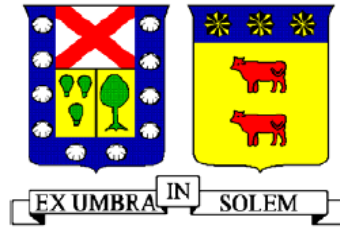


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



**SELECCIÓN EN CHILE DE LOS SITIOS MAS ADECUADOS PARA
LA EXTRACCION DE ENERGIA A PARTIR DEL OLEAJE
UTILIZANDO SWAN**

Memoria de titulación presentada por
DIEGO ESCOBAR DIAZ

Como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Patricio Catalán M.

Junio de 2012

Resumen

El principal objetivo de este trabajo de título consiste en la determinación de los sitios, a lo largo de la costa chilena entre la región de Valparaíso y de la Araucanía, que se presentan como los más adecuados para la extracción de energía a partir del oleaje, utilizando como modelo numérico de transferencia de oleaje de tercera generación SWAN. Adicionalmente, esta información es utilizada en la toma de decisiones del proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718.

Con el fin de contextualizar la problemática, en primer lugar se realizará una revisión del estado del arte, tanto a nivel internacional como nacional. De esta manera se busca determinar los avances y las nuevas problemáticas que surgen.

Para llevar a cabo este estudio, se obtendrá, desde el NOAA, una base de datos correspondiente a 13 años, desde Enero de 1997 hasta Marzo del 2010, para 8 puntos en el área investigada. De esta base, se recopilarán los parámetros de resumen para dos estados de mar por día, con el fin de propagarlos hacia la costa utilizando el modelo numérico. A diferencia de estudios anteriores, se utilizarán grillas anidadas en la cercanía a la costa, como una manera de mejorar la modelación de los procesos físicos relevantes en aguas someras.

A partir de los resultados obtenidos se extraerá la información para una profundidad de 50 m, con la cual se calculará el flujo medio de energía en toda la zona costera. Luego, se realizará una primera selección con las ubicaciones más energéticas, las cuales, según lo esperado, deberían corresponder a los sitios que presentan una configuración geográfica determinada, conocida como ‘punta’. De no ser así, estos sitios se incluirán de igual manera, con el fin de analizar su comportamiento. Utilizando un análisis multicriterio sobre los sitios seleccionados, el cual considera parámetros tales como la cantidad de energía disponible, la pendiente del fondo marino, así como su ubicación con respecto a puertos y al Sistema Interconectado Central, se elaborará un ranking de las ubicaciones más adecuadas para la extracción del recurso energético. Finalmente, se realizará un análisis estadístico del recurso en cada uno de los sitios seleccionados, así como un análisis de la potencia de salida asociada a distintos dispositivos generadores de energía.

Del estudio a realizar, se espera que la zona investigada presente ubicaciones con un alto potencial energético, ideal para la extracción del recurso. En base a estudios anteriores y conocimientos de la zona, se espera una media cercana a los 30 kW/m y una baja variabilidad, tanto estacional como interanual.

Abstract

The main objective of this title is the determination of sites, along the Chilean coast between the regions of Valparaíso and the Araucanía, presented as the most suitable for the extraction of energy from waves, using SWAN as a transfer numerical wave model, which is a third-generation phase-averaged wave model. Additionally, this information is used in making project decisions for CORFO-INNOVA 09CN14-5718.

To contextualize the problem, we will first conduct a review of the state of art, both internationally and domestically. This will seek to determine the progress and new problems that arise.

To carry out this study, we will obtain from the NOAA a database for 13 years, from January 1997 until March 2010, of 8 points in the investigated area. From this database, the summary parameters will be collected for two states of the sea per day, in order to propagate them to the coast using the numerical model. Unlike previous studies, nested grids were used in close proximity to the coast, as a way to improve the modeling of relevant physical processes in shallow waters.

From the results we will extract the information for a depth of 50 m, with which we will calculate the average power flow across the coastal zone. Then, we will make an initial selection of the most energetic sites, which, as expected, should correspond to sites that have a particular geographical setting, known as 'punta'. Otherwise, these sites will be included anyway, in order to analyze their behavior. Using a multicriteria analysis on the selected sites, which considers parameters such as the amount of energy available, the slope of the seabed and its location relative to ports and the Central Interconnected System, we will produce a ranking of the most appropriate locations for the extraction of the energy resource. Finally, we will perform a statistical analysis of the resource in each of the selected sites, as well as an analysis of the output power associated with different power generating devices.

From the study to be performed, it is expected that the investigation area presents locations with a high energy potential, ideal for the extraction of the resource. Based on previous studies and knowledge of the area, it's expected an average around 30 kW/m and a low variability, both seasonal and year.

Glosario

ERNC: Energías Renovables No Convencionales.

JONSWAP: *Joint North Sea Wave Project.*

SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

USACE: *U.S. Army Corps of Engineers.*

SWAN: *Simulating WAves Nearshore.*

NOAA: *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration.*

NWW3: *NOAA WAVEWATCH-III.*

SIC: Sistema Interconectado Central.

SING: Sistema Interconectado del Norte Grande.

Índice

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
GLOSARIO	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. MOTIVACIÓN	11
1.2. OBJETIVOS.....	11
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	11
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.3. ESTRUCTURA DEL INFORME.....	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. GENERACIÓN, PROPAGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE	13
2.1.1. <i>Generación y Propagación</i>	13
2.1.2. <i>Características y Clasificación</i>	15
2.2. TEORÍAS DE OLEAJE	17
2.2.1. <i>Teoría lineal</i>	17
2.2.2. <i>Teoría no lineal</i>	19
2.2.3. <i>Flujo de energía</i>	19
2.3. METODOLOGÍAS DE REPRESENTACIÓN DEL OLEAJE	20
2.3.1. <i>Análisis estadístico</i>	20
2.3.2. <i>Análisis espectral</i>	22
2.4. CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE EN CHILE.....	26
2.5. TRANSFERENCIA DE OLEAJE	26
2.5.1. <i>Fenómenos que afectan la transferencia del oleaje</i>	26
2.5.2. <i>Métodos de transferencia</i>	29
2.5.3. <i>Modelos numéricos</i>	30
2.5.4. <i>SWAN</i>	31
2.6. ESTUDIOS PREVIOS	35
2.6.1. <i>Análisis geo-espacial multi-variado para el uso de un sistema de conversión de energía en base al oleaje (Nobre et al., 2008)</i>	35
2.6.2. <i>Evaluación global del oleaje como recurso energético (Cornett, 2008)</i>	37
2.6.3. <i>Recurso energético en base a oleaje en el área de Estaca de Bares (España) (Iglesias & Carballo, 2009)</i>	40
2.6.4. <i>Potencial energético en base a oleaje a lo largo de la costa atlántica del sureste estadounidense (Defne, 2009)</i>	43
2.6.5. <i>Estudio a escala nacional del recurso energético de oleaje en Australia (Hughes & Heap, 2009)</i>	46
2.6.6. <i>Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile (Acuña, 2008)</i>	49
2.6.7. <i>Selección preliminar de sitios – recurso energético marino chileno (GARRAD HASSAN, 2009)</i>	52

