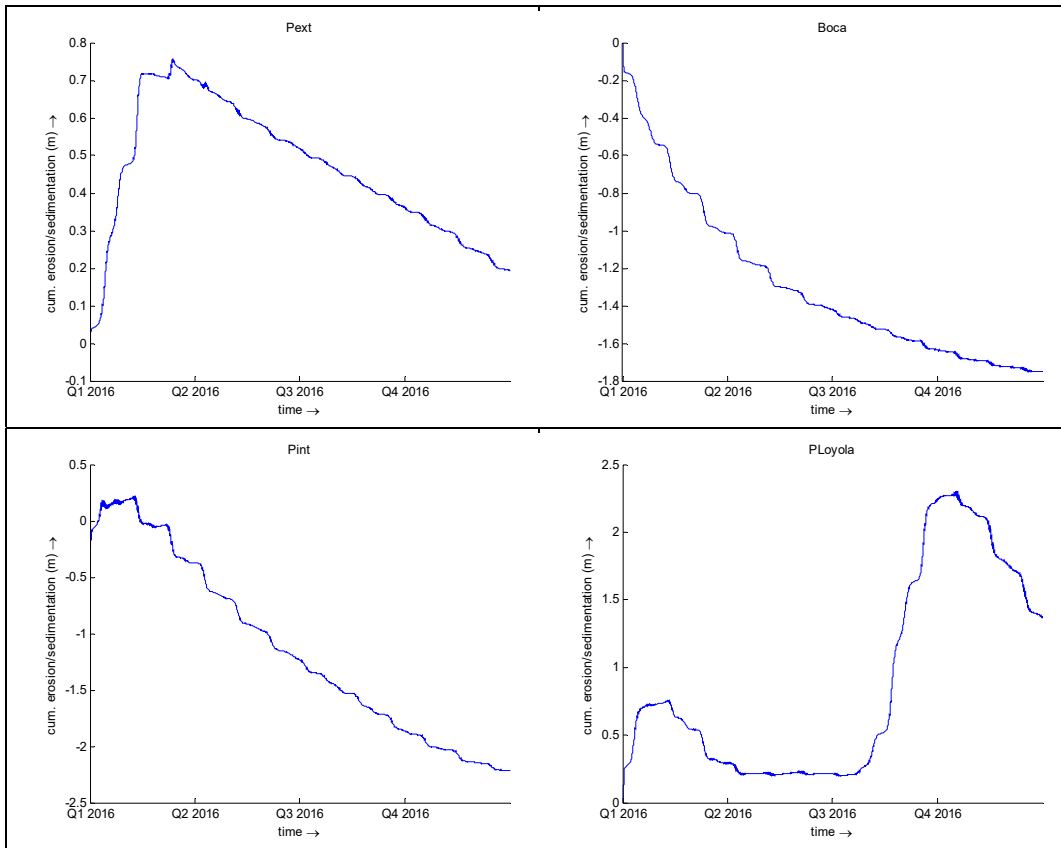


Figura 5.4. Variación puntual de la profundidad en ubicaciones de interés

Estos resultados tienen un valioso interés práctico ya que permiten la comparación en términos relativos de lo que sucede en distintos sectores del área de modelación, al mismo tiempo que brinda una primera estimación sobre el orden de magnitud de los cambios morfológicos poniendo en evidencia la importancia de estos procesos.

Una mejor descripción de la composición granulométrica del sedimento constituiría un aporte sustancial para reducir la incertidumbre de los resultados. Con el propósito de evaluar el grado de incertidumbre asociado a estos resultados se realizó un análisis de sensibilidad repitiendo los ensayos numéricos con modificaciones en la composición del sedimento.

La Figura 5.5 muestra la comparación de resultados obtenidos para las cuatro ubicaciones puntuales en tres simulaciones diferentes de tres meses de duración que fueron desarrolladas considerando las composiciones de sedimento definidas en la Tabla 5.1.

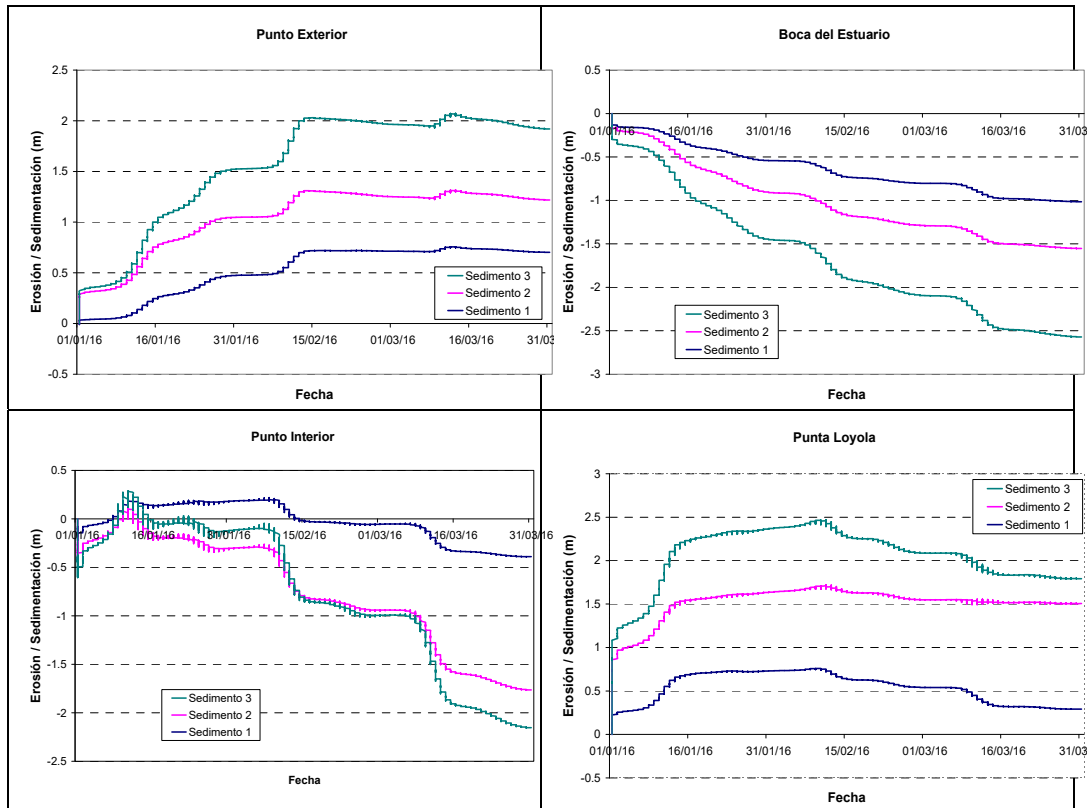


Figura 5.5. Variación puntual de la profundidad en ubicaciones de interés para diferentes composiciones del sedimento

Estos gráficos muestran importantes variaciones en los valores acumulados de erosión y sedimentación en las cuatro ubicaciones puntuales derivadas del cambio en la composición del sedimento.

Los resultados señalan que, si bien las tendencias se mantienen en todos los casos, los valores de erosión y sedimentación se incrementan sensiblemente para las simulaciones realizadas con Sedimento 2 y Sedimento 3, respecto de la situación inicial donde se consideró el Sedimento 1. De acuerdo con los gráficos presentados en la Figura 5.5, dichas variaciones pueden ser del orden de dos o tres veces según la ubicación que se analice.

El resultado de este análisis pone en evidencia la significancia que puede tener la composición granulométrica del sedimento sobre las estimaciones de los cambios morfológicos. Esto señala la necesidad de contar con información precisa para la caracterización adecuada de los sedimentos en las simulaciones numéricas.

Completando el análisis se decidió indagar sobre los mecanismos de transporte que posibilitan el arrastre de los materiales sueltos por acción de la corriente de marea. En las Figuras 5.6 y 5.7, referidas a $P_{Interior}$ y P_{Loyola} , respectivamente, se muestran los gráficos que representan caudales sólidos de sedimentos transportados por fondo (gráficos de la izquierda) y por suspensión (gráficos de la derecha) para las tres composiciones sedimentarias consideradas en este estudio.

De la interpretación de estas figuras resulta evidente que los volúmenes movidos por acción de las corrientes de marea como transporte de fondo son sustancialmente mayores a los transportados por suspensión, independientemente de la composición del sedimento y de la ubicación puntual que se analice.

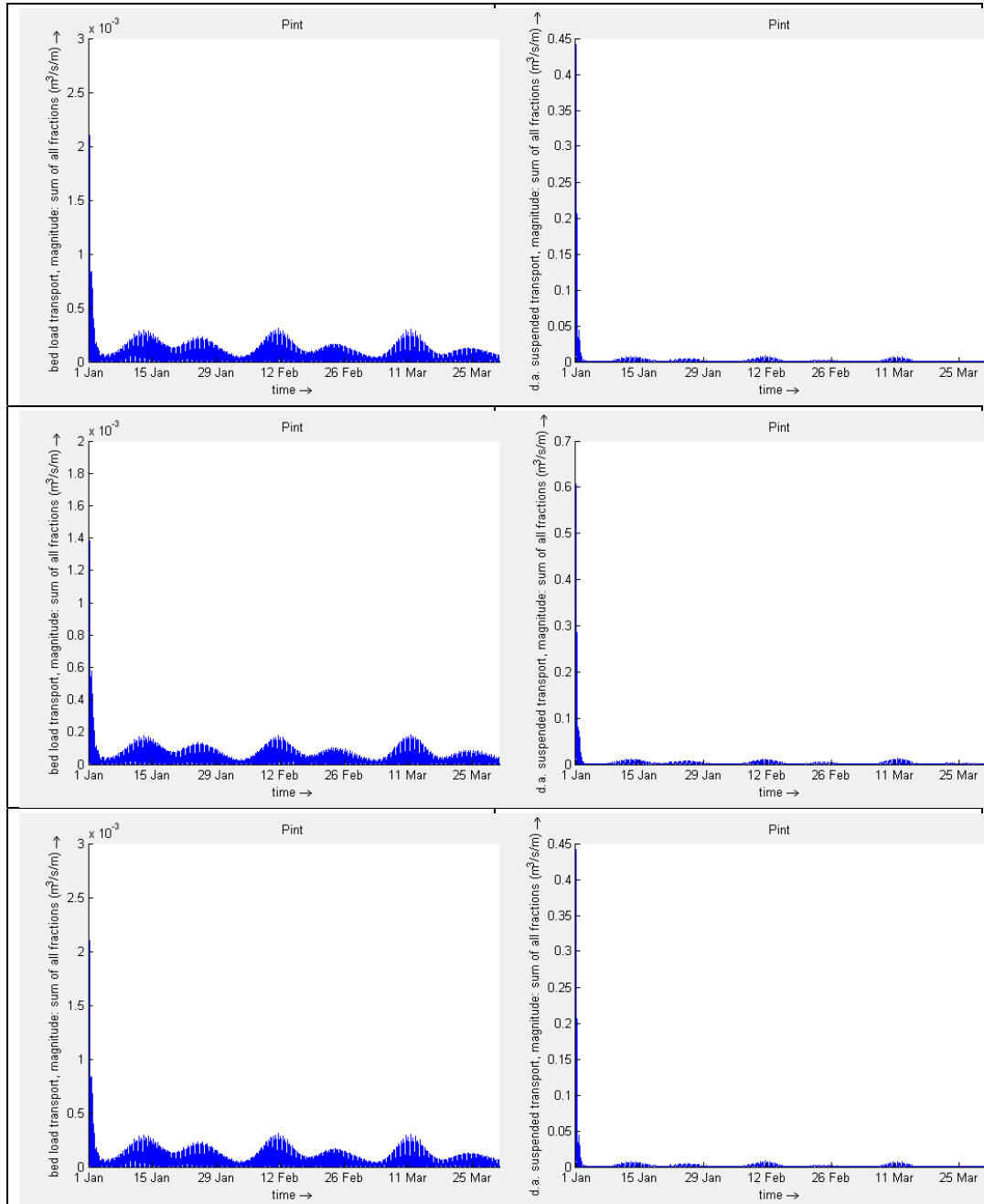


Figura 5.6. Transporte de sedimentos de fondo (izquierda) y en suspensión (derecha) en P Interior para tres composiciones diferentes

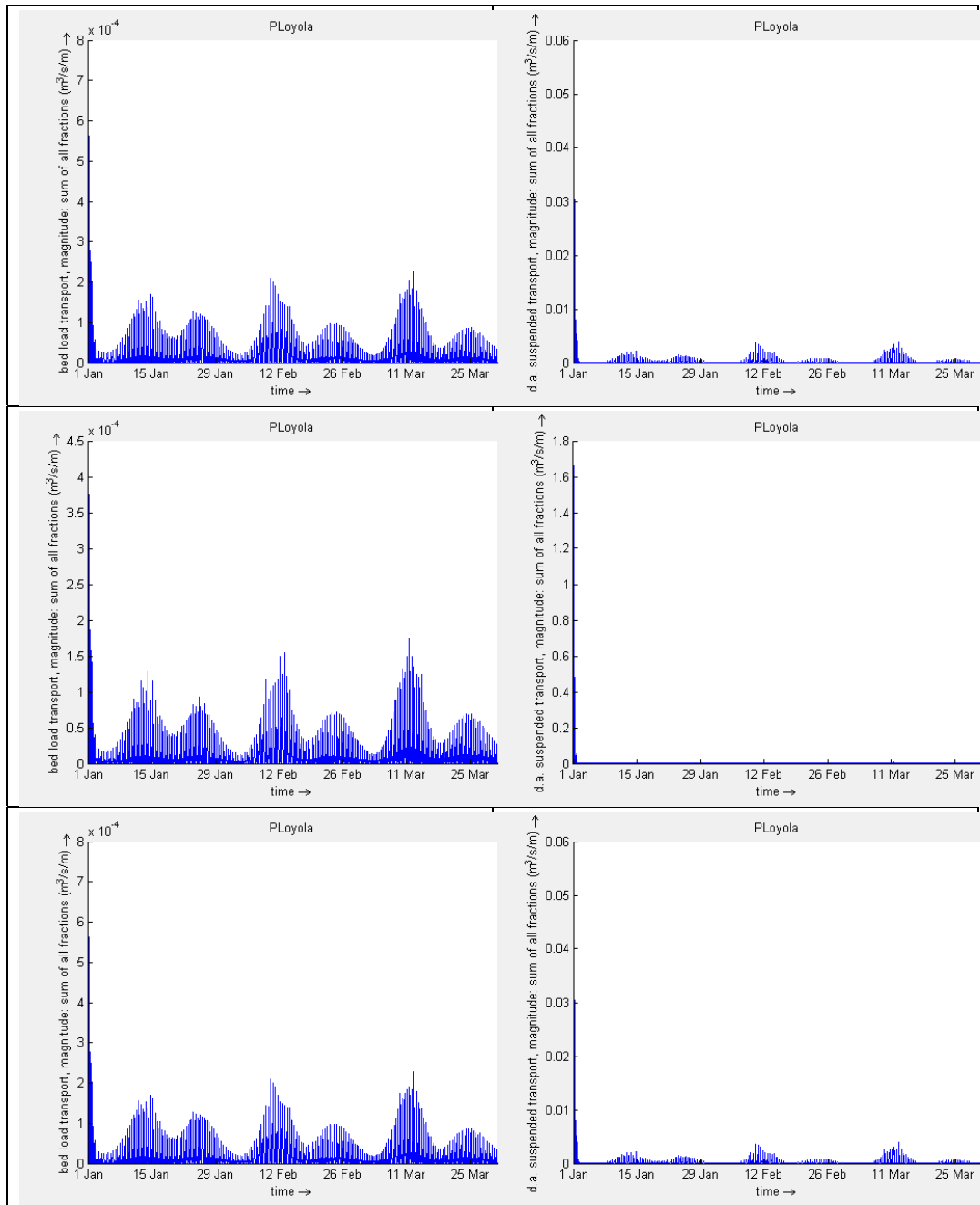


Figura 5.7. Transporte de sedimentos de fondo (izquierda) y en suspensión (derecha) en Punta Loyola para tres composiciones diferentes

Por último se realizó un análisis morfológico del sistema bajo la hipótesis de la presencia de un grupo de turbinas. El sitio elegido fue arbitrario en el interior del estuario, del mismo modo que para el análisis de los cambios de velocidad.

