



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

**Evaluación del potencial energético de las olas en la
plataforma continental de Tierra del Fuego,
Argentina**

Tesista: Lic. Ana Julia Lifschitz

Director: Dr. Walter C. Dragani

Lugar de trabajo:

*Departamento Oceanografía
Servicio de Hidrografía Naval
Ministerio de Defensa
Av. Montes de Oca 2124, Ciudad Autónoma de Buenos Aires*

Septiembre, 2010

Agradecimientos:

Walter: te quiero agradecer profundamente que me aceptaras como becaria, siendo mi director de beca. Te agradezco todas las explicaciones y toda la paciencia que me tuviste. Fue realmente una muy buena experiencia trabajar contigo. Gracias!!!!

Me gustaría agradecer también a la fundación YPF por otorgarme la Beca Estenssoro con lo cual pude hacer la Maestría en Ciencias Ambientales. También agradezco al Servicio de Hidrografía Naval (SHN) por permitirme trabajar en sus instalaciones y usar las computadoras.

A mis padres, que caminan siempre a mi lado...

Y a mi queridísima hermana y hermanos, con sus flías y mis bellos sobrinos.

ÍNDICE

Resumen	5
1. Introducción	7
1.1 Objetivos	11
1.2. Descripción ambiental del área de estudio	12
2. Descripción de algunos dispositivos utilizados para la conversión de energía de olas	15
2.1. Clasificación de dispositivos	18
2.1.1. Dispositivos fijos	
2.1.2. Dispositivos flotantes	18
3. Datos	21
3.1. Análisis estadístico de alturas, períodos y direcciones de olas	32
3.2. Distribuciones bidimensionales de Hs y T	38
3.3. Discusión	42
4. Mecánica de las olas. Breve reseña histórica	45
5. Modelo Numérico	50
5.1. Descripción del modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore)	50
5.2. Forzantes del modelo. Reanálisis del NCEP/NCAR	55
5.3. Barimetría	56
5.4. Validación	57
5.4.1. La Misión Exterior	57
5.4.2. La Misión Interior	59
5.5. Condiciones iniciales y de borde	60
5.5.1. Conclusiones parciales	62
6. Campos medios de Alturas, Periodos y Direcciones	64
6.1. Campos medios Climatológicos	64
6.2. Campos estacionales	66
6.3. Campos mensuales	69
6.4. Campos anuales	71
6.5. Conclusiones Parciales	73
7. Potencia de las olas	75
7.1. Variabilidad estacional de la potencia	75

7.2. Campos mensuales de potencia	76
7.3. Campos anuales	77
7.4. Conclusiones parciales	78
8. Estudio del impacto ambiental (IEA)	79
8.1. Lineamientos básicos para realizar un IEA	79
8.1.1. Dispositivos costeros	81
8.1.2. Dispositivos 'offshore'	81
9. Discusión y conclusiones	83
10. Referencias Bibliográficas	87

RESUMEN

La creciente demanda de energía para satisfacer las necesidades de la población mundial está impulsando estudios sobre la proyección de la cantidad de energía requerida para los años venideros, junto con la asignación de costos y beneficios de producción. Los resultados de algunos estudios propenden a la continua necesidad de exploración y utilización de fuentes de energía alternativas y formas de producción eficientes en vistas de cubrir la demanda futura. A su vez, las nuevas ofertas de energía deben estar acompañadas con mecanismos de abastecimiento, almacenaje, transporte y distribución. Actualmente se están buscando nuevas fuentes energéticas sin impactos negativos sobre el medio ambiente. Es aquí cuando surgen los conceptos de energía sustentable y de energía limpia y, consecuentemente, el de un sistema de producción con la minimización de cualquier contaminación o con la posibilidad de gestión para procesar los residuos peligrosos para nuestro planeta. Entre todas las energías limpias disponibles, la asociada a la dinámica de las olas parecería ser una alternativa viable para localidades costeras con demanda moderada. Para ello, la industria ha desarrollado y continúa investigando distintos dispositivos capaces de transformar la energía oceánica de las olas en un recurso energético aprovechable para la población.

Un requisito primario para que la energía asociada a las olas sea sustentable, eficiente y viable es que el clima de olas de la región de interés ofrezca alturas, direcciones y periodicidades del oleaje apropiadas para que la energía aprovechable sea comparable, o al menos no mucho menor, a la demanda. En esta Tesis de Maestría se investigó el clima de olas en la plataforma fueguina con el objeto de evaluar cuantitativamente su potencial energético. Dado que las observaciones directas de olas poseen una cobertura espacio-temporal limitada el presente 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 ha sido convenientemente implementado y validado con las observaciones de campo disponibles en el Servicio de Hidrografía Naval. El período modelado en este estudio se extiende desde enero de 1971 hasta diciembre de 2005.

Dado que los vientos predominantes en la región son del sector oeste, los campos de alturas medias de olas presentan por lo general un aumento monótono hacia el este, mostrando alturas y períodos mínimos en la zona costera y valores crecientes hacia el talud continental. Por otro lado, dichos campos muestran una leve variabilidad interanual respecto de la media correspondiente al período modelado (1971-2005).

Se concluye que la mayor disponibilidad de potencia (más de 60 KW por unidad de longitud de cresta: KW/m) se encuentra “offshore”, a más de 100km de distancia de la costa. Por el contrario, cerca de la costa, la potencia teórica es inferior a 20 KW/m. Se puede apreciar que la potencia se distribuye bastante regularmente a lo largo de todo el año. Por esta razón, desde el punto de vista del aprovechamiento energético, los dispositivos más convenientes de generación de energía eléctrica a partir de las olas serían aquellos diseñados para ser proyectados lejos de la costa. Pero, por otro lado, estos tienen la desventaja del consecuente costo adicional que significaría el transporte de energía hacia el continente.

Finalmente, considerando la baja densidad poblacional de la costa fueguina (en la isla de Tierra del Fuego existen tan solo dos ciudades: Río Grande, sobre la margen izquierda del río que le da nombre, y Ushuaia, emplazada al oeste del canal Beagle) y la relativamente baja cantidad de energía de olas aprovechable cerca de la costa, esta fuente energética parecería ser tan sólo un recurso secundario capaz de abastecer un pequeño porcentaje de las necesidades de la región. En ese sentido, se plantea la necesidad de evaluar, en una etapa futura, si la energía de olas disponible sería suficiente como para abastecer (total o parcialmente) o, al menos, contribuir como fuente de energía secundaria para la iluminación urbana (de calles y espacios públicos) de la ciudad de Río Grande.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento incesante de la demanda de los recursos energéticos y el paulatino agotamiento de los recursos naturales ha conducido a la comunidad científica a considerar el aprovechamiento de fuentes energéticas alternativas renovables y limpias, tales como las derivadas del Sol, del viento y del océano que si bien, no podrían reemplazar a las energías convencionales, contribuirían a una utilización más racional de estas últimas y a una mejor preservación de nuestro ambiente, de acuerdo al nuevo concepto ecológico. Aunque aparentemente sean recursos abundantes, no bastan aún para que puedan ser vistos como una opción. La accesibilidad a tecnologías y mercados, los estudios sobre la cuantía y la potencialidad de las energías renovables deberían ser aspectos incentivados e impulsados desde el Estado.

Si bien la tecnología para captar la energía oceánica existe, el ambiente hostil y las dificultades que implican las operaciones en el mar hacen que su extracción no resulte una tarea sencilla. Las fuentes son muy variadas e incluyen las olas, las corrientes oceánicas, el gradiente térmico y la amplitud de la marea. Cada una de estas posibilidades representa una considerable inversión de capital y posee sus propias limitaciones y problemas de implementación. Para el caso de la energía de las olas, el movimiento permanente de la superficie del mar bajo la forma de ondas generadas por el viento constituye una posible fuente aprovechable de energía. Las olas se propagan hacia la costa y se disipan en rompientes generando la compleja dinámica litoral. Algunos sistemas generadores tienen una producción intermitente, otros necesitan costosos sistemas de almacenamiento pero todos deben estar en fase con la infraestructura económico-social proporcionada por las tecnologías convencionales. En principio, la física de funcionamiento de los convertidores de energía es simple, primeramente, las olas permiten poner en marcha turbinas generadoras de energía, luego, la electricidad producida se transporta por cables submarinos hacia la costa para, finalmente, enlazarse con la red eléctrica.

Es evidente que de todas las formas de energía disponibles en el mar sólo serán posibles de utilizar aquellas que se adecuen a las restricciones que imponga la propia región de interés. Por ejemplo, para la conversión de la energía de las olas se requiere

que la zona cuente con un adecuado promedio anual de velocidades del viento, así como una buena exposición de la costa frente al mar. El impacto sobre el medio ambiente depende de la escala de la actividad de conversión. En los casos de proyectos en donde la potencia liberada a la red está entre los 40 y 100 MW (10^6Js^{-1}), el impacto ambiental esperado es relativamente bajo. Si el proyecto alcanza o supera los 1000 MW el impacto será mayor y, posiblemente, no sea benigno.

El oleaje representa una de las fuentes dominantes de energía en gran parte de las zonas costera, interviniendo de manera significativa en la circulación, el transporte de sedimentos y la evolución de las costas, entre otros factores (Wright and Coleman, 1973, citado en Restrepo *et al.*, 2009). De esta manera es muy probable que la instalación de dispositivos para la conversión de energía de la ola en electricidad pueda influir en el mismo régimen costero de olas y en otros factores como la biota, la navegación y en la estética visual.

Los grandes sistemas de conversión pueden, paradójicamente, reducir la energía de las olas que llegan a la costa y alterar así el natural transporte de arena. Con respecto a ese punto, las costas y las riberas constituyen un valioso recurso natural y, por consiguiente, deben ser conservadas y protegidas. Pero, frente al crecimiento demográfico, tecnológico e industrial, los encargados de la gestión y el manejo costero se encuentran actualmente ante un conflicto que se debate, por un lado, entre el mejoramiento y el desarrollo de la infraestructura costera y, por el otro, en la prevención de los posibles impactos de origen natural y/o antropogénico. Entre los naturales pueden mencionarse el aumento del nivel medio del mar, el efecto de las tormentas y la erosión y, entre los antropogénicos, la desestabilización de la costa por uso recreativo, el vertido de basuras y contaminantes (sólidos y líquidos), el escurrimiento pluvial mal diseñado y la construcción de todo tipo de estructuras costeras para fines tan diversos como la protección, la mejora de puertos, el dragado o la construcción de centrales energéticas. Afortunadamente, en la actualidad, la gestión del ambiente costero trata de pasar de la resolución directa de problemas a la planificación para evitarlos.

El aprovechamiento de la energía de las olas varía con la posición geográfica y presenta cambios diarios, mensuales, estacionales y anuales y, a la fecha, no se conoce con precisión la cantidad que se podría suministrar sostenidamente a un precio económico. A modo de ejemplo, algunos dispositivos se utilizan localmente en sitios con pequeña demanda eléctrica y complementan otras fuentes tradicionales de energía. Se ha estimado, por ejemplo, que la potencia media de las olas por unidad de ancho de playa en Comodoro Rivadavia sería de 13.8 KW/m (Pousa *et al.*, 1995). Otro ejemplo se da en Gran Bretaña, donde la energía de las olas ha sido objeto de investigaciones y de estudios profundos. La fuente teórica se estima en 700 TW h por año, pero el potencial técnicamente utilizable se limita a 87 TW/h por año (<http://energiesnouvelles.free.fr/>). Muchos prototipos, desde unos pocos KW hasta 2 MW (Thorpe, 1995) han sido testeados en virtud de la investigación y del desarrollo, pero ninguno ha podido llegar a la etapa de ensayos industriales, aunque una producción masiva de energía podría lograrse con la interconexión de varios dispositivos. Luego, estos convertidores se deben diseñar para ser compatibles con el ambiente, es decir, sin que produzcan contaminación acústica ni visual, y además, sin generar residuos. En ese sentido, se cree que la energía undimotriz (es decir, la generada por las olas) es la fuente renovable que menos impactos tiene sobre el medio (Beyene and Wilson, 2008).

A partir del dramático incremento del precio del petróleo en 1973, el aprovechamiento de la energía generada por las olas está en una etapa de estudio y experimentación intensiva en todo el mundo (<http://www.iea.org/>, Lemus, 2003). Lo cierto es que la generación de energía a partir de las olas es una de las energías renovables menos utilizadas y pocos países han invertido en estas instalaciones. En muchos lugares del mundo, como en Asia, la demanda de electricidad crece rápidamente cada año y se están desarrollando diversos planes para la construcción de centrales eléctricas que utilizan energía marina. Los países de rápida expansión tales como China e India se encuentran entre los que investigan el uso comercial de la energía generada por las olas. El Centro Europeo de Energía Marina (EMEC), (situado en Escocia y creado en 2003), se encarga de evaluar potenciales generadores de energía de olas. Actualmente, los funcionarios de la UE estiman que la energía obtenida del mar generará electricidad suficiente para abastecer casi un millón de

hogares en el mundo industrializado (www.erenovable.com). Un país que puede considerarse pionero en la investigación de la energía de las olas es España al haber instalado en sus costas una de las primeras plantas generadoras en Europa (González Vélez, 2009). Luego de varios estudios y simulaciones se llegó a la conclusión que la comunidad autónoma española con mayor potencial en este tipo de energía es Galicia.

Se proyecta iniciar la construcción de una plataforma de aprovechamiento energético que se estima tendrá relevancia mundial. Este emprendimiento se ubicará en las costas de Lemoiz (un municipio costero perteneciente a la provincia vasca de Vizcaya, España). El proyecto tendrá una inversión de entre 15 a 20 millones de euros y generará 200 puestos de trabajos (diario El Mundo, País Vasco, 11/07//2009). Por otro lado, el alcalde de San Francisco (USA), Gavin Christopher Newsom, se ha mostrado sumamente entusiasmado con la posibilidad de generar energía a partir de las olas en la costa de esta ciudad. Según Newsom este proyecto podría generar entre 10 y 30 MW, con un potencial de hasta 100 MW y dará origen a más de 100 puestos de trabajo.

El Gobierno de Brasil tiene la iniciativa de construir una planta piloto para producir energía eléctrica a partir de las olas. Este emprendimiento está basado en un estudio realizado por la Universidad de Río de Janeiro, la cual ha llegado a la conclusión que esta forma de aprovechamiento podría generar el 15% del total de la energía requerida por Brasil. En Portugal los científicos han realizado experimentos con la tecnología resultante de la acción del viento en el mar y, según un estudio del Centro de Energía de las Olas (CEO), podría suministrar (en teoría) cerca de la quinta parte de la electricidad consumida por ese país. Como proyecto piloto se instaló una planta de energía oceánica y fue la primera “comercial” para conseguir energía eléctrica a partir de las olas del océano. Hoy está en pleno funcionamiento y abastece de energía a 1500 hogares. Los Estados Unidos de Norte América están desarrollando varios proyectos de este tipo, sin contar el que ya está en funcionamiento en Hawaii. Por otro lado, Escocia lleva también años experimentado con variados sistemas en la isla de Islay. Asimismo, países como Australia, India, China, Suecia o Japón también están ensayando distintos sistemas (<http://cienciasdelatierra.wordpress.com>).

1.1. Objetivo

El objetivo de la presente Tesis de Maestría es estimar cuantitativamente la energía de olas disponible en la plataforma continental interior de la isla de Tierra del Fuego (Fig.1.1) y, en consecuencia, discutir si se encuentra en cantidades lo suficientemente adecuadas como para ameritar su futuro aprovechamiento. Dado que la información de base (datos de campo y observaciones) no es lo suficientemente adecuada para permitir una descripción objetiva, se recurre a simulaciones realizadas con el modelo de olas SWAN (www.swan.tudelft.nl) convenientemente implementado y validado para la región. Primeramente se estiman los campos medios de alturas, períodos y direcciones correspondientes al período simulado (1971-2005). Dichos campos se utilizan como base para analizar la variabilidad interanual del oleaje. Seguidamente se estudia la variabilidad estacional del oleaje para determinar si hay momentos del años con alturas máximas o mínimas o si, en cambio, se trata de un recurso energético con un nivel estable durante todo el año. Se presentan, finalmente, los campos medios anuales de potencia de olas y se discute cuantitativamente la distribución espacial y el posible aprovechamiento de este recurso.

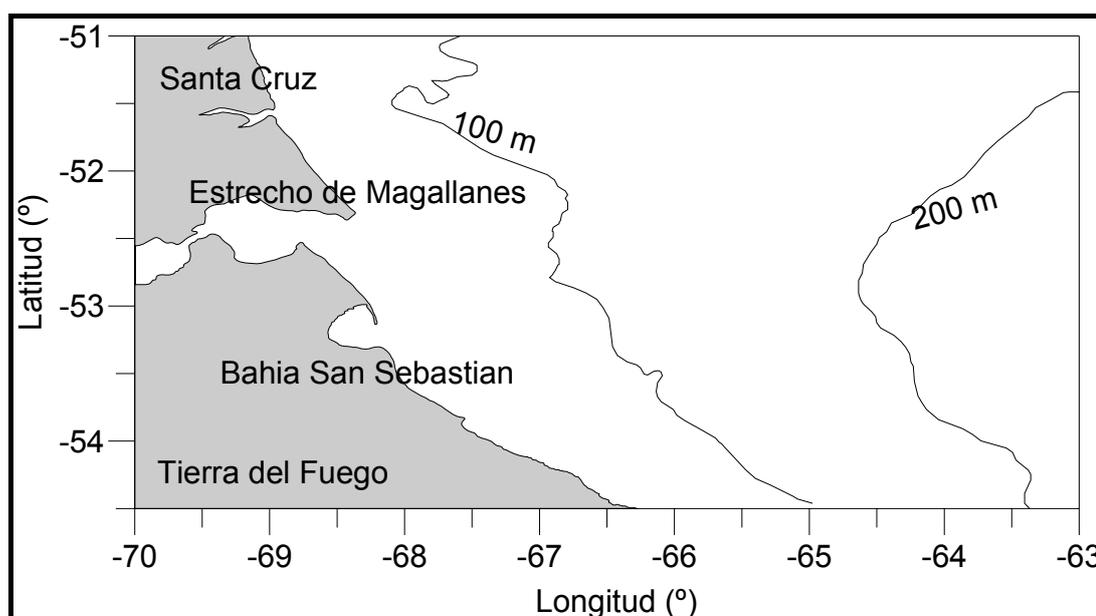


Figura 1.1. Área de estudio

1.2. Descripción ambiental del área de estudio

La región de interés comprende la plataforma continental y zona costera fueguina y santacruceña, aproximadamente desde 50° S hasta 56° S, y desde 60° W hasta 70° W (Fig.1.1). La plataforma continental austral argentina es una región de no más de 200m de profundidad, de escaso relieve, de forma irregular y que en general se ensancha hacia el sur. Es una zona con gran variedad de ambientes costeros: innumerables caletas y puntas, pequeñas playas, barrancos y acantilados. Entre los accidentes geográficos más notables se pueden mencionar a la Bahía Grande, el Estrecho de Magallanes, el Golfo San Sebastián y el Canal Beagle.

La circulación atmosférica esta gobernada por la posición transitoria de los sistemas de alta presión de los océanos Atlántico y Pacífico y la vaguada circumpolar. Los vientos predominantes son de los sectores oeste, noroeste y sudoeste, que en conjunto suman en general alrededor del 60% de las frecuencias de ocurrencia (Barros *et al.*, 1997) y presentan una variabilidad estacional con una notable disminución en época invernal (Oliva *et al.*, 2007), soplando con mayor intensidad (fuertes a muy fuertes) en la primavera y verano (Frumento, 2003- Comunicación Personal). Según Prohaska (1976) dicha variabilidad estacional puede ser atribuida a cambios en la posición de los centros anticiclónicos. El clima es del tipo templado-frío, con cuatro estaciones bien definidas, y gran amplitud entre las temperaturas de invierno y de verano: la amplitud media anual es de 8° C aproximadamente, con temperatura media invernal menor a 2° C pero sobre cero. Las temperaturas máximas absolutas, en general, no altas en esta región: se registra máximos de 14° C y mínimos de ~ 4° C (Servicio Meteorológico Nacional, www.smn.gov.ar/climatologías, Kokot, 2004). Las precipitaciones están comprendidas entre 100 a 430mm anuales pero, en promedio, no superan los 200mm por año (Kokot, 2004). En esta zona las nevadas son, por lo general, escasas y cuando ocurre el suelo permanece cubierto por poco tiempo. El suelo y la mayoría de los cursos de agua permanecen congelados en superficie durante el período mayo-agosto. Esta zona no presenta período libre de helada. Hacia el sur, el clima se presenta más húmedo, aumentando las precipitaciones de norte a sur. Las nevadas son más frecuentes e intensas, permaneciendo una gran parte de la

zona cubierta de nieve durante todo el invierno.

Con respecto a la fauna terrestre, los animales más representativos son los guanacos, los zorros grises y colorados fueguinos, junto al amenazado chungungo o nutria marina, que vive en las costas. Dentro de la fauna costera se distinguen el albatros de ceja negra, el petrel, la gaviota, la paloma antártica y el cuervo marino. Las aguas provenientes del sur (subantárticas) en general presentan altas concentraciones de nutrientes disueltos. Estos son necesarios para la afloración del fitoplancton que marca el inicio de la cadena trófica marina. Dicha fauna está representada por moluscos (mejillones, cholgas, almejas, pulpos y calamares), crustáceos (centollas, camarones y krill), cetáceos (ballenas, delfines, orcas, marsopas) y otros mamíferos en general como los lobos marinos de uno y dos pelos, las focas y los elefantes marinos. Entre la fauna ictícola figuran el róbalo, el abadejo, la merluza de cola y las sardinas (<http://www.tierradelfuego.org.ar>).

Las mareas en la región inducen notables variaciones del nivel del mar en la costa, siendo la componente semidiurna lunar principal (M_2) la más significativa. A modo de ejemplo, la amplitud de marea máxima en la Bahía de San Sebastián es ligeramente mayor a 10m (SHN, 2009). En el borde de la plataforma continental se encuentra la corriente de Malvinas, que es un desprendimiento de la corriente Circumpolar Antártica y transporta aguas frías y de baja salinidad (aguas subantárticas) hacia el norte. Las aguas de la plataforma en la región austral son formadas por mezcla de agua subantártica y agua de baja salinidad proveniente del Estrecho de Magallanes (Campos *et al.*, 1996).

Sobre los aspectos socioeconómicos, la provincia de Tierra del Fuego cuenta como principales recursos la cría de ovejas, la explotación de gas y petróleo, la pesca, el turismo y la industria. La cría de ovejas ha sido fundamental ya que éstos son los animales que mejor se adaptaron al clima y al terreno de la región. Se comercializan, además, carnes para frigorífico tanto para exportación como para consumo local y cueros. Otros animales, como vacunos, equinos y porcinos, se crían en menor proporción en cabañas o estancias. Se destacan también las industrias del rubro electrónico y, sobretodo, la fabricación de equipamiento para el hogar y la metalúrgica.

La pesca es otro recurso importante en la región y su principal destino es la exportación. La merluza, la centolla, los centellones, el calamar y las cholgas son algunas de las especies codiciadas en los mercados internos e internacionales.

2. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LA CONVERSION DE ENERGÍA DE OLAS

La generación de energía de olas no ha convergido todavía a una única tecnología. Se han propuesto muchas clases diferentes de dispositivos y sólo algunos han alcanzado el estado de prototipos y están siendo probados en condiciones reales en el mar (Thrope, 1999; <http://www.iter.es/proyectos/wavenergy.html>). Generalmente, los dispositivos que existen actualmente están diseñados para instalarse a diferentes distancias de la línea de costa. Los dispositivos emplazados en la costa tienen la ventaja de no necesitar cables eléctricos submarinos ni sistemas de anclaje. A pesar de ello, están limitados en relación a los posibles lugares de ubicación ya que estarían sujetos a regímenes de olas menos intensos.

Los dispositivos emplazados entre 10 y 25m de profundidad están por lo general sujetos a un clima de olas con una mayor energía aprovechable que los dispositivos instalados sobre la costa. Como desventaja, los primeros necesitan una determinada calidad de fondo de mar para ser instalados. Respecto de los dispositivos emplazados a más de 50m de profundidad (conocidos como “*off-shore*”) tienen la ventaja de recibir los regímenes de las olas energéticamente más intensos, ya que están situados a una profundidad en la cual los mecanismos de atenuación de la energía son menos marcados.

En la actualidad existen dos métodos físicos básicos para obtener electricidad del movimiento del oleaje: los que aprovechan el movimiento horizontal de las ondas y los que se basan en sus oscilaciones verticales. Los primeros funcionan sobre el mismo principio de las centrales hidráulicas canalizando las olas mediante estructuras de tuberías, que conducen el agua hasta un depósito situado en tierra, desde el que se alimenta un sistema de turbinas que genera la fuerza eléctrica. En el segundo caso, se trata de una boya que aprovecha el movimiento vertical producido por el oleaje para generar energía. La boya cuenta con una bomba hidráulica que traslada la energía mecánica obtenida a un alternador, cuya corriente puede ser luego transmitida a tierra mediante un cable submarino, (www.erenovable.com). Los distintos tipos de dispositivos captadores/convertidores poseen distintas tecnologías por intermedio de

las cuales se logra actualmente obtener electricidad a partir de las olas. Estas tecnologías, y dispositivos específicos pueden estar basados en:

- un **atenuador**, el cual consiste en un dispositivo flotante alineado paralelamente a la dirección de la ola y los movimientos longitudinales pueden ser utilizados para producir energía. Uno de los modelos representativos de esta categoría es el sistema Pelamis.
- un **colector**, el cual es una estructura flotante que captura las olas para concentrar la energía en un punto, donde se produce la conversión de la energía de mecánica a eléctrica.
- un sistema de **rebalse** que consiste en una estructura que utiliza una pared, la cual es sobrepasada por las olas que entran a un depósito de agua. Este acumula energía potencial, descargando el agua a través de turbinas hidráulicas. Uno de los modelos representativos de esta categoría es el “Wave Dragon”, que posee un colector de olas y turbinas en el sector central.
- una **columna de agua oscilatoria** la cual implica la utilización de un estanque abierto en la parte inferior, parcialmente sumergido en el agua superficial, de manera tal que el movimiento vertical de las olas produzca una diferencia de presión dentro del estanque, la cual es canalizada a turbinas para aire (comúnmente bidireccionales). Uno de los sistemas que mejor la representan es “Wavegen”.
- un **conversor/atenuador** de ola que captura su movimiento horizontal mediante una paleta con pivote en la parte superior. La paleta oscila como un péndulo, permitiendo la conversión de la energía.
- un **“absorber” de punto** que consiste en una estructura flotante que captura la energía proveniente de cualquier dirección pudiéndose diseñar para que resuene maximizando la potencia. El dispositivo para transformar la energía cinética de la estructura puede tomar diversas formas, siendo el más común el uso de generadores lineales. Uno de los principales modelos dentro de esta categoría es “Aqua Buoy”.
- un **dispositivo de presión sumergido** que consiste en una estructura sumergida en el fondo marino cercana a la costa. Aprovecha el avance y retroceso de las olas, aumentando y disminuyendo el volumen de agua sobre el

dispositivo y, por ende, la presión. La tecnología “Ceto” es un buen ejemplo.