2.6.8.	<i>Resumen y Comparación</i>	55
3.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	57
3.1.	ÁREA DE INTERÉS Y BASE DE DATOS DISPONIBLE	57
3.2.	VALIDACIÓN DATOS	60
3.3.	TRANSFERENCIA DE OLEAJE	65
3.3.1.	<i>Primera propagación</i>	65
3.3.2.	<i>Segunda propagación</i>	67
3.3.3.	<i>Programación en MATLAB</i>	68
3.4.	CÁLCULO DE ENERGÍA Y POTENCIA	70
3.5.	MEDIDA DE TENDENCIA CENTRAL	71
3.6.	CRITERIO DE SELECCIÓN DE <i>HOTSPOTS</i>	72
4.	RESULTADOS	76
4.1.	RESULTADOS PROPAGACIÓN Y DETERMINACIÓN <i>HOTSPOTS</i>	76
4.2.	CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE EN LOS <i>HOTSPOTS</i> SELECCIONADOS.....	86
4.2.1.	<i>Clima de oleaje</i>	86
4.2.2.	<i>Distribución espacial de la potencia</i>	91
4.2.3.	<i>Histogramas de flujo de potencia media</i>	92
4.2.4.	<i>Variabilidad del flujo de potencia media</i>	94
4.2.5.	<i>Probabilidad de excedencia</i>	96
4.2.6.	<i>Diagramas de energía y dispersión</i>	97
4.2.7.	<i>Potencia de salida</i>	100
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
6.	CONCLUSIONES	113
7.	REFERENCIAS	115
8.	ANEXOS	120
8.1.	ANEXO A. HOJAS DE COMANDO SWAN	120
8.2.	ANEXO B. FUNCIONES MATLAB.....	123
8.3.	ANEXO C. HISTOGRAMAS H_S Y T_P	134
8.4.	ANEXO D. ROSAS DE OLEAJE	140
8.5.	ANEXO E. HISTOGRAMAS DE POTENCIA (MENSUALES Y ANUALES)	143
8.6.	ANEXO F. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA.....	149
8.7.	ANEXO G. DIAGRAMAS DE ENERGÍA Y DISPERSIÓN	152

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 TIPOS DE OLA Y LA ENERGÍA EN ELLAS CONTENIDA (FERNANDEZ, 2004)	13
FIGURA 2.2 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SEA, SWELL Y FETCH (VILLAVERDE, 2009)	14
FIGURA 2.3 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE OLA Y SUS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS (WWW.TODOSURF.COM)	15
FIGURA 2.4 MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS AL APROXIMARSE A LA COSTA (FERNANDEZ, 2004)	16
FIGURA 2.5 PERFILES DE ONDA DE ACUERDO A LAS DIFERENTES TEORÍAS (GIOC UC, 2000)	19
FIGURA 2.6 PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN DEL OLEAJE (CAVIA, 2009).....	20
FIGURA 2.7 DEFINICIÓN DE OLAS CON EL MÉTODO DE PASO DESCENDENTE (SILVA, 2005)	22
FIGURA 2.8 ESPECTRO BIDIMENSIONAL Y ESPECTROS UNIMODALES DE DIRECCIÓN Y FRECUENCIA (CEM, 2002)	23
FIGURA 2.9 COMPARACIÓN ADIMENSIONAL DE ESPECTROS JONSWAP Y PIERSON-MOSKOWITZ (CEM, 2002)24	
FIGURA 2.10 ASOMERAMIENTO (WWW.ERICBEIERS.COM).....	27
FIGURA 2.11 REFRACCIÓN (WWW.GEOGRAPHYFIELDWORK.COM)	27
FIGURA 2.12 DIFRACCIÓN (WWW.CYBERCHALKY.WORDPRESS.COM)	28
FIGURA 2.13 REFLEXIÓN (WWW.METED.UCAR.EDU)	28
FIGURA 2.14 DISTINTOS TIPOS DE GRILLAS UTILIZADAS EN SWAN (WWW.METED.UCAR.EDU)	32
FIGURA 2.15 HOJA CON ENTRADA DE DATOS AL MODELO Y EJEMPLO DE ARCHIVO DE SALIDA GRAFICADO EN MATLAB	34
FIGURA 2.16 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA APLICADA (NOBRE ET AL., 2008)	36
FIGURA 2.17 REPRESENTACIÓN DEL RESULTADO FINAL (NOBRE ET AL., 2008).....	36
FIGURA 2.18 ENERGÍA DE OLEAJE ESTIMADA A NIVEL GLOBAL POR BARSTOW (CORNETT, 2008).....	37
FIGURA 2.19 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DEL FLUJO DE POTENCIA MEDIO ANUAL (CORNETT, 2008)	38
FIGURA 2.20 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE FLUJO DE POTENCIA, REPRESENTADA POR LA COVARIANZA DE P (CORNETT, 2008).....	39
FIGURA 2.21 MAPA DE ESTACA DE BARES, CON LAS ROSAS DE OLEAJE EN LA UBICACIÓN DE LOS DATOS SIMAR-44 Y LA UBICACIÓN DE LA BOYA UTILIZADA (IGLESIAS & CARBALLO, 2009)	40
FIGURA 2.22 EJEMPLO DE ROSAS DE OLEAJE ESTACIONALES PARA LOS DATOS DE LA BOYA Y DIAGRAMAS COMBINADOS DE DISPERSIÓN Y ENERGÍA PARA LOS DATOS SIMAR-44 (IGLESIAS & CARBALLO, 2009)..	41
FIGURA 2.23 ALTURA SIGNIFICATIVA Y POTENCIA EN TORMENTA (IGLESIAS & CARBALLO, 2009)	42
FIGURA 2.24 DIFERENTES FILTROS APLICADOS A SERIE DE ALTURA DE OLAS (DEFNE, 2009).....	44
FIGURA 2.25 DISTRIBUCIÓN DE HS FILTRADAS DURANTE 25 AÑOS (DEFNE, 2009)	45
FIGURA 2.26 POTENCIA ESTIMADA A LO LARGO DE LA COSTA ATLÁNTICA DEL SURESTE ESTADOUNIDENSE, PARA CADA BOYA, ASÍ COMO LAS ISOLINEAS RESPECTIVAS (DEFNE, 2009)	46
FIGURA 2.27 MAPA DE LA POTENCIA MEDIA ESTIMADA PARA LA PLATAFORMA CONTINENTAL AUSTRALIANA Y TABLA CON LA ENERGÍA TOTAL POR ESTADO (HUGHES & HEAP, 2009).....	47
FIGURA 2.28 MAPA DE ÍNDICES ESTACIONALES DE POTENCIA E ÍNDICES DE FALLA (HUGHES & HEAP, 2009)...	48
FIGURA 2.29 METODOLOGÍA APLICADA PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA DISPONIBLE Y LA POTENCIA GENERADA POR DISPOSITIVOS MECÁNICOS (ACUÑA, 2008)	49
FIGURA 2.30 DISTRIBUCIÓN DE LA POTENCIA DEL OLEAJE A LO LARGO DE LA COSTA CHILENA COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD (ACUÑA, 2008)	50
FIGURA 2.31 CLASIFICACIÓN GENERAL (GARRAD HASSAN, 2009)	54
FIGURA 2.34 DESARROLLOS RECIENTES A NIVEL LOCAL (CATALÁN ET AL., 2011)	56
FIGURA 3.1 TOPOBATIMETRÍA GEBSCO. LIMITES DE MALLAS DE CÁLCULO INCLUIDOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	58
FIGURA 3.2 ÁREA DE INTERÉS, Y UBICACIÓN DE LOS SITIOS DEL MALLADO DESDE DONDE SE EXTRAJERON LOS DATOS NWW3 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	59