En este caso se realizó una simulación de 3 meses de duración con las mareas como forzantes, y un coeficiente de pérdida de energía para la ubicación de las turbinas $C_{loss} = 5$. Los resultados finales se muestran en los mapas N° 40 a 43 del Anexo III.

En los Mapas N° 40 y 41 se muestran los niveles finales del lecho, referidos al nivel medio del mar. En términos generales puede observarse que en el sistema presenta sectores

característicos con mayores profundidades y, por consiguiente, mayores velocidades. Estos son el Canal Norte, el Canal Sur, y los canales interiores en el entorno de Paso Remolinos. En particular en la zona de mayor profundidad aguas arriba de Punta Loyola, se ha considerado la presencia de las turbinas mediante las ecuaciones de porous plate.

Si se comparan los mapas N° 40 y 41 presentan profundidades similares en todo el estuario, excepto en el entorno de las obras. En efecto, en los mapas N° 42 y 43 se muestran los cambios relativos del lecho y se observa que la zona donde se incorporaron las turbinas la tendencia era de erosión, y pasó a ser de sedimentación. Asimismo, alrededor de la barrera parcial que genera el *porous plate* se desplazan las erosiones. Estos patrones morfológicos se condicen con los cambios en las corrientes observados en el capítulo anterior del presente trabajo.

CAPITULO VI: Resumen y Conclusiones

En el presente trabajo se desarrollaron estudios específicos sobre el potencial hidrocínético de las corrientes de marea en el Estuario de Río Gallegos. Este trabajo se enmarca en objetivos más amplios a nivel nacional, tales como investigar y desarrollar tecnologías orientadas a la obtención y almacenamiento de energías de fuentes no agotables, que contribuyan a fortalecer la matriz energética actual, haciendo hincapié en la sustentabilidad y el cuidado del medio ambiente. Del mismo modo, el potencial energético del mar de la Patagonia austral, tanto de corrientes oceánicas como de mareas, es considerado uno de los más importantes del mundo, y su estudio no se agota en solo un sitio.

Una importante ventaja que tiene la energía proveniente de las mareas, es que resulta predecible en el tiempo y su variación por efectos meteorológicos sólo ocurre en cortos períodos. Asimismo, debido a que el agua es alrededor de 832 veces más densa que el aire, existe un gran contraste entre la densidad de potencia del recurso eólico y la originada por las corrientes de marea para una misma velocidad de flujo, lo cual resalta el enorme potencial asociado a este tipo de aprovechamientos.

Cabe destacar también que en comparación con los proyectos hidroeléctricos convencionales y mareomotrices, los aprovechamientos hidrocínéticos presentan las siguientes ventajas potenciales:

- No requieren obras de cierre, evitando generar zonas de inundación.
- Requieren estructuras de fundación y soporte más sencillas, en comparación con la infraestructura requerida por los aprovechamientos de embalse.
- No obstruyen el paso de especies migratorias.
- No generan impacto visual.
- No producen contaminación auditiva.
- Menores periodos de gestación y construcción.
- Posibilidad de aplicar sistemas modulares, facilitando el mantenimiento y prolongando la vida útil de los turbogrupos.

Los estudios desarrollados en este trabajo estuvieron basados en modelación matemática, validados con algunas mediciones. Los resultados obtenidos permitieron la descripción y entendimiento de las principales variables físicas y ambientales del sistema, así como la estimación del potencial energético del estuario y la evaluación preliminar de hipotéticas obras de aprovechamientos hidrocínéticos. Asimismo, se ha recopilado y analizado la información antecedente disponible, la cual es relativamente escasa para toda la zona de estudio.

En cuanto a las características generales del Estuario de Río Gallegos, el mismo se destaca por ser un cuerpo de agua semicerrado con una dinámica marcada por amplios rangos de marea (8,4 m de amplitud media y 12,7 m como máximo astronómico), que dan lugar a corrientes de gran intensidad en su interior. Como consecuencia de ello se desarrolla un importante proceso de transporte, remoción y re-depósito de sedimentos arenosos que configuran un complejo sistema hidrosedimentológico. Se suma además

un oleaje permanente que, aunque es de relativa baja altura, su persistencia y amplitud provoca alteraciones en la dinámica hídrica.

Respecto al análisis energético de las corrientes de marea, dado que la densidad de potencia es proporcional a la velocidad de la corriente al cubo, resulta de carácter fundamental conocer y predecir tal variable de la manera más fiel posible, tanto espacial como temporalmente. El estudio en detalle de la hidrodinámica del estuario a través de la modelación numérica, se manifiesta como un proceso esencial para lograr dicho análisis. Asimismo, debido a que las zonas a evaluar para la instalación de equipos generadores representan extensiones muy importantes, estudios basados en modelación matemática se presentan como una herramienta ventajosa de aplicación en cuanto a plazos de estudio. En efecto, un modelo matemático hidrodinámico permite evaluar diversos escenarios y condiciones de clima marítimo, para diferentes puntos de la zona costera.

Por lo tanto, se analizaron corrientes de marea, distribuciones del oleaje y dinámica del transporte de sedimentos para diferentes condiciones climáticas y de marea mediante la aplicación de 3 modelos numéricos.

Cabe mencionar que como una primera etapa del trabajo proyectado para las tareas de campo, el grupo conformado por Y-TEC realizó mediciones hidrodinámicas en las inmediaciones del muelle situado en Punta Loyola. El instrumento fue ubicado entre medio de dos líneas de pilotes separadas 40 metros y fondeado a una profundidad de 17 metros respecto al cero local. El equipo implementado, conocido genéricamente como ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), permitió obtener registros de niveles, velocidad y dirección de la corriente en tiempo real para distintas capas a lo largo de la columna de agua.

Una vez implementado el modelo hidrodinámico, se realizó un contraste entre datos medidos y simulados, determinándose una correlación muy buena tanto de niveles como de velocidades.

A partir de la calibración y validación del modelo, se realizó una simulación de 1 año de duración a fin de determinar las características de las corrientes de marea. En condiciones de marea entrante o lo que se conoce como flujo, las líneas de corriente tienden a concentrarse en los canales de acceso al estuario, denominados norte y sur, presentándose velocidades de hasta 3,9 m/s (7,6 nudos) durante las mareas de sicigia. En condiciones de marea saliente o reflujó, las velocidades se reparten más uniformemente en el estuario, con una concentración parcial en el canal sur, alcanzando velocidades máximas de 3,4 m/s (6,6 nudos). Dentro del estuario, las velocidades disminuyen, alcanzando valores máximos de 2,70 m/s (5,2 nudos).

Una vez obtenidas las velocidades se realizaron determinaciones de densidad de potencia, como parámetro característico de la energía generada por las corrientes de mareas. El análisis además se realizó en base al concepto de garantía, para saber qué porcentaje del tiempo se mantiene determinada potencia, o cuáles son los picos de densidad de potencia máximos y mínimos. Por este motivo fue necesario realizar un análisis estadístico de las velocidades (y por ende de las densidades de potencia) para determinar la verdadera potencialidad del estuario.

La zona que presenta las mejores condiciones en cuanto a velocidades, es el canal sur, con densidades de potencia del orden de los 7,5 kW/m² con un 50 % de garantía y 3,50 kW/m² con 75 % de garantía. Esto implicaría que una turbina con 10 m de diámetro podría generar aproximadamente 130 kW de potencia con una garantía del 75% (asumiendo un rendimiento global del 50 %). En segundo lugar de importancia, se encuentra una zona exterior al canal norte y algunos puntos aislados en la zona media-interior del estuario, como los canales ubicados aguas arriba de Punta Loyola.

La densidad de potencia no es el único parámetro del estuario que debe ser tenido en cuenta al momento de elegir un sitio para el aprovechamiento. La profundidad útil es otro factor de suma importancia que debe ser considerado al elegir una zona a explotar. En este sentido, existe conceptualmente un tirante máximo aprovechable para cada punto del estuario, el cual depende de un calado superior (por requerimientos para la navegación y para considerar alteraciones en las velocidades por viento u oleaje), de las mareas más bajas, y una capa cercana al lecho que no puede ser aprovechada. A partir del modelo digital de terreno del estuario y los datos de marea, se pudo verificar que en la mayor parte del estuario se presentan profundidades aprovechables menores a 2 m, con zonas relativamente estrechas en el interior con profundidades del orden de los 15 m, y recién en la boca norte se presentan profundidades mayores a 25 m. Esto significa que a pesar de que las densidades de potencia sean altas, la capacidad de explotación puede ser relativamente baja para los equipos de generación desarrollados y probados hasta el momento.

Un aspecto a considerar es la energía extraíble del estuario. Dadas ciertas limitaciones de carácter ambiental, el flujo de energía asociado a las corrientes de marea no puede ser aprovechado en su totalidad. Por su parte, existen diversos factores geomorfológicos, sedimentológicos e hidrodinámicos, los cuales generan algunas restricciones sobre el aprovechamiento total del recurso disponible. Los antecedentes disponibles en el tema, indican límites de extracción en el rango de 10% - 20% sobre el flujo anual de energía. Esta restricción se fundamenta en evitar variaciones significativas sobre la hidrodinámica del estuario, lo cual podría afectar el transporte de sedimentos, nutrientes, oxígeno y, consecuentemente, la flora y fauna marina local

A fin de estimar la energía extraíble en el estuario de Río Gallegos, se realizaron cálculos del flujo anual de energía. Dada la disponibilidad de un modelo numérico validado a través de mediciones, fue posible contar con un panorama completo acerca de la hidrodinámica del estuario y brindar mayores precisiones sobre el cálculo del flujo anual de energía. De esta manera, el procedimiento efectuado tuvo en cuenta la direccionalidad del flujo y la distribución no uniforme de densidades de potencia a lo largo de la embocadura.

La potencia media anual generada por los flujos de marea se estimó en 67 MW, mientras que los reflujos de marea presentan un valor de 61 MW, dando como resultado una asimetría energética del 9%. En función de los resultados obtenidos y considerando el porcentaje de tiempo en el cual se produce el ciclo de marea, se obtiene un flujo anual de energía del orden de 470 GWh. Si se aplica factor de 15 % de extracción por limitaciones ambientales, se estima un potencial hidrocinético anual extraíble de 70 GWh como valor nominal de referencia.

La extracción de dicho recurso hidroenergético será función de la ubicación del sector de explotación, la cantidad de equipos instalados, su velocidad de diseño, y la estrategia energética que se desee implementar con un aprovechamiento de este tipo. Asimismo, cabe recordar que las garantías de velocidad varían considerablemente entre distintas zonas del estuario, por lo cual la hidrodinámica será un factor fundamental en una eventual selección de un sitio de implantación de los turbogrupos. Por su parte, deberán tenerse en cuenta otras variables tales como la profundidad disponible, factores sedimentológicos, interferencias con vías navegables, incidencia del oleaje y proximidad a tierra.

De esta manera, si bien la extracción del recurso se encuentra limitada por los factores mencionados anteriormente, los recientes avances en la tecnología aplicada a la obtención de energía de las corrientes y la disponibilidad de zonas adecuadas para su implantación justifican ampliamente la investigación y posterior desarrollo de esta clase de proyectos.

Por otra parte, la extracción de energía puede generar modificaciones tanto en las velocidades de las corrientes, como los patrones de erosión y sedimentación, causando algunos cambios en las zonas donde están ubicadas las turbinas. Esto indica que un análisis hidrodinámico sin la presencia de estructuras, resulta insuficiente para determinar la potencialidad de la zona en estudio. Consecuentemente, se realizaron simulaciones con la representación de turbinas a través de ecuaciones que modifican la ecuación de cantidad de movimiento en un determinado sitio del estuario, considerando diferentes valores del coeficiente de pérdidas, a fin de analizar los efectos sobre los campos de corrientes. Dado que el análisis sólo representa un ejercicio sobre el potencial impacto que generarían turbogrupos, se eligió un lugar arbitrario en el interior del estuario. Los resultados indican que el coeficiente más bajo genera una reducción de las velocidades en condiciones de flujo y reflujos, de hasta 0.5 m/s con una extensión del orden de los 2 km, tanto hacia aguas abajo como hacia aguas arriba de la línea que representarían un conjunto de turbinas hidrocinéticas.

Además de la evaluación del potencial energético del estuario, fueron analizados en este trabajo otras variables de suma importancia para la caracterización de aspectos meteorológicos y ambientales de la zona de estudio.