De lo anterior se desprende que en todos los sistemas undimotrices la conversión de la energía se lleva a cabo en dos etapas, la conversión primaria, en donde la extracción de la energía del oleaje se realiza mediante sistemas mecánicos o neumáticos, transmitiendo la cinemática del oleaje en el movimiento de un cuerpo o en un flujo de aire y la conversión secundaria, en donde los movimientos mecánicos o neumáticos se transforman en energía eléctrica utilizable.

Para el desarrollo de estas tecnologías es importante apreciar las dificultades originadas en el complicado desarrollo de convertir la potencia de las olas en electricidad. Los más importantes son los problemas que surgen del planeamiento y ubicación óptima de los dispositivos y la falta de mediciones de olas durante largos periodos de tiempo. Es un hecho que si el dispositivo esta ubicado en una zona donde los parámetros de las olas no fueron los usados para el diseño y/o construcción del dispositivo (ya sean valores mayores o menores), inevitablemente habrá una pérdida o déficit en la generación de energía (Beyene and Wilson, 2008).

Por otro lado, para obtener un máximo de eficiencia en todo el rango de frecuencias de excitación en cualquier proyecto se debe considerar la variabilidad de la amplitud, fase y dirección del oleaje, lo cual es difícil de predecir. Por otro lado, deben asegurarse las estructuras previendo eventos extremos y condiciones severas del clima ya que, si los parámetros del oleaje superaran a los de diseño además de una caída de la eficiencia de energía, también podría producirse daños en los dispositivos y rupturas en los cables transmisores (Beyene and Wilson, 2008).

2.1. Clasificación de dispositivos

Los dispositivos de generación de energía a través de las olas se pueden clasificar a su vez en fijos o flotantes. En este capítulo se presenta una sucinta descripción de los principales dispositivos la cual es extraída básicamente de la Internet, ya que, para este tema técnico en particular, ella es la fuente de información más actualizada y completa.

2.1.1. Dispositivos fijos

Estos dispositivos son los que están construidos en la línea costera (en la zona de rompientes de las olas) o fijados al lecho marino en aguas someras. Los sistemas fijos tienen algunas ventajas importantes sobre los sistemas flotantes, sobre todo con respecto al mantenimiento. Sin embargo, la cantidad de lugares apropiados para este tipo de dispositivos es limitada.

Columna de Agua Oscilante (OWC)

La columna de agua oscilante (<http://www.emec.org.uk>) genera electricidad en un proceso de dos pasos. Cuando la ola (el agua) entra en la columna, fuerza al aire a pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna. Cuando la ola sale, el aire vuelve a pasar por la turbina, debido a la disminución de la presión de aire en el lado exterior (oceánico) de la turbina. Sin importar la dirección de la corriente de aire, la turbina (conocida como turbina Wells) gira con el mismo sentido y hace que el generador produzca electricidad (Fig. 2.1). La tecnología OWC se está utilizando en la isla de Islay, perteneciente a Escocia y ubicada en el Mar del Norte, donde hay un sistema instalado desde el año 2000 llamado LIMPET (www.wavegen.co.uk). Este sistema tiene una producción máxima de 500 KW. Es ideal para lugares donde existe un gran potencial de energía de olas, como se da en la zona de rompiente, defensas costeras, proyectos de recuperación de territorio y escolleras de puertos. En la isla de Islay, la electricidad generada se está utilizando para hacer funcionar un bus eléctrico, el primer bus en el mundo que utiliza energía de las olas como combustible (Proyecto 'Wavenergy, 2007', <http://www.iter.es/proyectos/wavenergy.html>). La columna de agua

alimenta a un par de turbinas y cada una de ellas opera a un generador de 250 KW. Este dispositivo es fácil de construir e instalar y, además, genera pocas obstrucciones, es poco visible y no genera molestias en el paisaje costero. Su costo es, aproximadamente, 6.1 millones de euros (Cavia del Olmo, 2009).

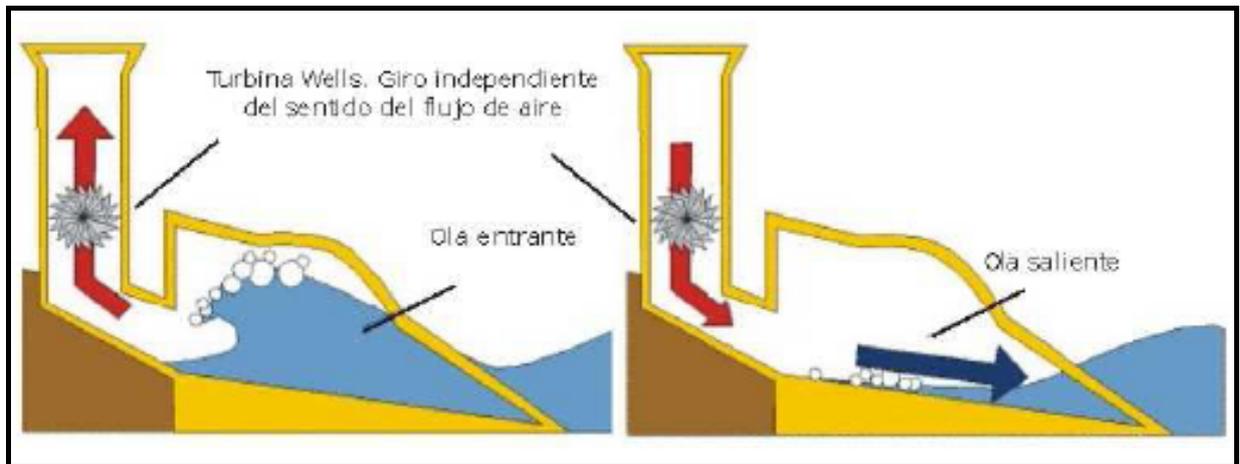


Figura 2.1. Columna de agua oscilante: esquema de funcionamiento. Fuente: [Wavegen](#).

TAPCHAN (Tapedred Channel wave energy conversión device)

El sistema TAPCHAN consiste en un canal estrecho que alimenta a un embalse que está construido en un acantilado, como se muestra en la Fig. 2.2. El estrechamiento del canal hace que las olas aumenten su amplitud cuando se acercan a la pared del acantilado. Eventualmente las olas se desbordan sobre las paredes del canal dentro del embalse, que está ubicado varios metros por debajo del nivel del mar. La energía cinética de la ola en movimiento se convierte en energía potencial cuando el agua se almacena en el embalse. La generación de electricidad es similar a la de una planta hidroeléctrica. El agua en depósito pasa por una turbina "Kaplan". El concepto de TAPCHAN es, simplemente, una adaptación de la producción de energía hidroeléctrica tradicional. Con muy pocas partes móviles y contenido dentro del sistema de generación, los sistemas TAPCHAN tienen un bajo costo de mantenimiento y son confiables. Estos sistemas también superan los problemas de demanda de energía, ya que el embalse puede reservar la energía hasta que ésta sea requerida. Desafortunadamente, no son apropiados para todas las regiones costeras. Las

regiones deben tener un clima de olas estable, con un buen promedio de energía y con una amplitud de marea inferior a 1m. Además, la costa debe tener aguas profundas cercanas y una ubicación apropiada para el embalse (Cavia del Olmo, 2009).

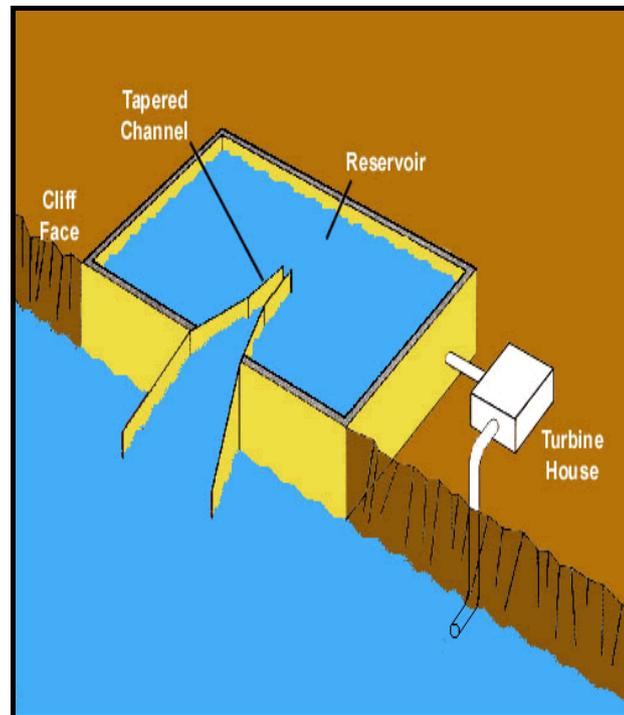


Figura 2.2. Sistema TAPCHAN

Wave Roller

El dispositivo Wave Roller consiste en una placa, con su parte inferior fija al fondo del océano, que oscila hacia atrás y adelante. El movimiento de las olas mueve la placa y la energía cinética producida se recoge en una bomba de pistón. Esta energía puede ser convertida en electricidad ya sea por un generador unido a la unidad Wave Roller o por un sistema hidráulico cerrado en combinación con un sistema de generador/turbina. El Wave Roller es un concepto modular, en la práctica esto significa que la capacidad de la planta está formada por la conexión de una cantidad

determinada de módulos de producción a una planta Wave Roller (Fig. 2.3). Debido a su particular diseño, la planta Wave Roler puede entrar en producción gradualmente, módulo por módulo. La empresa constructora, AW-Energy, señala que el mantenimiento de los módulos es sencillo y la producción de electricidad se puede garantizar durante el mantenimiento de las unidades (www.aw-energy.com).

Los resultados de pruebas señalan que el Wave Roller podría superar ampliamente a otras tecnologías de energía marinas, ya sea en términos de rendimiento como en cuestiones económicas. Este dispositivo es más apto para regiones con períodos de olas largas y son más eficientes si se lo colocan en el fondo, pues, los niveles de energía obtenida a lo largo del año en estas regiones fluctúan bastante menos que en los dispositivos de olas de superficies (Cavia del Olmo, 2009).

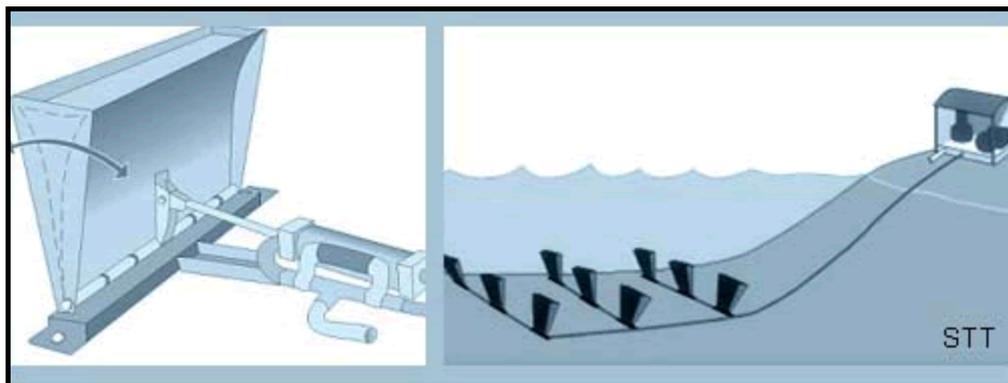


Figura 2.3. Dispositivo Wave Soller. Fuente: [AW-Energy](http://www.aw-energy.com), 2005.

2.1.2. Dispositivos flotantes

Estos dispositivos de generación de energía de las olas son sistemas que se encuentran flotando en el océano ya sea cerca de la costa u “*offshore*”. A continuación se describen los dispositivos flotantes principales.

Pelamis

Los diseñadores de Pelamis (Fig. 2.4), la empresa británica Checkmate Seaenergy Ltd., creen haber superado algunos de los obstáculos que impedían hasta ahora la viabilidad económica como, por ejemplo, la resistencia del material en un ambiente muy salino y hostil como el marino (Bondareff, 2008). El prototipo es principalmente de goma, un material con una capacidad de recuperación natural. Además, tiene muy pocas piezas que haya que mantener. Consiste en una estructura semi-sumergida y articulada compuesta por secciones unidas por juntas tipo bisagra. El movimiento de estas juntas es resistido por arietes hidráulicos, que bombean aceite a alta presión a través de los motores hidráulicos. Estos motores hacen que los generadores produzcan electricidad. Se puede conectar varios dispositivos juntos y unidos a la costa a través de un solo cable que va por el fondo marino. Por ejemplo, un grupo de 50 “anacondas” (como frecuentemente es conocido este sistema) podría generar suficiente electricidad para alimentar 50.000 hogares a un precio muy alentador.

La estructura se mantiene en posición por un sistema de anclaje compuesto por una combinación de flotantes y pesas, que previene que los cables de anclaje estén tensos al mantener el Pelamis en su posición y que, además, permiten un movimiento de vaivén con las olas incidentes. El prototipo, a escala completa, de 750 KW, tiene un largo de 120m, un diámetro de 3.5m y contiene tres módulos de conversión de energía, de 250 KW cada uno. Cada módulo contiene un sistema completo de generación de energía hidroeléctrica (<http://www.checkmateuk.com>, www.Pelamiswave.com). Esta estructura prioriza la resistencia sobre la eficiencia en la conversión energética, ya que está pensada para zonas con condiciones marinas muy adversas. En el Reino Unido, como en el resto de Europa, la costa oeste cuenta con intensos vientos que atraviesan el Atlántico Norte. En ese sentido, se estima que 50 anacondas de tamaño real proporcionarían electricidad a 50.000 hogares. Queda por estudiar, sin embargo, la viabilidad económica y la eficiencia de la conversión de electricidad.



Figura 2.4. Sistema Pelamis. Fuente: www.Pelamiswave.com

Salter Duck

El Salter Duck es otro dispositivo flotante de energía de las olas, como el Pelamis, que genera electricidad a través del movimiento armónico de la parte flotante del dispositivo. En estos sistemas, los dispositivos suben y bajan de acuerdo al movimiento de la ola y la electricidad se genera debido a este movimiento. El Duck (pato) rota con un movimiento de cabeceo a medida que la ola se propaga. Este movimiento bombea fluido hidráulico que activa el motor, que a su vez, activa el generador eléctrico. Aunque el Salter Duck (Fig. 2.5) podía producir energía de un modo muy eficiente, este proyecto fue frenado durante la década de '80 debido a errores en los cálculos de los costos de producción de energía por un factor de 10. (<http://www.mech.ed.ac.uk>).

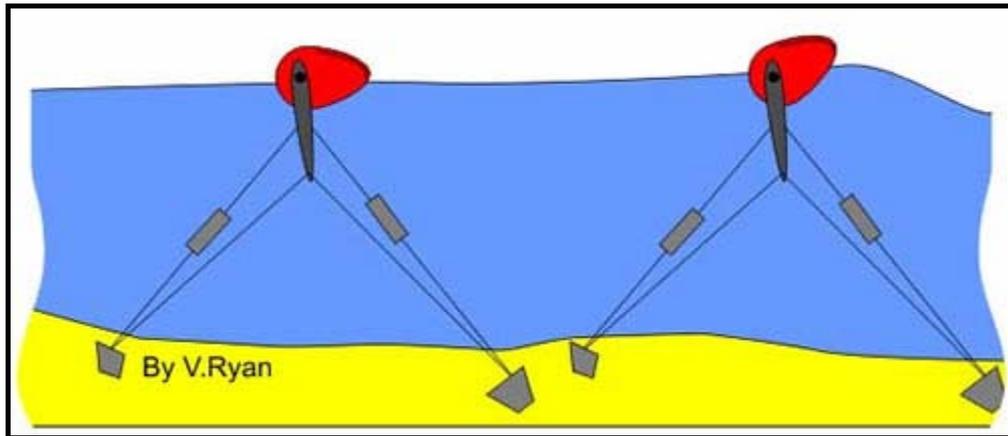


Figura 2.5. Salter Duck. Fuente: <http://www.mech.ed.ac.uk>

Wave Dragon

El Wave Dragon es esencialmente un dispositivo que eleva las olas marinas a un embalse por encima del nivel del mar donde se permite que el agua pase por una serie de turbinas y por lo tanto se genere electricidad (Fig. 2.6). La construcción del Wave Dragon es muy simple y sólo tiene como parte móvil a las turbinas, lo que es útil para operar “*offshore*” bajo condiciones extremas. El Wave Dragon está anclado en aguas relativamente profundas para tomar ventaja de las olas marinas antes de que pierdan energía en el área costera. El dispositivo está diseñado para mantenerse lo más firmemente posible, utilizando simplemente la energía potencial del agua. El agua se conserva por un tiempo en un embalse creando una cabeza, es decir, una diferencia entre el nivel del mar y la superficie del agua en el embalse. El agua sale del embalse del *Wave Dragon* a través de varias turbinas generando electricidad en un modo similar a las plantas de energía hidroeléctrica. La rampa del Wave Dragon es muy corta y bastante empinada para minimizar la pérdida de energía que cada ola sufre cuando alcanza una playa. Una ola que se acerca a la playa cambia su geometría. La particular forma elíptica de la rampa optimiza este efecto, y el experimento del modelo ha demostrado que el rendimiento aumenta significativamente. El Wave Dragon está diseñado para ser ubicado “*offshore*”, a más de 20 o 30m de profundidad, para producir entre 4 y 11 MW, dependiendo de la actividad de las olas (<http://www.wavedragon.net/>).

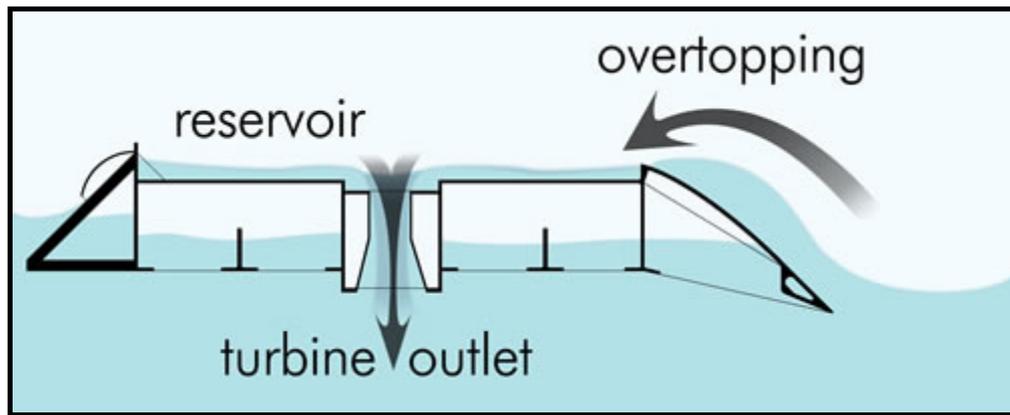


Figura 2.6. Sistema Wave Dragon. Fuente: [Wave Dragon](#).

Archimedes Wave Swing (AWS)

El Archimedes Wave Swing (www.waveswing.com; www.awsoccean.com) es un sistema simple de cámaras de aire conectadas, que utilizan el efecto “flywheel”, utilizando el empuje del mar para producir energía eléctrica. El AWS consiste en dos cilindros, el cilindro inferior está fijado al lecho marino, mientras que el cilindro superior se mueve hacia arriba y abajo bajo la influencia de las olas (Fig. 2.7). En forma simultánea magnetos fijados en el cilindro superior se mueven a lo largo de una bobina. Como resultado, el movimiento del flotante genera electricidad. El interior del AWS está lleno de aire y cuando el cilindro superior se mueve hacia abajo el aire interior se presuriza y se genera una fuerza contraria a la del cilindro superior al subir nuevamente. Para las olas largas la amplificación puede ser de tres veces la elevación de la ola siendo aun mayor para las olas cortas. La amplificación puede compararse con el efecto de un columpio. Si uno empuja el columpio en el momento en el que éste alcanzó la mayor altura, el movimiento se amplificará ya que entra en resonancia.

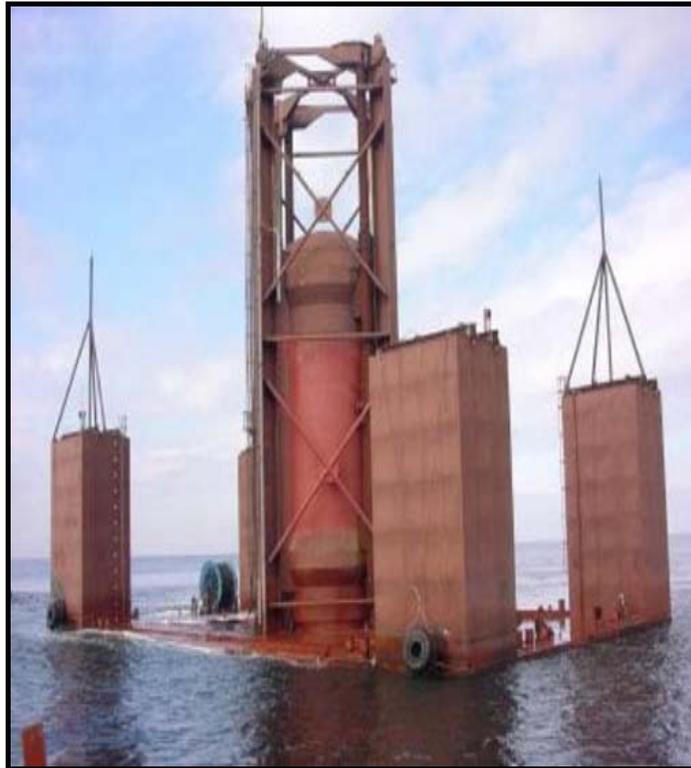


Fig.2.7. System Archimedes Wave Swing. Fuente: [Archimedes Wave Swing](#).

Mighty Whale & JAMSTEC

El desarrollo de prototipos japoneses comenzó con los experimentos de Yoshio Masuda en la década del '40 (www.Jamstec.go.jp) alcanzándose resultados satisfactorios en los '70 y, desde entonces, una buena cantidad de prototipos se han probado exitosamente en Japón. En los años '70 el grupo de energía de las olas de JAMSTEC desarrolló un prototipo flotante a gran escala, llamado *Kaimei*. Este dispositivo fue probado en el mar de Japón, cerca de la ciudad de Yura. Se completaron dos series de pruebas, una de las mismas con los auspicios de la International Energy Agency. En los '80 JAMSTEC desarrolló un dispositivo fijo en la costa para realizar pruebas cerca de Sanze. Desde 1987, el foco ha estado en otro dispositivo flotante conocido como Mighty Whale (Fig. 2.8). Las aplicaciones proyectadas para un grupo de este tipo de dispositivos incluyen el suministro de energía para granjas de peces en las aguas calmas detrás de los dispositivos y la aireación y purificación del agua de mar. Las dimensiones del prototipo son 50m de

largo, 30m de ancho y 12m de altura. El Mighty Whale genera electricidad cuando la ola entra a las tres cámaras de aire ubicadas en la parte delantera del dispositivo. La superficie interna del agua se mueve hacia arriba y abajo generando una presión neumática lo que hace girar las turbinas de aire. Esto hace que los generadores conectados a las turbinas generen electricidad a una razón máxima de 110 KW.



Fig.2.8. System Mighty Whale & JAMSTEC. Fuente: jamstec

Power Buoy

La Ocean Power Technologies ha desarrollado un sistema de generación de energía a través de las olas conocido como Power Buoy (www.oceanpowertechnologies.com/products.htm). El sistema utiliza una boya marítima para convertir la energía de las olas en energía mecánica controlada que activa un generador eléctrico (Fig. 2.9). La electricidad generada se convierte en corriente de alto voltaje y se transmite a la costa a través de un cable sumergido. El Power Buoy incorpora sensores que monitorean el rendimiento y la calidad del ambiente oceánico circundante.



Fig. 2.9. Power Buoy. Fuente: www.oceanpowertechologies.com/products.htm

Aqua Buoy

Desarrollado por la empresa canadiense Finavera Renewables (<http://www.finavera.com/en/wavetech/configuration>) el sistema Aqua Buoy (Fig. 2.10) consiste en una estructura que convierte la energía cinética asociada al movimiento vertical de la ola incidente en electricidad. Se trata de una boya cilíndrica que absorbe el movimiento de las partículas de fluido que se transfiere a través de una columna de agua encerrada en un tubo situado bajo dicha boya. La electricidad generada se lleva a tierra a través de un cable submarino.



Fig. 2.10. Sistema Aqua Buoy. Fuente: <http://www.finavera.com/en/wavetech/configuration>

Planteada la necesidad energética y su posibilidad de generación a partir de las olas, el objetivo de los científicos, ingenieros y equipo técnico es determinar qué sistema es el más apto en cuanto a eficiencia para la captación de energía de olas y, asimismo, evaluar el costo de construcción y de mantenimiento y, finalmente, ponerlo en funcionamiento. Para el caso de España, según afirman los expertos, con un desarrollo tecnológico y un apoyo institucional adecuados para el 2020 las plantas generadoras de energía proveniente de las olas podrían generar hasta 100 MW (www.erenovable.com, 2008). Una estimación del potencial energético mundial de la energía de olas que se aportaría a la producción eléctrica, estimado por la Agencia Internacional de Energía (2005), está entre el 10 y el 50% de la demanda mundial energética estimada en 15000 TW h (<http://www.iea-oceans.org/>).

3. DATOS

En el área considerada existen registros de altura de ola significativa, período y dirección en ocho sitios (caratulados con nombres particulares según el proyecto en los cuales se enmarcaban las tareas de campo) denominados: Camxe, Carina, Pleyade, Panamerican, Gama, La Misión Exterior, La Misión Interior e Hidra (Fig. 3.1). En cada sitio particular se utilizaron técnicas e instrumental oceanográfico diferente. En las primeras cinco estaciones mencionadas se utilizaron instrumentos Interocean System modelo S4. Estos son equipos que miden el movimiento del agua con sensores electromagnéticos y los niveles instantáneos del mar con uno de presión. La dirección del oleaje se obtiene mediante la combinación de los campos de presión y de corriente. En la Misión Exterior y en la Misión Interior se utilizaron olígrafos direccionales Datawell modelo Waverider y en Hidra un olígrafo del mismo tipo pero no direccional, consecuentemente, en esta última estación no se tiene la dirección del oleaje.

Los datos correspondientes a La Misión (Interior y Exterior) y Gama fueron obtenidos por el Servicio de Hidrografía Naval mediante mediciones directas desarrolladas por éste y, como se discutirá más adelante, constituyen las series de datos de olas disponibles más largas y confiables correspondientes a la zona de interés.