FIGURA 3.3 REGISTRO DE OLAJE Y ALTURA SIGNIFICATIVA PARA EL NODO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	60
FIGURA 3.4 UBICACIÓN BOYA TRIAXYS DEL SHOA Y NODO NWW3 UTILIZADO EN LA VALIDACIÓN FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	61
FIGURA 3.5 ESPECTRO TÍPICO RECOPIADO DE BOYA TRIAXYS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	61
FIGURA 3.6 COMPARACIÓN EN SERIE DE TIEMPO DE ALTURA SIGNIFICATIVA HS, PERIODO PEAK TP Y DIRECCIÓN PRINCIPAL MWD PARA DATOS DE BOYA TRIAXYS V/S NWW3. LAS LÍNEAS SEGMENTADAS CORRESPONDEN A LOS ESTADOS DE MAR PROPAGADOS CON SWAN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	62
FIGURA 3.7 ALTURA SIGNIFICATIVA PARA DISTINTOS ESTADOS DE MAR DURANTE LOS MESES EN ESTUDIO, OBTENIDAS EN NODO NWW3, EN BOYA TRIAXYS Y PROPAGADOS CON SWAN A UBICACIÓN DE BOYA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	64
FIGURA 3.8 COMPARACIÓN ENTRE ESPECTRO REAL REGISTRADO EN BOYA TRIAXYS, Y ESPECTRO JONSWAP GENERADO POR PARÁMETROS DE RESUMEN NWW3 A PARTIR DE SWAN FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
FIGURA 3.9 UBICACIÓN DE LA PRIMERA MALLA DE CÁLCULO, ASÍ COMO DE LAS MALLAS ANIDADAS. SE ESPECIFICAN ADEMÁS LOS SEGMENTOS CUBIERTOS POR LOS DISTINTOS ESPECTROS JONSWAP. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	67
FIGURA 3.10 ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESUMEN EN LA ZONA DE INTERÉS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	69
FIGURA 3.11 ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE LA POTENCIA MEDIA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	71
FIGURA 3.12 HISTOGRAMA DE HS PARA UN PUNTO CUALQUIERA CON DATOS ENTRE 1997 Y 2010. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	71
FIGURA 4.1 REGISTRO DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS PARA UN ESTADO DE MAR CUALQUIERA, GENERADO A PARTIR DE SWAN, GRAFICADO EN GOOGLE EARTH GRACIAS A MATLAB FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	76
FIGURA 4.2 REGISTRO DE FLUJO DE POTENCIA PARA UN ESTADO DE MAR CUALQUIERA, GENERADO A PARTIR DE SWAN, GRAFICADO EN GOOGLE EARTH MEDIANTE MATLAB FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	77
FIGURA 4.3 PROFUNDIDAD EN ZONAS SELECCIONADAS PARA ANÁLISIS DE DATOS, A PARTIR DE BATIMETRÍA GEBCO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	77
FIGURA 4.4 VARIACIÓN LATITUDINAL DE ALTURA SIGNIFICATIVA (HS), PERIODO PEAK (TP) Y FLUJO MEDIO DE POTENCIA (P), A UNA PROFUNDIDAD DE 50 M. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	78
FIGURA 4.5 VARIACIÓN LATITUDINAL ANUAL DE FLUJO MEDIO DE POTENCIA (P) A UNA PROFUNDIDAD DE 50 M. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	79
FIGURA 4.6 MAPA 1 DE SITIOS SELECCIONADOS, INCLUYENDO UBICACIÓN DEL SIC Y LOS PUERTOS UTILIZADOS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	81
FIGURA 4.7 MAPA 21 DE SITIOS SELECCIONADOS, INCLUYENDO UBICACIÓN DEL SIC Y LOS PUERTOS UTILIZADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	82
FIGURA 4.8 SERIE DE TIEMPO PARA HS UTILIZANDO VALORES MEDIOS MENSUALES, PARA EL SITIO EN ESTUDIO UBICADO EN PUNTA CARRANZA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	86
FIGURA 4.9 HISTOGRAMAS DE DENSIDAD DE ALTURA SIGNIFICATIVA Y PERIODO PEAK PARA LOS PRIMEROS TRES SITIOS EN LA SELECCIÓN REALIZADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	87
FIGURA 4.10 HISTOGRAMA DE DENSIDAD DE ALTURA SIGNIFICATIVA Y PERIODO PEAK EN PUNTA DEL TORO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	88
FIGURA 4.11 ROSAS DE OLAJE ESTACIONAL PARA LOS PRIMEROS TRES SITIOS EN LA SELECCIÓN REALIZADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	90
FIGURA 4.12 ROSAS DE OLAJE ESTACIONAL PUNTA DEL TORO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	91
FIGURA 4.13 DISTRIBUCIÓN LATITUDINAL DE LA POTENCIA PARA TODA LA COSTA ESTUDIADA Y EN CADA HOTSPOT, Y SU REGRESIÓN CUADRÁTICA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	91

FIGURA 4.14 DISTRIBUCIÓN DE LA POTENCIA DEL OLEAJE A LO LARGO DE LA COSTA CHILENA COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD FUENTE: ACUÑA, 2008	92
FIGURA 4.15 HISTOGRAMAS DE POTENCIA MEDIA MENSUAL DE OLEAJE PARA PUNTA CARRANZA, PUNTA LEBU, PUNTA LOROS Y PUNTA LOBOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	93
FIGURA 4.16 HISTOGRAMAS DE POTENCIA MEDIA ANUAL DE OLEAJE PARA PUNTA CARRANZA, PUNTA LEBU, PUNTA LOROS Y PUNTA LOBOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	94
FIGURA 4.17 VARIABILIDAD DE POTENCIA DE OLEAJE – INTERANUAL E INTERMENSUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	95
FIGURA 4.18 CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE POTENCIA DE OLEAJE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	96
FIGURA 4.19 POTENCIA DE OLEAJE PARA DISTINTOS NIVELES DE EXCEDENCIA – DATOS TOTALES Y ESTACIONALES PARA LOS SITIOS SELECCIONADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	97
FIGURA 4.20 DIAGRAMA COMBINADO DE ENERGÍA Y DISPERSIÓN. LA ESCALA A COLOR REPRESENTA LA ENERGÍA TOTAL POR METRO DE FRENTE DE OLA. LOS NÚMEROS EN CADA CELDA INDICAN LA OCURRENCIA DE ESTADOS DE MAR EN NÚMERO DE HORAS POR AÑO, Y LAS CURVAS CORRESPONDEN A LAS ISOLINEAS DE POTENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	98
FIGURA 4.21 DIAGRAMA COMBINADO DE ENERGÍA Y DISPERSIÓN – PUNTA DEL TORO. LA ESCALA A COLOR REPRESENTA LA ENERGÍA TOTAL POR METRO DE FRENTE DE OLA. LOS NÚMEROS EN CADA CELDA INDICAN LA OCURRENCIA DE ESTADOS DE MAR EN NÚMERO DE HORAS POR AÑO, Y LAS CURVAS CORRESPONDEN A LAS ISOLINEAS DE POTENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	99
FIGURA 4.22 DIAGRAMA Y MATRIZ DE ENERGÍA – DISPOSITIVO AQUABUOY FUENTE: MEDEL, 2010.....	101
FIGURA 4.23 DIAGRAMA Y MATRIZ DE ENERGÍA – DISPOSITIVO PELAMIS FUENTE: MEDEL, 2010.....	102
FIGURA 4.24 DIAGRAMA Y MATRIZ DE ENERGÍA – DISPOSITIVO WAVE DRAGON FUENTE: WWW.WAVEDRAGON.NET.....	103
FIGURA 5.1 COMPARACIÓN DATOS NOAA (ROJO) Y SHOA (AZUL) – ENERO 2003. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	111