En cuanto a las condiciones de viento, a partir de la información recopilada predominan los eventos del W y WSW (42% del total) y casi la totalidad de los datos son del cuadrante SW, NW (aproximadamente el 70%). También se presentan importantes vientos provenientes de las direcciones N-NE, que si bien tienen frecuencias menores a los provenientes del SW (alrededor 14%), tienen un peso importante en el conjunto total.

Dado que no existen mediciones ni un estudio de olas específico para el Estuario de Río Gallegos, se ha recurrido a datos provenientes de modelos Globales de Oleaje para la caracterización de las olas exteriores. A partir del tratamiento estadístico de la información puede decirse que cerca del 75 % de las olas se encuentran entre 1,0 m y 2,5 m de altura, con períodos inferiores a 8 segundos. Las direcciones predominantes en la zona exterior corresponden a los cuadrantes SW, SSW y NE.

Se realizó también un detallado análisis espectral de las olas exteriores, determinándose que existe un marcado predominio del oleaje generado por vientos locales, los cuales manifiestan una ocurrencia del 65%. En segundo lugar, resulta interesante destacar la

presencia de estados combinados de wind sea y swell, los cuales aportan un 20%. Finalmente, tan sólo el 15% de la totalidad de los casos corresponde a estados de swell predominante.

Para la caracterización de las olas en la boca e interior del estuario, se aplicó un modelo espectral de generación y transformación. Como forzantes del modelo se utilizaron los datos provenientes del modelo global de olas del proyecto IOWAGA, los datos de vientos del modelo global Meteorológico NCEP/NCAR y los datos de vientos medidos en la Estación Meteorológica del Aeropuerto de Río Gallegos.

Se efectuaron simulaciones con condiciones estacionarias y no estacionarias, con combinaciones de olas como condición de borde oceánico y campos de vientos variables en el tiempo y en el dominio computacional. Se observó que a pesar de la intensidad del oleaje exterior, la atenuación en la boca del estuario es muy significativa llegando a alcanzar olas de 2.5 m como máximo. Asimismo, los períodos del oleaje se ven modificados por procesos de rotura, y transformaciones en los bancos y zonas de baja profundidad en el acceso, debido a las fuertes interacciones no lineales afectan el desarrollo del oleaje hacia el interior del estuario. Por las mismas razones, se producen fuertes cambios de dirección de las olas que provienen de direcciones de los cuadrantes SE o NE, tratando de alinearse en la dirección E-W.

Para el caso de las simulaciones con vientos de gran intensidad, focalizado el análisis en aquellos eventos con vientos del W y del NW, se observa que las olas pueden alcanzar 1.6 m de altura con períodos de hasta 4.5 segundos en el interior del estuario. Estos vientos intensos suelen perdurar mucho tiempo, con lo cual las condiciones de agitación de este tipo en el interior del estuario son permanentes. En consecuencia, las instalaciones que se ubiquen en el agua deben estar adecuadamente verificadas y protegidas para estas condiciones.

En cuanto a la caracterización morfológica del estuario de Río Gallegos se destaca la presencia de bancos irregulares formados de pedregullo y arena. Sobre las barras y los pasos someros el fondo es de pedregullo, mientras que en los bancos exteriores el suelo es de arena, presentando ondulaciones. En el interior se presentan bajas profundidades, con extensas llanuras de marea o marismas, con numerosos canales. En general, los canales de marea juegan un rol importante, ya que controlan la dispersión del material, facilitando el intercambio de sedimentos entre las llanuras de marea y el ambiente marino. Asimismo, las amplias planicies formadas por material muy fino podrían influir en las condiciones de refluo.

El área de la desembocadura está asociada a un sistema de bancos de extensión longitudinal, alineados en forma paralela al curso del estuario. Los bancos de arena de la desembocadura son rasgos importantes del estuario. Los mismos juegan un rol significativo en la defensa natural costera, en la navegación y como fuente de sedimento marino.

Con el propósito de ampliar el entendimiento sobre los procesos que dan origen al complejo sistema morfológico, se realizaron simulaciones numéricas bajo diversas hipótesis y con diferentes períodos de análisis. El propósito inicial de la modelación consistió en evaluar los cambios morfológicos del lecho marino en la totalidad del estuario, considerando como forzante principal la acción de las corrientes generadas por la onda de marea. Esta evaluación contempló el desarrollo de los procesos

sedimentológicos que tienen lugar a lo largo de sucesivos ciclos de mareas constituidos por la alternancia de períodos de tiempo con flujos entrantes y salientes a través de la boca del estuario.

Se observó que las zonas de erosión y sedimentación dentro del estuario se distribuyen de manera aparentemente equitativa, sin patrones que permitan determinar con claridad el predominio de uno u otro. Asimismo, se presentan zonas características como los canales norte y sur en el acceso del estuario, en los cuales la tendencia es de transporte y erosión, así como el canal ubicado en el interior del estuario aguas arriba de Punta Loyola.

Estos resultados tienen un valioso interés práctico ya que permiten la comparación en términos relativos de lo que sucede en distintos sectores del área de modelación, al mismo tiempo que brinda una primera estimación sobre el orden de magnitud de los cambios morfológicos poniendo en evidencia la importancia de estos procesos.

Una mejor descripción de la composición granulométrica del sedimento constituiría un aporte sustancial para reducir la incertidumbre de los resultados. Con el propósito de evaluar el grado de incertidumbre asociado a estos resultados se realizó un análisis de sensibilidad repitiendo los ensayos numéricos con modificaciones en la composición del sedimento.

Se realizó también un análisis morfológico del sistema bajo la hipótesis de la presencia de un grupo de turbinas. A partir del análisis de los resultados se concluye que las reducciones de velocidades que pueden generar la presencia de grupos de turbinas provocaría cambios en los patrones de sedimentación, llegando a cambiar de zonas de erosión a zonas de sedimentación (o viceversa), así como el cambio en las direcciones de las velocidades podría desplazar las zonas de erosión (o sedimentación). Cabe mencionar que dichos efectos sólo son importantes en el entorno de las estructuras consideradas (del orden de 3 km), lo cual representaría un impacto muy bajo para todo el estuario en general.

Desde el punto de vista ambiental, se identifica a la región como zona de pastizales inundables, y hacia la costa se evidencia la presencia de marismas con vegetación escasa y extensas planicies intermareales fangosas. Es para destacar que el estuario de Río Gallegos forma parte también de la categorización como Sitio de Importancia Internacional según la Red Hemisférica de Reservas de Aves Playeras (RHRAP) y como un Área de Importancia para la Conservación de Aves en Argentina (AICA) por BirdLife International, la cual protege porcentajes significativos de las poblaciones mundiales de algunas especies de aves en riesgo, como lo son el Macá Tobiano y el Chorlito Ceniciento. Estos aspectos deben tenerse en consideración al momento de la evaluación integral de un proyecto de aprovechamiento de energía hidrocínética en el estuario.

Por último, es importante destacar la importancia de la continuación de los trabajos de relevamientos y medición de diferentes variables físicas, ya que los datos generados pueden enriquecer los resultados obtenidos en el presente trabajo y dar una mayor certidumbre para futuros proyectos. Al mismo tiempo, la información surgida de esta primera etapa de modelación constituye una contribución relevante para la planificación de nuevas campañas de mediciones, dado que permite identificar los sectores de mayor interés para la adquisición de datos dentro de la vasta extensión del estuario.

Por otra parte, con el presente estudio queda disponible una herramienta de modelación que puede ser replicada fácilmente en otras zonas de interés, tales como Punta Quilla y el Estrecho de Magallanes. Asimismo, la base de datos de olas exteriores y campos de vientos se encuentran comprendidos en las áreas mencionadas. De esta manera se lograría un mejor panorama de la potencialidad energética de toda un área costera, no solo de un estuario en particular.

BIBLIOGRAFÍA

- Ardhuin, F., Hanan, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queeulou, P., Obrebski, M., 2011. Calibration of the "Iowaga" Global Wave Hindcast (1991-2011). Using ECMWF and CFSR Winds. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai'i. 13pp.
- Calverley, M.J.; Szabo, D.; Cardone, V.J.; Orelup, E.A., y Parsons, M.J., 2002. Wave Climate Study of the Caribbean Sea. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting (Banff, Alberta, Canada), pp. 75-86.
- Chawla, A.; Tolman, H.L.; Gerald, V.; Spindler, D.; Spindler, T.; Alves, J.; Cao, D.; Hanson, J.L., y Devaliere, E.M., 2013. A Multigrid Wave Forecasting Model: A New Paradigm in Operational Wave Forecasting. *Weather and Forecasting*, 28(4), 1057-1078.
- Chini, N.; Stansby, P.; Leake, J.; Wolf, J.; Roberts-Jones, J., y Lowe, J., 2010. The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: A case study for East Anglia (UK). *Coastal Engineering*, 57(11-12), 973-984.
- Consejo Portuario Argentino, 2011. Puerto de Río Gallegos. Disponible en <http://www.consejoportuario.com.ar/>
- Decristóforo, L., Ferrari, S. y Albrieu, C., 2014. Reservas naturales urbanas en el Sur de Santa Cruz (Argentina): importancia, caracterización del uso público e incidencia sobre las comunidades vecinas. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Río Gallegos Departamento de Ciencias Naturales y Exactas y Departamento Ciencias Sociales Río Gallegos.
- E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, and R. Reynolds (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*
- Etala, P.; Alonso, S.M.; Souto, D.; Romero, R., y Echevarría, P., 2012. Progreso en el modelo de pronóstico de olas hasta un mosaico global multiescala. Congreso Argentino de Meteorología (Mendoza, Argentina), pp. 125-140.
- Fabrice Aedhuin, Jenny Hanan, Yves Quilfen, Bertran Chapron, Pierre Queeulou, Mathias Obrebski, 2011. Calibration of the IOWAGA "Global Wave Hindcasting (1991 – 2011) Using ECMWF and CFSR Winds. Ifremer Laboratoire d'Océanographie Saptiale, Plouzane, France.
- Germán Rodríguez Rodríguez (1995). Métodos de análisis espectral del oleaje. Tesis Doctorado. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Hagerman G. & Polagye B. (2006) "Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production be Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices" EPRI.

- Kassem, S. y Özkan-Haller, H.T., 2012. Forecasting the wave-current interactions at the mouth of the Columbia River, OR, USA. Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering (Santander, Spain), wave paper No. 53, 7p.
- Komen, G.J., S. Hasselmann and K. Hasselmann (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. 7. Phys. Oceanography., 14, 1271-1285.
- Ortíz Tarroija, Nicolás (2003). Caracterización espectral de tormentas intensas en la costa Catalana y su aplicación a la predicción de oleaje. Tesis de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona).
- Padilla-Hernández, R.; Perrie, W.; Toulany, B., y Smith, P.C., 2007. Modeling of Two Northwest Atlantic Storms with Third-Generation Wave Models. Weather and Forecasting, 22(6), 1229-1242.
- Papadopoulos, A.; Katsafados, P., y Kallos, G., 2002. Regional weather forecasting for marine application. Global Atmosphere and Ocean System, 8(2-3), 219-237.
- PICCOLO. 1997. Geomorfología costera del estuario de Río Gallegos. X Coloquio Argentino de Oceanografía. Comunicación Científica, 8: 17.
- Sagar Mungar, 2014. Hydrodynamics of horizontal-axis tidal current turbines – A modelling approach based on Delft3D. Master of Science Thesis. Faculty of Civil Engineering and Geosciences · Delft University of Technology
- Saha, S.; Moorthi, S.; Pan, H.-L.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Tripp, P.; Kistler, R.; Woollen, J.; Behringer, D.; Liu, H.; Stokes, D.; Grumbine, R.; Gayno, G.; Wang, J.; Hou, Y.-T.; Chuang, H.-Y.; Juang, H.-M.H.; Sela, J.; Iredell, M.; Treadon, R.; Kleist, D.; Van Delst, P.; Keyser, D.; Derber, J.; Ek, M.; Meng, J.; Wei, H.; Yang, R.; Lord, S.; Van Den Dool, H.; Kumar, A.; Wang, W.; Long, C.; Chelliah, M.; Xue, Y.; Huang, B.; Schemm, J.-K.; Ebisuzaki, W.; Lin, R.; Xie, P.; Chen, M.; Zhou, S.; Higgins, W.; Zou, C.-Z.; Liu, Q.; Chen, Y.; Han, Y.; Cucurull, L.; Reynolds, R.W.; Rutledge, G., y Goldberg, M., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(8), 1015–1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.2.S1
- Santaolaria, M. L., 2010. “Estudio de la variabilidad espacio-temporal del banco Oliver, Río Gallegos, Pcia. de Santa Cruz, mediante la comparación de Modelos digitales del Terreno”. Tesis de Licenciatura. Instituto Universitario naval.
- Sclavo, M.; Athanassoulis, G.; Barstow, S., y Cavaleri, L., 2000. An efficient approach to wave climate analysis in coastal waters. In: Resio, D.T. (ed.), 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting (Monterey, California), pp. 345-360.
- Sørensen, O. R.; Kofoed-Hansen, H.; Rugbjerg, M. y Sørensen, L.S., 2004. A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering (Lisboa, Portugal), 13p.

- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2014), Sistema Nacional de Información Hídrica, Base de Datos Hidrológica Integrada, disponible en <http://www.hidricosargentina.gov.ar/>
- Bahaj, A.S; Myers, L.E. (2003). "Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production". *Renewable Energy*, Volume 28, Issue 14, pp 2205-2211.
- Bedard, Roger; Previsic, Mirko; Polagye, Brian; Hagerman, George; Casavant, Andre. (2006). "North America Tidal In-Stream Energy Conversion Technology Feasibility Study". Electric Power Research Institute (EPRI). TP-008-NA.
- Hagerman, George; Polagye, Brian. (2006). "Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices". Electric Power Research Institute (EPRI). TP-001-NA.
- Betz, Albert; (D. G. Randall, Translator.). (1966) "Introduction to the Theory of Flow Machines". Oxford: Pergamon Press.
- Glauert, Hermann. (1935). "Airplane Propellers" in D.W. Durand (ed.) "Aerodynamic Theory". New York: Springer. Vol 4, pp 169-360.
- Gorban' A.N., Gorlov A.M., Silantyev V.M., (2001). "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow", *Journal of Energy Resources Technology*. Volume 123, Issue 4, pp. 311-317.
- M. Shahsavari, E.L. Bibeau, V. Chatoorgoon. (2015). "Effect of shrouding on the performance of horizontal axis hydrokinetic turbines", *Ocean Engineering* 96, p215-225.
- Bryden, I, Couch, S, Owen, A & Melville, (2006). "Tidal Current Resource Assessment" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Power and Energy*, vol. 221, no. 2, pp. 125-135.
- Couch, S. J. and Bryden, (2004) "Numerical modelling of energy extraction from tidal flows". Presented at the World Renewable Energy Congress, Innovation in Europe, Aberdeen.
- Delft University of Technology, 2004. SWAN User manual (ver. 40.31), Faculty of Coastal Engineering and Geosciences, Netherland.
- De Jong, J.C.M., 1997. Verification of the numerical wave model SWAN in the Petten coastal area. Delft University of Technology. Master thesis, 78p.
- Atria Baird Consultores S.A., 1999. Estudio de las condiciones marítimas para el Proyecto Portuario en Caleta La Misión. Informe Técnico.
- Booij, N.; Ris, R.C. y Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(4), 7649-7666.

- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., and Booij, N., 1999. A third generation wave model for coastal regions. Part 2: Model description and validation. *Journal of Geophysics Research*, 104 (C4), pp 7649-7666.
- Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. y Larsen, J., 2001. Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. *Proceedings of 27th International Conference of Coastal Engineering*, pp.1169-1182.
- Valladares, A., 2004. Cuenca de los ríos Gallegos y Chico. Ficha técnica de la Cuenca N° 72. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- Ferrari, S., Albrieu, C. y Imberti, S., 2005. Estuario de Río Gallegos. Áreas importantes para la conservación de las aves de Argentina. *Temas de naturaleza y conservación - monografía de aves argentinas*, N° 5.
- Castellano, R.D.; Tomazin, N.J., y Granada, J., 2009. Caracterización del clima de olas en el litoral marítimo de la provincia del Chubut. *Congreso Nacional del Agua (Trelew, provincia del Chubut, Argentina)*, pp. 35-52.
- Lifschitz, A.J., 2010. "Evaluación del potencial energético de las olas en la plataforma continental de Tierra del Fuego, Argentina". Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires.
- Samela, A.M., Bahamonde, P., Calafiore, C., Bonfili, O., 2011. Relevamiento Eoloeléctrico de la Localidad de Río Gallegos. *Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustenta de Energía*. 10-168.
- Durrant, T. y Greenslade, D., 2011. Evaluation and implementation of AUSWAVE. Melbourne, Australia: Centre for Australian Weather and Climate Research, Bureau of Meteorology. Technical Report No. 041, 55p.
- Camarena Calderon, R.A., 2012. Feasibility of a Marina port along the Buenos Aires coast, Argentina. Delft University of Technology. Master thesis, 130p.
- Bastor, S., Waldman, S., Side, J., 2014. Modelling energy extraction in tidal flows. Terrawatt Consortium. Marine Alliance for Science and Technology for Scotland
- Bamler, R., 1999. The SRTM Mission; A world wide 30 m resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days. *Photogrammetric Week*. D. Fritsch & R. Spiller, Eds.
- Deltares 2014. Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flow and transport phenomena, including sediments – User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands. pp 710.
- Hartwanger, D., Horvat, A., (2008). "3D Modeling of a Wind Turbine Using CFD". NAFEMS UK Conference 2008 "Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice", Cheltenham, UK.

Anexo I: Caracterización Espectral del Oleaje

En el presente anexo se presenta una caracterización espectral del oleaje en la zona de estudio, a partir de la información del proyecto IOWAGA (Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications), desarrollado por el instituto de investigación IFREMER (Francia).

A continuación se presentan los resultados correspondientes a los nodos exteriores, ubicados en las siguientes coordenadas:

- Nodo W0675S510, Latitud = 51° S, Longitud = 67.5° O
- Nodo W0675S520, Latitud = 52° S, Longitud = 67.5° O

En esta base de datos se presenta la información del espectro total de energía, la componente por vientos locales (sea) y las componentes por oleaje oceánico (swell_1 y swell_2). En la Tabla siguiente se muestran los parámetros analizados en detalle:

Parámetro	Unidades	Descripción	Periodo
hs	m	Altura Significativa (Espectro Completo)	2012-2013
fp	s-1	Frecuencia Pico (Espectro Completo)	2012-2013
dir	° (Nautical)	Dirección Media (Espectro Completo)	2012-2013
spr	°	Dispersión Direccional (Espectro Completo)	2012-2013
pdir0	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SEA)	2012-2013
pdir1	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SWELL_1)	2012-2013
pdir2	° (Nautical)	Dirección Principal (Componente SWELL_2)	2012-2013
phs0	m	Altura Significativa (Componente SEA)	2012-2013
phs1	m	Altura Significativa (Componente SWELL_1)	2012-2013
phs2	m	Altura Significativa (Componente SWELL_2)	2012-2013
ptp0	s	Periodo Pico (Componente SEA)	2012-2013
ptp1	s	Periodo Pico (Componente SWELL_1)	2012-2013
ptp2	s	Periodo Pico (Componente SWELL_2)	2012-2013
pspr0	°	Dispersión Direccional (Componente SEA)	2012
pspr1	°	Dispersión Direccional (Componente SWELL_1)	2012
pspr2	°	Dispersión Direccional (Componente SWELL_2)	2012

Los resultados obtenidos fueron agrupados en tablas e histogramas con frecuencia relativa de altura de olas para cada componente indicada, gráficos de frecuencia acumulada de altura de ola, tablas e histogramas con frecuencia relativa del período pico de olas para cada componente.

Asimismo, se han incorporado gráficos de dispersión del oleaje, donde se combina la altura de ola con el período. De esta manera se puede observar la distribución de cada componente del oleaje.

Se presentan también rosa de olas, en donde se muestra la distribución del oleaje por dirección y por rangos de intensidad, de manera tal de obtener una descripción visual cuantitativa muy clara del clima de olas oceánico en la zona de estudio. Por último se muestran series de altura de ola de cada componente, de manera tal de observar la evolución a lo largo del año y la relación con la intensidad del viento.

1.1 Resultados para el Nodo W0675S510.

Intervalo phs (m)	Frecuencia Relativa (%)		
	phs0	phs1	phs2
<0.5	11.32%	42.73%	89.65%
0.5-1	23.84%	38.46%	10.16%
1-1.5	23.78%	13.41%	0.19%
1.5-2	18.65%	4.13%	0.00%
2-2.5	11.51%	1.05%	0.00%
2.5-3	6.30%	0.20%	0.00%
3-3.5	2.91%	0.02%	0.00%
3.5-4	0.90%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.59%	0.00%	0.00%
>4.5	0.21%	0.00%	0.00%

Tabla: 1.1 Distribución de olas totales por componente, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

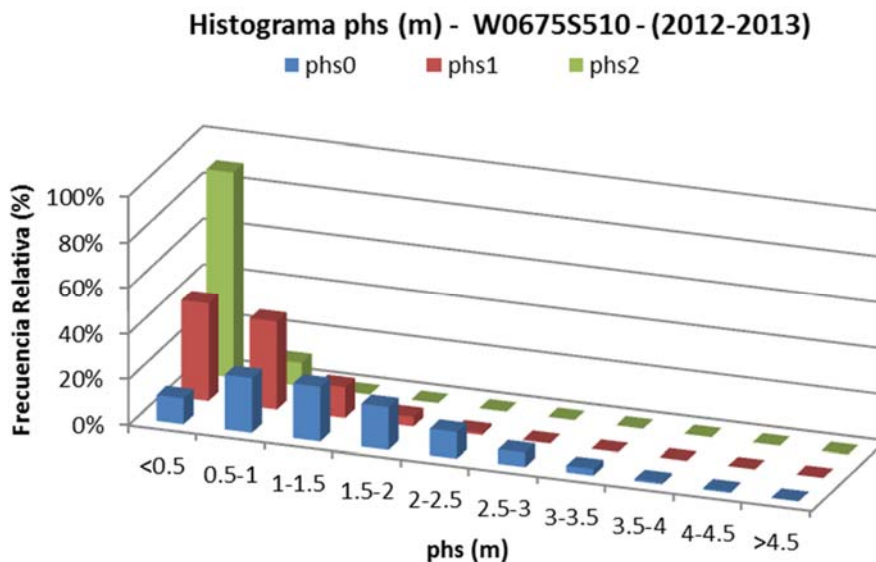


Figura N° 1.1 Histograma de altura significativa por componente, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

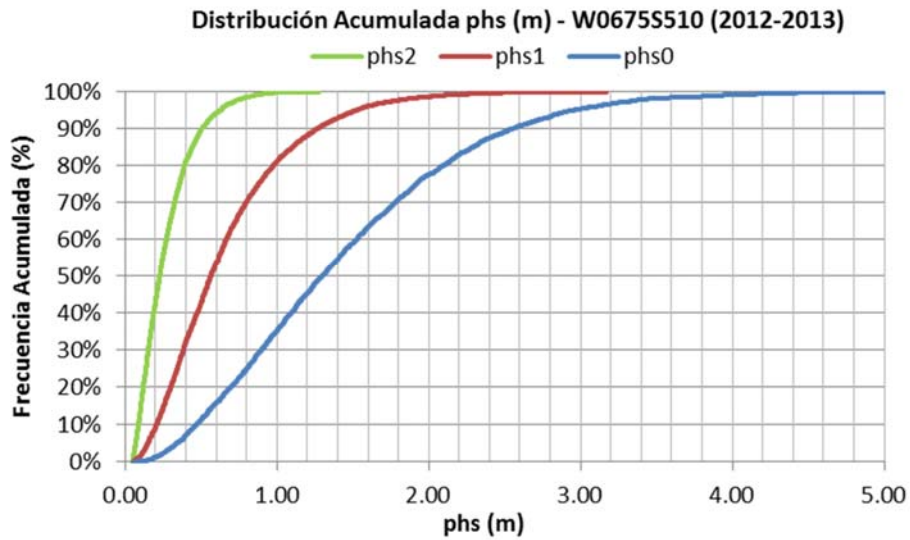


Figura N° 1.2 Diagrama de distribución acumulada por componente, nodo W0675S510.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

ptp (s)	Frecuencia Relativa (%)		
	ptp0	ptp1	ptp2
<2	0.63%	0.00%	0.00%
2-4	19.36%	1.37%	5.53%
4-6	48.58%	14.36%	14.99%
6-8	27.65%	29.96%	21.32%
8-10	3.68%	39.01%	32.31%
10-12	0.10%	12.56%	17.60%
12-14	0.00%	2.31%	5.58%
>14	0.00%	0.43%	2.66%

Tabla: 1.2 Distribución de periodos pico por componente, nodo W0675S510.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Histograma ptp (seg) - W0675S510 - (2012-2013)

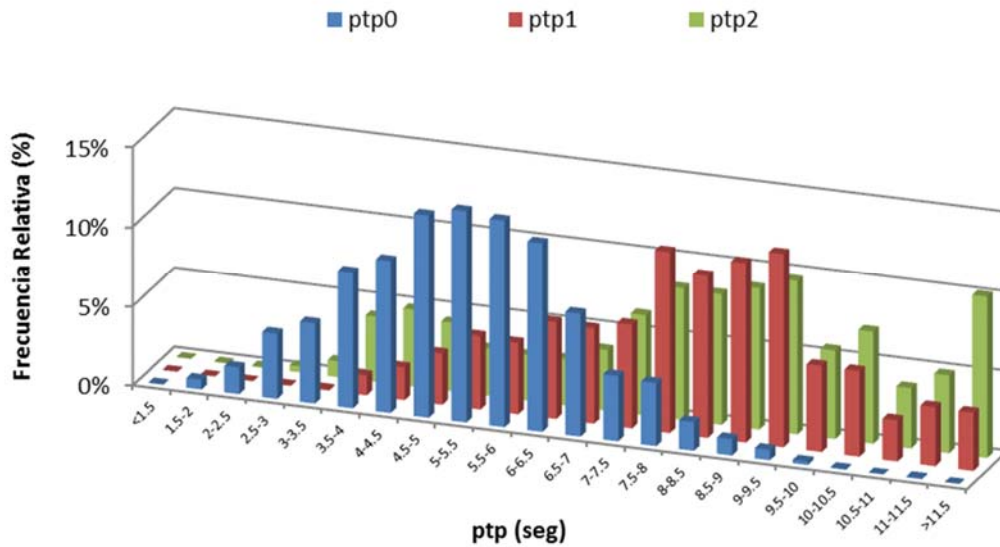


Figura N° 1.3 Histograma de periodos pico por componente, nodo W0675S510.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Distribución phs-ntp W0675S510 (2012-2013)

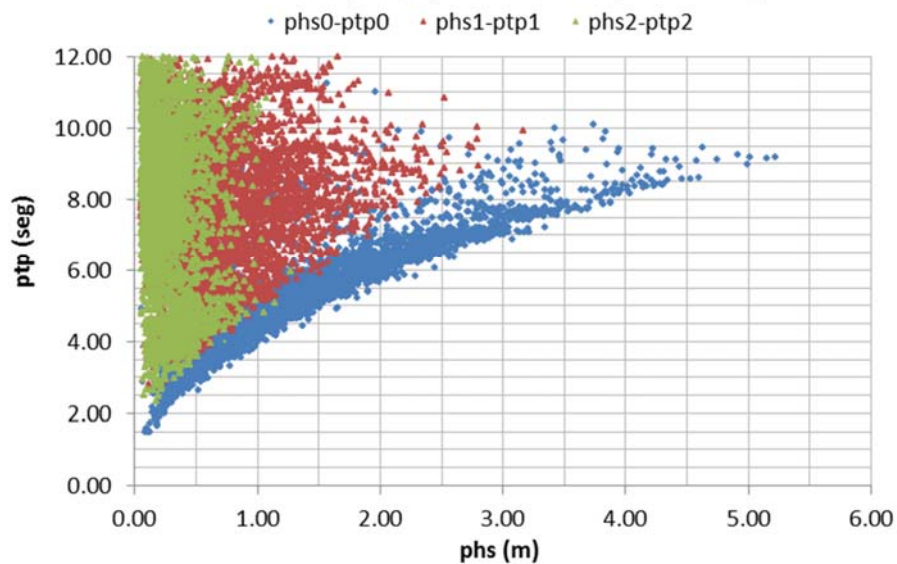


Figura N° 1.4 Dispersión del oleaje por componente, nodo W0675S510.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs0-pdir0 W0675S510 (2012-2013)