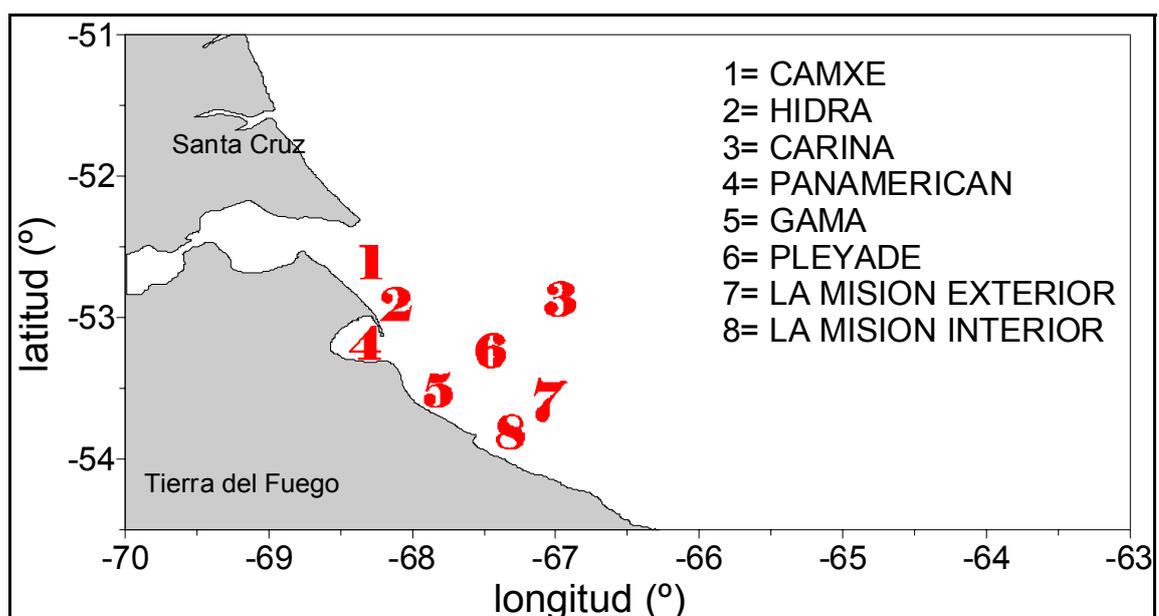


Figura.3.1. Los números indican sitios en donde se midieron parámetros de olas

La zona en la cual se dispone de datos va desde el sur del Estrecho de Magallanes hasta Caleta La Misión y tiene una cobertura espacial, en lo que se refiere a datos de olas, por mucho superior a otras regiones de la plataforma argentina probablemente debido a la exploración petrolera que se viene desarrollando desde hace algunas décadas. La extensión temporal de los registros difiere en forma marcada entre las estaciones. Las series más largas corresponden a las estaciones La Misión Interior y Exterior, Gama e Hidra, resultando en consecuencia ser las más apropiadas para las validaciones. Dentro de la bahía San Sebastián sólo se dispone de una serie corta de mediciones (Panamerican) de tan solo 222 datos, mientras que la estación más oceánica, Carina, cuenta con sólo 250 datos. En la Tabla 3.1 se presenta la posición geográfica, el inicio y el final de cada registro, la profundidad del sitio de fondeo (referidas al plano de reducción de la carta náutica) y la cantidad de datos para cada estación considerada.

Estación	Latitud (S)	Longitud (W)	Inicio	Fin	Prof. sitio fondeo (m)	Nº de datos
Camxe	-52,612	-68,450	01/06/1999	14/06/1999	61	155
Hidra	-52,816	-68,233	08/02/1984	21/02/1985	27	2564
Carina	-52,791	-67,141	18/07/1999	28/07/1999	87	250
			03/08/1999	14/08/1999		
Panamerican	-53,286	-68,215	06/01/2002	25/01/2002	14	222
Pleyade	-53,312	-67,774	06/07/1999	15/07/1999	49	217
			17/08/1999	26/08/1999		
Gama	-53,479	-67,991	07/11/2001	24/02/2002	14	2971
La Misión Exterior	-53,681	-67,307	29/01/1998	23/03/1999	66	1874
La Misión Interior	-53,686	-67,810	29/01/1998	19/03/1999	18	3507

Tabla 3.1. Posición geográfica, inicio y fin de cada registro, cantidad de datos para cada estación y profundidad del sitio (referidas al plano de reducción de la carta náutica)

3.1. Análisis estadístico de alturas, períodos y direcciones de olas

Excepto para las series de datos de La Misión Interior y de La Misión Exterior, las cuales son simultáneas durante casi todo el período de mediciones, las otras no se superponen temporalmente. Por esta razón es imposible realizar interpretaciones sinópticas, basada en datos, sobre las características de las olas en la región. Por otro lado, los registros disponibles contienen o el período medio o el período asociado a la altura significativa (Hs). Aunque conceptualmente ambos son diferentes, en este estudio se optó por analizar el período (T) que estuviera presente y, en consecuencia, tratarlos indistintamente. Esto introduce un ligero error en las distribuciones de períodos ya que el período significativo asociado es levemente superior al medio. Un análisis preliminar indica que la diferencia entre ambos puede llegar hasta un 20% (Shore Protection Manual, 1984).

Para todos los sitios analizados en la Tabla 3.1, Dragani *et al.* (2010) discutieron los histogramas de Hs y T y, para los sitios con series más largas, se hicieron las distribuciones conjuntas o bidimensionales (Hs – T) para cada una de las direcciones de mayor probabilidad de propagación. Como es habitual en los estudios de olas, la dirección indicada en los registros es la correspondiente a la de donde proviene el oleaje. En la discusión que se presenta para cada conjunto de datos las direcciones indicadas (N, NE, E, etc.) agrupan datos correspondientes a un sector de 45 grados, es decir, 22.5° a izquierda y a derecha de la dirección indicada. Por ejemplo, la dirección E (es decir, olas provenientes de la dirección 90°) agrupa a las olas provenientes entre 67.5° y 112.5°.

Camxe

Debe notarse que en Camxe el registro de datos tiene tan solo 14 días de duración y, por lo tanto, estos resultados no deben ser generalizados ni considerados como representativos del oleaje. La distribución (no direccional) presenta una frecuencia máxima para Hs comprendidas entre 0.4 y 0.8m. Para Hs mayores que 0.8 m las ocurrencias son muy bajas (inferiores a 10 casos). La distribución de T es irregular y muestra una zona de mayor concentración de datos entre 4 y 9 segundos.

Para períodos más altos las ocurrencias son inferiores a 15 casos (Fig. 3.2). Las direcciones en las que se verifican las mayores ocurrencias son las NE (43%), la N (17%) y la E y SW (12%). Las olas con mayor altura provienen del W y SW y, ligeramente menores del E, NE y S. Debe enfatizarse que esta estación tiene apenas 14 días de duración y, en consecuencia, los resultados de este análisis no deben ser generalizados ni considerados como representativos del oleaje en Camxe.

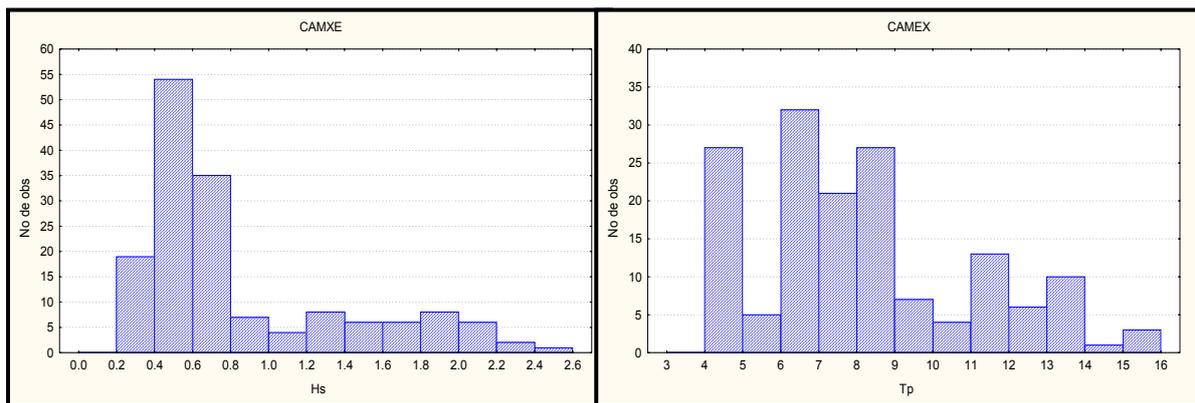


Fig.3.2. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

Hidra

La serie de observaciones de olas para Hidra fueron obtenidas con un olígrafo no direccional, por lo tanto, las direcciones de las olas se obtuvieron asignándole a cada observación la dirección del viento obtenida en la estación meteorológica automática instalada en la costa, en las proximidades de la desembocadura del Río Cullen, verificándose la consistencia entre las alturas de ola y el viento asociado, resultando una gran coherencia entre ambos.

La distribución de Hs correspondiente a Hidra tiene una fuerte similitud con la distribución teórica de Rayleigh (Dean y Dalrymple, 1984) la cual corresponde a un océano con distribución de niveles instantáneos del mar gaussiano. La mayor concentración de observaciones que presenta Hs (Fig. 3.3) están comprendidas entre 0.4 y 1.4 m, con un fuerte decaimiento hacia las alturas más bajas y uno mucho más suave hacia las altas, las cuales no superan los 3.6 m. La distribución de T indica que la mayor frecuencia toma valores de entre 3 y 8 s. La distribución de Hs máximos

presenta direcciones con mayor ocurrencia de observaciones del W y SW (entre ambas, el 56% de los casos). Las alturas máximas corresponden a las direcciones N (3.43m), NE (3.07m) y SW (3.06m). Sin embargo, olas con alturas superiores a los 2m son posibles de cualquier dirección. Se debe mencionar nuevamente que el olígrafo utilizado es no direccional y, por lo tanto, los resultados obtenidos deben ser considerados con cuidado.

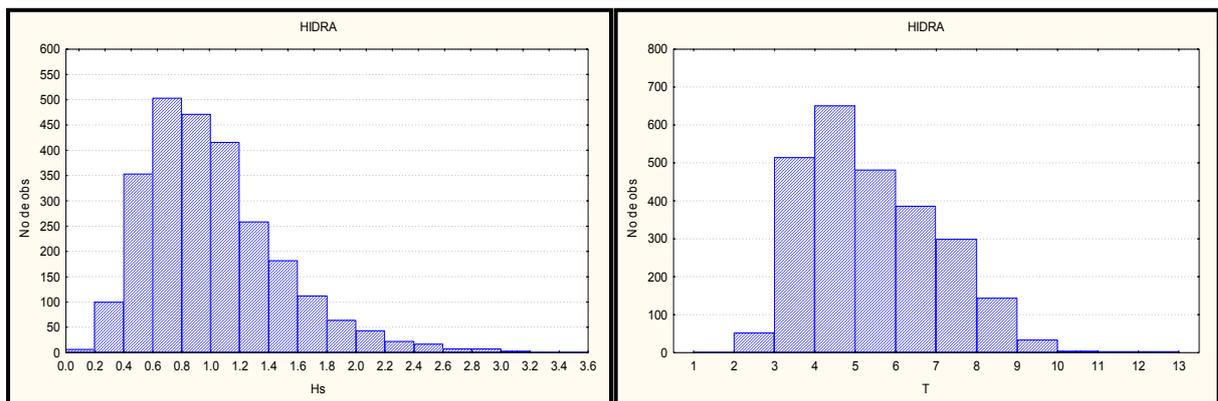


Fig.3.3. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

Carina

De todos los sitios analizados Carina es el que está ubicado más alejado de la costa. La máxima frecuencia de ocurrencia para Hs corresponde a valores comprendidos entre 0.6 y 2.8m. Para alturas mayores a las mencionadas la distribución decae progresivamente hasta valores superiores a 5 m. La distribución de T muestra un máximo principal entre 8 y 9 s y otro secundario entre 6 y 7 s. Estos máximos, posiblemente, sean producto de la escasa cantidad de datos, siendo más razonable considerar uno solo entre 6 y 9 s. La dirección de mayor porcentaje de ocurrencia es la NE (30%), siguiéndole la N (22%). Para las direcciones restantes los porcentajes son bastante uniformes, entre el 5 y el 11%.

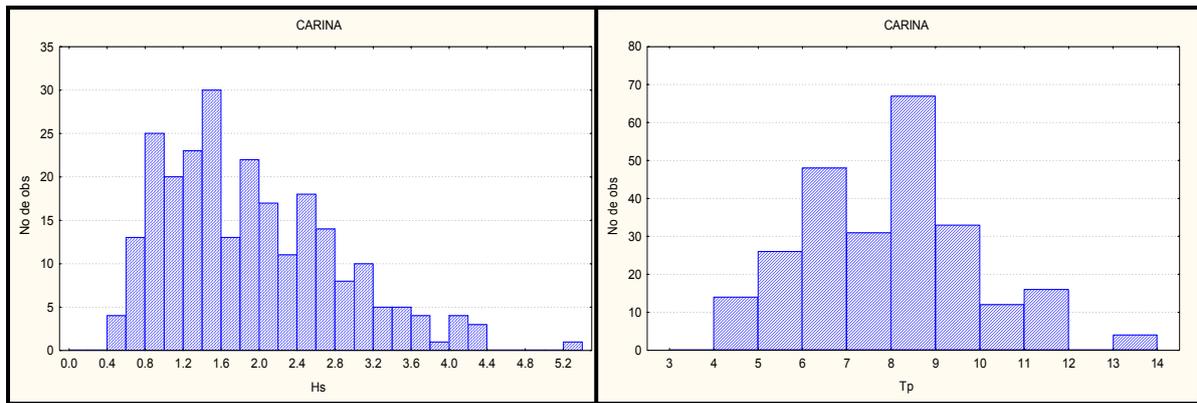


Fig.3.4. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

Panamerican

Esta serie de datos es la única disponible en la bahía San Sebastián, consecuentemente, las alturas registradas son en general inferiores a las de la plataforma fueguina. La máxima concentración de Hs se da entre 0.2 y 0.6m, decayendo uniformemente para Hs superiores a 0.8m. Con respecto a los períodos, casi el 75% de los valores están comprendidos entre 3 y 5 s. Considerando la preponderancia de períodos relativamente cortos es razonable suponer que las olas registradas en dicho punto corresponden a las condiciones locales del viento más que al mar de fondo. La dirección que presenta el mayor porcentaje de ocurrencia es la N (38%) siguiendo en importancia la W (28%) y la NW (15%). Para el resto de las direcciones los porcentajes de ocurrencia varían entre el 2 y el 7%. El máximo valor de Hs fue de 1.41m con un T y una dirección de incidencia asociada de 4.3 s y 267°, respectivamente.

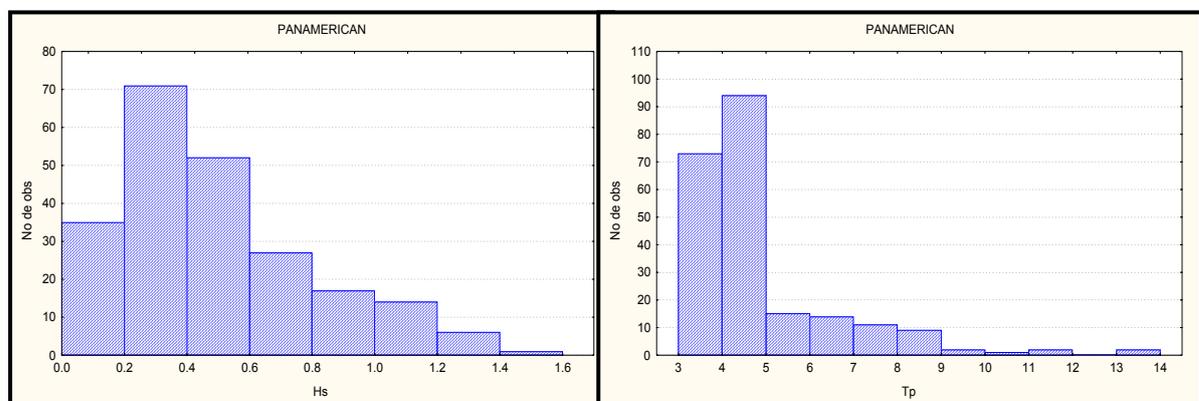


Fig.3.5. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

Pleyade

La distribución de Hs presenta un máximo de frecuencia de ocurrencia entre 0.4 y 1.2m y, a partir de este último valor la distribución decae uniformemente hasta Hs inferiores a 2.4m. Los T predominan entre 4 y 8 s (aproximadamente el 90% de los casos). En cuanto a los porcentajes de ocurrencia por dirección, las máximas frecuencias se dan entre el NW y NE (con un porcentaje total del 81%). Para el resto de las direcciones los porcentajes están comprendidos entre el 1 y el 8%. Las Hs máximas registradas fueron 2.22m (T: 5.6 s y dirección 311°) y 2.17m (T: 6.3 s y dirección 330°).

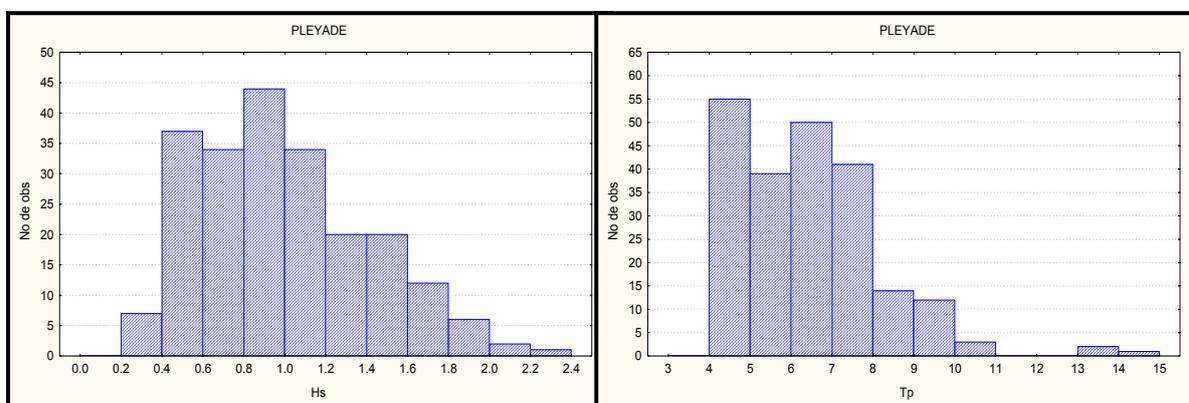


Fig.3.6. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

La Misión (Exterior)

Las mediciones comenzaron el día 29 de enero de 1998 y finalizaron el 23 de marzo de 1999. Entre el 15 de marzo y el 16 de julio el instrumento estuvo fuera de servicio por desprendimiento de la línea de fondeo. Cada registro tuvo una duración de 20 minutos y los registros se midieron cada 4 horas. La distribución de Hs para La Misión Exterior presenta dos máximos (Fig. 3.7). Alrededor del más importante, posicionado en aproximadamente 1.2m, se agrupa la mayor cantidad de datos. El segundo máximo, ubicado en aproximadamente 3 m, agrupa una cantidad de datos mucho menor. Los períodos se distribuyen entre 3 y 15 s pero presentan una mayor concentración entre 4 y 8 s, un 87% de los datos. Los porcentajes de ocurrencia por direcciones indican que el 72% de las olas provienen del NW y N, siguiéndoles en frecuencia de ocurrencia, con un 13%, las olas del W. Las direcciones restantes tienen porcentajes de

ocurrencia que varían entre 0 y 9%. Las olas con alturas máximas provienen entre el W y el N.

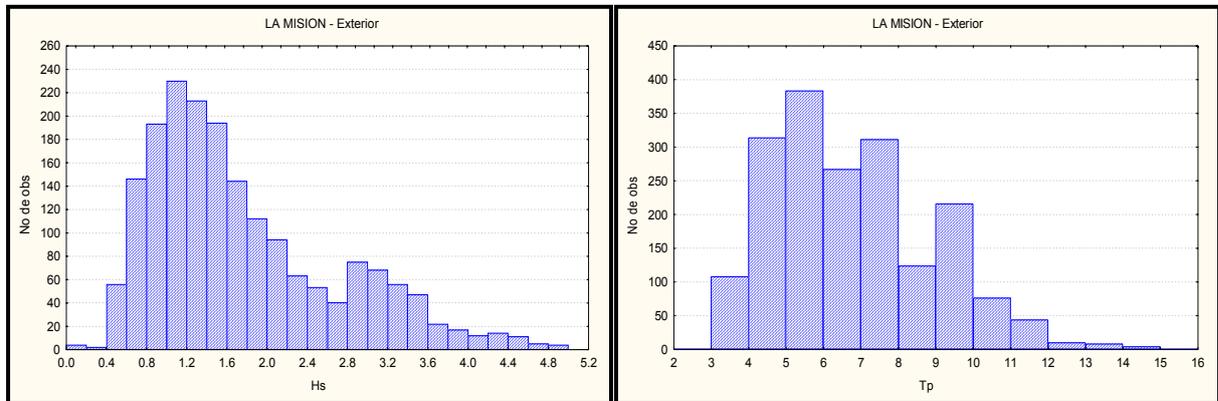


Fig.3.7: distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

La Misión (Interior) y Gama

Dada la cercanía entre La Misión y Gama y considerando la similitud de los sitios en los cuales se habían fondeado los instrumentos, ambas series de datos se analizaron en conjunto. Las mediciones en La Misión Interior comenzaron el día 29 de enero 1998 y finalizaron el 19 de marzo de 1999. Durante este período se recolectaron 3507 registros. En Gama, la adquisición de datos comenzó el día 7 de noviembre de 2001 y finalizó el 24 de abril de 2002, que resultan ser 2971 registros. En Gama, los primeros tres meses de datos (1041 registros) se obtuvieron con un intervalo de medición de 2 horas, con ciclos de 20 minutos cada uno, mientras que la segunda parte, correspondiente a los últimos 1931 registros se realizaron con intervalos de 1 hora y con ciclos de 18 minutos.

La distribución de Hs correspondientes a La Misión Interior y Gama es similar en aspecto a la de La Misión Exterior pero está desplazada hacia Hs más bajas (Fig. 3.8). La distribución presenta dos máximos: el principal ubicado aproximadamente en 0.5 m y el menor en 2 m. La distribución de T también es similar a la de La Misión Exterior. En este caso, entre 5 y 10 s, se agrupan casi el 75% de los datos. El 70% de los datos corresponden a las direcciones N y NE, siguiendo en importancia la E (15%) y la NW (11%). Para el resto de las direcciones los porcentajes de ocurrencia no superan el 2%.

En cuanto a las Hs máximas correspondientes a las ocho direcciones, los máximos fueron 4.59m (T: 10 s y dirección 20°) y 4.28m (T: 10.5 s y dirección 32°).

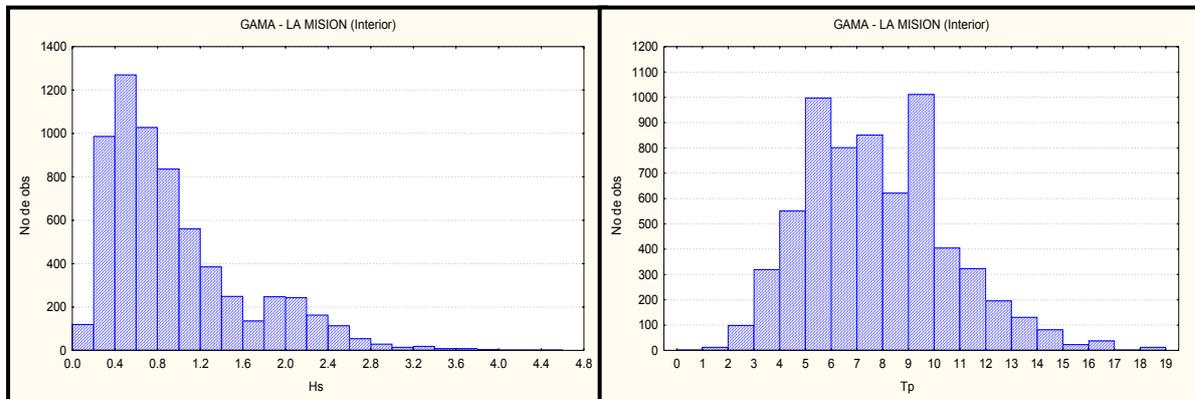


Fig.3.8. Distribución de alturas significativas en m (izquierda) y periodo en s (derecha)

3.2 Distribuciones bidimensionales de Hs y T

Este tipo de distribuciones permiten obtener un panorama claro sobre el oleaje más frecuente o probable para cada una de las ocho direcciones principales. Las distribuciones se construyeron con intervalos de clases de 0.25m para las alturas y de 1 s para los períodos. Se presentan a continuación las distribuciones para La Misión Interior y Exterior y Gama ya que son dos de las estaciones costeras de las que se dispone mayor cantidad de observaciones direccionales.

Las alturas de ola en La Misión Interior alcanzan valores un poco mayores a 2m y cubre una amplia gama de periodos, desde 2 s hasta 11 s. Presenta un máximo relativo de ocurrencias ubicado en 3 - 4 s y 0.5m (Fig. 3.9, panel superior). Para el caso de Gama, la distribución está también extendida en periodos, desde 4 s hasta 14 s. Las alturas de olas están prácticamente confinadas a valores de hasta 1m. Esta distribución presenta dos máximos, uno marcado en 5 s y 0.5m y el otro menor en 9 s y 0.5m de altura (Fig. 3.9, panel central). Por ultimo, para fines comparativos, se presenta la distribución para La Misión Exterior. Puede apreciarse un máximo ubicado en 5 s y 1.2 m. El rango de periodos está comprendido entre 3 y 7 s y las alturas entre 0.5 y un poco más de 3m (Fig. 3.9, panel inferior).

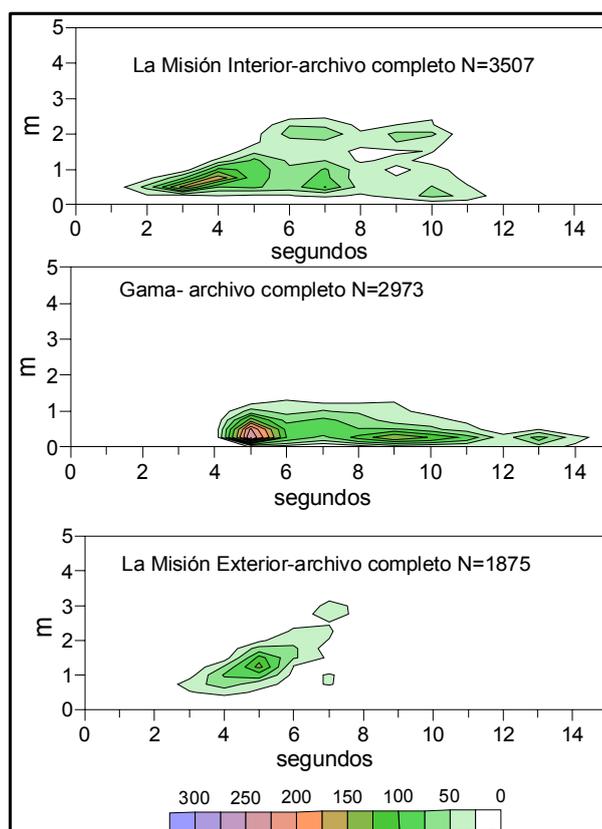


Fig.3.9. Distribuciones bidimensionales para La Misión Interior (superior), Gama (centro) y La Misión Exterior (inferior)

La Fig. 3.10 corresponde al análisis direccional para la estación La Misión Interior, que prácticamente no muestra casos para las direcciones SE y S. Las direcciones más frecuentes son la N, con un máximo entre 1 y 5 s y alturas menores a 1m, y el NE con alturas también inferiores a 1m pero con un rango más grande de periodo, de 3 a 6 s. Para la dirección NW se observa un máximo centrado en 0.5m y entre 1 y 3 s. Las direcciones predominantes para esta estación, como se aprecia de la Fig. 3.10, son la N y NE.