Índice de Tablas

TABLA 2-1 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS SWAN Y STWAVE (ALLARD ET AL., 2004).....	34
TABLA 2-2 FUENTES DE DATOS PARA LA SELECCIÓN DE ZONAS (GARRAD HASSAN, 2009).....	53
TABLA 2-3 UBICACIONES PRIORITARIAS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA DEL OLEAJE Y CAMPO DE ENERGÍA ANUAL ESTIMADO PARA UNA GRANJA DE 30MW EN BASE AL DISPOSITIVO PELAMIS (GARRAD HASSAN, 2009)	55
TABLA 3-1: UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS PUNTOS DE INTERÉS DEL MALLADO NWW3	59
TABLA 3-2: PARÁMETROS DE RESUMEN PARA DISTINTOS ESTADOS DE MAR, OBTENIDOS EN SITIO NWW3, EN BOYA TRIAXYS Y PROPAGADOS CON SWAN A UBICACIÓN DE BOYA.	64
TABLA 3-3: PUERTOS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO Y SU UBICACIÓN.	73
TABLA 3-4: FACTORES, ESCALA Y PONDERACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL RANKING DE HOTSPOTS	74
TABLA 4-1: RANKING PRELIMINAR PARA SELECCIÓN DE HOTSPOTS, EN BASE AL VALOR DE POTENCIA PARA EL CUANTIL 50%	80
TABLA 4-2: VARIABLES CON SUS VALORES, NOMBRES DE LA SUBESTACIÓN Y PUERTO MÁS CERCANO A CADA UNO DE LOS SITIOS, ORDENADOS POR VALOR DE POTENCIA.	83
TABLA 4-3: NUEVO RANKING CON VALORES ESCALADOS POR VARIABLE Y RESULTADO FINAL A PARTIR DE LA PONDERACIÓN DE CADA UNA DE LAS VARIABLES. SE PRESENTA ADEMÁS EL RANKING ANTERIOR DE CADA SITIO.	84
TABLA 4-4 VARIACIÓN DE PONDERADORES PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	85
TABLA 4-5 RESULTADOS OBTENIDOS PARA DISTINTOS PONDERADORES POR CADA VARIABLE. EL COLOR VERDE INDICA QUE MANTIENE SU POSICIÓN EN EL RANKING CON RESPECTO A LA PONDERACIÓN INICIAL, EL AZUL QUE BAJA Y EL ROJO QUE SUBE.	85
TABLA 4-6: PARÁMETROS DE RESUMEN ESTACIONALES POR SITIO SELECCIONADO, ORDENADOS DE NORTE A SUR	89
TABLA 4-7: MAYOR CONTRIBUCIÓN, SU ESTADO DE MAR CORRESPONDIENTE Y PORCENTAJE DE OCURRENCIA PARA CADA UNO DE LOS HOTSPOTS, ORDENADOS DE NORTE A SUR.....	100
TABLA 4-8: RESUMEN ESPECIFICACIONES POR DISPOSITIVO.....	103
TABLA 4-9: TABLA RESUMEN POR DISPOSITIVO, DE LA ENERGÍA Y POTENCIA ANUAL GENERADA EN CADA SITIO EN ESTUDIO, Y SU FACTOR DE CAPACIDAD ASOCIADO.....	105

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Una de las problemáticas actuales más importantes, tanto a nivel mundial como a nivel país, consiste en asegurar la distribución de energía a toda la población. Esto tiene su origen en el acelerado crecimiento de la economía y la industria, así como la ubicación de nuevos emplazamientos para vivir debido al crecimiento de la población.

Pero el crecimiento no es la única causa de esta problemática. El origen o fuente desde donde es extraída la energía representa una variable a considerar en la búsqueda de soluciones. Al año 2006, a nivel país, más del 65% de la generación de energía proviene de fuentes energéticas no renovables (CNE, 2008), y el porcentaje restante lo conforman fuentes de energía renovables convencionales, por lo cual, las ERNC no presentan participación. A razón de esto, el año 2008 se introdujo la ley 20.257, la cual realiza modificaciones a la ley general de servicios eléctricos con respecto a la generación con fuentes de ERNC. Esta ley define cada una de las fuentes de energía consideradas no convencionales, así como estipula que cada empresa generadora con capacidad instalada mayor a 200 MW debe acreditar, al año 2024, que una cantidad equivalente al 10% de la energía generada haya sido inyectada a partir de ERNC.

Dentro de las ERNC definidas en esta ley, se encuentra la energía de los mares, sin hacer distinción en su método de extracción. Dentro de los variados métodos, la energía generada a partir del oleaje es particularmente atractiva, ya que presenta una alta densidad de potencia en comparación con otras fuentes (EPRI, 2006), y en el caso nacional su atractivo es mucho mayor. A partir de estudios de distintas partes del mundo, se ha logrado determinar que Chile, en conjunto con Australia y las Islas Británicas, corresponde a uno de los mejores emplazamientos para generar energía a partir del oleaje, donde el flujo puede ser de 50 – 60 kW/m (SET-TE Oceans, 2010), por lo cual el análisis e investigación de este recurso en las costas chilenas se hace realmente necesario.

Esta tesis se centra únicamente en la energía procedente del oleaje, su análisis a lo largo de un sector de la costa chilena, así como un estudio detallado de las ubicaciones donde se concentra dicho recurso (*hotspots*), indicando los lugares más adecuados para la generación de energía a partir del oleaje.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Recogiendo la problemática actual, lo que pretende esta tesis es la determinación de los lugares con mayor concentración de energía del oleaje (o *hotspots*) y su clasificación en orden de las ubicaciones más adecuadas para la generación de energía.

Esta investigación se enmarca en el proyecto “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”, desarrollado por el Instituto Nacional de Hidráulica de Chile. Este proyecto busca fortalecer el proceso de implementación de ERNC de carácter undimotriz a nivel zonal, a través de la valoración del recurso.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Disponer de una revisión del estado del arte en cuanto a la investigación realizada con respecto a la energía a partir del oleaje, tanto a nivel nacional como internacional.
- Utilización y comprensión del modelo de transferencia numérico SWAN, en la propagación de un estado de mar, desde aguas profundas hacia aguas someras.
- Validación de los datos de análisis retrospectivos entregados por el NOAA, a partir de datos reales proporcionados por el SHOA.
- Propagar hacia la costa, dentro de los límites espaciales asumidos, la totalidad de estados de mar considerados en este estudio utilizando el modelo numérico SWAN.
- Identificar las ubicaciones con mayor concentración de energía de oleaje, clasificándolas según el mayor contenido energético, así como a partir de un análisis de criterios múltiples.
- Evaluar resultados obtenidos con información de algunos dispositivos captadores de energía, analizando su aplicación en la zona estudiada.

1.3. Estructura del Informe

El siguiente informe se divide en cinco capítulos principales, además de las referencias y los anexos con material adicional.

En el Capítulo 2 se presenta una revisión de conceptos básicos relevantes para la comprensión de este trabajo de titulación, además de una investigación del estado del arte con respecto a trabajos relacionados con la energía obtenida a partir del oleaje. El Capítulo 3 muestra la metodología implementada en el desarrollo de este trabajo. En el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología explicada en el capítulo anterior. Finalmente, el Capítulo 5 entrega un análisis de los resultados obtenidos, así como las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generación, Propagación y Caracterización del Oleaje

2.1.1. Generación y Propagación.

Fuerzas externas de la naturaleza, tales como la acción del viento, la geotérmica, la tectónica y la rotación terrestre, se encuentran actuando constantemente sobre el océano, entregando la energía y determinando el tipo de oleaje que este presentará (Massel, 1996). El oleaje corresponde a la manifestación de la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfase agua-atmosfera, correspondiente a la superficie del mar (GIOC UC, 2000). Una vez que las olas son creadas, la acción de la gravedad y la tensión superficial permiten que estas se propaguen, desde los centros generadores hacia la costa (Dean & Dalrymple, 1991). La figura 2.1 muestra, de forma esquemática, los mecanismos de generación, así como los de restauración asociados a distintos periodos y a una escala arbitraria de energía.