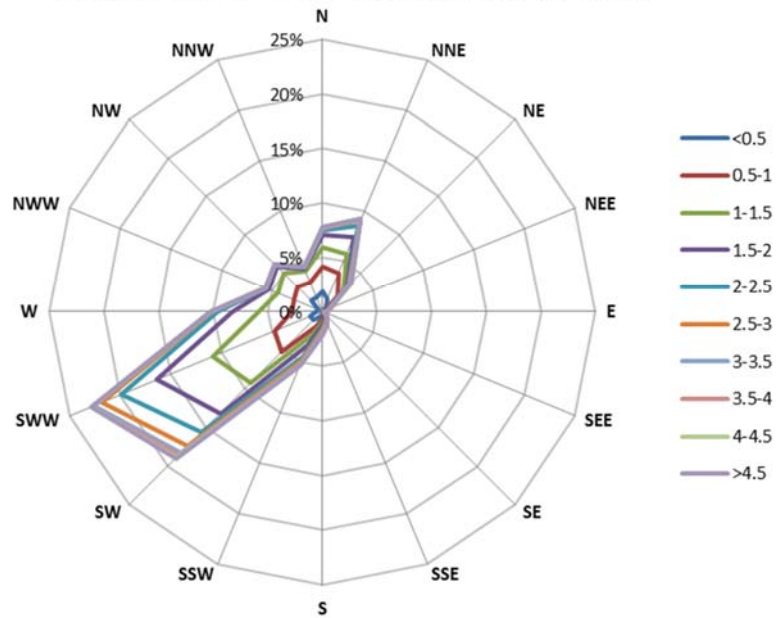


Figura N° 1.5 Rosa de Olas componente SEA, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs1-pdir1 W0675S510 (2012-2013)

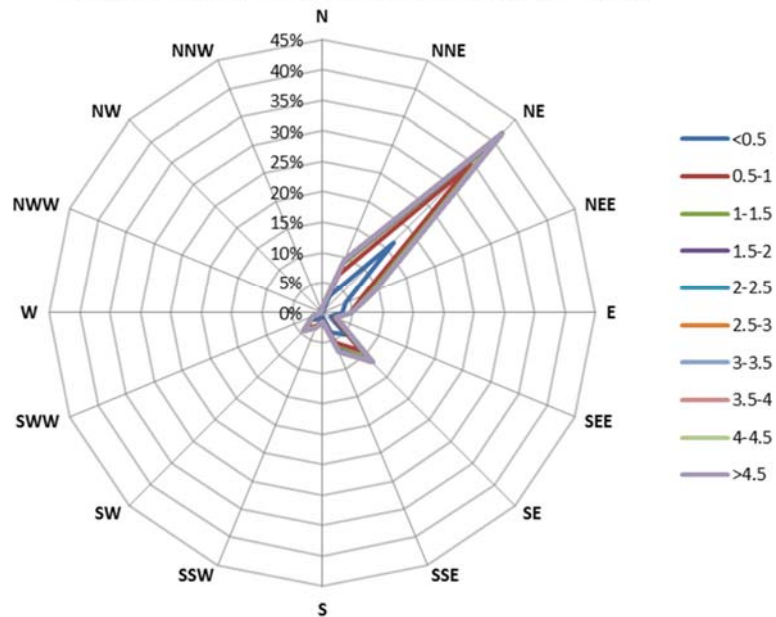


Figura N° 1.6 Rosa de Olas componente SWELL_1, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs2-pdir2 W0675S510 (2012-2013)

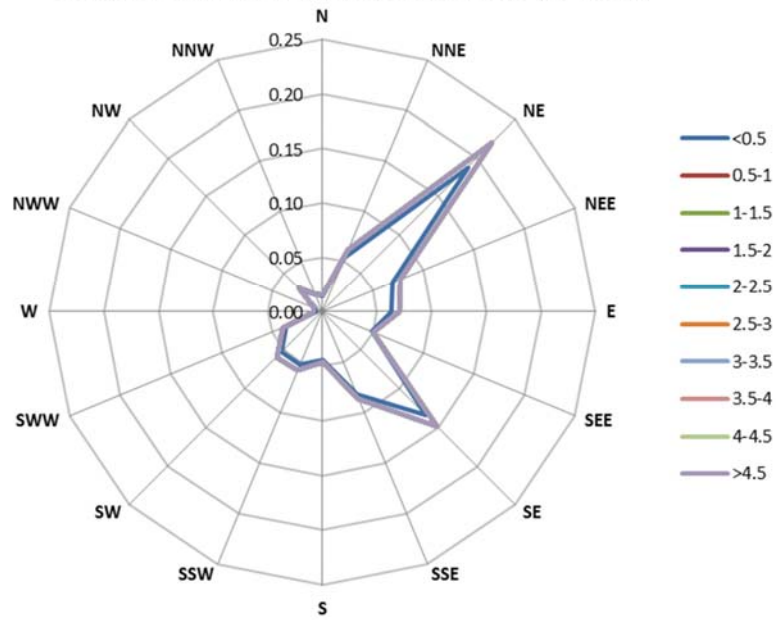


Figura N° 1.7 Rosa de Olas componente SWELL_2, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs-pdir W0675S510 (2012-2013)

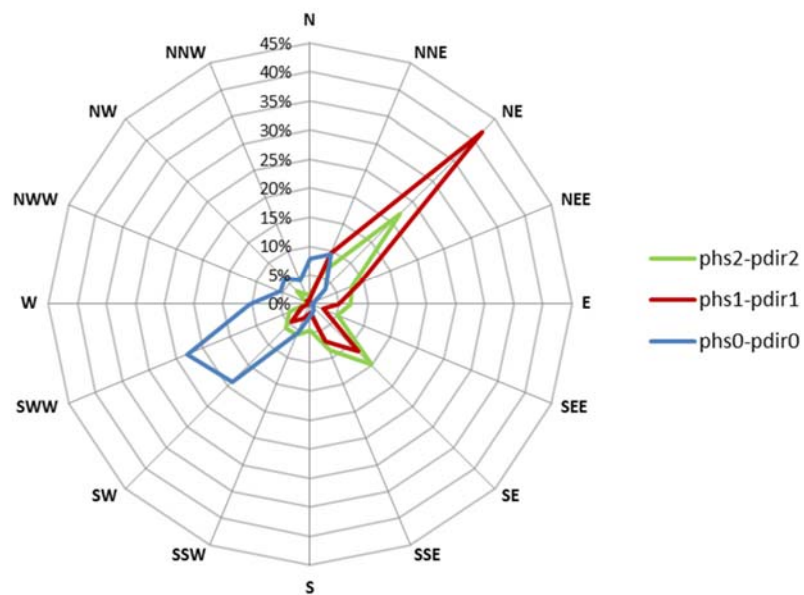


Figura N° 1.8 Rosa de Olas por componente, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

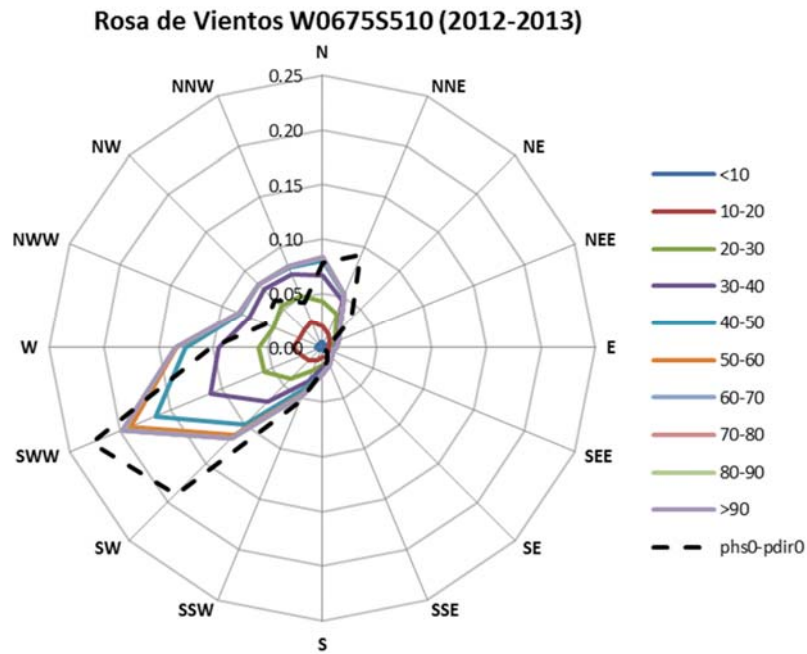


Figura N° 1.9 Rosa de Vientos vs Rosa de Olas para componente SEA, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

1.2 Resultados para el Nodo W0675S520.

Intervalo phs (m)	Frecuencia Relativa (%)		
	phs0	phs1	phs2
<0.5	7.88%	48.68%	94.02%
0.5-1	22.80%	32.12%	5.88%
1-1.5	24.41%	12.95%	0.10%
1.5-2	22.84%	4.73%	0.00%
2-2.5	12.82%	1.24%	0.00%
2.5-3	6.08%	0.27%	0.00%
3-3.5	2.41%	0.02%	0.00%
3.5-4	0.50%	0.00%	0.00%
4-4.5	0.22%	0.00%	0.00%
>4.5	0.04%	0.00%	0.00%

Tabla: 1.3 Distribución de olas totales por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Histograma phs (m) - W0675S520 - (2012-2013)

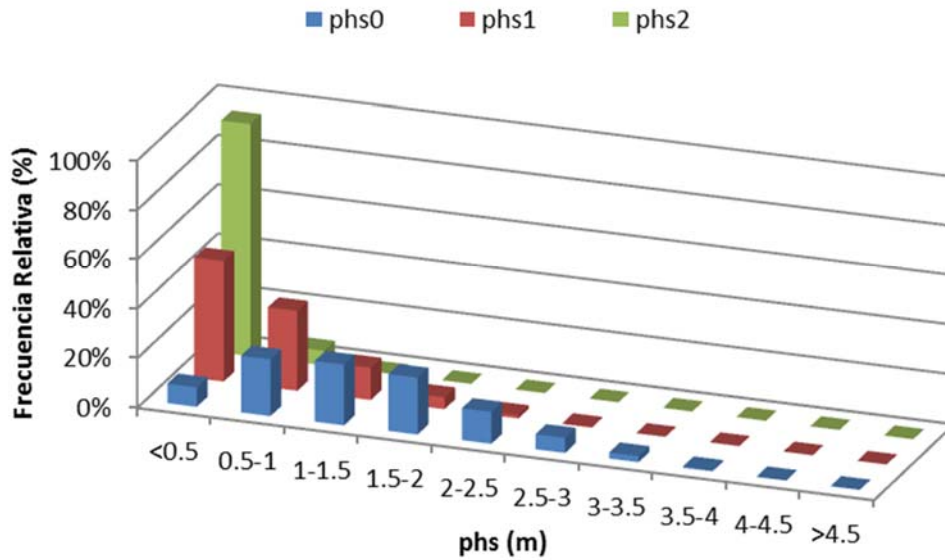


Figura N° 1.10 Histograma de altura significativa por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Distribución Acumulada phs (m) - W0675S520 (2012-2013)

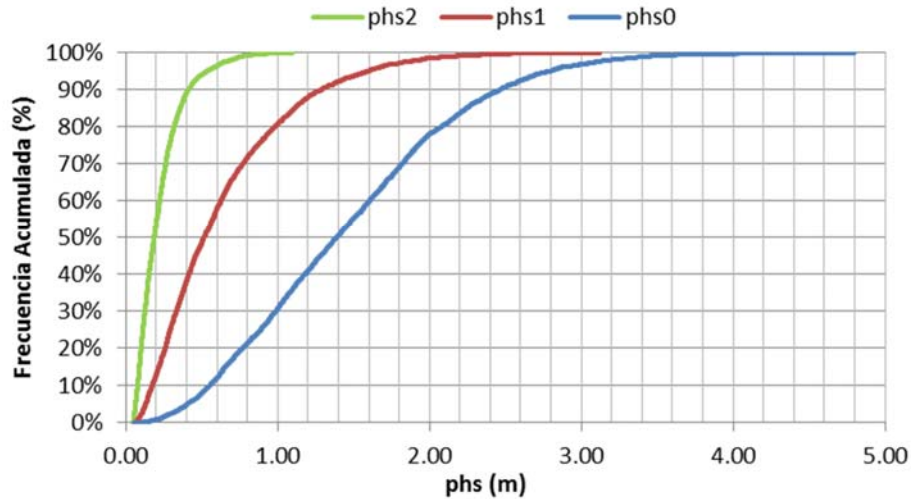


Figura N° 1.11 Diagrama de distribución acumulada por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

ptp (s)	Frecuencia Relativa (%)		
	ptp0	ptp1	ptp2
<2	0.30%	0.00%	0.00%
2-4	18.23%	1.16%	3.98%
4-6	53.93%	8.38%	9.24%
6-8	24.93%	31.71%	21.00%
8-10	2.61%	41.42%	36.15%
10-12	0.00%	14.30%	18.12%
12-14	0.00%	2.56%	7.68%
>14	0.00%	0.48%	3.82%

Tabla: 1.4 Distribución de periodos pico por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Histograma ptp (seg) - W0675S520 - (2012-2013)