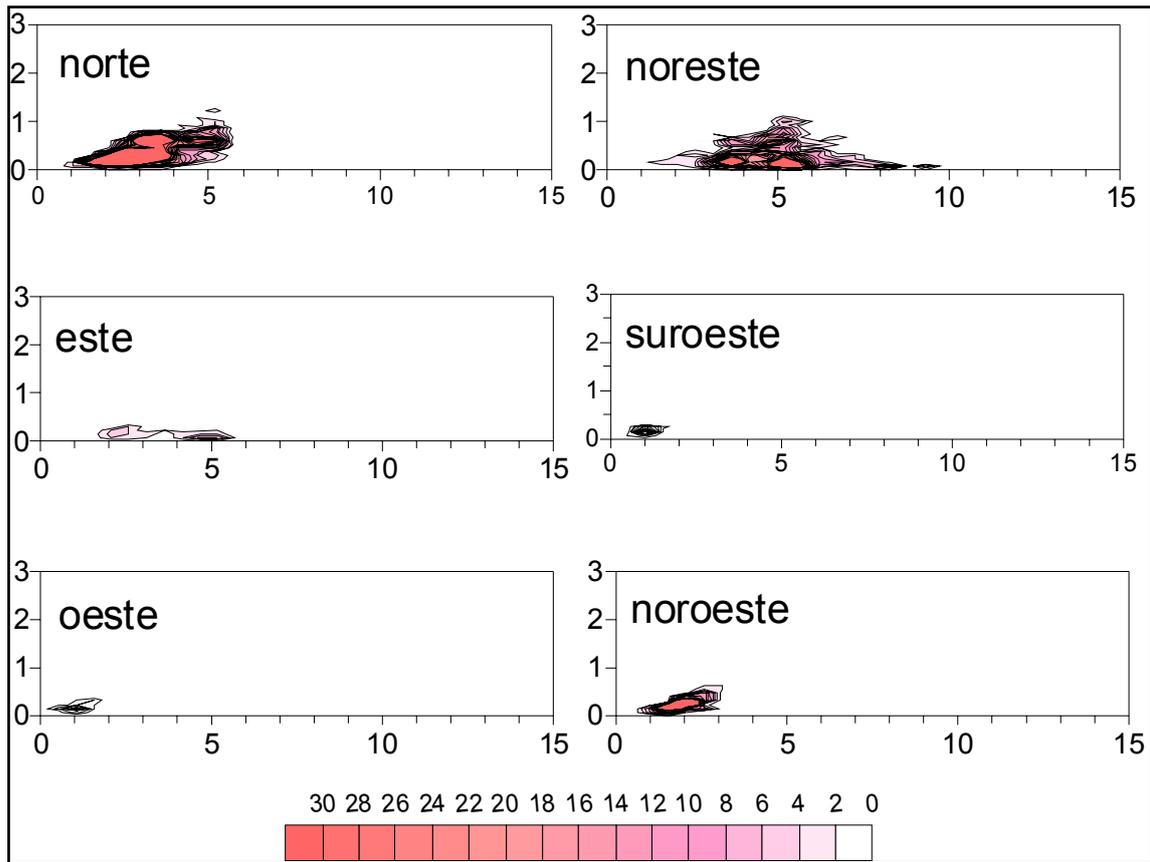


Fig. 3.10. Distribuciones conjuntas direccionales para La Misión Interior. Los períodos, abscisas, están en s y las alturas, ordenadas, en m.

Para la estación Gama, la dirección N muestra un máximo centrado entre 2 - 3 s y 0.4m. El oleaje proveniente del NW, con baja ocurrencia, también tiene alturas que no superan 0.5m con períodos de alrededor de 5 s. Para el E, las alturas tampoco superan los 0.5m, pero muestra un rango mas amplio para los periodos. Las otras direcciones poseen distribuciones con muy poca cantidad de ocurrencias (Fig. 3.11).

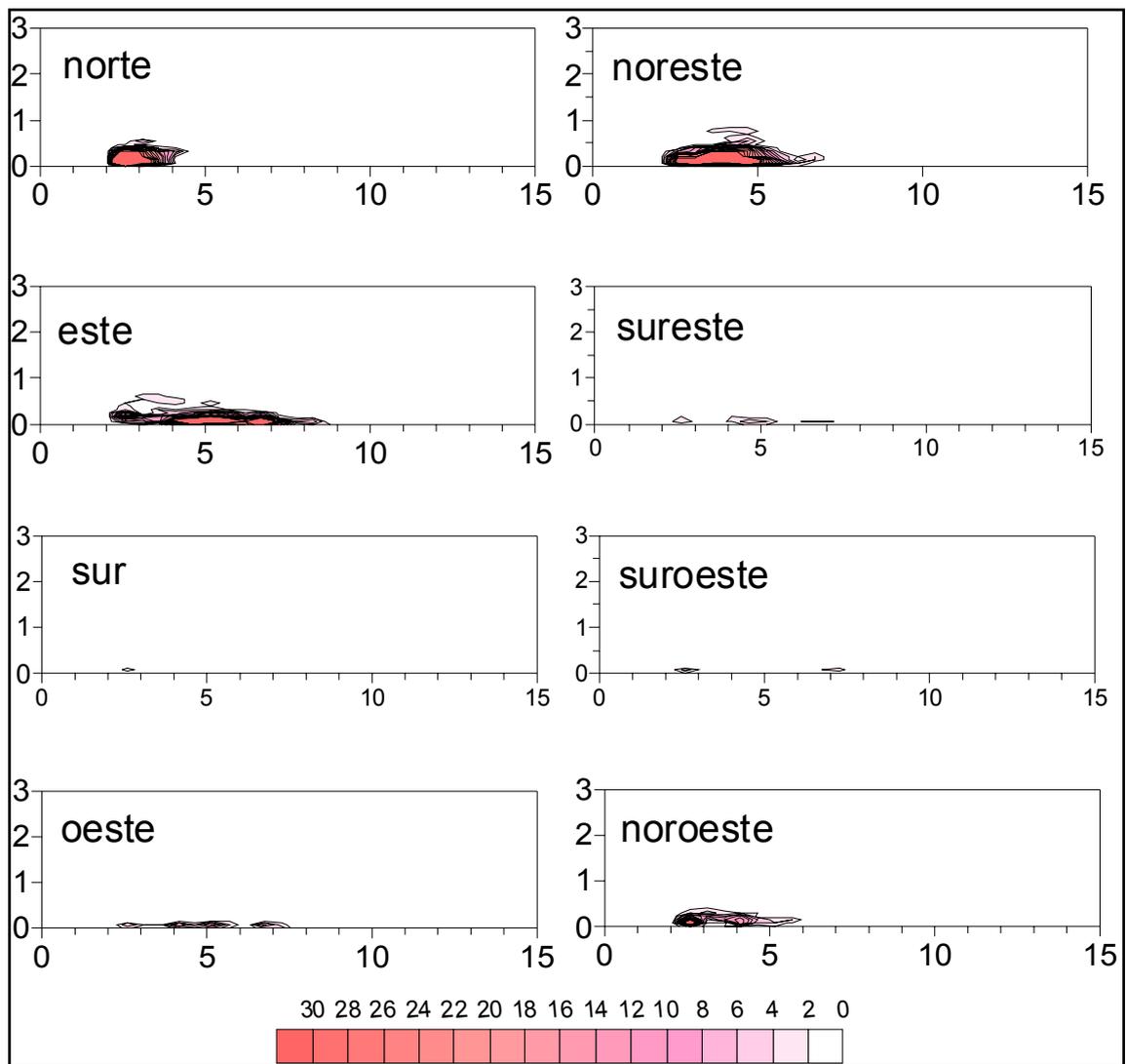


Fig.3.11. Distribuciones bidimensionales direccionales para Gama. Los períodos, abscisas, están en *s* y las alturas, ordenadas, en *m*.

La distribución bidimensional para La Misión Exterior presenta para la dirección NW un máximo de ocurrencias ubicado en $H_s = 1.3\text{m}$ y $T_p = 5$ segundos. Consecuentemente, este par de valores representa la ola más probable en la dirección indicada. Le sigue en porcentaje de ocurrencia la dirección N (31%). Esta distribución presenta una muy marcada dispersión tanto en alturas como en períodos. Para las alturas puede inferirse que la probabilidad de ocurrencia es aproximadamente constante entre 0.2 y 5m. Además, dada la ausencia de máximos en la distribución, se concluye que la dirección N presenta una muy fuerte variabilidad en H_s y T_p , pudiéndose registrar olas altas y cortas, altas y largas, bajas y largas y bajas y cortas.

La distribución de alturas y períodos para la dirección W es similar (en aspecto) a la de la dirección NW. Para esta dirección, el máximo de la distribución se ubica en 1.3m y 4 segundos. Le siguen las direcciones NE, E, SE, S y SW con porcentajes de ocurrencia que no superan el 9%.

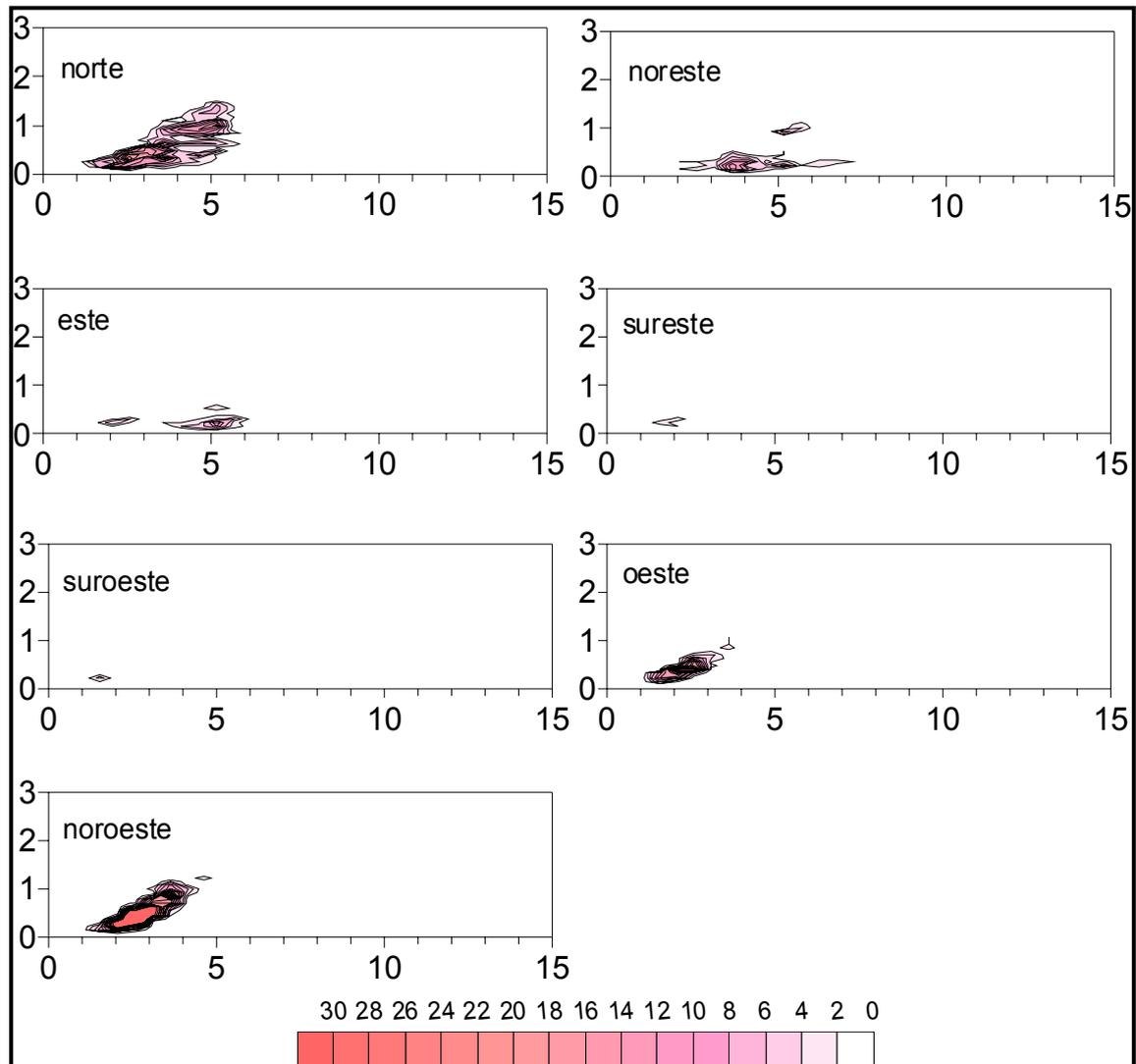


Fig. 3.12 Distribuciones bidimensionales direccionales para la Misión Exterior. Los períodos, abscisas, están en s y las alturas, ordenadas, en m.

3.3. Discusión

La serie de datos de Hidra debe ser interpretada con cuidado ya que el punto más cuestionable parecería ser la heterogeneidad del registro, constituido por alturas obtenidas de olígrafo y por períodos y direcciones inferidas de registros de viento.

Adjudicar la dirección del viento a la dirección del oleaje puede ocasionar resultados distorsionados. Por ejemplo, las direcciones SW y W agrupan el 56% de los datos en Hidra. En cambio, si se considera los dos sitios con registros más prolongados de olas (La Misión Exterior y La Misión Interior-Gama), para las mismas direcciones se obtiene un porcentaje de ocurrencias del 13% para la primera y de tan solo el 3% para la segunda. En consecuencia, dicha comparación revela que la asignación de la dirección del viento a la de las olas puede ser cuestionada, fundamentalmente cuando se pretende elaborar conclusiones relativas a la direccionalidad del oleaje.

Aunque el área de estudio aparece con una cobertura razonable de estaciones (Tabla 3.1) cabe destacar, nuevamente, que en muchas de ellas las series recabadas tienen una duración de tan solo un par de semanas, lo cual es definitivamente insuficiente para el estudio de olas. Consecuentemente, no son útiles desde el punto de vista estadístico. La zona que está mejor cubierta es la correspondiente a la latitud de La Misión, con dos olígrafos direccionales que operaron aproximadamente durante un año (en el Exterior hay una brecha de casi cuatro meses). Dada la posición geográfica de la estación Gama los datos obtenidos en dicho punto se agruparon con La Misión Interior surgiendo así una serie que, junto a los datos de La Misión Exterior, permitió hacer una descripción preliminar del área relativa a las características principales de las olas.

Se concluye entonces que la dirección de mayor número de observaciones es la N (39%) para el olígrafo interior y la NW (41%) para el exterior. Aquí se aprecia claramente que el abrigo (limitación por “fetch”) que le impone la costa al punto interior no afecta de la misma manera al exterior, quedando éste expuesto al viento predominante de esta zona patagónica (con componente W). En la posición interior las olas del NW les siguen en ocurrencia a las del NE y E con tan solo el 11% de casos observados. Resumiendo este punto y tratando de darle una connotación regional, los datos indicarían que cerca de la costa las olas más probables tendrían direcciones comprendidas entre el N y el E y períodos largos. En cambio, más alejado de la costa, el mar responde a los vientos de la zona siendo las olas de generación local las predominantes. Con respecto a los valores máximos registrados, los datos indican que las olas más altas provienen del N y NE en el sitio interior y entre el W y N en el exterior. El resto de las direcciones: SE, E y SW muy pocos casos fueron registradas

en las estaciones. Para las estaciones restantes tienen series de datos cortas (Camxe, Pleyade, Carina y Panamerican), no pueden ser utilizadas como elemento de comparación de valores máximos ni estadísticos pero sí para la validación de métodos de diagnóstico de olas (“hindcasting”).

Es posible realizar un análisis de variabilidad espacial con las estaciones La Misión Exterior y La Misión Interior, dado que estas registraron mediciones casi simultáneamente (Tabla 3.1) y están separadas 30km, aproximadamente, con lo cual puede considerarse a La Misión Interior como costera y a La Misión Exterior como más oceánica. En el sitio interior las olas propagan desde el N-NE con períodos comprendidos entre 4 y 12 s. En el punto exterior, la dirección predominante es N-NW con períodos entre 4 y 10 s. En La Misión Interior, el oleaje severo es menor que 4m (desde el NE) y, en la Misión Exterior, las máximas provienen del NW con alturas que alcanzan valores de hasta 4.5m.

Las distribuciones bidimensionales para La Misión Interior resultaron ser más elongadas, con periodos comprendidos entre 2 y 11 s y alturas de 2m (Fig. 3.10). En Gama se observa un máximo muy claro en 5 s y 1m (Fig. 3.11). La Misión Exterior tiene una distribución más pobre en cuanto al número de datos comparado con las anteriores. Su máximo no es muy notable, se ubica en 5 s y 1m. Las distribuciones bidimensionales direccionales y los antecedentes muestran que las direcciones más frecuentes son para Gama la N-NE, para La Misión Interior la N-NE y para La Misión Exterior la N-NW.

4. MECÁNICA DE LAS OLAS. BREVE RESEÑA TEÓRICA

Existen variadas teorías que explican la generación, propagación y transformación de las olas que van desde la Teoría Lineal (Airy, 1845) hasta complejas teorías no lineales las cuales ofrecen una descripción más realista de las propiedades de las olas como, por ejemplo, la de Stokes (1880), la de Gerstner (1809) o la de Dean (1965). En muchísimos proyectos o estudios se prefiere utilizar la Teoría Lineal de Olas ya que, aunque provea una descripción menos exacta de las características básicas de las olas es una teoría de muy simple aplicabilidad, físicamente robusta, realista y válida para aguas someras, intermedias y profundas. En esta teoría las olas se consideran como ondas sinusoidales de pequeña amplitud que se propagan sobre la superficie del mar con distintas velocidades. Si se define a longitud de onda (λ) como la distancia entre dos crestas sucesivas y al periodo (T) como al tiempo transcurrido entre el pasaje de dos crestas sucesivas (Airy, 1845; Southgate, 1981) la velocidad de propagación de las ondas (C) conocida como celeridad queda definida por la siguiente relación:

$$C = \frac{\lambda}{T}$$

Un resultado central de la Teoría Lineal es que las trayectorias de las partículas de agua de mar son cerradas (McCormick, 1973; Dean and Dalrymple, 1984) y, en consecuencia, estas olas de pequeña amplitud son incapaces de transmitir masa en su propagación, pero si pueden transmitir energía.

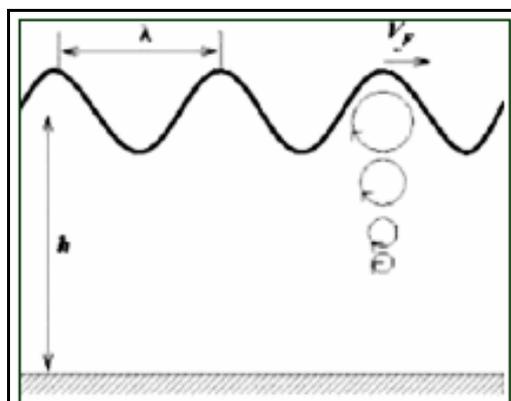


Fig.4.1.a. Movimiento orbital de las partículas en aguas profundas (Welti, 2000)

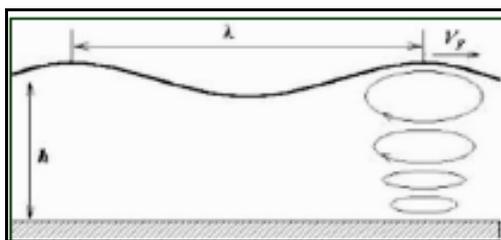


Fig.4.1.b. Movimientos orbital de las partículas en aguas poco profundas (Welti, 2000)

Las ondas superficiales que se propagan en aguas profundas poseen un movimiento de partículas es circular, con un radio que disminuye exponencialmente con el aumento de la profundidad, tal como se observa en la Fig. 4.1.a, siendo h la altura del nivel medio del mar y V_p la velocidad de propagación de las ondas. En este caso, el oleaje no siente el fondo, es como si la profundidad fuera infinita. Para las ondas que se propagan en aguas someras, toda la capa de agua, desde la superficie hasta el fondo está en movimiento. Las trayectorias de las partículas son elipses, tal como se observa en la Fig. 4.1.b. Los ejes mayores de estas elipses son paralelos a la superficie del agua y sus longitudes no varían mucho desde la superficie hasta el fondo. Los ejes menores disminuyen gradualmente desde la superficie y son nulos en el fondo. Esto hace que las elipses se hagan cada vez mas estrechas con el aumento de la profundidad. Los movimientos verticales de las partículas son muy pequeños.

La generación y la propagación de las olas comienzan cuando gran parte de la energía cinética del viento en la baja troposfera es transferida hacia las capas superiores del océano (CERC, 1984; Southgate, 1987; Rodrigues, 2008). Esta transferencia origina un almacenamiento natural de energía en las capas superficiales del agua de mar. Las olas, una vez generadas, pueden viajar cientos o miles de kilómetros propagando su energía hacia regiones muy lejanas a las de origen. (Dean and Dalrymple, 1984). Dicha energía se divide equitativamente en dos partes: cinética, asociadas al movimiento orbital de las partículas de agua y potencial, asociadas a los distintos cambios de los niveles de las partículas de agua (CERC, 1984). Puede demostrarse (ver, por ejemplo, Thorpe, 1999; McCormick, 1973) que la densidad de energía mecánica E (potencial y cinética, Jm^{-2}) por unidad de área de mar y por unidad de tiempo está dada por la siguiente relación:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8}$$

En donde, ρ es la densidad del agua de mar, cuyo valor aproximado puede ser tomado igual a 1030kgm^{-3} , g es la aceleración de la gravedad tomada con valor 9.8ms^{-2} y H la altura de ola (en m). Como se observa, la densidad de energía mecánica total es básicamente dependiente de la altura de la ola y, en consecuencia, presenta valores diferentes a medida que las olas se transforman mientras se acercan a la costa.

Desde hace varias décadas se viene evaluando en aprovechar esta inmensa cantidad de energía disponible en la capa superficial del océano. Cuando se trata del aprovechamiento energético se habla de potencia (que es la variación de la energía por unidad de tiempo) y, consecuentemente, la unidad física que se utiliza es el W (Watt). Como las cantidades de potencia que se utilizan son enormes suelen usarse las unidades KW (10^3 W), MW (10^6 W), GW (10^9 W) y TW (10^{12} W).

A partir de la expresión del flujo de energía de olas la Teoría Linear permite obtener una expresión para evaluar la potencia (P) por ancho de cresta asociada a las olas (Southgate, 1987; Lanfredi *et al.*, 1992) la cual está dada de la siguiente manera:

$$P = \frac{\rho g^2 TH^2}{32\pi}$$

Dado que la energía es máxima cerca de la superficie (Fig. 4.1), la mayoría de los dispositivos convertidores de energía están diseñados para flotar y, en el caso de estar anclados en el fondo, se los ubica en aguas someras para que de esa manera se capte la mayor cantidad de energía posible.

Como por lo general el clima de olas responde directamente al clima de vientos, la energía de olas no se distribuye de forma equitativa en el globo. La energía de olas se incrementa entre 30° y 60° de latitudes en ambos hemisferios, consecuencia directa de los intensos vientos dominantes del oeste (Centre for Renewable Energy Sources, 2006, Proyecto 'Wavenergy, 2007', <http://www.iter.es/proyectos/wavenergy.html>, Rodrigues, 2008). Las máximas alturas se localizan en la costa oeste de Europa, en las

costas occidentales de Canadá y USA, en la región sur de Australia y en América del Sur. (www.wavedragon.net/2005).

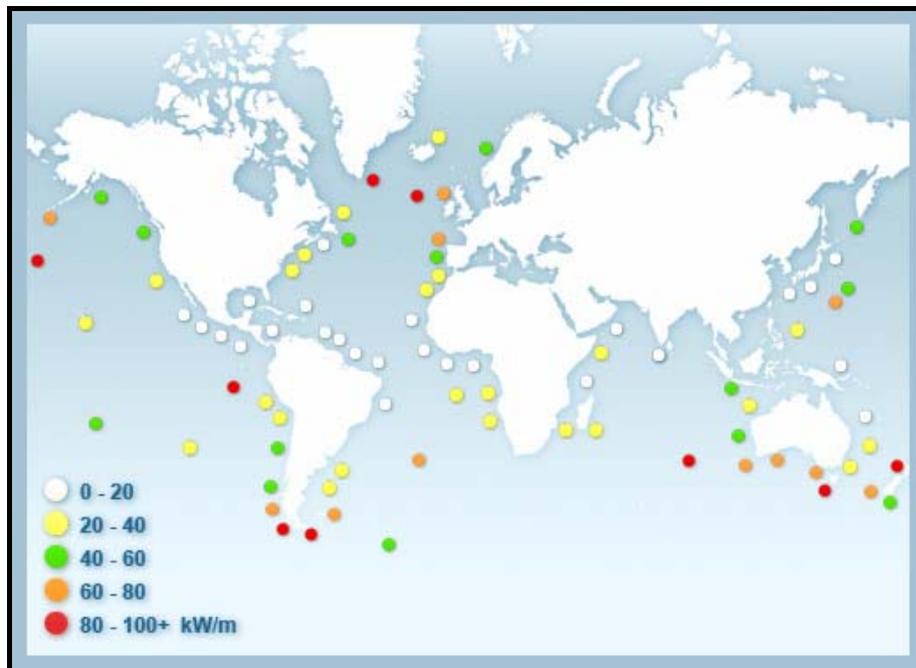


Fig.4.2. Distribución global de la potencia de olas. Los valores de potencia por unidad de longitud están dados en KWm^{-1} . Fuente: <http://www.aw-energy.com>



Fig.4.3. Distribución global de la potencia de olas. Los números indican el valor en KWm^{-1} . Fuente: www.wavedragon.net

Las Fig. 4.2 y 4.3 describen la distribución de la potencia de olas medidas por

dos organismos diferentes. Es un hecho comprobado que las costas oestes de Europa tienen un potencial de olas muy grande, pues éstas se generan en la costa americana y aumentan su altura a medida que cruzan el Atlántico, hasta alcanzar el estado desarrollado. La figura 4.3 es más fácil de interpretar, los valores de potencia están indicados sobre las costas, mientras que el grafico 4.2 sirve para dispositivos alejados de éstas. Otra diferencia es en las costas de Australia, si bien en la costa occidental los valores son equivalentes, sobre el borde oriental y sur, en la figura 4.3 no registra valores. En general, las distribuciones de potencia son del mismo orden para ambas fuentes de información, pero los valores presentados en la Fig. 4.2 son levemente mayores. Para tener una estimación del potencial de olas, se debe evaluar los factores físicos que intervienen en la generación de las olas, es decir, la intensidad y dirección del viento, su persistencia y el "fetch", es decir, la distancia en la dirección del viento sobre la cual éste ejerce su tensión.