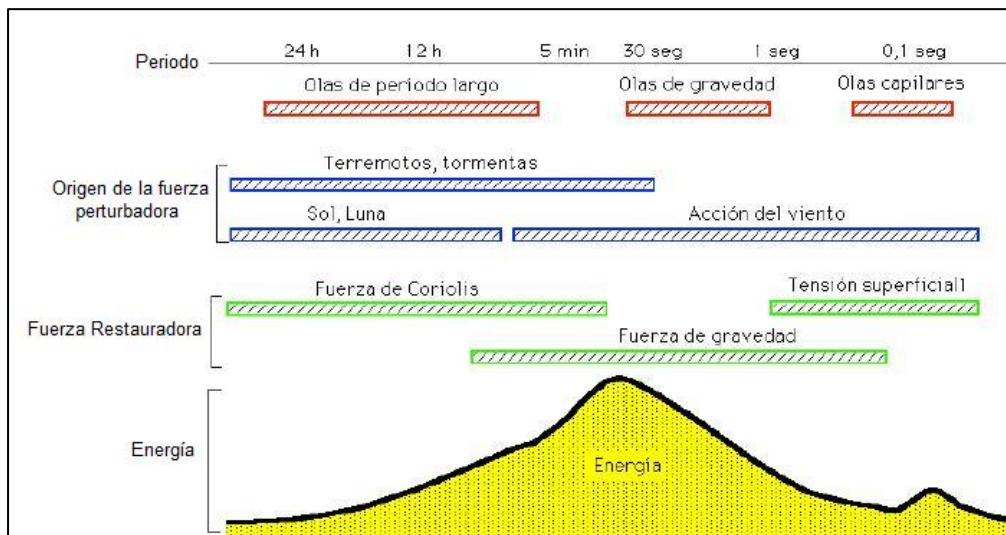


Figura 2.1 Tipos de ola y la energía en ellas contenida (Fernandez, 2004)

El oleaje presenta diversos mecanismos de generación, pero, predominantemente, las olas de gravedad, generadas a partir del viento, con períodos entre 3 y 30 s, son las de mayor interés en la práctica ingenieril, principalmente debido a que este oleaje concentra un porcentaje importante de la energía de un estado de mar, así como constituye una de las principales solicitaciones estructurales, de operación y morfología costera [Koutitas, (1988), Journée & Massie (2001)]. Ya que el máximo de energía disponible se encuentra en este rango de periodos, es este tipo de oleaje el considerado en este estudio.

En la etapa inicial de generación de oleaje por viento, las fluctuaciones turbulentas de presión atmosférica inducen olas de alturas menores a 0.1 m y periodos bajo 0.25 s (Holthuijsen, 2007), llamadas *olas capilares*. Estas olas son tradicionalmente inestables y son atenuadas cuando el viento deja de soplar, por efecto de la tensión superficial. Cuando

la velocidad del viento aumenta, las olas crecen de tamaño y las fuerzas de tipo gravitacionales son suficientes para mantener la propagación del oleaje (Massel, 1996).

Al cabo de un determinado tiempo y de una distancia o *fetch* mínima de acción del viento sobre la superficie del mar, se logra un estado de equilibrio, denominado *Oleaje Totalmente Desarrollado*. Si el equilibrio aún no es logrado, el oleaje se encuentra en crecimiento, denominándose *Oleaje Parcialmente Desarrollado*. Mientras las olas se encuentran en la zona de generación por viento local, sean total o parcialmente desarrolladas, estas se comportan de forma irregular y caótica, presentando crestas cortas, poca correlación en alturas y con direcciones de propagación variables, siendo llamadas *Mar de Viento* o *Sea*. Cuando estas dejan el área de generación, se produce una separación de los trenes de ondas que componen el oleaje. Las de mayor periodo, se adelantan a las de menor periodo, produciéndose una *Dispersión Radial* en la dirección de propagación, además se produce una *Dispersión Angular* debido a que en la zona de generación sus direcciones eran diferentes. En consecuencia, el oleaje adquiere un comportamiento de forma regular, perdiendo su aspecto caótico, presentando crestas largas, así como periodos y direcciones dominantes, siendo llamado *Mar de Fondo* o *Swell* [GIOC UC, (2000), Holthuijsen, (2007)]. La figura 2.2 presenta de forma esquemática el comportamiento del oleaje, desde la zona de generación hasta su propagación.

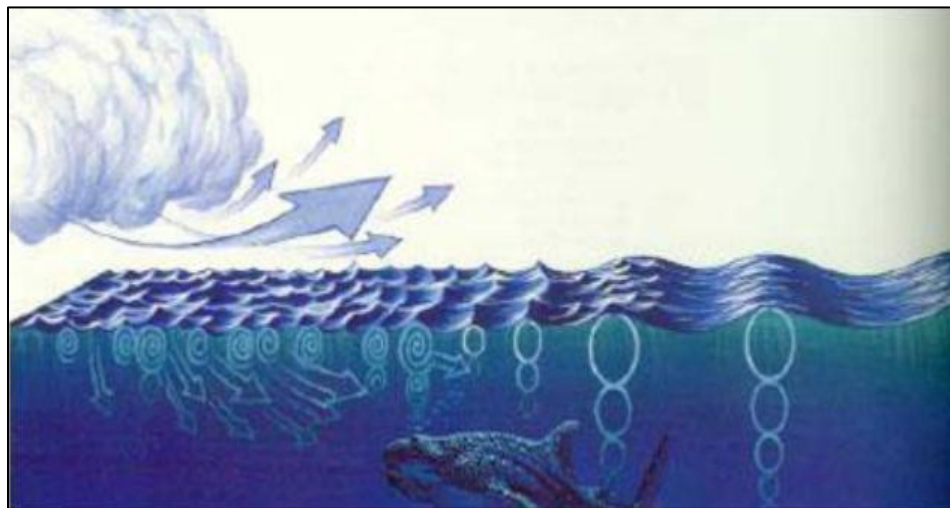


Figura 2.2 Representación esquemática del Sea, Swell y fetch (Villaverde, 2009)

2.1.2. Características y Clasificación

El oleaje puede ser considerado como una secuencia de pulsos sucesivos, los cuales se distinguen por el paso a través de la superficie libre, desde una elevación máxima relativa (cresta) a una mínima relativa (seno o valle) [(Koutitas, 1988)]. Cada ola puede ser caracterizada a partir de los siguientes parámetros:

Altura de Ola (H)	Distancia entre cresta y seno sucesivos
Periodo (T)	Tiempo que tardan en pasar dos crestas sucesivas por el mismo punto
Profundidad (h)	Distancia al fondo marino con respecto al nivel medio de la onda

A continuación se exponen otros parámetros importantes asociados a la caracterización de una ola, que se pueden obtener a partir de los nombrados anteriormente, y que intervienen en posteriores cálculos (figura 2.3). Se presenta además la fórmula para su obtención:

Longitud (L)	Distancia horizontal entre dos crestas sucesivas	
Frecuencia angular (ω)		$\omega = \frac{2\pi}{T}$ (2.1)
Numero de onda (k)		$k = \frac{2\pi}{L}$ (2.2)
Celeridad (c)		$c = \frac{L}{T}$ (2.3)
Peralte (ε)		$\varepsilon = \frac{H}{L}$ (2.4)
Altura Relativa (δ)		$\delta = \frac{H}{h}$ (2.5)
Profundidad Relativa (μ)		$\mu = \frac{h}{L}$ (2.6)

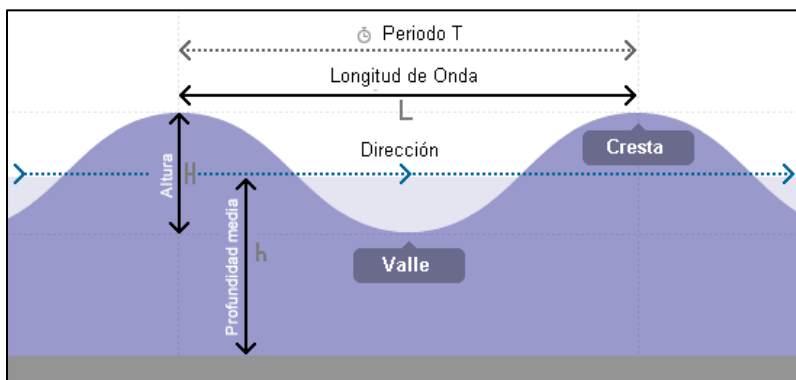


Figura 2.3 Diagrama esquemático de ola y sus parámetros característicos (www.todosurf.com)

Los parámetros adimensionales expuestos anteriormente son utilizados para caracterizar el movimiento de las olas, además de simplificar el entendimiento y las ecuaciones de movimiento para sus valores límites.