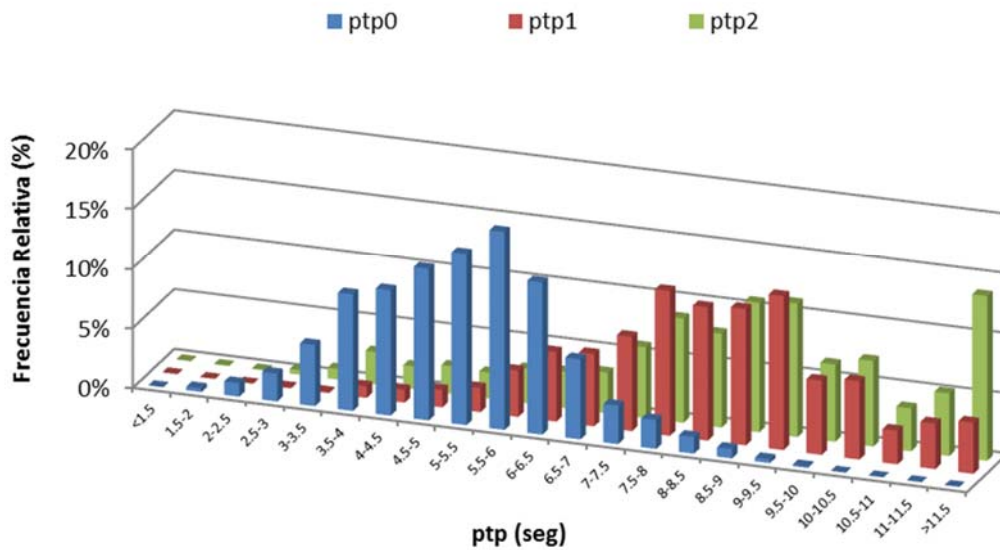


Figura N° 1.12 Histograma de periodos pico por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

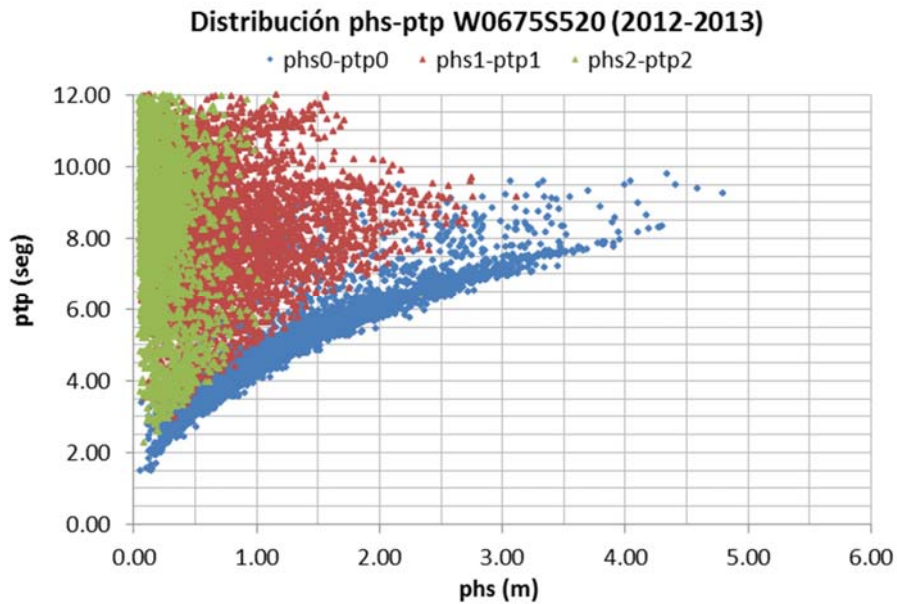


Figura N° 1.13 Dispersión del oleaje por componente, nodo W0675S510.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

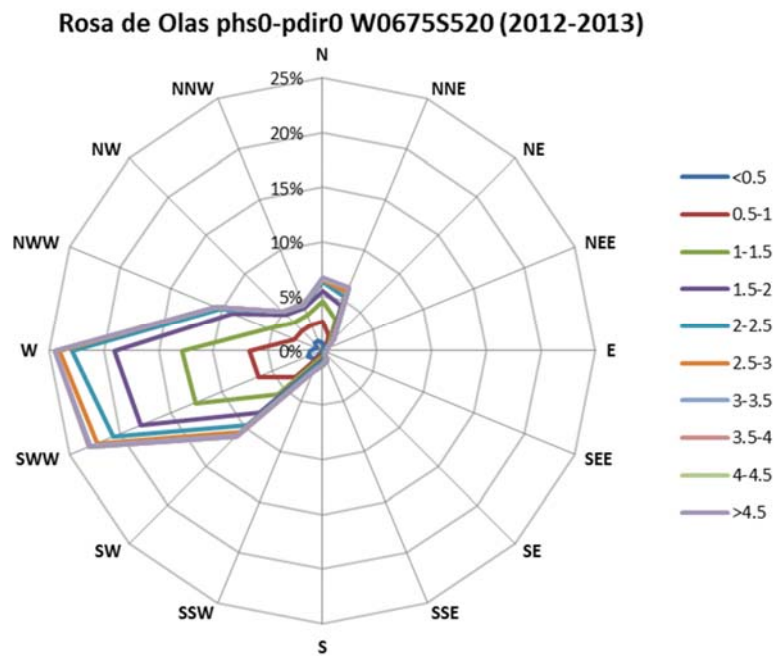


Figura N° 1.14 Rosa de Olas componente SEA, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs1-pdir1 W0675S520 (2012-2013)

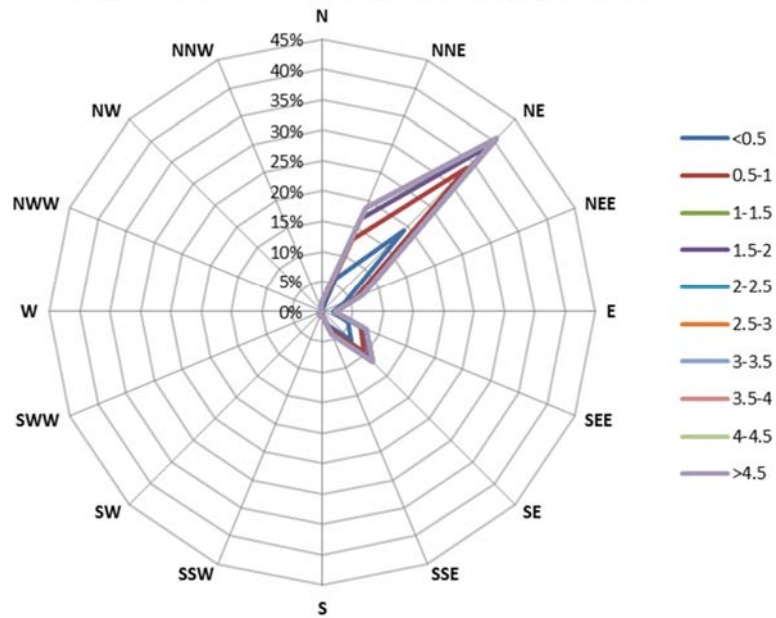


Figura N° 1.15 Rosa de Olas componente SWELL_1, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs2-pdir2 W0675S520 (2012-2013)

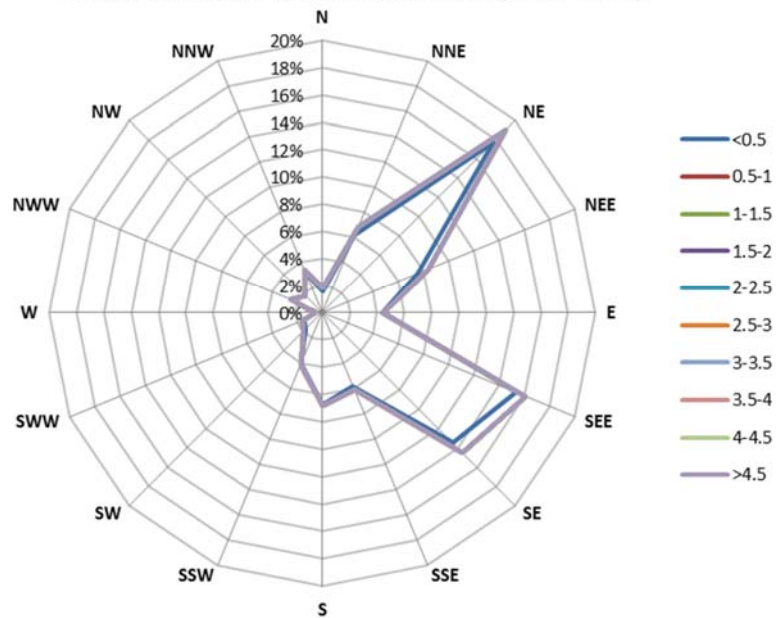


Figura N° 1.16 Rosa de Olas componente SWELL_2, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Rosa de Olas phs-pdir W0675S520 (2012-2013)

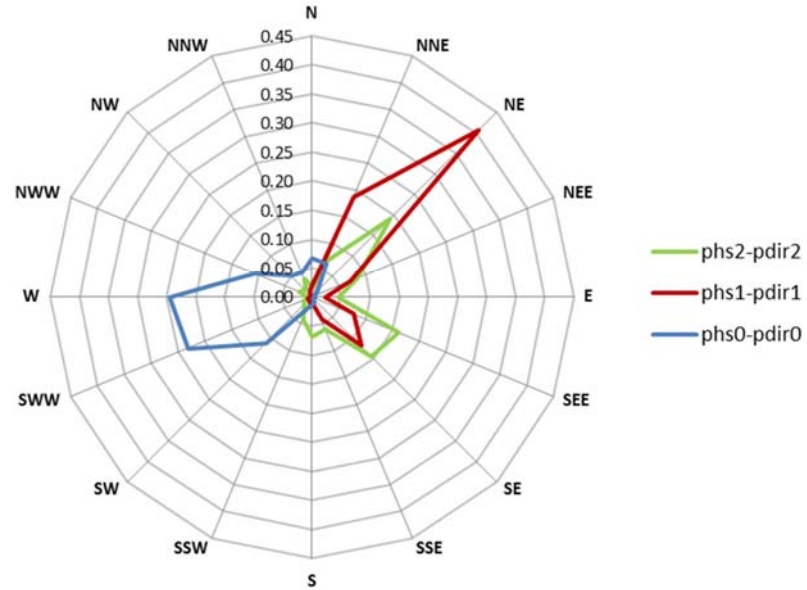


Figura N° 1.17 Rosa de Olas por componente, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

1.3 Series de oleaje para el Nodo W0675S510 y Nodo W0675S520.

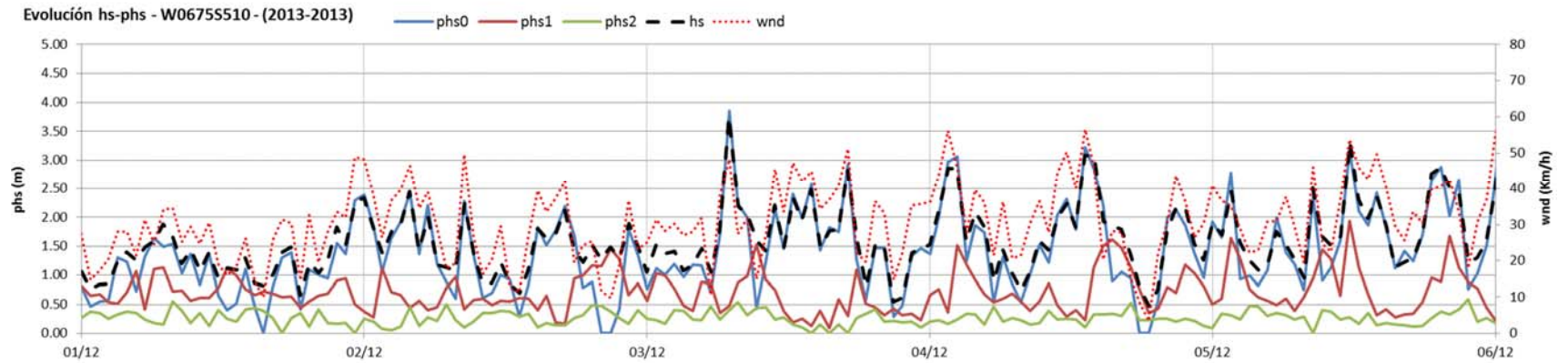


Figura N° 1.18 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S510. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

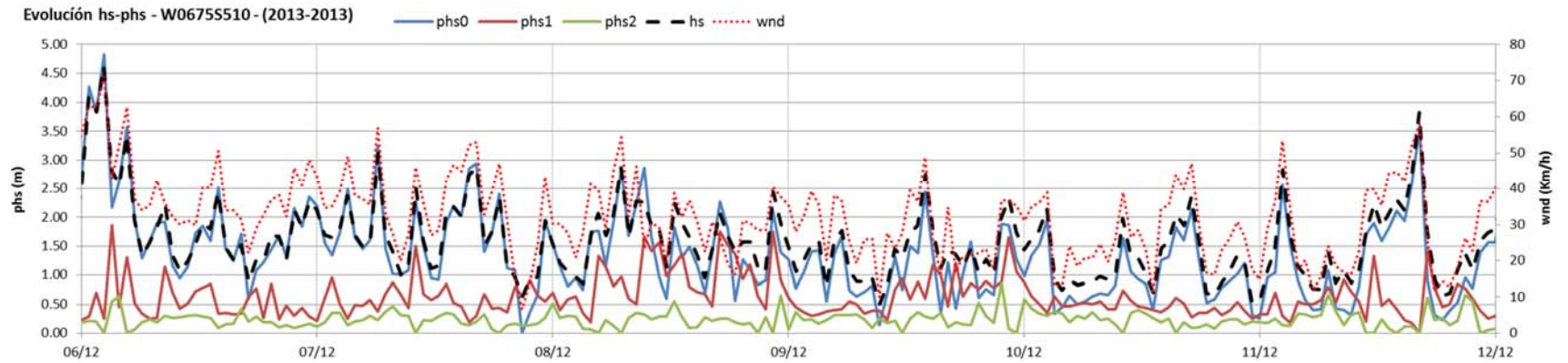


Figura N° 1.19 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S510. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