5. MODELO NUMERICO

Las mediciones de campo descritas en el Capítulo 3 permiten obtener una visión preliminar sobre la climatología de olas en la región estudiada. Sin embargo, son escasas como para realizar un estudio o una caracterización regional de las olas. En consecuencia, se recurrió a un modelo de generación, propagación y transformación de olas (SWAN, Simulating Waves Nearshore, www.swan.tudelft.nl) el cual fue convenientemente validado con las observaciones de alturas, periodos, y direcciones discutidas precedentemente.

5.1. Descripción del modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore)

El modelo SWAN (Cycle III versión 40.31) simula la altura, el período y la dirección de las olas (modelo de shallow waters), en un dominio previamente seleccionado. SWAN es un modelo numérico de tercera generación utilizado para obtener estimaciones realistas de los parámetros de olas en aguas someras o costeras a partir del viento, la batimetría y los campos hidrodinámicos (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999; Delft University of Technology, 2004). Este modelo se basa en la ecuación de balance de la acción de olas (“wave action”) considerando fuentes y sumideros. Se representan explícitamente, como en otros modelos de tercera generación, la generación del viento, la formación de burbujas (“whitecapping”), los efectos no lineales (“quadruplets”), las interacciones entre olas y la disipación por fricción en el fondo. Además, pueden agregarse interacciones entre olas del tipo “triads” y rompientes inducidas por profundidad. SWAN simula olas aleatorias cortas en áreas costeras, lagos y estuarios, por lo tanto es uno de los modelos más apropiados para la región considerada en este estudio. Asimismo, SWAN permite representar la propagación a través del espacio geográfico, la refracción batimétrica y por corriente, el bajío (“shoaling”) por variaciones espaciales en el fondo, variaciones de frecuencia por corrientes, bloqueo y reflexiones por corrientes opuestas, transmisión a través de obstáculos y bloqueo por reflexión contra obstáculos. Los modelos explícitos costeros, en general, poseen mayor resolución espacial que los de aguas profundas y, por lo

tanto, su ejecución requiere dos órdenes de magnitud más de tiempo. Sin embargo, a diferencia de otros modelos de tercera generación, el esquema numérico de propagación de SWAN es implícito, lo que implica que los cálculos en aguas someras sean más económicos. Las salidas de SWAN se aplican para la gestión de puertos, el diseño de instalaciones “offshore”, el desarrollo y manejo costero y el diagnóstico y pronóstico de olas. Es utilizado, aproximadamente, en 50 países y está registrado en al menos 700 institutos y centros de investigación.

El modelo SWAN es compatible con el paquete de software (3D) de Delft University of Technology lo cual permite un acople directo y eficiente con modelos de circulación (“wave driven currents”) y con modelos de transporte de sedimentos. Aunque SWAN está específicamente diseñado para aplicaciones costeras, puede ser aplicado en cualquier escala espacial (de laboratorio a global). Se lo puede utilizar para modelado de escalas grandes pero solo con la intención de transición de escala oceánica a costera. Esta flexibilidad sirve para anidar SWAN con modelos numéricos mucho más eficientes en escala oceánica como ser el WAM o WAVEWATCH III

En SWAN todas las cantidades están expresadas en unidades del Sistema Internacional (SI), la altura significativa de ola (H_s) y la profundidad en m y el período del pico espectral (T_p) en segundos. Para dirección de viento y olas se eligió la convención náutica (o sea, la dirección desde donde viene la ola o el viento, medida en sentido horario, desde el norte geográfico). La densidad de energía de olas por unidad de superficie de mar se expresa en Jm^{-2} . Se seleccionó coordenadas esféricas ya que son convenientes tanto para escala pequeña como grande y es la más recomendable para anidar. En este trabajo se utilizaron retículos regulares, uniformes y rectangulares para los forzantes y las salidas del modelo, las cuales pueden tener distintas resoluciones espaciales dado que SWAN realiza automáticamente todas las interpolaciones necesarias en sus cálculos. El origen geográfico puede ser elegido arbitrariamente. Todas las posiciones geográficas (ya sea para la batimetría o para los puntos de salida) son definidos con la longitud y latitud geográficas. Los retículos espaciales que deben ser definidos por el usuario son: la correspondiente al dominio computacional, la batimétrica, las de las componentes zonales y meridionales del viento y las salidas (“outputs”) las cuales, opcionalmente, pueden ser las de H_s , T_p , dirección y dispersión de la propagación. La discretización espacial del retículo computacional debe ser tal que resuelva bien los detalles espaciales relevantes como ser, bordes,

cambios bruscos en profundidad, bancos y pendientes pronunciadas. Si los retículos de salidas coinciden con la computacional no hay aproximaciones por interpolación.

En el dominio computacional los bordes pueden ser tierra o agua, en consecuencia, un nodo de cómputo puede ser “húmedo” (incluido) o “seco” (excluido). En el caso de tierra (es decir, nodo seco o excluido) la condición es simple ya que en él se absorbe toda la energía. En cambio, en el caso de un nodo húmedo en el borde la situación puede ser problemática si no se imponen condiciones de ola conocidas. La energía de ola entrante a lo largo de los bordes geográficos abiertos necesita ser predeterminada por el usuario. Para regiones costeras la energía entrante es provista a lo largo de los bordes ubicados en aguas profundas los cuales deben estar lo suficientemente alejados del área de interés para que no afecten las simulaciones. En las simulaciones anidadas se conocen las condiciones de borde con una resolución menor que la del dominio de cómputo. En general, los resultados obtenidos cerca de los bordes del retículo computacional son descartados.

SWAN es un modelo numérico de olas basado en la ecuación de balance de “wave action”. El espectro de densidad que es considerado por SWAN es el de “wave action” $N(\sigma, \theta)$ en vez del de energía $E(\sigma, \theta)$ ya que, en presencia de corrientes, $N(\sigma, \theta)$ se conserva mientras que $E(\sigma, \theta)$ no (Whitham, 1974). Las variables independientes son la frecuencia relativa σ (observada desde un sistema de referencia que se mueve con las corrientes, pero, debe aclararse que en este estudio en particular no se incluyen campos ni de corrientes ni de niveles) y la dirección de olas θ (dirección normal a la cresta de la ola de cada componente espectral). La densidad de “wave action” es igual a la densidad de energía dividida la frecuencia relativa: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$. En SWAN el espectro puede variar tanto temporal como espacialmente. La evolución del espectro de olas es descrito por la ecuación de balance espectral de “wave action” en coordenadas esféricas, dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_\lambda N)}{\partial \lambda} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial(c_\varphi \cos \varphi N)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

El primer término de la mano izquierda de esta ecuación representa la tasa local de la variación de $N(\sigma, \theta)$ en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación en el espacio geográfico, con velocidades de propagación en c_λ y c_φ en λ

(longitud) y φ (latitud), respectivamente. El cuarto término representa la variación de la frecuencia relativa debida a cambios de profundidad y de corrientes (con velocidad de propagación c_σ en el espacio σ). En el presente trabajo, el espacio de frecuencias utilizado en todos los experimentos numéricos tiene 20 frecuencias, comprendidas entre 0.05 y 1.00 Hz. El quinto término representa a los efectos de refracción inducidos por profundidad y por corrientes (con velocidad de propagación c_θ en el espacio θ). Las expresiones de esta última velocidad de propagación son tomadas de la teoría lineal de olas. El término $S(\sigma, \theta)$ de la ecuación de balance representa a los efectos de generación de olas, disipación e interacciones no lineales entre olas. Holthuijsen *et al.* (2004) presentan una explicación detallada relativa a las formulaciones del ingreso de energía debido al viento, a la disipación (“whitecapping”), fricción de fondo y rotura inducida por profundidad) e interacciones no lineales entre olas.

La transferencia de energía del viento a las olas se describe a través de un mecanismo de resonancia y de otro de retroalimentación. El término que da origen a estos mecanismos se describe comúnmente de la siguiente manera:

$$S(\sigma, \theta) = A' + B' E(\sigma, \theta)$$

en donde A' y B' dependen de la frecuencia, la dirección de ola y el viento. La expresión de A' se debe a Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981) e incluye un filtro para evitar el crecimiento en frecuencias menores a la de Pierson-Moskowitz (1964). Para la formulación del coeficiente B' se utilizan dos expresiones opcionales. Una de ellas proviene de una versión antigua de SWAN y se expresa en términos de la velocidad de fricción (Komen *et al.*, 1994) y del coeficiente de arrastre dado por Wu (1982). La segunda expresión para B' proviene de la versión más reciente del modelo SWAN y responde explícitamente a la interacción entre el viento y las olas considerando los efectos de la capa límite y la escala de la rugosidad de la superficie del mar. Las ecuaciones son resueltas según el procedimiento iterativo de Mastenbroek *et al.* (1993).

La integración de la ecuación ha sido implementada en SWAN mediante un esquema de diferencias finitas en las cinco dimensiones: tiempo, latitud, longitud, dirección y frecuencia. Estas se describen para la propagación de las olas sin los

términos de generación, disipación e interacciones entre olas, los cuales son introducidos posteriormente. El tiempo se discretiza con un Δt constante. El espacio geográfico se discretiza en un retículo rectangular de resolución $\Delta\lambda$ y $\Delta\omega$ constantes, la cual es un caso especial de retículo curvilíneo que puede ser considerada por SWAN. El espectro se discretiza con resoluciones direccionales y frecuenciales ($\Delta\theta$ y $\Delta\sigma$) constantes. El esquema numérico de SWAN fue elegido en base a su robustez, exactitud, y economía. Por esta razón se utiliza un esquema implícito “upwind” tanto para el espacio geográfico como para el espectral y una aproximación central para la dimensión temporal.

La técnica de anidado consiste en correr al 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.

En el presente trabajo se corrió SWAN en un retículo regional de baja resolución, aproximadamente 25km x 25km, y también se trabajó con un retículo batimétrica de resolución mayor, aproximadamente, 5km x 5km. En ambas se utilizó una resolución temporal de 20 minutos. Se corrió el modelo con la base de vientos de NCEP/NCAR entre los años 1971 y 2005. Los resultados fueron comparados con las observaciones directas de olas en la región de estudio.

El modelo SWAN se forzó con vientos correspondientes al nivel 10m (U) mientras que para los cálculos se utiliza la velocidad friccional, U^* . Para SWAN la transformación de U a U^* se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$U_*^2 = C_D U^2$$

en la cual C_D es el coeficiente de arrastre dado por Wu (1982), expresado por:

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \cdot 10^{-3} & U < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 U) \cdot 10^{-3} & U \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases}$$

5.2. Forzantes del modelo. Reanálisis del NCEP/NCAR

En la región descrita precedentemente se dispone de una muy baja cobertura espacial de estaciones meteorológicas costeras y, en consecuencia, los datos disponibles en la región medidos en forma directa son insuficientes para generar campos de viento realistas para ser utilizados como forzantes de un modelo de olas. Debido a la carencia de observaciones directas de viento en la región de estudio y considerando que los datos de viento provistos por satélite tienen una baja resolución temporal y son de corta data, en este trabajo se utilizaron las componentes NS y EW (10m de altura) correspondientes a los reanálisis de NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov>) de las 0, 6, 12 y 18 UTC. Esta base de datos ha sido usada para numerosos trabajos como por ejemplo el análisis de variabilidad de viento realizado por (Simionato *et al.*, 2005a, c; 2006a, b; 2007), el estudio niveles de agua y corrientes para el RDP y plataforma continental adyacente (Simionato *et al.*, 2005 b; 2006 c) y para estudios climatológicos de olas (Dragani *et al.*, 2008; Dragani *et al.*, 2010).

La base de datos NCEP/NCAR, aunque de baja resolución, tiene la gran ventaja de cubrir un muy prolongado período de tiempo (desde 1948 a la fecha) y de ser un modelo global, abarcando un dominio computacional mucho más extenso que el del área de interés de este trabajo. Estos reanálisis no son observaciones directas sino el resultado de un análisis objetivo combinando radiosondeos, observaciones de sensores remotos y modelos numéricos (Kalnay *et al.*, 1996). El resultado de este análisis es un conjunto de datos de retículo con resolución espacial 1.875° en longitud y 1.905° en latitud y una resolución temporal de 6hs. Las principales ventajas de este reanálisis son su consistencia física y su relativamente alta cobertura temporal (más de sesenta años). La validación de este modelo fue presentada por Simmonds y Keay (2000).

5.3. Batimetría

El área de estudio se extiende aproximadamente desde 55° S hasta 50° S y desde 63° W hasta 70° W. Para la confección del retículo batimétrica se utilizaron profundidades provenientes de la base mundial “General Bathymetric Chart of the Oceans” (GEBCO, 2003) producida por el British Ocean Data Center (BODC) www.bodc.ac.uk/projects/international/gebco/gebco_digital_atlas/, con una resolución de 1° en latitud y en longitud. Dichos datos proveen una caracterización batimétrica muy realista del océano pero es poco confiable en sitios costeros o someros, como, por ejemplo, la plataforma continental interior. En consecuencia, en el área costera se utilizaron datos batimétricos extraídos de la cartas náuticas (SHN, 2002).

Finalmente, con los datos seleccionados se generaron los dos retículos batimétricos mencionados: una de baja y otra de alta resolución. Ambas fueron anidadas en un dominio atlántico (Fig. 5.1) que se extiende desde 70° W hasta 20° E y desde 65° S hasta 15° S, con un resolución espacial de, aproximadamente, 82.5km x 124.4km. Los dominios regionales de baja y alta resolución se extienden desde 70° W hasta 62° W y desde 55° S hasta 50° S, con resoluciones espaciales de 25km y 5km, respectivamente.

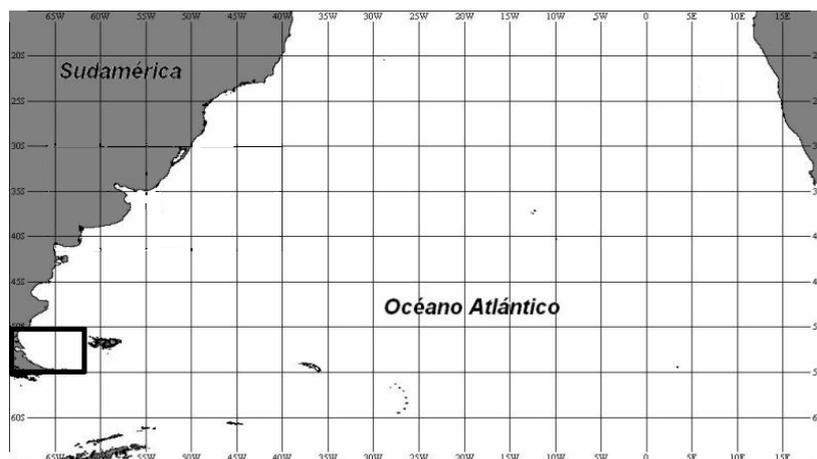


Fig.5.1. Dominio Atlántico. En el rectángulo se delimita el dominio regional utilizado.

5.4. Validación

Los primeros ensayos numéricos se realizaron en el dominio computacional de alta resolución (5km x 5km). Con el objetivo de evaluar la respuesta del modelo se compararon las alturas, períodos y direcciones simuladas con los parámetros de olas observados, descritos en el Capítulo 3. Para las comparaciones se optó por seleccionar las estaciones La Misión Exterior y La Misión Interior por poseer los registros de mediciones más largos y confiables y por abarcar todas las estaciones del año. Se realizó una validación exhaustiva pero, por razones de espacio, se presentan tan solo algunas comparaciones mensuales con el objeto de ilustrar la capacidad de SWAN. Se optó a modo de convención para todos los gráficos de esta sección que las curvas rojas ilustran las simulaciones y las negras las observaciones. Las alturas se dan en metros, los periodos es segundo y las direcciones en grados, (correspondiendo el 0° al N, el 90° al E, el 180° al S, etc.). En el eje de abscisas se grafica el tiempo en horas. En los gráficos sucesivos se presentan las primeras 180 h para facilitar la apreciación de los detalles.

5.4.1. La Misión Exterior

Se presenta la comparación entre los parámetros de olas medidos y simulados correspondientes al mes de diciembre de 1998 (Fig. 5.2). En general se observa un muy buen acuerdo para alturas y períodos y una tendencia al suavizado para las direcciones. Los extremos están bien representados aunque con amplitudes ligeramente diferentes. Las simulaciones, en general, fluctúan alrededor de las observaciones, es decir, hay una alternancia entre lapsos de subestimación y sobreestimación. El ECM (error cuadrático medio) calculado para las alturas correspondiente a este mes es 0.43m. Con respecto a los periodos, se observan lapsos en donde se aprecia una muy buena coincidencia y otros en donde el acuerdo no es tan bueno notándose diferencias mayores a 5 s. Las direcciones simuladas tienden a reproducir un valor medio, probablemente asociado a la dirección del viento predominante.

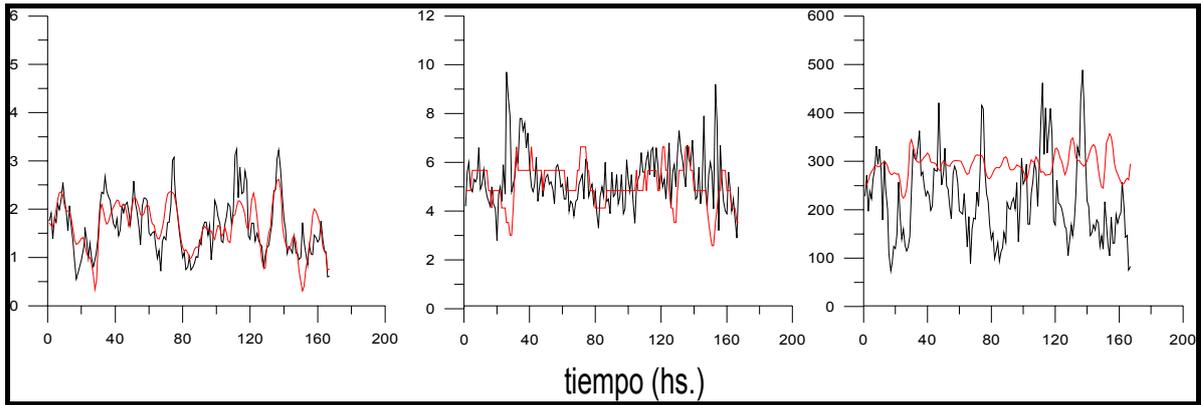


Fig.5.2. *Altura (m, izquierda), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) para la Misión Exterior (diciembre de 1998). Curva roja ilustra las simulaciones y la negra las observaciones.*

El mes de febrero de 1998 (Fig. 5.3) presenta un excelente acuerdo entre las alturas observadas y modeladas. Los extremos están representados casi con los mismos valores y el ECM es de 0.39m. Con referencia a los periodos, el modelo subestima ligeramente los valores en aproximadamente 2-4 s. En cuanto a la dirección, el modelo parece representar mejor la variabilidad sin embargo tiende a dar diferencias de entre 80 y 100°.

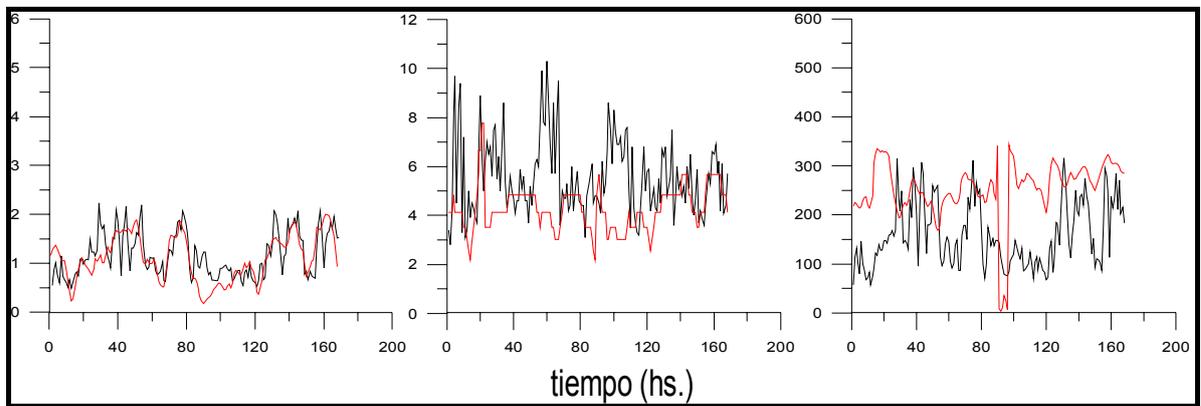


Fig.5.3. *Altura (m, izquierda), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) para la Misión Exterior (febrero, 1998). Curva roja ilustra las simulaciones y la negra las observaciones*

5.4.2. La Misión Interior

Para esta localidad, se presenta la comparación entre los parámetros de ola del mes de febrero de 1998 (Fig. 5.4). Las amplitudes modeladas sobreestiman ligeramente los valores observados. No obstante, la amplitud de las olas está razonablemente descrita con un ECM de 0.68m. Respecto de las direcciones simuladas, el modelo muestra menor variabilidad que las observadas. Con relación a los periodos, el modelo tiende a subestimar a las observaciones.

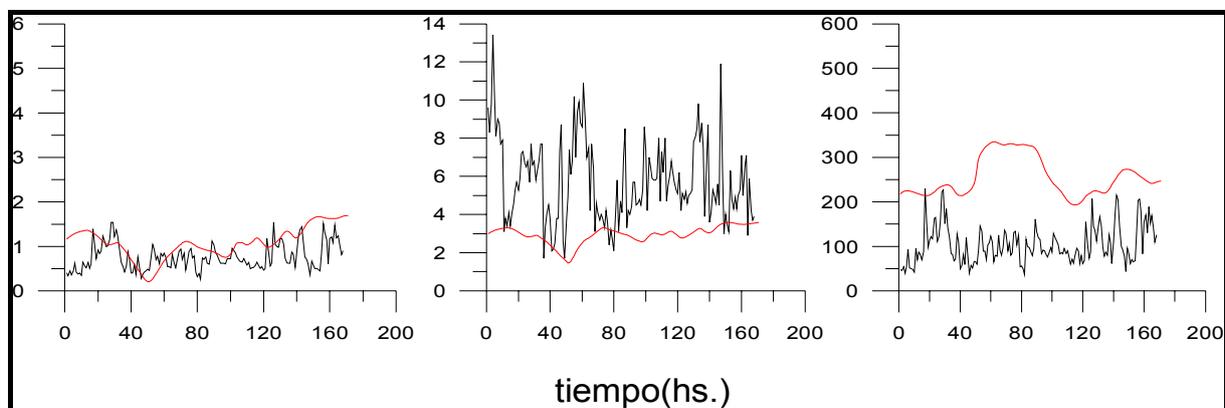


Fig.5.4. *Altura (m, izquierda), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) para la Misión Interior (febrero, 1998). Curva roja ilustra las simulaciones y la negra las observaciones*

Las alturas correspondientes a abril (Fig. 5.5) presentan un ECM de 0.68m. En cuanto a las direcciones, se debe notar que muchos valores modelados están muy cerca de los 360°, lo cual serian direcciones cercanas a la N. Esto estaría significando que las direcciones simuladas están ligeramente corridas respecto de las observadas (entre 50 y 150 °). En cuanto al periodo, los valores simulados, en este caso, están notablemente subestimados.

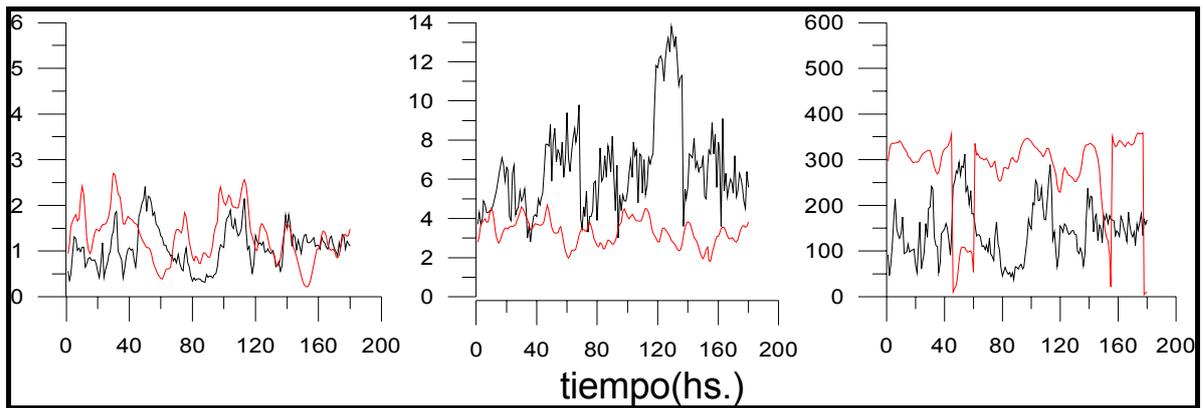


Fig.5.5. *Altura (m, izquierda), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) para la Misión Interior (abril, 1998). Curva roja ilustra las simulaciones y la negra las observaciones*

En un segundo paso se cambio el retículo de alta resolución por una de menor resolución (25km x 25km), respetándose la misma metodología que para el retículo de alta resolución. Los resultados que surgen de la comparación (no mostrados ya que son prácticamente iguales a los de las figuras anteriores) indican que son muy parecidos cuando se consideran cualquiera de las dos resoluciones previstas. Por esta razón y considerando el ahorro de tiempo de procesamiento que implica utilizar el dominio de baja resolución, se optó por trabajar con el retículo de baja resolución, de ahora en más caratulada como tf25, para el estudio energético realizado en la presente Tesis.

5.5. Condiciones iniciales y de borde

Con el objeto de lograr una estabilización adecuada de la solución dentro del dominio computacional las simulaciones realizadas para cada año se iniciaron el 1ro de diciembre del año anterior y, en consecuencia, el primer mes es descartado de los procesamientos. Previamente, se realizó un experimento numérico para estudiar la sensibilidad de los resultados ante la inclusión de condiciones de borde al recinto adoptado. Para ello, el dominio tf25 se anidó a uno más extenso (de menor resolución, Fig. 5.1, caratulado como dominio “atlántico”) que abarcaba casi todo el Océano Atlántico Sudoccidental. La convención para los gráficos es la misma que la adoptada anteriormente. Las curvas rojas y azules corresponden a los parámetros obtenidos de las simulaciones sin anidar y anidadas, respectivamente.