Dependiendo de su altura relativa (δ):

$\delta \ll 1$	Ola de amplitud infinitesimal o lineal.
$\delta \gg 1$	Ola de amplitud finita o no lineal.

Dependiendo de su profundidad relativa (μ):

$\mu > 0,5$	Aguas Profundas.
$1/20 < \mu < 0,5$	Aguas Intermedias.
$\mu < 1/20$	Aguas Someras.

En aguas profundas, el oleaje se propaga sin interacción con el fondo, siendo la celeridad independiente de la velocidad y la órbita de las partículas de forma circular. En aguas intermedias las olas comienzan a notar el fondo, por lo cual la celeridad depende de la profundidad y la trayectoria de las partículas pasa a ser elíptica. Finalmente, en aguas someras, las partículas notan la existencia del fondo marino, con lo que, en caso extremo, el movimiento vertical queda totalmente impedido, siendo su trayectoria paralela al fondo (figura 2.4).

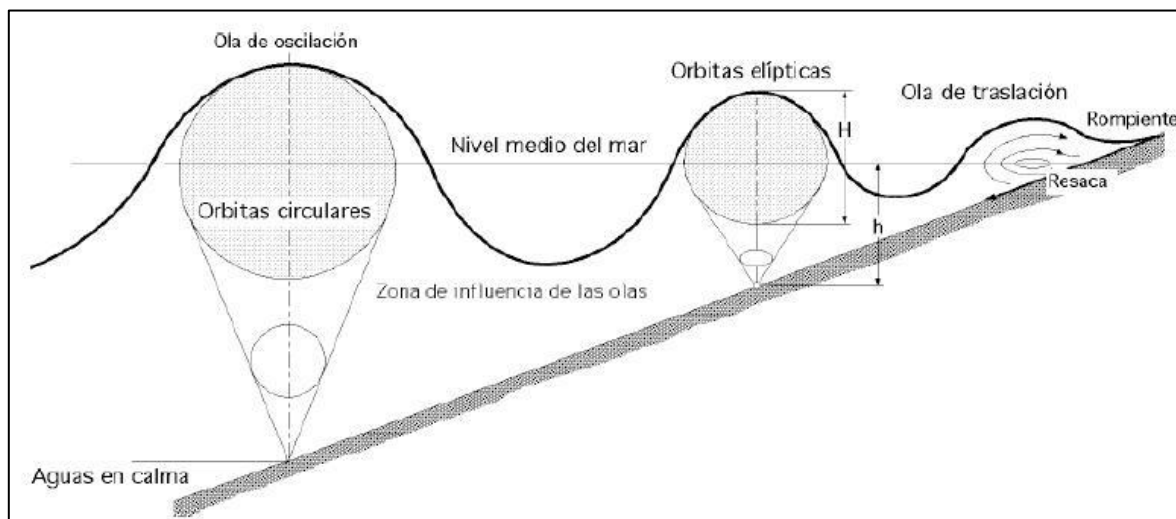


Figura 2.4 Movimiento de las partículas al aproximarse a la costa (Fernandez, 2004)

2.2. Teorías de oleaje

Las teorías que describen el oleaje son aproximaciones a la realidad y se comportan correctamente siempre que se cumplan las hipótesis adoptadas en su derivación. Es por esto que, al adoptar una teoría, ha de asegurarse que el fenómeno de interés se encuentre descrito razonablemente por la teoría adoptada.

A continuación se describe la teoría lineal de oleaje, ya que es en base a esta teoría que se derivan las ecuaciones adoptadas en este estudio. En cuanto a la teoría no lineal, se hace una breve referencia a ella, ya que su aplicación esta fuera del alcance de este estudio.

2.2.1. Teoría lineal

La Teoría Lineal de Airy, o de primer orden en el régimen de Stokes, corresponde a la más simple de las teorías posibles (GIOC UC, 2000), ya que considera olas periódicas y regulares, además de que al asumir ciertas hipótesis elimina variables que no afectan el resultado final de manera sustancial, siendo validas en muchos casos prácticos, pasando a ser una de las hipótesis más utilizadas a nivel ingenieril. Las hipótesis asumidas en esta teoría se presentan a continuación:

1. Agua homogénea e incompresible (ρ cte.).
2. Tensión superficial despreciable.
3. Efecto Coriolis despreciable.
4. Presión en superficie del mar uniforme y constante.
5. Flujo ideal.
6. Flujo irrotacional.
7. Fondo marino horizontal, fijo e impermeable.
8. Amplitud pequeña e invariable.
9. Ondas planas.

La ecuación que gobierna esta teoría corresponde a la función potencial ϕ (Ecuación 2.7), la cual resuelve el problema de contorno lineal asumiendo todas las condiciones límites impuestas (Dean & Dalrymple, 1991):

$$\phi = -\frac{H \cdot c}{2} \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.7)$$

Donde:

- z: Profundidad respecto a la superficie libre.
- x: Posición en x.
- t: Tiempo.

De esta manera el potencial de velocidades se encuentra expresado a partir de 4 parámetros independientes (h , H , k y ω) así como depende de la celeridad (c). Utilizando una

condición de borde dinámica es posible eliminar uno de estos parámetros, obteniendo como resultado la función dispersión de frecuencias, la cual da cuenta de cómo se dispersan olas de distintas frecuencias a causa de sus diversas celeridades:

$$\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad (2.8)$$

Donde g corresponde a la aceleración de gravedad.

A continuación se presentan las ecuaciones asociadas a los parámetros derivados desde la Teoría Lineal utilizados en este estudio. No se incluyen las aproximaciones asintóticas de aguas someras ni profundas, sino que se expone la ecuación general definida para aguas intermedias, las cuales son el objeto de estudio en este trabajo.

$$\begin{array}{l} \text{Desplazamiento} \\ \text{Vertical} \end{array} \quad \eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

$$\begin{array}{l} \text{Longitud de Ola} \end{array} \quad L = \frac{gT^2}{2\pi} \left[\tanh \left(2\pi \frac{\sqrt{(h/g)}}{T} \right)^{3/2} \right]^{2/3} \quad (2.9)$$

$$\begin{array}{l} \text{Celeridad} \end{array} \quad C = \frac{L}{T} \quad (2.10)$$

$$\begin{array}{l} \text{Celeridad de Grupo} \end{array} \quad C_g = nC = \left(\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \right) \left(\frac{\omega}{k} \right) \quad (2.11)$$

La ecuación para la longitud de ola corresponde a la aproximación de Fenton y McKee (1990). Esta aproximación es exacta en profundidades reducidas e indefinidas y en profundidades intermedias entrega resultados con un error menor al 1.7%, considerada válida para aplicaciones ingenieriles (GIOC UC, 2000).

La figura 2.5 presenta la superficie libre correspondiente a las ondas más comúnmente empleadas con el fin de demostrar las diferencias presentes entre cada teoría. Se muestra la teoría lineal de Airy, así como los perfiles de teorías no lineales.