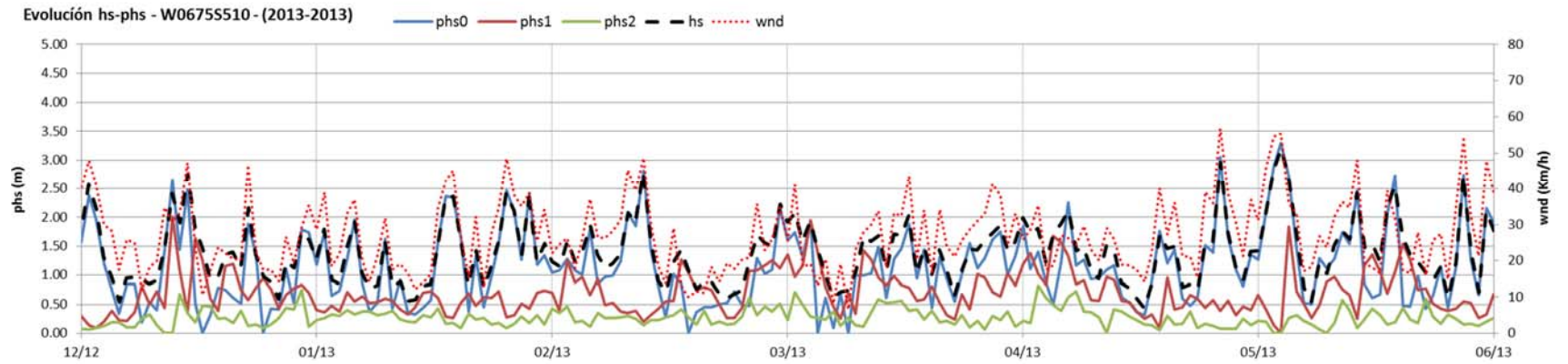


Figura N° 1.20 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S510. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

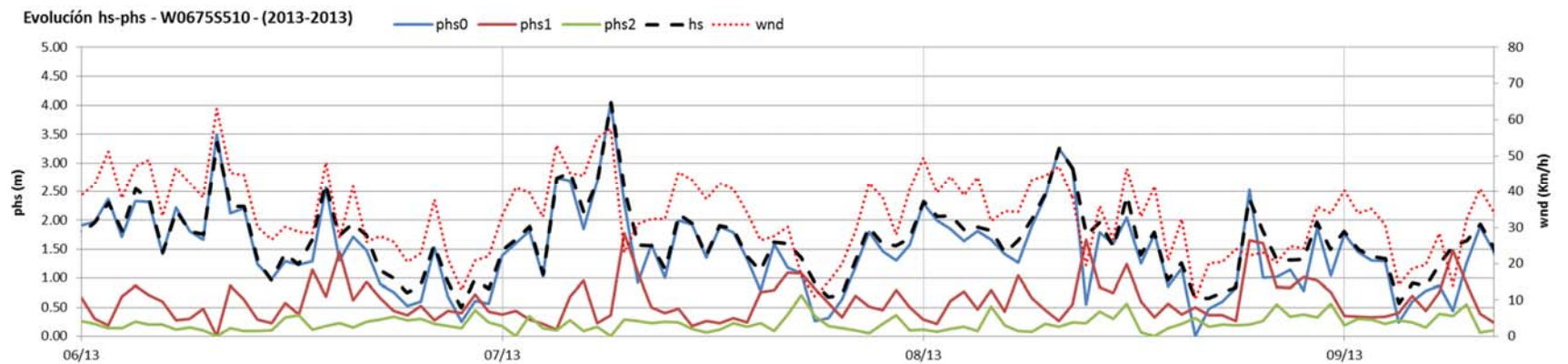


Figura N° 1.21 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S510. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

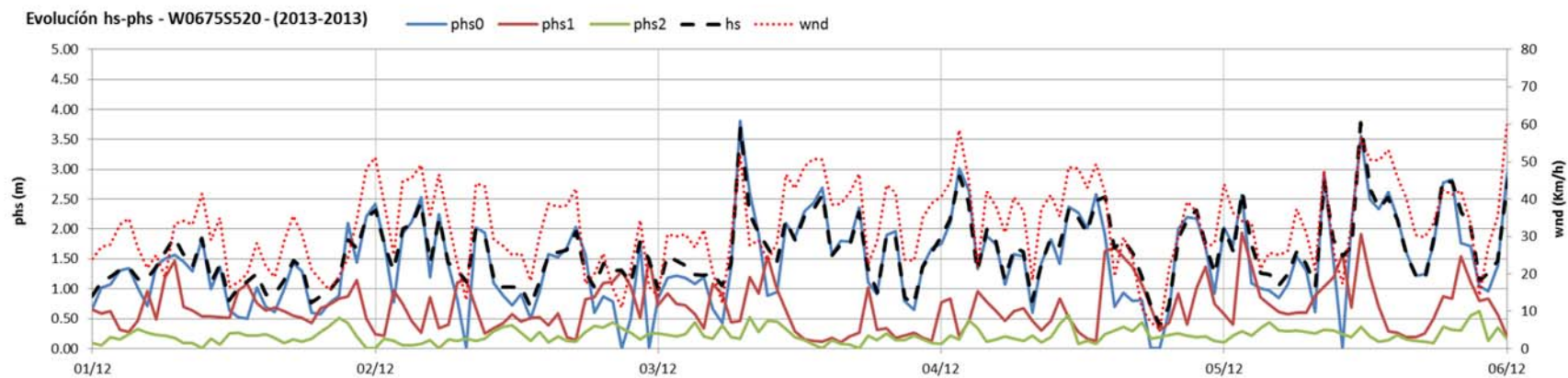


Figura N° 1.22 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S520. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

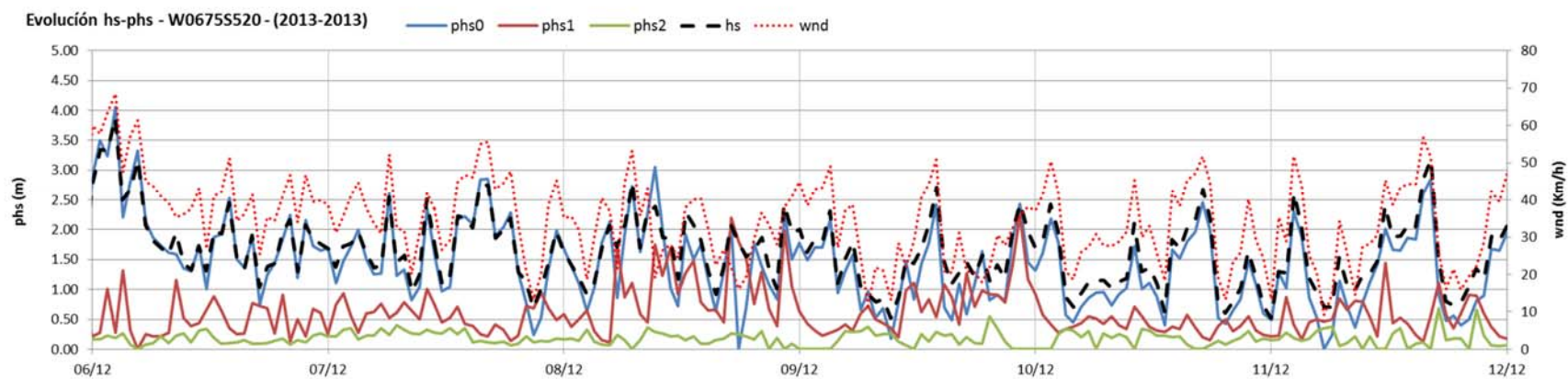


Figura N° 1.23 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S520. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

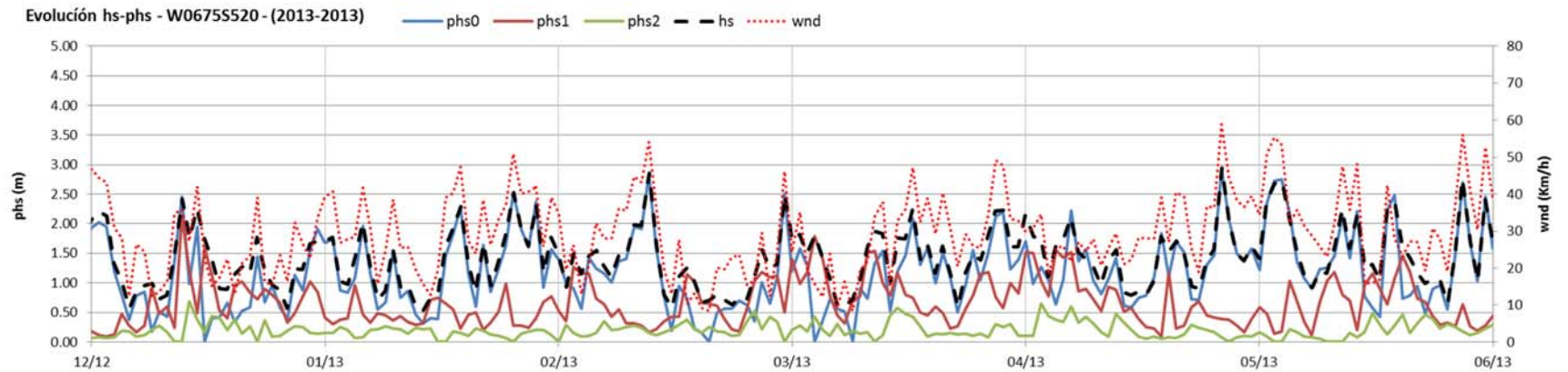


Figura N° 1.24 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S520. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

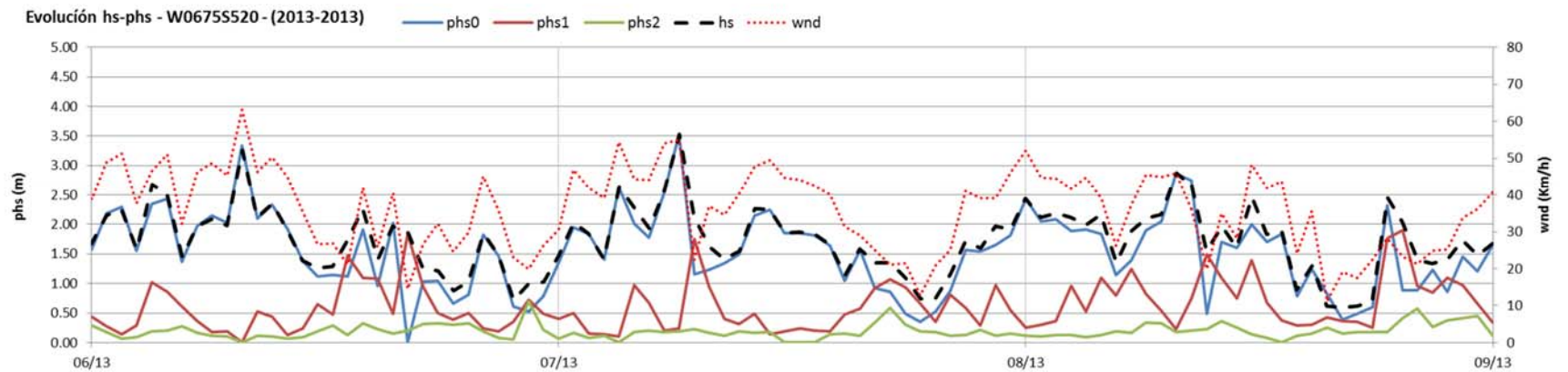


Figura N° 1.25 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0675S520. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