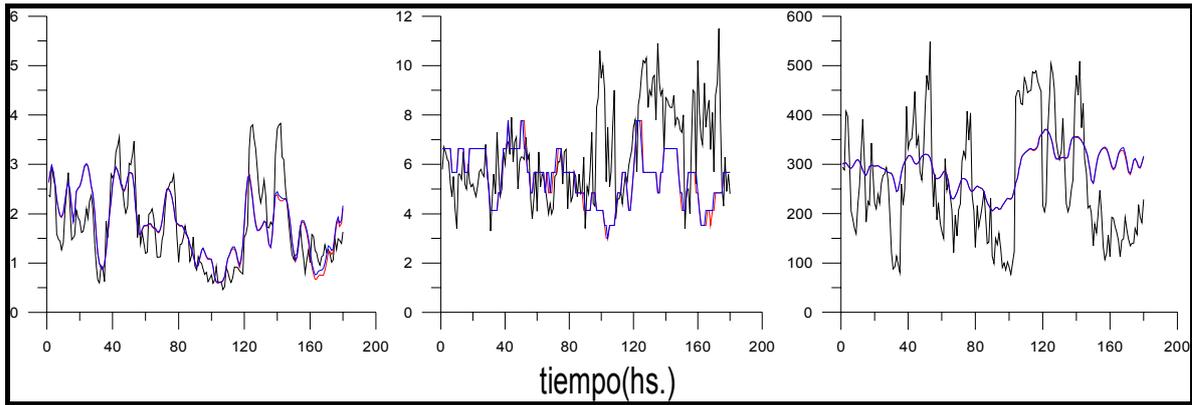


Fig.5.7. *Altura (izquierda, m), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) para la Misión Exterior (septiembre, 1998). Curva negra: parámetros observados, curva roja: parámetros de simulación sin anidar, curva azul: parámetros de simulación anidada.*

No se encontraron diferencias importantes entre las simulaciones obtenidas en el dominio anidado en el recinto atlántico y en el retículo sin anidar tanto para la altura, el periodo y la dirección. La Tabla 5.1 muestra los ECM para septiembre de 1998, donde la similitud entre ambas salidas del modelo se hace evidente. En cuanto al comportamiento de estos resultados comparativamente con las observaciones, en el caso de la altura, la correspondencia es muy buena. Se logra reproducir bien la variabilidad aunque el modelo tiende a subestimar ligeramente los valores máximos. Los períodos simulados en general están un poco subestimados y las direcciones simuladas tienden a estar alrededor de 300° con una variabilidad de aproximadamente $\pm 60^\circ$.

ECM-25km	Hs (m)	Tp (s)
Sin anidar	0.52	2.3
Anidada	0.52	2.3

Tabla 5.1. *ECM de parámetros olas para el modelo anidado y sin anidar (septiembre, 1998).*

Para el mes de agosto de 1998 tampoco se encontraron grandes diferencias entre las simulaciones anidadas y sin anidar (Fig. 5.8). En la Tabla 5.2 se presentan los ECM para ambas simulaciones comparativamente a las observaciones. Las alturas modeladas reconstruyen la variabilidad de las observaciones, pero algunos máximos están subestimados. El periodo, como en los casos anteriores, está un poco

subestimado pero las simulaciones tienden a reproducir la variabilidad. Las direcciones simuladas tienden a mostrar una menor variabilidad que las observadas.

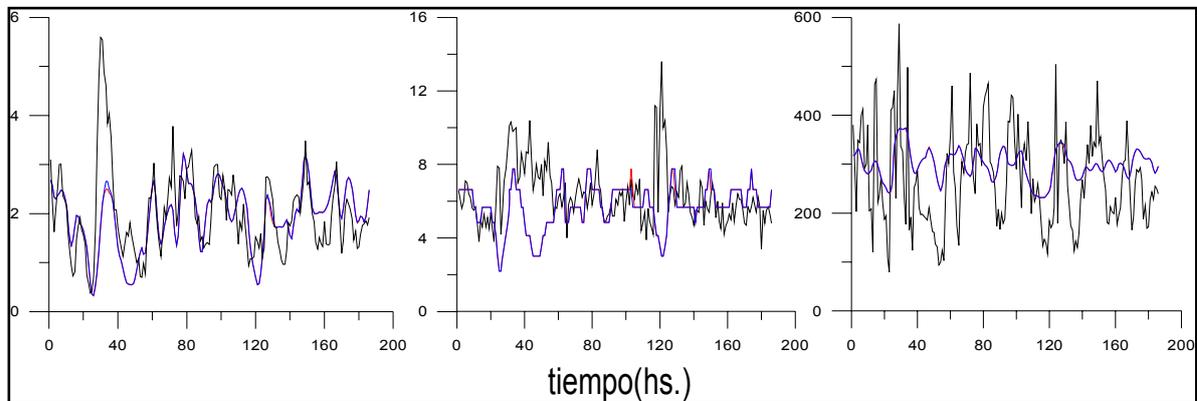


Fig.5.8. Altura (izquierda, m), periodo (centro, s) dirección (derecha, grados) la Misión Exterior (agosto, 1998). Curva negra: parámetros observados, curva roja: parámetros de simulación sin anidar, curva azul: parámetros de simulación anidada.

ECM- 25km	Hs (m)	Tp (s)
Sin anidar	0.76	2.3
Anidada	0.75	2.3

Tabla 5.2. ECM de parámetros olas para el modelo anidado y sin anidar (agosto, 1998).

5.5.1. Conclusiones parciales

En esta Tesis se implementaron tres dominios computacionales: dos regionales, sobre la plataforma continental fueguina con resoluciones de 5km y 25km, y uno más grande que abarcaba casi todo el océano Atlántico Sur. De los resultados obtenidos se aprecia que las simulaciones realizadas en el dominio regional de baja resolución (25 km) brindan resultados muy similares a los obtenidos en el dominio de alta resolución (5km). Por otro lado, se ha demostrado que el anidado de ambos recintos regionales en el dominio atlántico no mejora sustancialmente las simulaciones. Esto indicaría que los dominios regionales poseen una dimensión adecuada, con “fetch” suficiente como para reproducir los valores observados. Sin embargo, en este trabajo, para las simulaciones de los campos de olas comprendidos entre 1971 y 2005, se adoptó el dominio de baja

resolución regional (25km) anidado al dominio atlántico ya que, aunque no mejoraba sustancialmente las simulaciones, no insumía un costo computacional mayor.

Finalmente, en lo que respecta a la validación propiamente dicha, SWAN, en el dominio regional de baja resolución, permite obtener simulaciones de alturas muy razonables, con ECM inferiores a 0.70m. Sin embargo, los períodos simulados están levemente subestimados, obteniéndose ECM comprendidos entre 2 y 3 s. Tal vez el parámetro más pobremente simulado sea la dirección del oleaje. El modelo SWAN tiende a dar valores de dirección con poca variabilidad temporal. Quizá, la posible causa de esto esté en la base de vientos utilizada, la cual tiene una resolución espacio temporal relativamente baja. Una posible alternativa para estudiar esto sería reproducir todo este estudio utilizando otra base de datos de viento con mayor resolución espacio temporal (proveniente de algún modelo atmosférico regional, como, por ejemplo, el del SMN). Esta tarea, por supuesto, escapa a los objetivos planteados en esta Tesis y constituye una posible futura línea de trabajo.

Finalmente, vale destacar que para el cómputo de la potencia de las olas (Cap. 4) el parámetro más importante es la altura (ya que aparece en el numerador elevada al cuadrado) y, en segundo lugar, el período (aparece como un factor lineal en el numerador). A pesar que la dirección del oleaje no interviene en el cómputo de la potencia puede ser un parámetro importante a considerar a la hora de instalar algún convertidor de energía en algún sitio específico.

6. CAMPOS MEDIOS DE ALTURAS, PERIODOS Y DIRECCIONES

Para el estudio energético de las olas se realizaron simulaciones numéricas utilizando el dominio regional de baja resolución anidado en el dominio atlántico, forzando con vientos (reanálisis) de la base NCEP/NCAR entre los años 1971 y 2005. En este capítulo se presenta un estudio de alturas, períodos y direcciones, brindándose los campos de H_s (m), T_p (s) y direcciones ($^\circ$) para diferentes estaciones, meses y años.

6.1. Campos medios climatológicos

En la Fig.6.1 se presenta el campo medio de H_s para todo el período de simulaciones (1971-2005) caratulado aquí como “campo climatológico”. 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 1m hasta casi 3m.

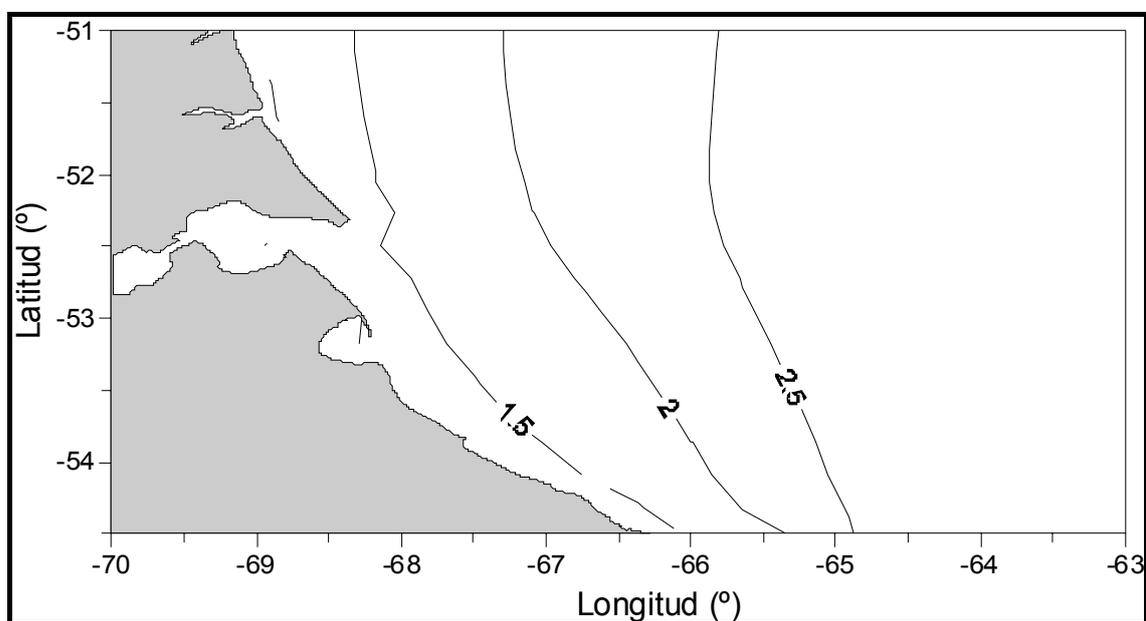


Fig.6.1. Altura significativa media (m). Período 1971-2005.

En cuanto al período medio (Fig.6.2) 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 Hs 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 (Frumento, 2003 Comunicación Personal). Esta constancia en la dirección de los vientos se manifiesta en la formación de oleaje proveniente principalmente del SW, con una dirección media de $240^{\circ} \pm 31.5^{\circ}$ (Fig. 6.3) en casi toda la región (“off-shore”) estudiada. En el océano abierto, el “fetch” 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.

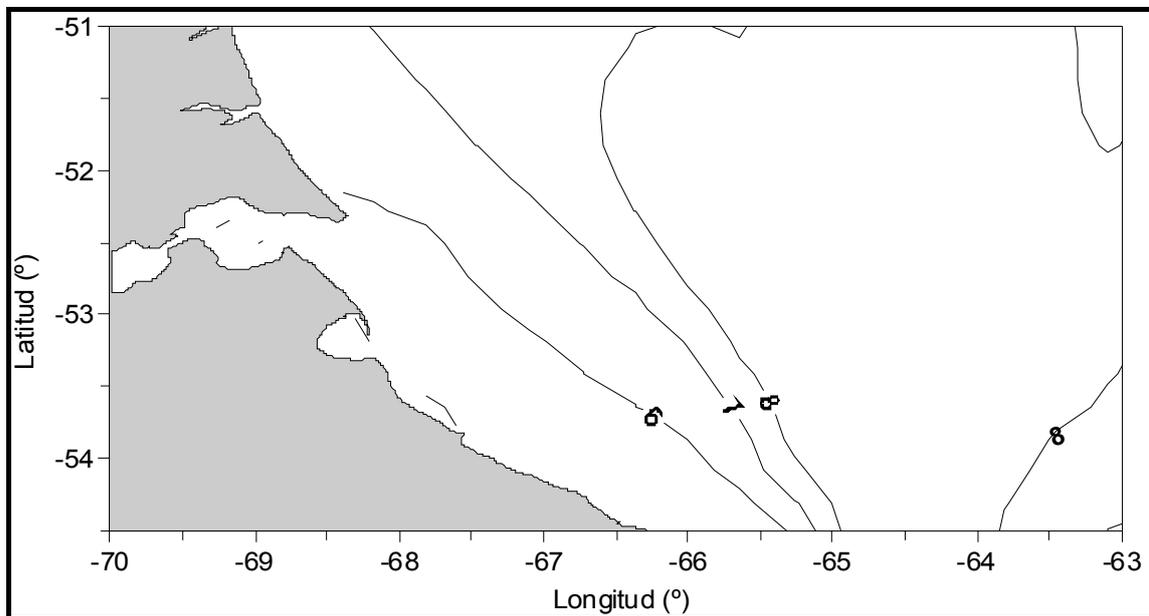


Fig.6.2. Período del pico espectral medio (s). Período 1971-2005.

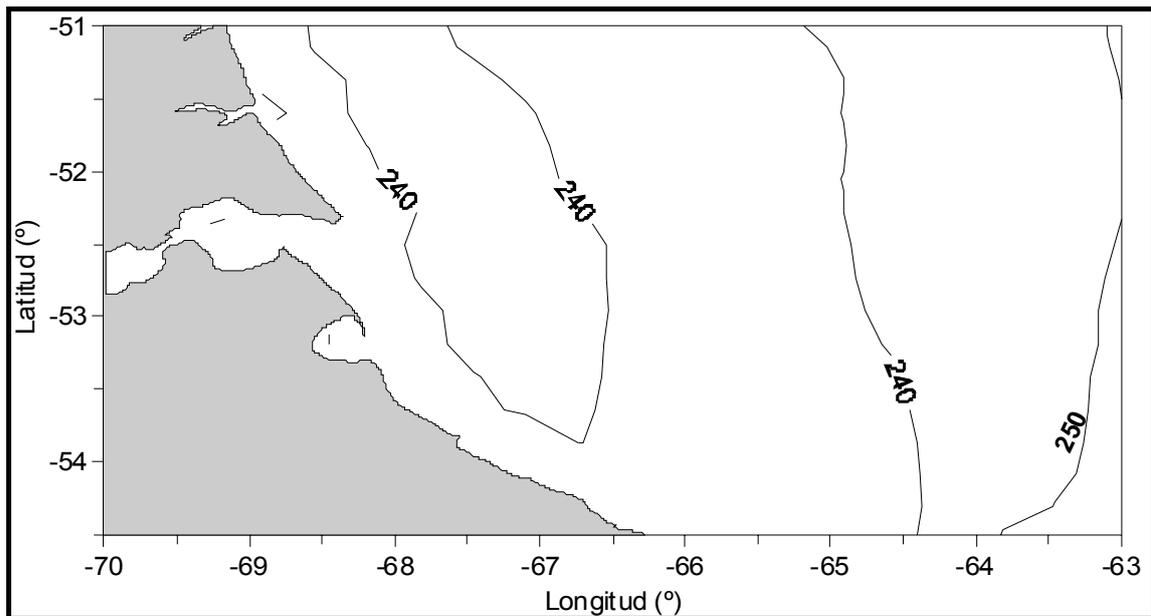


Fig.6.3. Dirección media de las olas (°). Período 1971-2005.

6.2. Campos estacionales

En la Figura 6.4 se presentan los campos estacionales de alturas que surgen del promedio de 35 años (1971-2005). Para el verano, otoño e invierno (Fig. 6.4. a, b y c) los mapas de altura son muy similares al medio (Fig. 6.1), mostrando alturas máximas “offshore” de 3m, aproximadamente, las cuales disminuyen hacia la costa hasta un valor de 1.2m, con gradientes zonales similares. Durante la primavera (Fig. 6.4.d) se alcanzan alturas levemente mayores a las anteriores, sobretodo lejos de la costa, con valores ligeramente superiores a 3m.

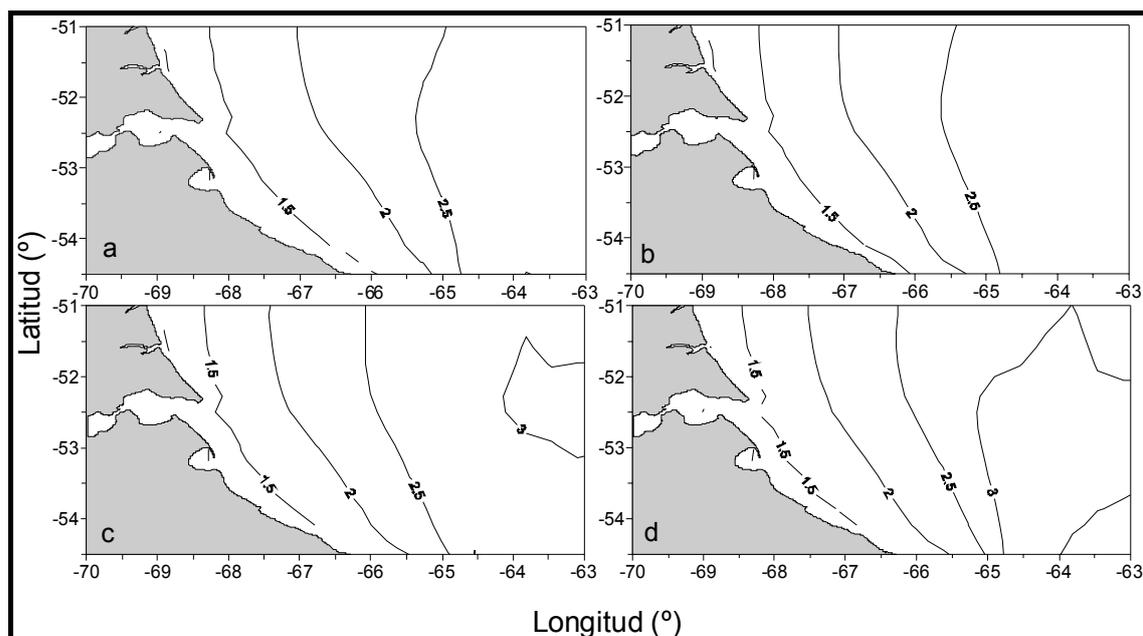


Fig.6.4. Campo de alturas de ola significativa. Período 1971-2005. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

En la Tabla 6.1 se presentan los parámetros estadísticos principales de las alturas de ola correspondientes al promedio de todos los puntos del retículo. De la misma se puede apreciar que no existe prácticamente variabilidad estacional en las alturas: la media correspondiente al verano (mínimo) es 2.14m y la media de primavera (máximo) es de 2.43m. Los máximos valores pueden ocurrir durante cualquier momento del año y la variabilidad (cuantificada por el desvío estándar) presenta valores homogéneos comprendidos entre 0.50 y 0.70m.

Hs (m)	Verano	Invierno	Otoño	Primavera
Máxima	2.82	3.05	2.87	3.60
Media	2.14	2.34	2.21	2.43
Desv. estándar	0.61	0.51	0.66	0.70

Tabla 6.1. Valores estadísticos para la altura significativa de ola (m).

En la Fig.6.5 se presentan los campos estacionales para el período de ola. Para las cuatro estaciones los mapas de períodos son muy similares al del campo medio (Fig.6.2), mostrando valores ligeramente inferiores a 5 s cerca de la costa y un aumento gradual hacia el E, hasta aproximadamente 8 s. En las cuatro estaciones se

aprecia un mayor gradiente zonal hacia el S del dominio, en concordancia con el campo medio.

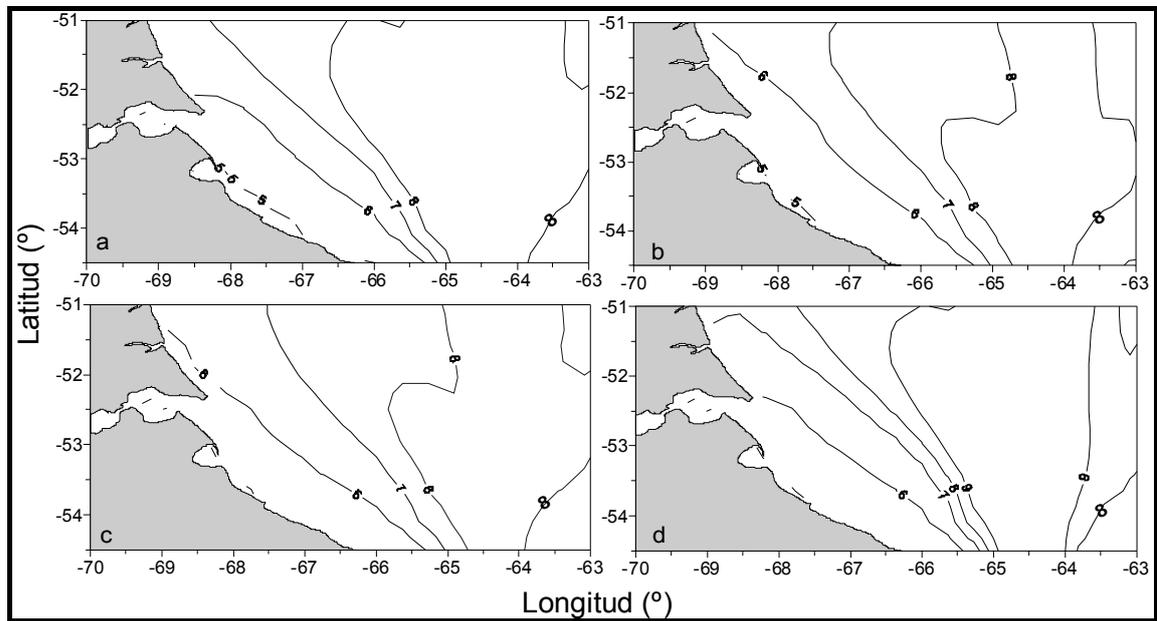


Fig.6.5. Campo de períodos de ola. Período 1971-2005. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Los campos medios estacionales de dirección del oleaje (Fig.6.6) muestran que en verano y primavera el oleaje proviene de la dirección 240° (WSW). En cambio, en otoño e invierno, el oleaje se hace ligeramente más del SW (230°) sobretodo cerca de la costa fueguina.

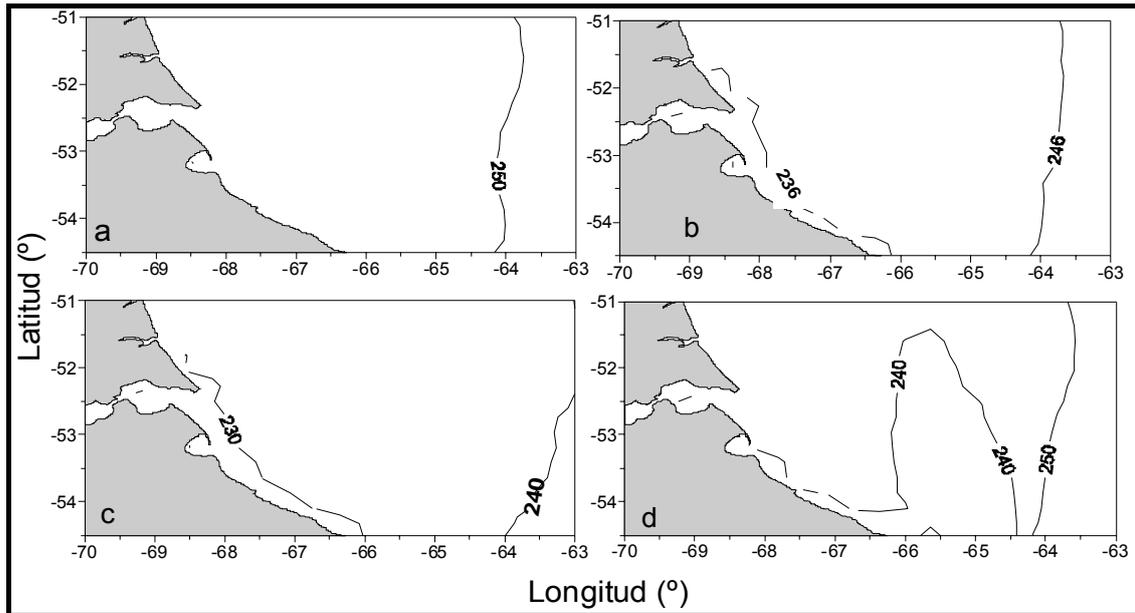


Fig.6.6. Campo de direcciones de ola. Período 1971-2005. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

6.3. Campos mensuales

En esta tesis se computaron los doce campos mensuales correspondientes al período 1971-2005. Las simulaciones no revelan una variabilidad mensual importante, sino leves variaciones respecto de los campos medios presentados en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3. A modo de ejemplo, se presentan y discuten brevemente los campos mensuales medios de alturas, períodos y direcciones correspondientes a junio, julio y agosto.

En la Fig.6.7 y 6.8 se presentan los campos de alturas de ola significativa y de períodos, respectivamente, correspondientes a los meses de junio (a), julio (b) y agosto (c). Como se adelantara previamente muestran gran similitud con el campo medio correspondiente al promedio de los 35 años analizados.

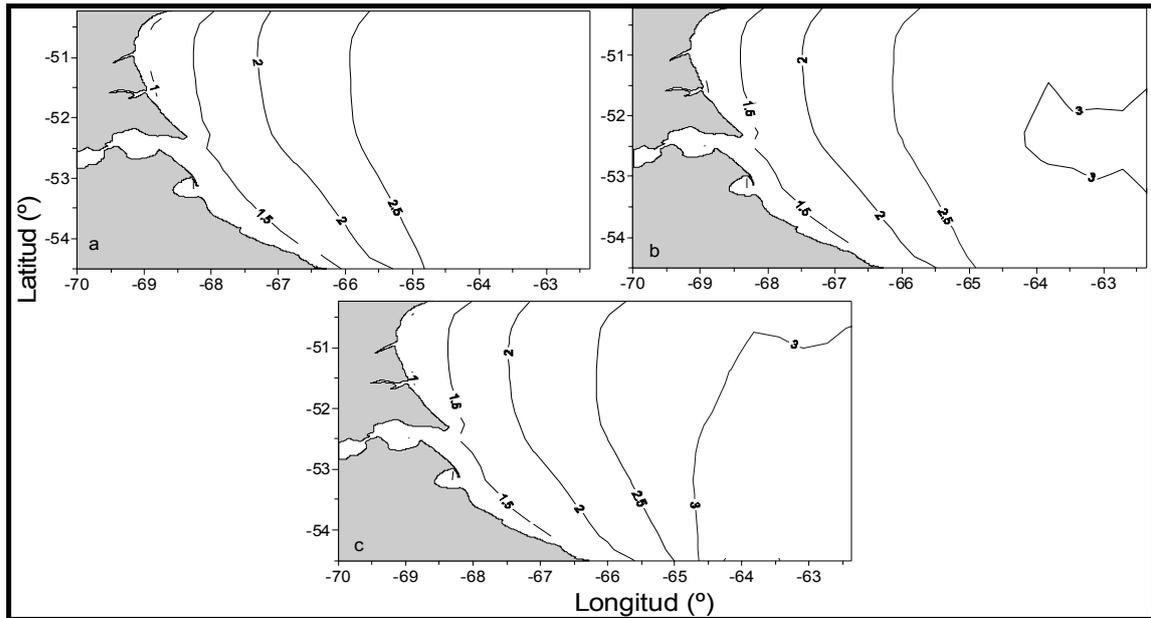


Fig.6.7. Campo de alturas de ola significativa. Período 1971-2005. (a) junio, (b) julio y (c) agosto.