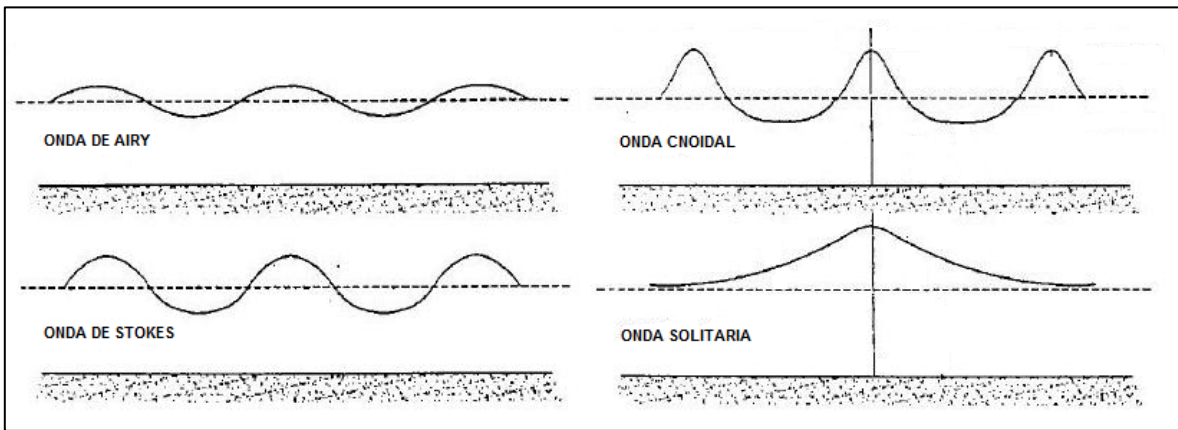


Figura 2.5 Perfiles de onda de acuerdo a las diferentes teorías (GIOC UC, 2000)

2.2.2. Teoría no lineal

En la naturaleza, la hipótesis básica de la teoría lineal, correspondiente a olas de pequeña amplitud, no siempre es válida. Para este tipo de olas se desarrollan teorías no lineales de amplitud finita, como la teoría en régimen de Stokes, así como soluciones aproximadas, como la onda cnoidal y la onda solitaria. Estas teorías no serán descritas en este trabajo, ya que están fuera del alcance de este estudio.

2.2.3. Flujo de energía

Asociado al movimiento de las olas existe una serie de parámetros que se relacionan con los promedios espacio-temporales del movimiento. Dentro de estos parámetros, existe uno de especial interés para el desarrollo de este estudio, el *Flujo de Energía*, ya que su valor nos indicará las principales ubicaciones para la explotación del recurso energético.

El flujo de energía medio \bar{F} , o potencia media, se define como la tasa media de transferencia de energía por unidad de ancho, y se obtiene a partir de la expresión:

$$\bar{F} = EC_g \quad (2.12)$$

Donde E corresponde a la energía total media o densidad de energía.

La densidad de energía se calcula en base a la suma de la energía cinética y potencial del flujo de agua. En su caso, no existe una expresión general independiente de la teoría de ondas utilizada. Para la teoría lineal de olas, la energía total por unidad de superficie es:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.13)$$

Es importante notar que la energía asociada a un grupo no viaja con las olas individuales que aparecen y desaparecen con el grupo, sino con la envolvente, la cual viaja a velocidad C_g .

2.3. Metodologías de representación del oleaje

El oleaje real raramente se ve idéntico ola tras ola y menos se propaga siempre en la misma dirección, sino que, por el contrario, es un proceso esencialmente aleatorio. Sin embargo, puede ser visto en términos prácticos como una superposición de un gran número de ondas armónicas regulares, cada una con su propia amplitud, longitud, periodo y dirección de propagación (figura 2.6).

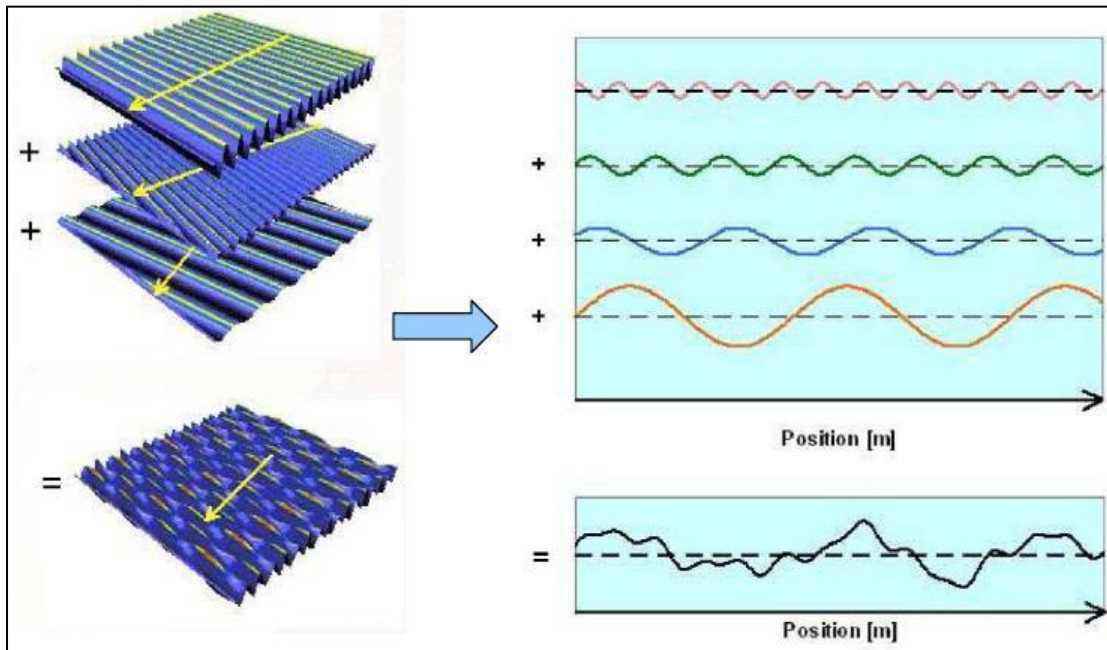


Figura 2.6 Principio de superposición del oleaje (Cavia, 2009)

En búsqueda de una correcta representación del oleaje real, se desarrollaron distintas metodologías de análisis, las cuales permiten aplicar las teorías basadas en oleaje regular, obteniendo un alto grado de exactitud.

Actualmente existen dos metodologías para el análisis de una señal de oleaje, cada una con sus ventajas y limitaciones, que pueden considerarse complementarias:

- *Análisis Estadístico*, el cual considera las propiedades estadísticas, los parámetros y distribuciones directamente de una serie de tiempo.
- *Análisis Espectral*, que toma en cuenta el estudio del espectro de energía y sus propiedades en el dominio de la frecuencia.

2.3.1. Análisis estadístico

Longuet & Higgins (1952) por un lado y Pierson & Marks (1952) por otro, propusieron que los registros de los desplazamientos de la superficie libre del mar, con respecto al nivel medio, pueden representarse a través de la suma de un gran número de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, así como de frecuencias y fases aleatorias (Silva, 2005).

El modelo presentado representa un proceso *estocástico*, ya que se considera el oleaje como un experimento, asumiendo la superficie libre como una función y no como un número, *estacionario*, en el cual las características externas que influyen en el oleaje (fuerzas generadoras y restauradoras) permanecen constantes durante cierto periodo de tiempo (*estado de mar*), *gaussiano*, donde la superficie libre se encuentra normalmente distribuida en el tiempo y *ergódico*, permitiendo sustituir promedios espaciales por temporales.

En la práctica, se debe disponer de un registro continuo de, por ejemplo, la superficie libre en un punto. Con el objeto de tener muestras estadísticamente representativas, se debe fijar un periodo de medición que sea, por un lado, lo suficientemente corto para admitir la hipótesis de estacionariedad y, por otro, lo suficientemente largo para obtener un número representativo de olas. Dicho periodo, en el caso de los datos reales utilizados en este estudio, corresponde a 20 minutos por cada 3 horas. Los parámetros estadísticos se extienden a todo el intervalo, admitiendo la duración del estado de mar por ese periodo de tiempo. Este análisis se denomina *variación a corto plazo*.

Al estudiar la variación de los estados de mar en el tiempo, *variación a largo plazo*, se puede analizar el régimen medio y el extremo, facilitando la descripción estadística de los parámetros, así como su probabilidad de excedencia en un periodo dado.

Parámetros Estadísticos

A continuación se describen brevemente los principales parámetros estadísticos que representan el estado del mar.