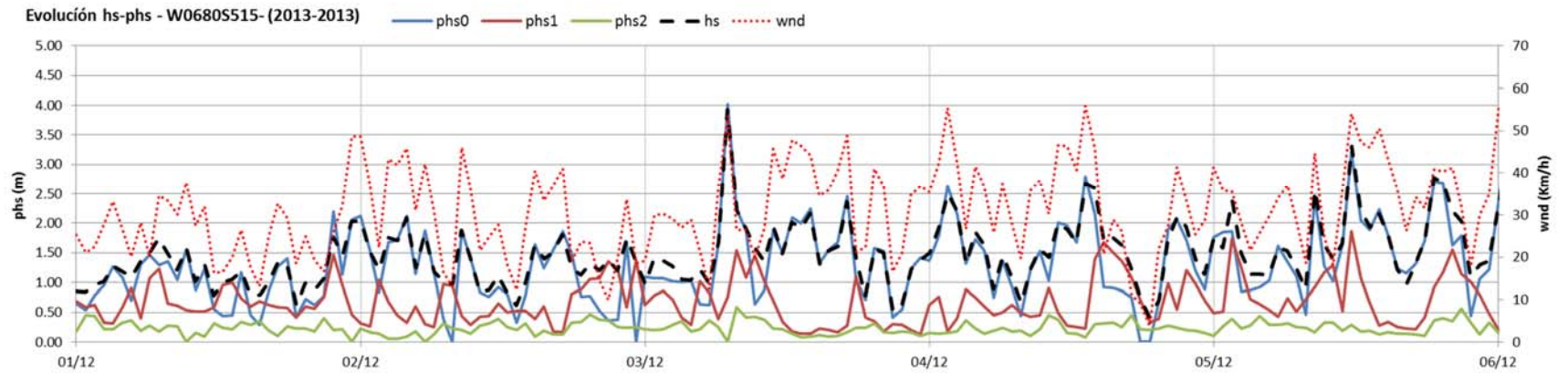


Figura N° 1.26 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

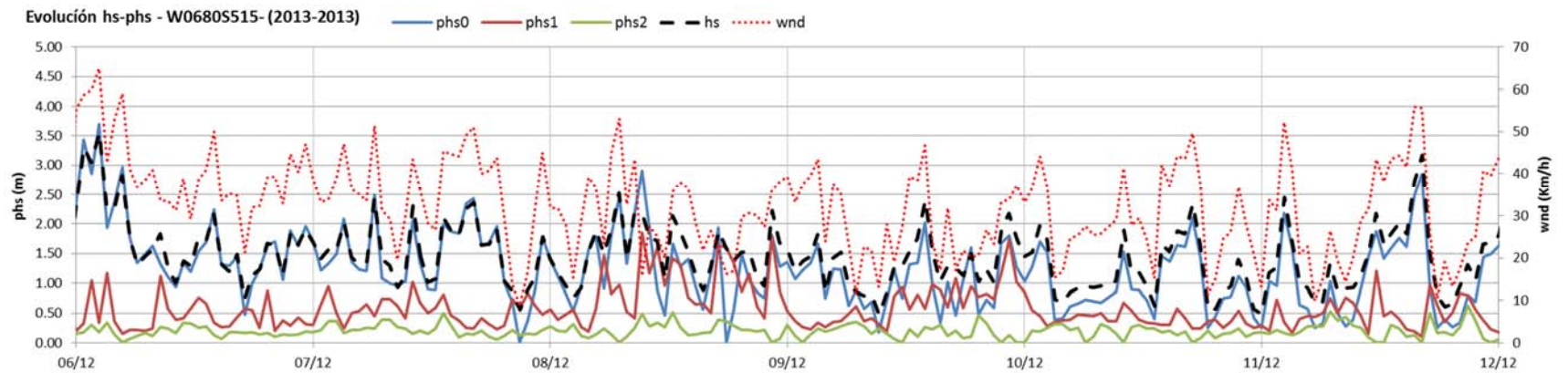


Figura N° 1.27 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

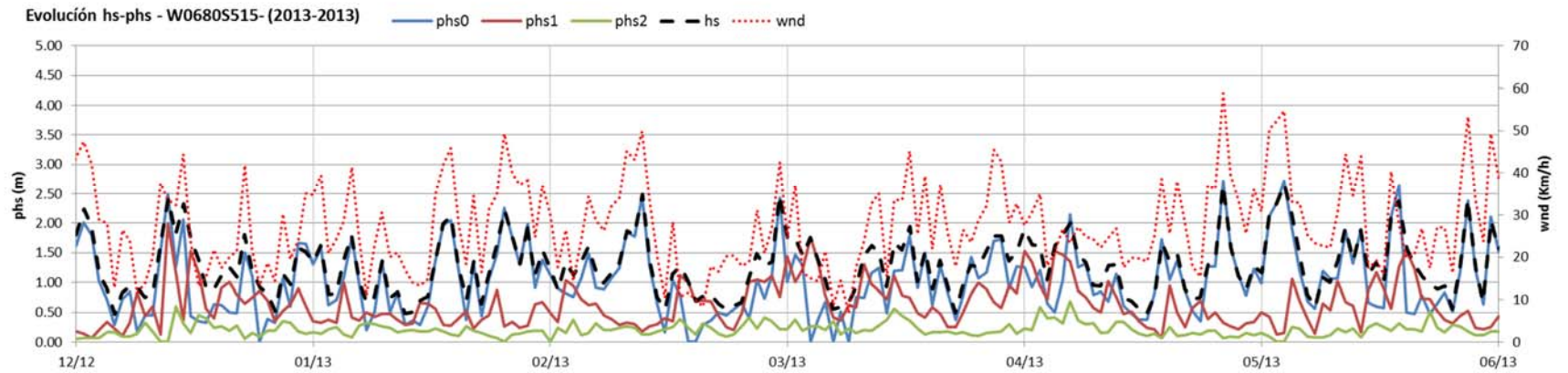


Figura N° 1.28 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

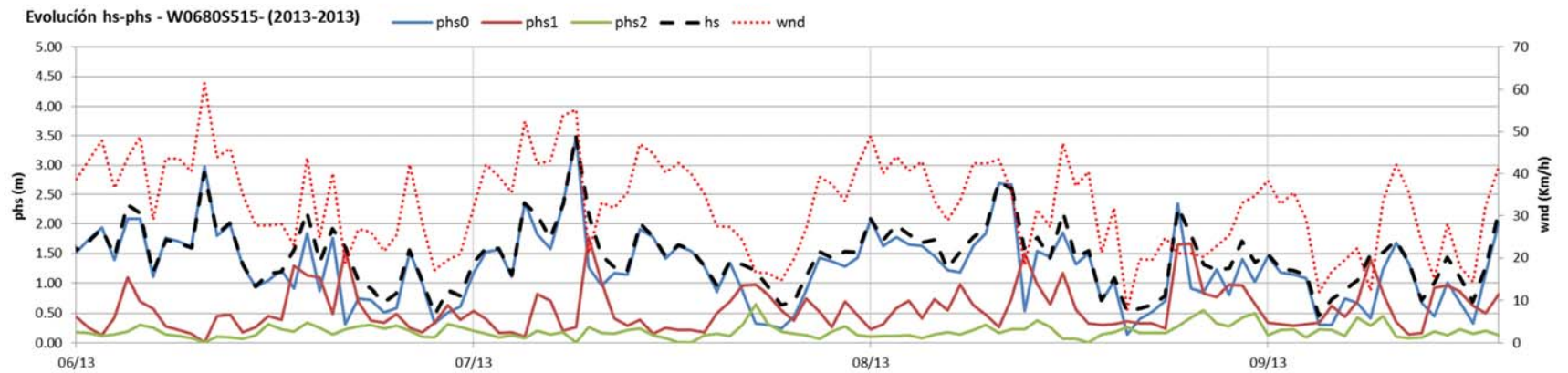


Figura N° 1.29 Evolución de la altura significativa por componente, nodo W0680S515. Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Anexo II: Base de datos de vientos. Comparación entre fuentes de información.

En el presente anexo se comparan en gráficos de rosas de vientos y diagramas de distribución de frecuencias relativas, las diferentes fuentes de información utilizadas para los campos de vientos.

Tal como fuera indicado en el capítulo 2.1, existe una gran concordancia entre los datos medidos y modelados.

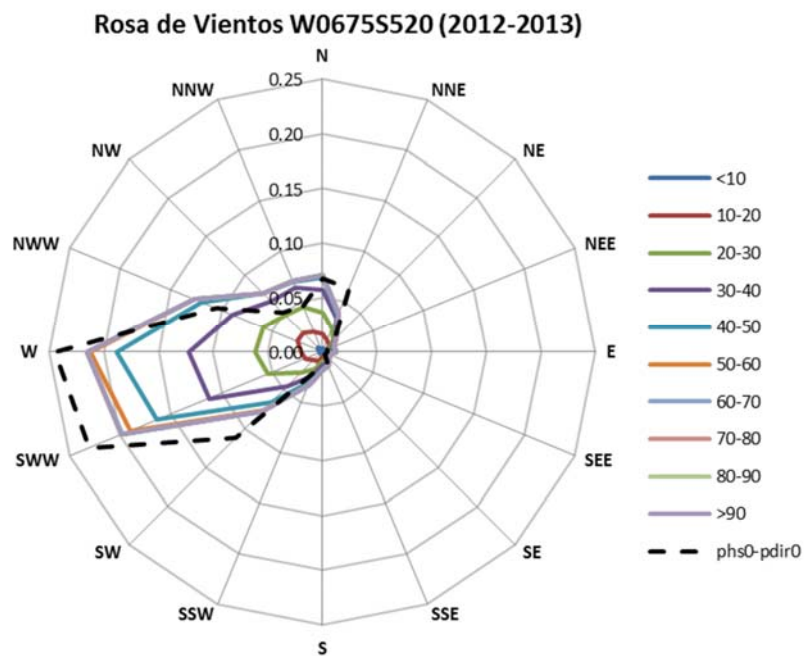


Figura N° 2.1. Rosa de Vientos vs Rosa de Olas para componente SEA, nodo W0675S520.
Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER.

Histograma wnd (Km/h) - (2012-2013)

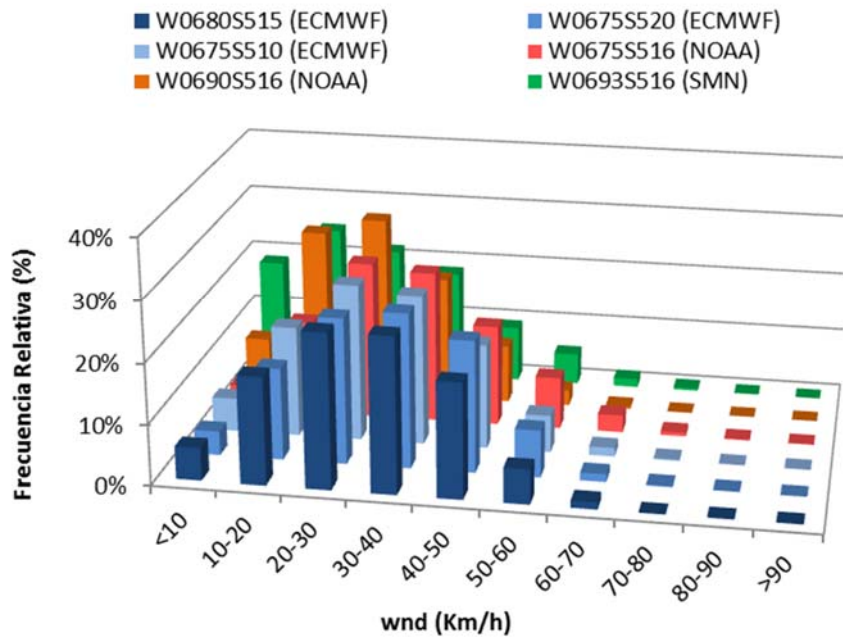


Figura N° 2.2. Histograma de intensidad de viento por nodo.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER – NCEP- SMN.

Distribución Acumulada wnd (Km/h) - (2012-2013)

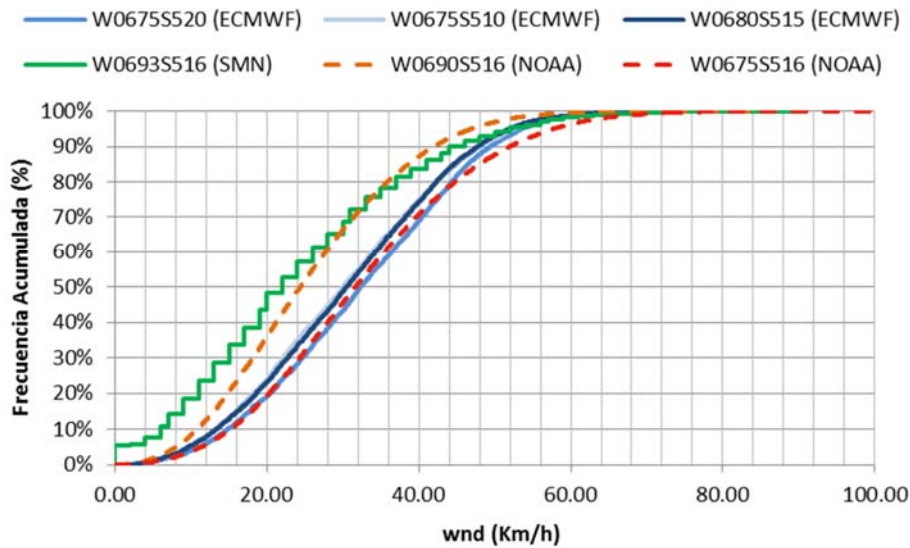


Figura N° 2.3. Distribución acumulada de intensidad de viento por nodo.

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER – NCEP- SMN.

Rosa de Vientos W06750S516 - NCEP - (2012-2013)

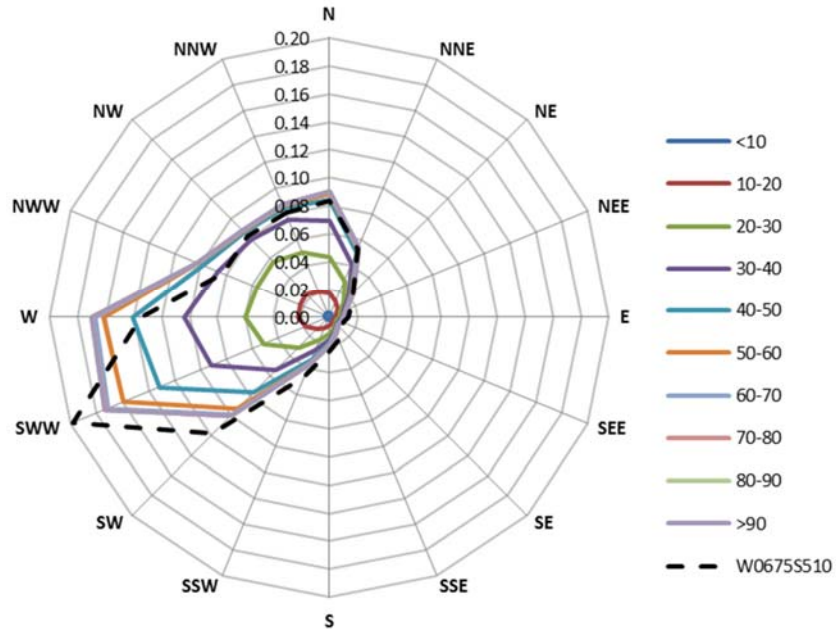


Figura N° 2.4. Rosa de Vientos nodo W0675S516 (NCEP) vs W0675S510 (ECMWF)

Fuente: Datos procesados en base al proyecto IOWAGA, IFREMER – NCEP.

Rosa de Vientos W0690S516 - NCEP - (2012-2013)

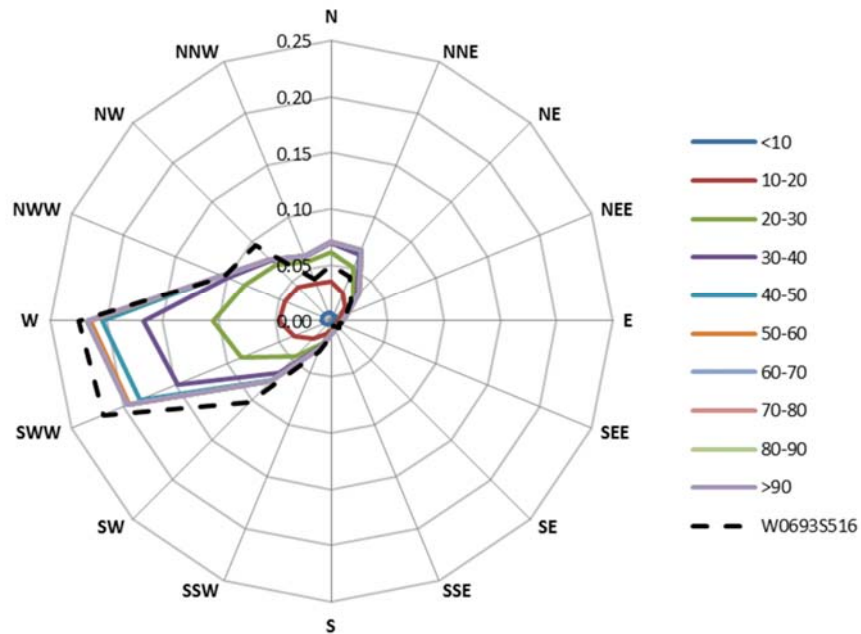


Figura N° 2.5. Rosa de Vientos nodo W0690S516 (NCEP) vs W0693S516 (SMN)

Fuente: Datos procesados en base al proyecto NCEP – SMN.

Anexo III: Mapas. Resultados modelación