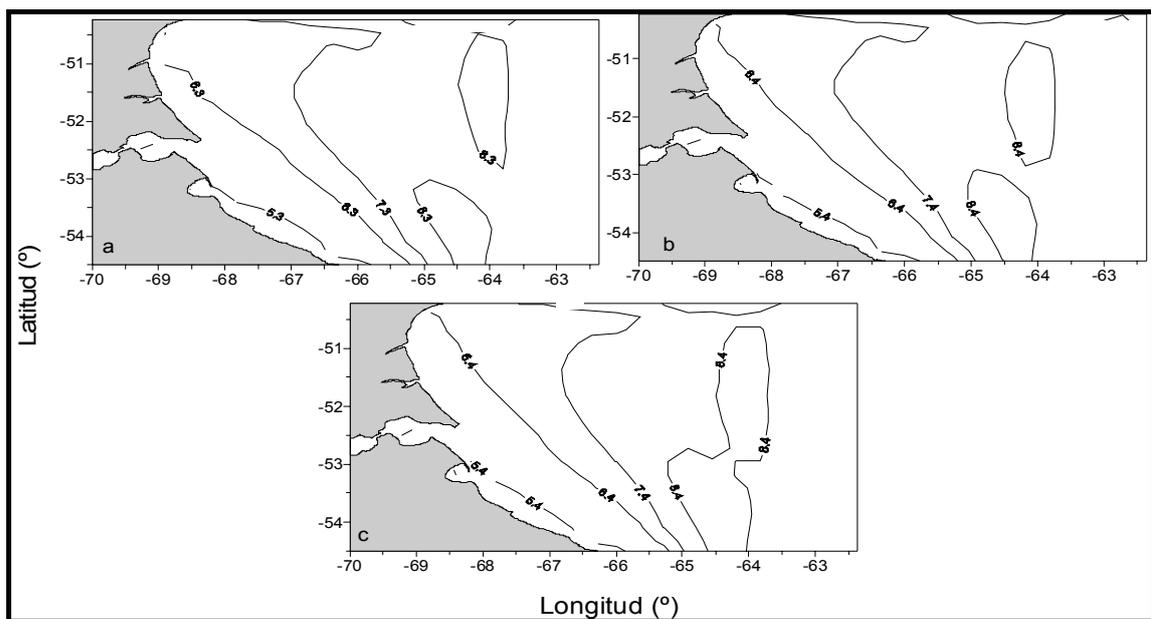


Fig.6.8. Campo de períodos. Período 1971-2005. (a) junio, (b) julio y (c) agosto.

Los mapas de direcciones (no mostrados) correspondientes al promedio de los junios muestran valores cercanos a 220° en toda la región costera. El mapa correspondiente a julio muestra valores que rondan los 230° y el de agosto valores de 240° , aproximadamente. Esto indica que, entre junio y agosto, el oleaje tendería a rotar

unos 20°, del SW al WSW lo cual, desde el punto de vista práctico u operativo es un cambio poco significativo.

6.4. Campos anuales

Como complemento de este trabajo se elaboraron los campos medios anuales de alturas, períodos y direcciones de olas con el objeto de evaluar la variabilidad interanual de estos parámetros. A modo de ejemplo, se presentan y discuten algunos campos anuales, seleccionándose para este análisis aquellos con diferencias mas pronunciadas con respecto a los campos medios (1971-2005) de alturas, períodos o direcciones.

Los campos medios correspondientes al año 1983 muestran alturas de olas inferiores a la media correspondiente al período de 35 años. Cerca de la costa las alturas son del orden de 1m y hacia el E se aprecia un aumento gradual hasta un poco menos de 2.5m. También se puede apreciar un menor gradiente zonal de alturas. La altura máxima alcanzada en un punto de control en la plataforma fue de 2.4m. Los periodos medios correspondientes al año 1983 muestran una distribución espacial homogénea, con valores comprendidos entre 5 y 6 s. La dirección media de propagación de olas es 265°, es decir, prácticamente del W, la cual difiere un poco de la del campo medio climatológico (Fig.6.3).

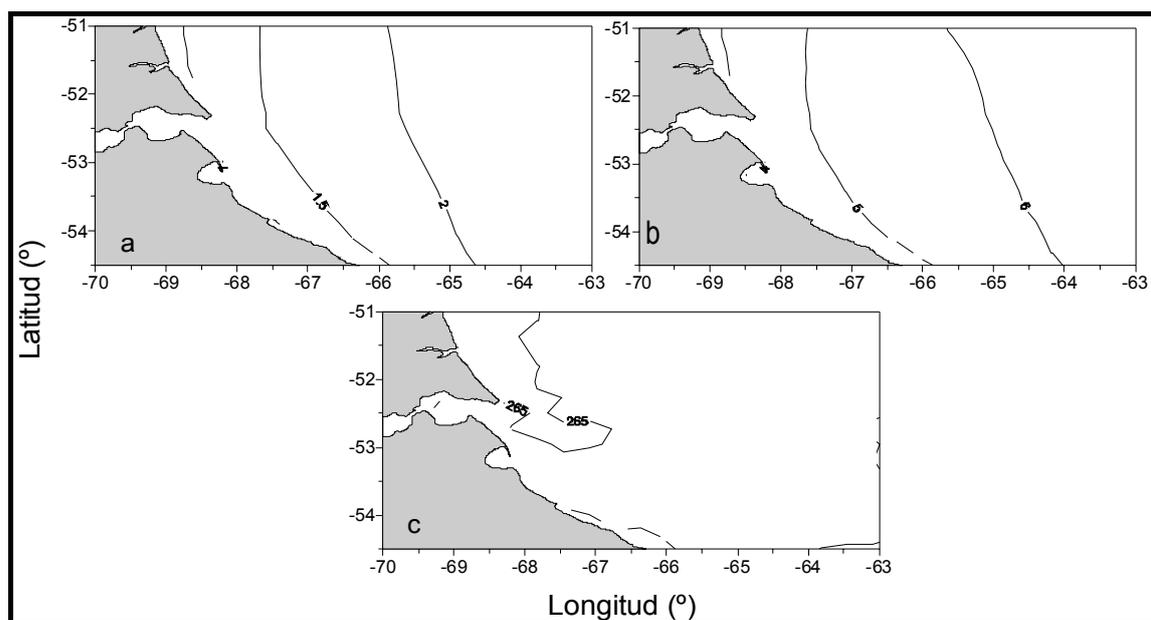


Fig.6.7. Campos medios anuales (1983). (a) Alturas, (b) períodos y (c) direcciones.

Se presentan, a continuación, los campos correspondientes al año 1999 (Fig. 6.8) por tener gran similitud con la media climatológica de alturas (Fig.6.1) pero por mostrar algunas diferencias en el campo de direcciones y períodos (Fig. 6.2 y 6.3). Las alturas presentan una distribución espacial concordante con el campo medio (Fig. 6.1) con valores crecientes hacia el E, desde 1.5 a casi 3m, aproximadamente. Los períodos, en cambio, muestran una distribución más homogénea que la media climatológica, con valores que, aumentando también hacia el E, van de 5 a 7 s. Las direcciones muestran una distribución espacial atípica, aproximadamente al N de 52° el oleaje se propaga desde el W en toda la franja zonal y, al S de 52° el oleaje se propaga desde el NW. Esta distribución es completamente diferente a la correspondiente al campo medio (Fig.6.3) donde el oleaje se mostraba predominantemente del SW.

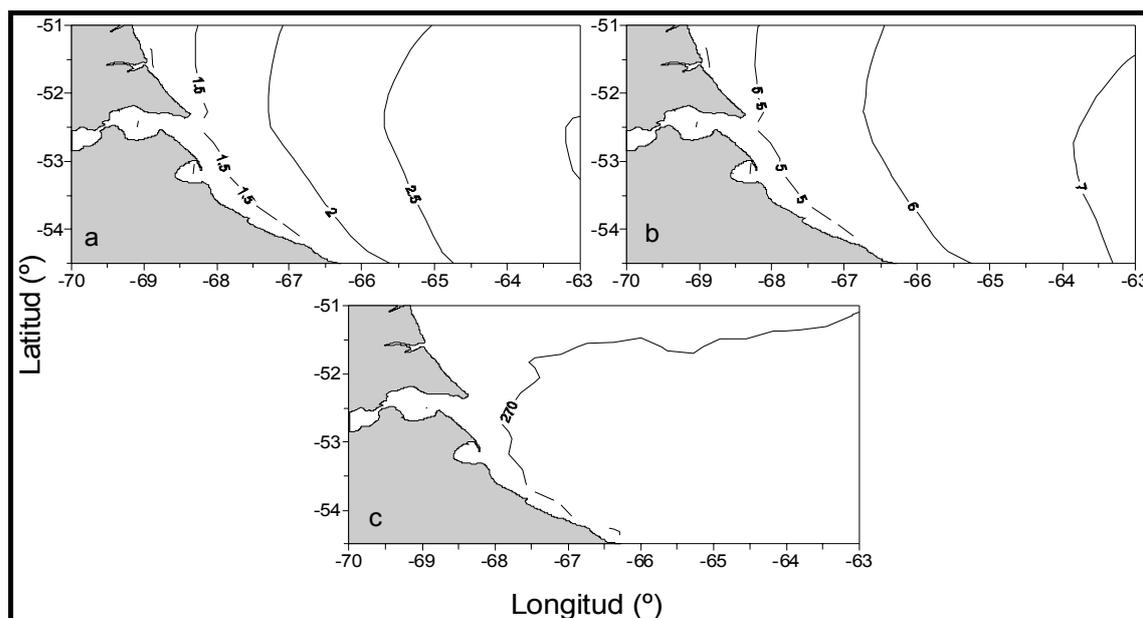


Fig.6.8. Campos medios anuales (1999). (a) Alturas, (b) períodos y (c) direcciones.

Los campos correspondientes al año 2002 (Fig.6.9) muestran alturas similares a las del campo medio (Fig. 6.1) pero con valores ligeramente menores, sobre todo hacia el E del dominio. Los períodos muestran una gran homogeneidad en todo el recinto con valores comprendidos entre 5 y 6 s, aproximadamente. El mapa de direcciones es bastante similar al del año 1999 (Fig.6.8.c). Sin embargo, para el año 2002 las direcciones medias son aproximadamente del 250°, a diferencia del año 1999, siendo

predominantemente del 270°.

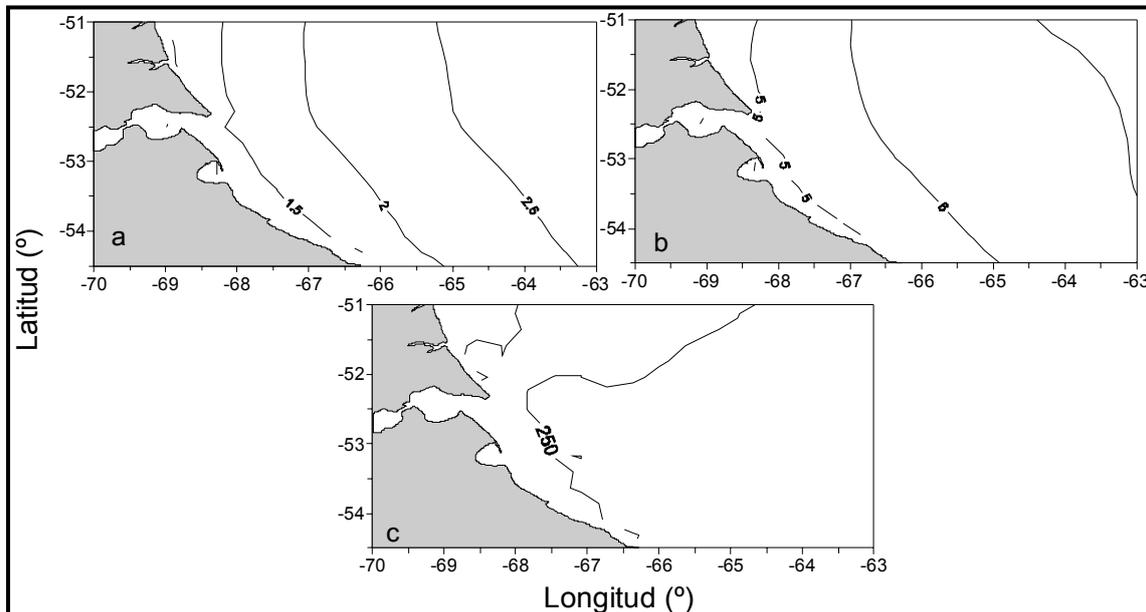


Fig.6.9. Campos medios anuales (2002). (a) Alturas, (b) períodos y (c) direcciones.

6.5. Conclusiones parciales

Sobre la base de los resultados, discusiones y análisis presentado en este capítulo se concluye que las alturas de olas aumentan gradualmente de W a E, con valores que van desde alrededor de 1m cerca de la costa hasta aproximadamente 3m en la región oriental del dominio computacional. Vale aclarar que los resultados presentados estarían eximidos de problemas de borde o frontera ya que los dominios computacionales propiamente dichos fueron convenientemente recortados al N, al S y al E, con el objeto de eliminar la presencia de valores espurios de alturas, períodos y direcciones en las soluciones mostradas.

Los resultados obtenidos muestran una muy escasa variabilidad estacional, con una tendencia a alturas levemente mayores en primavera. Asimismo la variabilidad mensual es baja, observándose en los campos mensuales ligeros apartamientos respecto del campo medio correspondiente al período 1971-2005, denominado aquí climatológico. Vale destacar que el análisis de la variabilidad mensual se efectuó sobre

los doce meses del año y que, en esta Tesis, por razones de espacio, solo se presentaron las medias correspondientes a junio, julio y agosto. Finalmente, el estudio de la variabilidad en los campos anuales de alturas, períodos y direcciones revelan que las principales variaciones se observan en los campos de direcciones, que si bien son predominantes del SW-WSW, se aprecian años con predominio neto del W, del WSW o del SW.

7. POTENCIA DE LAS OLAS

La estimación de la potencia por unidad de longitud de cresta de la ola se estimó de la manera explicada en el Capítulo 4. El campo obtenido para la potencia media (1971-2005) se presenta en la Fig.7.1. Este claramente muestra que la potencia tiene una marcada tendencia a incrementarse hacia el E, consistentemente con el incremento que presentan los campos de Hs y T. La zona de máxima potencia se ubica a partir de 65° W, correspondiendo a una profundidad de 150m, aproximadamente, en concordancia con las mayores alturas y períodos de ola.

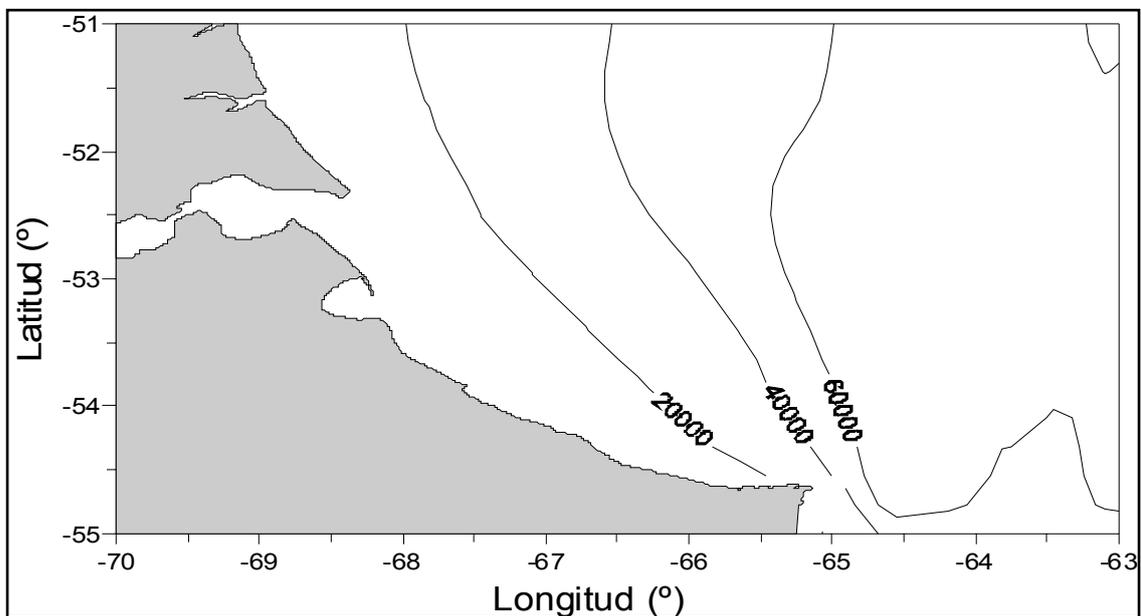


Fig.7.1. Campo medio (1971-2005) de potencia de olas por unidad de longitud de cresta (W/m).

7.1 Variabilidad estacional de la potencia

Se estudia aquí la variabilidad estacional en los campos de potencia (Fig.7.2). Estos campos exhiben el mismo patrón que la potencia media, es decir, un aumento de 10 KW/m, en la costa, hasta valores máximos en 65° S, aproximadamente. Los campos de invierno y verano son los que más se asemejan al campo medio. El campo de otoño, respecto al medio, presenta valores relativamente menores. En cambio, en primavera, la potencia es mayor, alcanzándose valores de casi 80 KW/m.

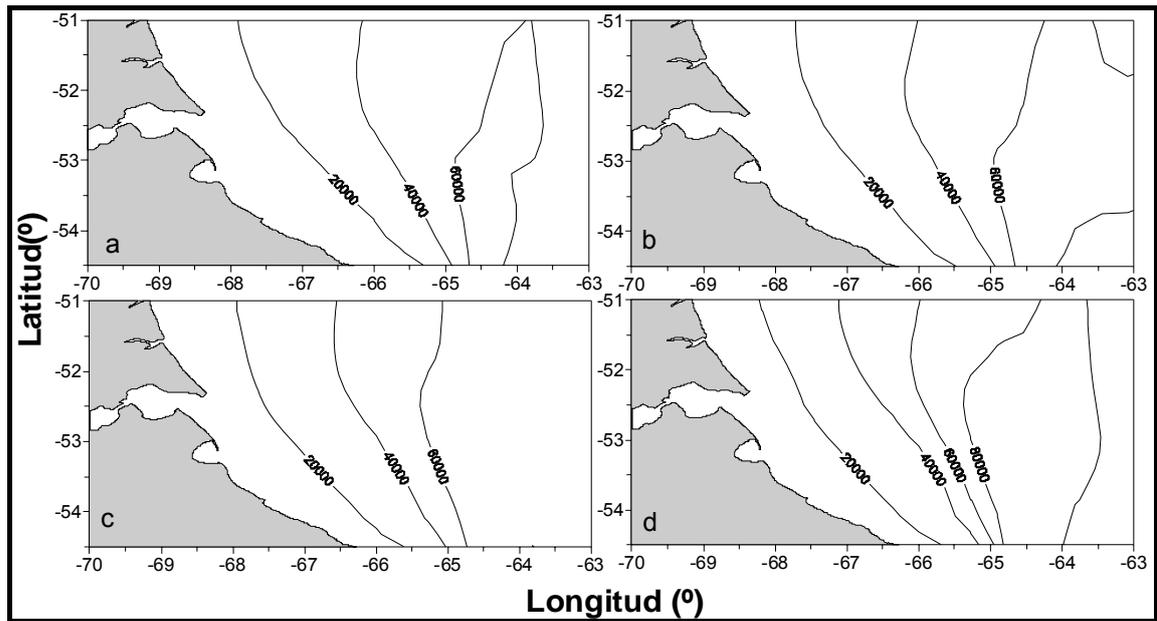


Fig 7.2. Potencia por unidad de longitud de cresta (W/m) promedio 1971-2005. (a) verano (b) otoño (c) invierno d) primavera.

7.2. Campos mensuales de potencia

Se presentan aquí, a modo de ejemplo, las distribuciones de potencia correspondiente a junio, julio y agosto. Las mismas, claro está, son muy parecidas al campo medio de potencia correspondiente al invierno, mostrando tan solo una muy ligera variabilidad mensual. Los campos de potencia correspondientes a los meses restantes también fueron computados pero, por razones de espacio, no han sido incluidos en la presente Tesis.

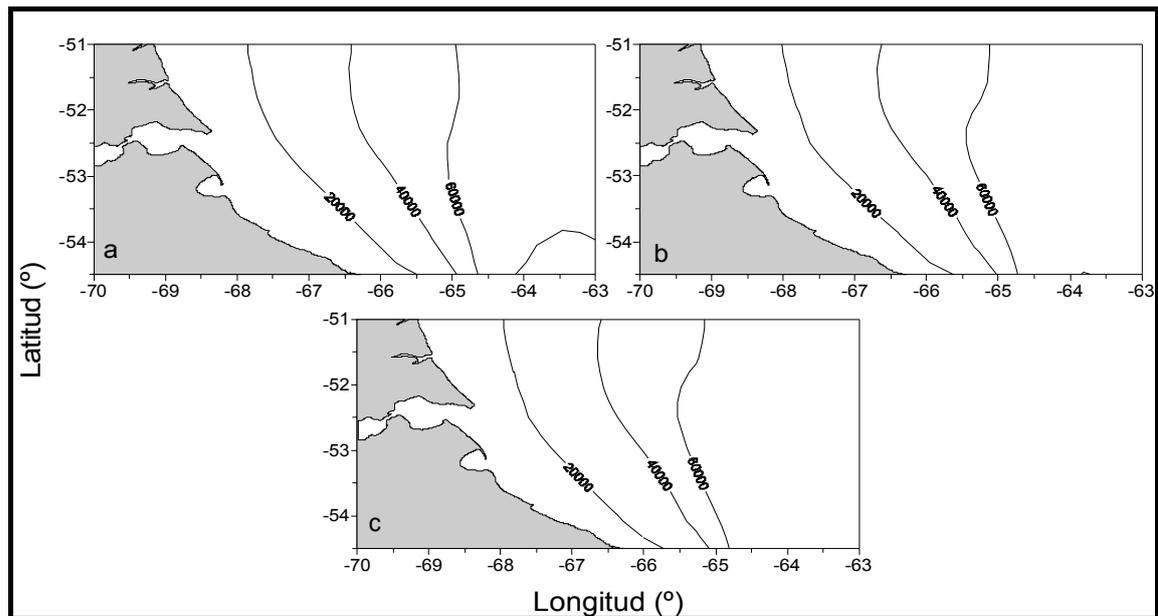


Fig.7.3. Potencia por unidad de longitud de cresta (W/m) promedio 1971-2005. (a) junio, (b) julio y (c) agosto.

7.3. Campos anuales

Se estudió también la variabilidad anual de la potencia. Debe aclararse que para esta Tesis se confeccionaron los 35 campos anuales correspondientes al período 1971-2005 pero, por razones de espacio, solo se presentan algunos en consistencia con los campos de alturas, períodos y direcciones discutidos en el Capítulo 6. Del análisis de estos campos se concluye, en principio, que la potencia de las olas en esta región presenta muy escasa variabilidad interanual.

En la Fig. 7.4 se presentan los campos de potencia media anual por unidad de ancho de cresta para los años 1971, 1983, 1999 y 2002. De la comparación de dichos campos surge que, el año 1999 muestra una potencia levemente mayor que los otros años, del orden de 10 – 20 KW/m. Los mayores valores de potencia se registran “offshore” en todos los años. Este rasgo, se vuelve a enfatizar, es consistente con los campos de altura y de período computados.

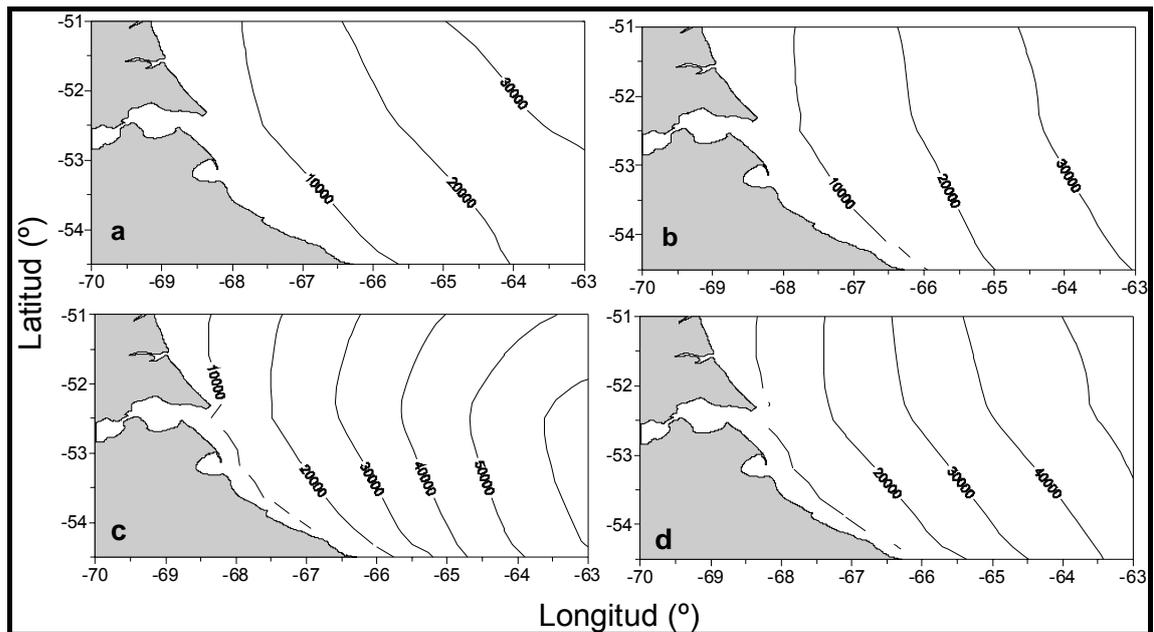


Fig.7.4. Potencia por unidad de longitud de cresta (W/m) para los años a) 1971, b) 1983 c) 1999 y d) 2002.

7.4. Conclusiones parciales

Sobre la base de discutido en el presente capítulo se concluye que la mayor disponibilidad de potencia se encuentra “offshore”, a más de 100km de distancia de la costa. Asimismo, se puede apreciar que la potencia se distribuye bastante regularmente, con escasa variabilidad interanual. Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, los dispositivos más convenientes de generación de energía eléctrica a partir de las olas serían aquellos diseñados para ser emplazados lejos de la costa. Pero, por otro lado, estos tienen la desventaja del consecuente costo adicional que significaría el transporte de energía hacia el continente.

8. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL (EIA)

Según los científicos, los riesgos ambientales asociados a los dispositivos explicados en el capítulo 2 son mínimos ya que utilizan tan sólo agua y/o fluido hidráulico mucho menos contaminante que el petróleo. En el proceso de transformación de energía no interviene ninguna sustancia tóxica y el funcionamiento de los generadores es, por lo general, relativamente silencioso. Si bien la energía de las olas es considerada como una fuente limpia y fiable conlleva a instalar dispositivos artificiales en el fondo del mar o en la línea de costa que podría afectar al medio marino de diversas maneras. El posible impacto debe ser analizado por las autoridades, quienes han de implementar instrumentos ambientales que permitan el desarrollo de este tipo de energía renovable sin olvidar la calidad ambiental. Los proyectos relativos a las energías renovables tienen un perfil ambiental claro, enfocando la mayor preocupación hacia el cuidado del ambiente. Por esta razón, suelen tener mayor permisividad que otros proyectos de producción de energía tradicionales. Los aspectos ambientales deben de ser considerados desde la fase de planeamiento con el fin de evitar consecuencias ambientales indeseables y/o conflictos de usos con otras áreas de actividad.

La identificación de los impactos ambientales ocasionados por dispositivos generadores de energía de olas ha sido estudiada evaluando las acciones que pueden ser causantes de impactos inherentes a cada proyecto, tanto en su fase de construcción y de desmantelamiento, como así también, en la explotación del recurso. Ambos estudios deben ser cuidadosamente evaluados con el fin de prever las incidencias ambientales derivadas y poder así cuantificar sus efectos.

8.1. Lineamientos básicos para realizar un EIA

Existen varios pasos previos de diseño y experimentación antes de la decisión de invertir en un prototipo. Estos diseños pueden llevar mucho tiempo de elaboración, más tiempo aún la prueba experimental en laboratorio y, finalmente, en el mar. La información ambiental que se pueda disponer del lugar (por ejemplo, batimetría, clima, corrientes, mareas) juntamente con los resultados de la eficiencia de los dispositivos

determinara con exactitud, por un lado, el área de influencia del proyecto y, por el otro, la valoración del impacto ambiental. Un EIA deberá tener en cuenta las múltiples interacciones entre el proyecto y el ambiente (medio natural y antrópico). Claro está que el diseño y construcción de prototipos como así también las pruebas preliminares son realizadas en los laboratorios, es decir, en ambientes controlados según normas de seguridad. Pero la instalación del dispositivo elegido se realizará en un medio natural y, aunque se desee minimizar sus efectos negativos, éste impactará de distintas maneras en el ambiente marino.

Cuando el dispositivo está en funcionamiento existen impactos positivos y negativos para el ambiente (natural y social). Por ejemplo, es poco común, pero el nivel sonoro del dispositivo podría llegar a ser molesto tanto para los pobladores de la zona como para la fauna. Este dependerá del propio funcionamiento del dispositivo, que debe estar contemplado en las etapas de diseño y experimentación. Por otro lado, la generación local de energía eléctrica traerá sin dudas beneficios para la economía local e incrementará, en general, los valores inmobiliarios. La duración de la utilidad de los dispositivos es variada, incierta y aun no está determinada con exactitud. Se supone que cuando el dispositivo no funcione más, el consecuente desmantelamiento disminuirá el valor de los inmuebles, sobre todo, los emplazados en la cercanía a la planta desactivada.

Según parece, en el mundo, esta actividad promueve inversiones, genera trabajo para mano de obra calificada, resuelve problemas ambientales reduciéndose la emisión de gases a la atmósfera y además provee la tan requerida y valiosa energía. Pueden considerarse impactos negativos comunes a todos los dispositivos, una leve contaminación del aire y el ruido durante las operaciones de construcción y desmantelamiento. Por otro lado, la reducción de la emisión de gases CO₂ a la atmósfera y la creación de empleo (González Vélez, APPA, diario 'Cinco Días', 2009) son los impactos positivos comunes a todos ellos. Es de señalar que el impacto ambiental que tengan los dispositivos depende en gran medida de las características de la zona donde se sitúe. Debe evaluarse, por ejemplo, si existe una ruta migratoria de mamíferos marinos próxima a la zona, si se produce alteraciones sobre alguna especie en peligro de extinción o sobre alguna población cercana. También existen diferencias

entre dispositivos, debidas entre otras razones, a sus variadas dimensiones y principios de funcionamiento. Se observan diferencias notables entre los impactos creados por los dispositivos instalados en la costa (o cercanos a ella) y los alejados de ella.

8.1.1. Dispositivos costeros

Estos modelos son fijados sobre la costa, lo que asegura una instalación y un mantenimiento relativamente fáciles. Además, estos dispositivos no necesitan arreglos de boyas ni largos cables eléctricos sumergidos (Centre for Renewable Energy Sources, 2006). No obstante, ellos están expuestos a una menor cantidad de energía de olas y, a veces, su instalación puede estar limitada por la morfología de la costa, por la amplitud de la marea o por aspectos ambientales. Las turbinas de estos dispositivos pueden emitir niveles de ruido que podrían ser incómodos para la población vecina. También pueden generar ruidos y vibraciones en el agua, pudiendo molestar a la fauna, especialmente a los peces. Si son instalados próximos a poblaciones, sin ser debidamente “camuflados”, podrían tener algún impacto paisajístico.

Es de destacar, por otro lado, que estas plantas incentivan la creación de nuevas infraestructuras como, por ejemplo, carreteras o caminos para acceder a ellos y hasta pueden fomentar el desarrollo del turismo. Si es instalado en una isla, se reduce notablemente la necesidad de energía desde el exterior y, consecuentemente, al disminuir el transporte por mar de petróleo o derivados, se reducen los riesgos ambientales asociados.

8.1.2. Dispositivos “offshore”

Estos dispositivos se ubican en profundidades del orden de los 40m y, por lo tanto, están expuestos a mayores niveles de energía. Los modelos recientes están compuestos por pequeños módulos dispuestos en arreglos y resultan tener diferentes impactos ambientales pudiendo provocar molestias a la fauna y a la flora de diversas maneras. Durante la ejecución de las obras pueden generarse, como impactos indeseables, un aumento de la turbidez del agua y, por lo tanto, puede verse afectada temporalmente la población de productores primarios de las inmediaciones y la pérdida de hábitat de las comunidades biológicas asociadas al sustrato donde se asentarán los

dispositivos (en el caso de ser sumergidos) y/o los anclajes. También puede producirse una pérdida temporal de hábitat debida a la instalación de los cables submarinos. Si el parque de energía de las olas ocupa un área considerable podría cambiar levemente los regímenes de las olas y producir pequeñas modificaciones en la línea de costa. Es de señalar que, sin embargo, en algunos casos este efecto podría ser positivo.

Por otro lado, dependiendo del tipo de pintura utilizada en la obra puede generar contaminación en el agua de mar. En el caso de tratarse de dispositivos que contengan fluidos y/o aceites, existe un potencial riesgo de derrame. Para evitar daños al medio ambiente, está prevista la construcción de los dispositivos con líquidos biodegradables, o la sustitución de éstos por agua. El ruido y las vibraciones que producen los dispositivos, dependiendo de su rango de frecuencias, pueden causar molestias, espantar a los mamíferos marinos y hasta llegar a desencadenar variaciones de las rutas migratorias de algunas especies.

Si fueran divisados desde la costa podrían provocar impacto visual, tanto durante el día como por la noche, debido a la iluminación necesaria para su señalización. El mayor conflicto lo tiene con la actividad pesquera, ya que implicaría la restricción de la pesca en el área de implantación del parque de generadores. Por otro lado, como impacto positivo debe destacarse que si estos dispositivos son correctamente diseñados y emplazados, podrían cumplir la función de arrecifes artificiales, con la presencia y desarrollo de flora y fauna específica.

Finalmente, las acciones para reducir o compensar los posibles impactos identificados y evaluados deberían estar contempladas en un Plan de Gestión Ambiental (PGA), en el cual se establecen los recursos y responsabilidades en el cumplimiento y aplicación efectiva de las medidas ambientales. La prevención, y no la corrección, debería ser la medida de mitigación por excelencia. Con esta filosofía de trabajo se logra minimizar los efectos indeseados sobre el medio ambiente y se puede maximizar los beneficios evitando que el costo de las medidas de corrección supere al de las de prevención.

9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El cuidado y la preservación del ambiente es una prioridad en los modelos económicos globales. Las estrategias que presentan son claras y tratan de investigar, mejorar e implementar el desarrollo sustentable de las energías renovables, inagotables y limpias. En particular esta Tesis se centró en el estudio de la energía de las olas en la plataforma continental fueguina con el objeto de cuantificar la potencia teórica o disponible (es decir, convertible en electricidad). Este tipo de energía es muy prometedora por su “casi infinita” disponibilidad, sin embargo, es muy difícil de estimar la cantidad que se puede aprovechar y suministrar a un precio económico.

La Agencia Internacional de Energía (IEA, 2005) estimó que las olas podrían eventualmente proveer mas del 10% de la demanda mundial de energía (Brooke, 2003). Para que la energía de olas sea sustentable, eficiente y viable, es necesario como primera medida, que el clima de olas de la región ofrezca alturas y períodos apropiados para que la energía aprovechable sea comparable, o al menos del orden de la demanda. El desarrollo de la industria de energía de olas presupone un nulo o escaso impacto ambiental. Sin embargo este aspecto esta bajo estudio. Algunos factores negativos podrían ser el impacto debido al ruido submarino y las molestias sobre la fauna y flora debido a un aumento de la turbidez del agua. También puede producirse una pérdida temporal de hábitat por la instalación de cables y la modificación de la línea de costa debido a la disminución del flujo de energía de las olas en la zona litoral producido por las estructuras asociadas a los generadores. La parte positiva es que estos dispositivos de energía de las olas no producen emisiones gaseosas, ni líquidas, ni sólidas y, por ello, en condiciones normales de operación, la energía de las olas es virtualmente una fuente no contaminante. Además, en términos generales, no impactan sobre el paisaje porque los aparatos que se utilizan están colocados, frecuentemente, a gran distancia de la costa o son convenientemente camuflados. Si el dispositivo es costero, puede actuar como una especie de arrecife artificial que daría abrigo a numerosas especies marinas, pero podría tener un impacto visual negativo.

Cuando en alguna zona en particular se intenta establecer las características medias, máximas o más probables del oleaje (clima de olas) se necesita disponer de al

menos cinco años de mediciones sistemáticas de olas obtenidas con instrumental específicamente diseñado para tal efecto. En el área de estudio (Fig.1.1), la serie de datos más larga es la que surge del agrupamiento de dos estaciones muy próximas (1.5 años, aproximadamente) la cual es significativamente menor que la longitud necesaria para la elaboración de conclusiones confiables.

Dado que se cuenta con una base insuficiente de datos observados, se implementó un modelo numérico de generación, propagación y transformación de olas (SWAN) para obtener series de alturas, períodos y direcciones entre 1971 y 2005. El modelo fue forzado con vientos provenientes de la base pública NCEP/NCAR y fue implementado sobre un dominio de resolución 25km anidado en un recinto que cubría casi todo el Océano Atlántico Sur. La validación del modelo se realizó con las observaciones de campo disponibles (brindadas por el Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa). Aunque el área de estudio aparece con una cobertura razonable de estaciones (Tabla 3.1) cabe destacar que en muchas de ellas las series recabadas tienen una duración de tan solo un par de semanas, lo cual es definitivamente insuficiente para un estudio completo de olas. La zona que está mejor cubierta es la correspondiente a la latitud de La Misión, con dos olígrafos direccionales que operaron aproximadamente durante un año (en el Exterior hay una brecha de casi cuatro meses). Del análisis de las observaciones de campo se concluyó, entonces, que la dirección de mayor frecuencia es la N (39%) para la zona costera y la NW (41%) para mar abierto. Las observaciones de campo indican que cerca de la costa las olas más probables tendrían direcciones comprendidas entre el N y el E y períodos largos. En cambio, más alejado de la costa, el mar responde a los vientos de la zona siendo las olas de generación local (NW-W) las predominantes.

En esta Tesis se implementaron tres dominios computacionales: dos regionales, sobre la plataforma continental fueguina con resoluciones de 5km y 25km, y uno más grande que abarcaba casi todo el océano Atlántico Sur. De los resultados obtenidos se aprecia que las simulaciones realizadas en el dominio de baja resolución brindan resultados muy similares a los obtenidos en el dominio de alta resolución. Por otro lado, se ha demostrado que el anidado de ambos recintos regionales en el dominio atlántico no mejora sustancialmente las simulaciones. Esto indicaría que los dominios regionales poseen una dimensión adecuada, con “fetch” suficiente como para reproducir los

valores observados. No obstante, en este trabajo se adoptó el dominio de baja resolución regional (25km) anidado al dominio atlántico ya que, aunque no mejoraba sustancialmente las simulaciones, no insumía un costo computacional mayor. En lo que respecta a la validación propiamente dicha, en el dominio regional de baja resolución SWAN permite obtener simulaciones de alturas muy razonables, con errores cuadráticos medio (ECM) inferiores a 0.70m. Sin embargo, los períodos simulados están levemente subestimados, obteniéndose ECM comprendidos entre 2 y 3 s. Tal vez el parámetro más pobremente simulado sea la dirección del oleaje. El modelo SWAN tiende a dar valores de dirección con poca variabilidad temporal. Quizá, la posible causa de esto esté en la base de vientos utilizada, la cual tiene una resolución espacio temporal relativamente baja.

Una posible alternativa para mejorar esto sería reproducir este estudio utilizando otra base de datos de viento con mayor resolución espacio temporal (proveniente de algún modelo atmosférico regional, como, por ejemplo, el del SMN o de otro modelo global de mayor resolución). Esta tarea, por supuesto, escapa a los objetivos planteados en esta Tesis y constituye una posible línea de trabajo futura que puede encararse en el ámbito de las Ciencias de la Atmósfera y los Océanos.

Para el cómputo de la potencia de las olas (Cap. 4) el parámetro más importante es la altura, ya que aparece en el numerador elevada al cuadrado y, en segundo lugar, el período, que aparece como un factor lineal en el numerador. A pesar que la dirección del oleaje no interviene en el cómputo de la potencia, es importante destacar, que puede ser un parámetro a considerar a la hora de instalar algún convertidor de energía en algún sitio específico.

En el capítulo 6 se concluyó que las alturas de olas aumentan gradualmente de W a E, con valores que van desde alrededor de 1m cerca de la costa hasta aproximadamente 3m en la región oriental de la región estudiada. Asimismo, los resultados obtenidos muestran una muy escasa variabilidad estacional, con una tendencia a alturas levemente mayores en primavera. La variabilidad mensual es también baja. El estudio realizado sobre la variabilidad de los campos anuales de alturas, períodos y direcciones revela que las principales variaciones se aprecian en los campos de direcciones, que si bien son predominantes del SW-WSW, algunos años

muestran predominio neto del W, del WSW o del SW.

Sobre la base de lo discutido en el capítulo 8 se concluye que la mayor disponibilidad de potencia (más de 60 KW/m) se encuentra “offshore”, a más de 100km de distancia de la costa. Por el contrario, cerca de la costa, la potencia teórica es inferior a 20 KW/m. Se puede apreciar que la potencia se distribuye bastante regularmente a lo largo de todo el año. Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, los dispositivos más convenientes de generación de energía eléctrica a partir de las olas serían aquellos diseñados para ser proyectados lejos de la costa. Pero, por otro lado, estos tienen la desventaja del consecuente costo adicional que significaría el transporte de energía hacia el continente.

Considerando que la costa fueguina tiene una baja densidad poblacional (en la isla de Tierra del Fuego existen tan solo dos ciudades: Río Grande, sobre la margen izquierda del río que le da nombre, y Ushuaia, emplazada al oeste del Canal Beagle) y que presenta un relativo bajo consumo de energía (por ejemplo en el 2005 la energía anual facturada fue de 130 millones de KW/h, lo que equivale a 120 millones de pesos de consumo anual facturado, Dirección Provincial de Energía de Tierra del Fuego, www.dpe.com.ar). Lo anterior sumado a la relativa baja cantidad de energía de olas aprovechable cerca de la costa (menor a 20 KW/m estimativamente), convertiría a esta fuente energética en tan sólo un recurso secundario capaz de abastecer un pequeño porcentaje de las necesidades de la región. En ese sentido, se plantea la necesidad de evaluar, en una etapa futura, si la energía de olas disponible sería suficiente como para abastecer (total o parcialmente) o, al menos, contribuir como fuente de energía para la iluminación urbana (de calles y espacios públicos) de la ciudad de Río Grande.

Finalmente, sobre la base de lo estudiado en la presente Tesis, el dispositivo que mejor funcionaría en esta región, desde el punto de vista del aprovechamiento energético, sería alguno de los descritos correspondiente a aguas abiertas, fondeado offshore, donde pueda captar una mayor cantidad de energía. Sin embargo se debe considerar que los costos inherentes a la provisión de energía aumentan marcadamente en función de la distancia entre la zona de producción y el centro de consumo. Este análisis también constituye una posible línea de trabajo a ser explorada desde la ingeniería eléctrica.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airy G. B: 'Tides and Waves'. Encycl Metrop London. 1845.

Barros V. O, Frumento I. Camilloni y M. Rivero: 'Energía eólica'. Subsecretaria de Energía, Praepra. 400 pp. 1997.

Beyene A. and Wilson J: 'Challenges and Issues of Wave Energy Conversion: Technical, Environmental and Permitting Challenges Facing Wave Energy Conversion on the California Coast', Sea Technology. magazine. 2008.

Bondareff M: 'Seadog Makes Waves, Researchers validate potencial of wave energy system'. INRI, Independent Natural Resources, Inc, june 2008.

Booij N, Ris R. C. and Holthuijsen L. H: 'A third generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation. Journal of Geophysics Res, 104(C4), 7649-7666, 1999.

Brooke J: 'Wave energy conversion'. Volumen 6, Elsevier ocean engineering book series. Elsevier, Oxford, UK, 2003.

Campos E J D, Lorenzzetti J A, Stevenson M R, Stech J L and Souza R B: 'Penetration of waters from the Brazil-Malvinas Confluence region along the South American continental shelf up to 23°S. An. Acad. Bras. Ci., 68 (Suppl. 1):49-58. 1996.

Cavaleri L and Malanotte-Rizzoli, P: 'Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications'. J. Geophys. Res., 86, No. C11,10, 961-10,973. 1981.

Cavia del Olmo Berta: 'Explotación potencial de energía en función del rango de trabajo de prototipos captadores', Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en <http://hdl.handle.net/2099.1/8720>. junio 2009.

'Centre for Renewable Energy Sources', Ocean Energy Conversion in Europe- Recent Advancements and Prospects, 36pp. (www.ca-oe.org).2006.

CERC: 'Shore Protection Manual', Coastal Engineering Research Center. Chapter 3: Wave and Water Level Prediction, U.S. Army, vol. 1, 143p.1984

Dean R G: 'Stream Function Representation of Non Linear Ocean Waves', J. of Geophysical Research, vol. 70, 1965.

Dean R G and Dalrymple R A: 'Water Waves Mechanics for Engineers and Scientists', Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 353 p.1984

Delft University of Technology, SWAN User manual (ver. 40.31), Faculty of Coastal Engineering and Geosciences, Netherland, 113p.2004.

Diario: 'El Mundo, País Vasco/ Gipuzkoa', autora: Maria Aurtenechea. Bilbao, 11/07/2009

Dragani W., Simionato C, Nuñez M. y Engel, M: 'Estudio de la disipación de la energía por fricción de fondo en la plataforma continental argentina y Río de la Plata utilizando un modelo de circulación 3-D forzado con marea'. Actas de la 21a Reunión Científica de Geofísica y Geodesía (AAGG), 261-265. 2002.

Dragani W, Garavento E, Simionato C, Núñez, M, Martín P, and Campos, M. I: ' Wave Simulation in the Outer Río de la Plata Estuary: an evaluation of Swan Model'. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2008

Dragani, W. C., Martín, P., Campos, M. I. and Simionato, C. Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32S and 40S? Continental Shelf Research,doi:10.1016/j.csr.2010.01.002. 2010.

Frumento Oscar A: 'El clima de las Provincias Patagónicas'. Centro Nacional Patagónico, Comunicación Personal, CONICET. Septiembre, 2003.

GEBCO, Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas (published in 2003)
http://www.bodc.ac.uk/projects/international/gebco/gebco_digital_atlas/sample_images/displaying_the_gebco_grid.html. 2003.

Gerstner F: 'Theory of the waves with a theory of the dyke profiles derived From it'. Ann. Phys. 2, 412-445. 1809.

González Vélez J M: 'Las energías renovables, apuesta para un desarrollo sostenible'. Diario: 'Cinco días', España. 02/04/2009.

Holthuijsen L H, Booij N, Ris R C, Haagsma I G, Keiftenurg A T, M. M, Kriezi, E E, Zijlema M, Van der Westhuysen, A J, Padilla-Hernandez R, Rogers E, Kaihatu, J, Petit H, Campbell T, Cazes J and Hashimoto N. Swan cycle III version 40.31, User Manual. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, Delft, 113p. 2004.

IEA Energy Statistics, OECD/IEA, www.iaea.org/Textbase/stats/index.asp, 2005

Kalnay E and Coautores: 'The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project'. Bulletin of the American Meteorological Society, 77,437-471.1996.

Kokot R R: 'Erosión en la costa patagónica por cambio climático' Revista de la Asociación Geológica Argentina, versión impresa ISSN 0004-4822. Rev. Asoc. Geol. Argent. v.59 n.4 Buenos Aires oct/dic. 2004.

Komen G J, Cavalieri L, Donelan M, Hasselmann, K, Hasselmann S and Janssen P A E M: "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", Cambridge University Press, 532p.1994

Lanfredi N W, Pousa J I, Mazio C A and Dragani W: 'Wave-Power Potencial along the Coast of the Province of Buenos Aires, Argentina'. Energy. Vol 17, Nº 11. 1992.

Lemus R A: Boletín Nº 208: 'Mercado Mundial del Petróleo'. Marzo de 2003.

Mastenbroek C, Burger G and Janssen, P. A. E. M: ' The dynamical coupling of a wave model in a storm surge model through the atmospheric boundary layer'. J. Physical Oceanography, 23, 1856-1866. 1993

McCormick M: ' Ocean Engineering Wave Mechanics', Printed in United of America. 1973.

Oliva R, Lescano J R, Triñanes P and Cortez N: 'Sistemas eólicos e híbridos-mediciones y simulaciones para su diseño teniendo en cuenta la variabilidad estacional del recurso en Patagonia'. Área Energías Alternativas, Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), 2007.

Pierson W J and Moskowitz: ' A proposed spectral form for fully developed wind seas base don the similarity theory of S. Kitaigorodskii'. J. Geophys., 69 (24), 5181-5190, 1964.

Pousa J L, Dragani W C, Mazio C A y Lanfredi N W: 'La energía oceánica en el Atlántico Sudoccidental. Posibilidades e impacto ambiental'. Revista de Ciencias del Mar Thalassas, vol. 11, pp. 59 - 72.1995.

Prohaska F: 'Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay'. Schowertfeger (editor), Climate of Central and South America, World Survey of Climatology. Elsevier, Amsterdam, pp 57-69, 1976.

Restrepo L J, Otero D and S A. López I: 'Clima de oleaje en el Pacifico Sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticos y aplicación a procesos costeros. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 33(128): 657-675. 2009.

Ris R C, Holthuijsen L H and Booij N: 'A third generation wave model for coastal regions. Part 2: Model description and validation' .Journal of Geophysics Research,104 (C4), 7649-7666.1999.

Rodrigues L: 'Wave power conversión systems for electrical energy production'.

Department of Electrical Engineering. Faculty of Science and Technology. Nova University of Lisbon, 2829-516 Caparica- PORTUGAL., Marzo, 2008.

SHN, Archipiélago Fueguino e Islas Malvinas, Carta Náutica H4, 4ta. Ed., Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina. 2002

SHN, 'Tablas de Marea'. Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, 2009.

Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center. Department of the Army Corps of Engineers, volume I, Chapter 3, 1984.

Simionato C, Vera C and Siegismund F: 'Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area', Journal of Coastal Research 21, 4, 770-783. 2005a

Simionato C, V Meccia, W Dragani and M Nuñez: 'Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata Estuary', Journal of Geophysical Research, vol. 110, C06008, doi: 10.1029/2004JC002842. 2005b.

Simionato C G, V L Meccia, W C Dragani, R Guerrero and M Núñez: 'La respuesta barotrópica del estuario del Río de la Plata a la variabilidad del viento en las escalas sinóptica a intraestacional'. IX Congreso Argentino de Meteorología, CONGREMET IX, Buenos Aires, 3 al 7 de octubre de 2005. 2005c

Simionato C, V Meccia, W Dragani and M. Nuñez: 'On the use of the NCEP/NCAR surface wind for modelling barotropic circulation in the Río de la Plata estuary'. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, (70), 195-206. 2006a

Simionato C, V Meccia W. Dragani, R. Guerrero and M. Nuñez: 'Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intraseasonal scales: Barotropic response'. Journal of Geophysical Research, vol. 111, C09031, doi:10.1029/2005JC 003297. 2006b

Simionato C G, V L Meccia, W C Dragani, R Guerrero and M Nuñez: 'Recent advances in the knowledge of the Río de la Plata estuary circulation, forcings and variability'. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Foz do Iguazú, Brasil, 23 al 28 de abril de 2006. 2006c

Simionato C, Meccia V, Guerrero R, Dragani W and Nuñez, M: 'Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intra-seasonal scales. 2. Current's vertical structure and its implications on the salt wedge structure'. Journal of Geophysical Research, 112, C07005, doi: 10.1029/2006JC 003815. 2007.

Simmonds I and Keay K: 'Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in 40 year NCEP_NCAR reanalysis'. Journal of Climate, 13, 873-885.2000.

Southgate H N: 'Ray Methods for Combined Refraction and Diffraction Problems', Report Number IT 214, Hydraulics Research, Wallingford, Oxon, UK. 1981.

Southgate H N: 'Wave Prediction in Deep Water and at the Coastline', Report Number SR 114, Hydraulics Research, Wallingford, Oxfordshire, UK, 1987.

Stokes G. G: 'ON the Theory of Oscilatory Waves'. Math and Phys Paper I. Cambridge University Press, Cambridge. 1880.

Thorpe T W: 'Economic Analysis of wave Power Devices'. AEA Technology, Abingdon, UK.1995

Thorpe T.W.: 'A brief review of wave energy. UK Department of Trade and Industry, May 1999.

Welti R: 'Ondas Superficiales en el Agua: la física del tsunami'. Departamento de Física y Química – FCEIA- Universidad de Rosario. Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina, 2000.

Whitham G B: 'Linear and nonlinear waves', Wiley, New York, 636p.1974

Wright L D and Coleman, J M: 'Variations in morphology of major rivers deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes'. Am. Assoc Petroleum Geologist Bull. 57(2), 370-398. 1973.

Wu S: 'Wind stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane', J. Geophysical Research, 87, C12, 9704-9706. 1982.