- Altura Significativa de Ola

Se define como la altura de ola que percibe un observador habituado al mar. Corresponde a la media aritmética del tercio de olas más altas del registro. Matemáticamente, con un registro de N olas y ordenado de mayor a menor, la altura significativa de ola:

$$H_S = H_{1/3} = \sum_{i=1}^{N/3} \frac{H_i}{N/3} \quad (2.14)$$

- Altura Cuadrática Media de Ola

Corresponde a la media cuadrática del registro de alturas de olas. Según algunos autores (Cooper, 2004), proporciona una idea de la ola que mejor representa la energía de un estado de mar.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (2.15)$$

- Periodo Medio (T_z)

Promedio de la diferencia temporal entre los pasos por cero consecutivos, definidos como ascendentes o descendentes. La figura 2.7 muestra la separación de olas utilizando el método del paso descendente. Para cada una de estas olas (numeradas en la parte inferior de la figura) existe un periodo distinto.

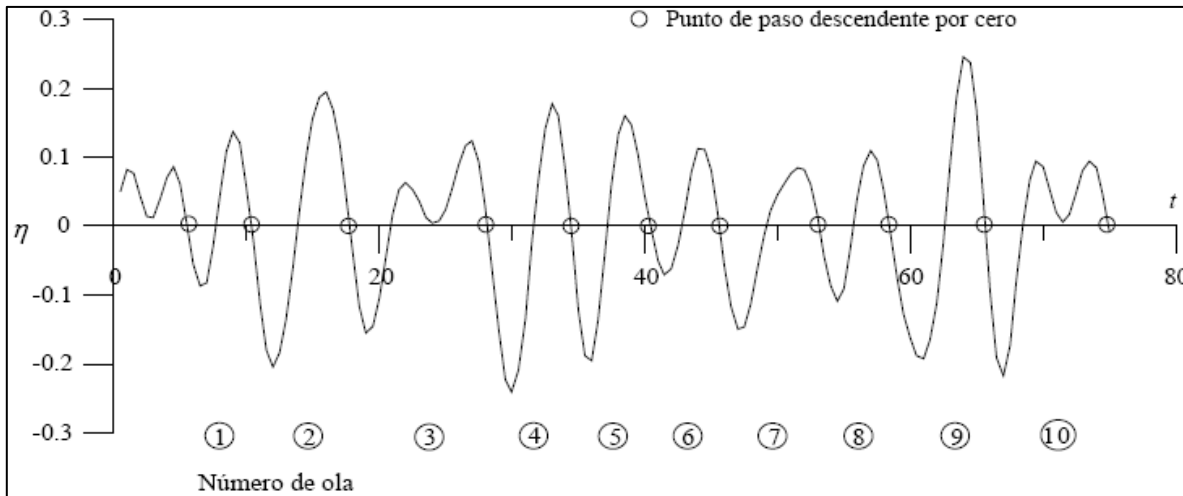


Figura 2.7 Definición de olas con el método de paso descendente (Silva, 2005)

2.3.2. Análisis espectral

A mediados del siglo XX, el trabajo de Rice (1945) en procesamiento de señales, fue extendido al oleaje. Asumiendo que un registro de oleaje es un ejemplo discreto de un proceso continuo, los principios de análisis de Fourier pueden ser aplicados para describir dicho registro.

En contraste con el análisis estadístico, que busca definir ondas individuales, el análisis espectral procura describir la distribución de variabilidad con respecto a la frecuencia de la señal. Esta medida de variabilidad es llamada *Spectro Energético Unidimensional*, ya que, asumiendo la teoría lineal de oleaje, la energía del campo de olas puede obtenerse a partir de ella.

Una ventaja inmediata de este método de análisis, es que entrega información de que frecuencias tienen un contenido energético significativo. Sin embargo, pierde la información asociada a la individualidad de las olas, ya que las considera a todas actuando en la misma dirección. Para que la representación sea más adecuada es necesario incluir la dirección en el análisis, obteniendo el *Spectro Energético Bidimensional* (figura 2.8).

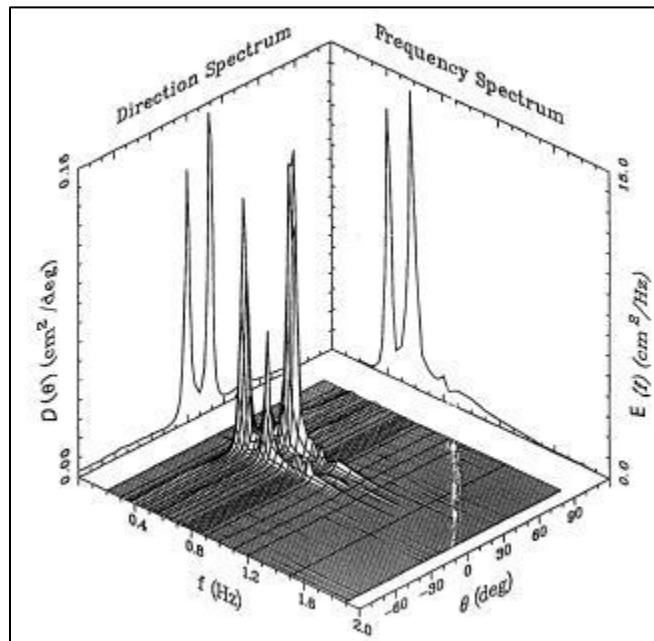


Figura 2.8 Espectro bidimensional y espectros unimodales de dirección y frecuencia (CEM, 2002)

La obtención del Espectro Direccional comúnmente involucra la medición del mismo parámetro en una serie de ubicaciones cercanas o de distintos parámetros en el mismo punto. El sistema más comúnmente utilizado en la actualidad corresponde a boyas direccionales. Sin embargo, no siempre es posible la obtención de estos registros, por lo cual, asumiendo que el estado de mar puede ser considerado como una superposición de un gran número de componentes sinusoidales, se puede representar el espectro de frecuencias utilizando, por ejemplo, la FFT (transformada rápida de Fourier), obteniendo funciones espectrales sintéticas.

Espectros más comúnmente empleados

Para describir determinados estados de mar se han desarrollado distintos espectros de energía teóricos que se ajustan bien a las condiciones generales del mar. A continuación de describen brevemente los dos espectros teóricos más utilizados.

- Pierson-Moskowitz

Creado por Pierson & Moskowitz (1964), es sencillo y uniparamétrico (depende sólo de la velocidad del viento a 19.5 m sobre el mar). Para oleajes totalmente desarrollados, asume que el *fetch*, así como la duración del temporal son finitos. Su expresión es:

$$S(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4 f^5} \cdot \exp \left[-0.74 \left(\frac{2\pi U_{19.5} f}{g} \right)^{-4} \right] \quad (2.16)$$

Donde:

$U_{19.5}$: Velocidad del viento a 19.5 m. sobre el mar

- JONSWAP (*Joint North Sea WAve Project*)

Desarrollado por Hasselmann (1973), corresponde a una extensión del espectro de Pierson-Moskowitz. Se aplica a áreas que presentan un *fetch* limitado y su expresión es:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \cdot \exp \left[-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{\left(\frac{f}{f_p} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.17)$$

Donde:

$$f_p = 3.5 \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-0.33} \quad (\text{frecuencia peak})$$

$$\alpha = 0.076 \left[\frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0.22} \quad (\text{factor de escala})$$

$$1 \leq \gamma \leq 7 \quad (\text{coeficiente de apuntamiento})$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (\text{cte. en función de la frecuencia})$$

F : Longitud del fetch

U_{10} : Velocidad del viento a 10 m sobre el mar

La comparación entre ambos espectros se presenta en la figura 2.9. Se puede observar que el espectro JONSWAP presenta un mayor agrupamiento de energía en torno a la frecuencia peak. Es por eso que, en base a las características de cada ubicación se debe decidir cual utilizar.

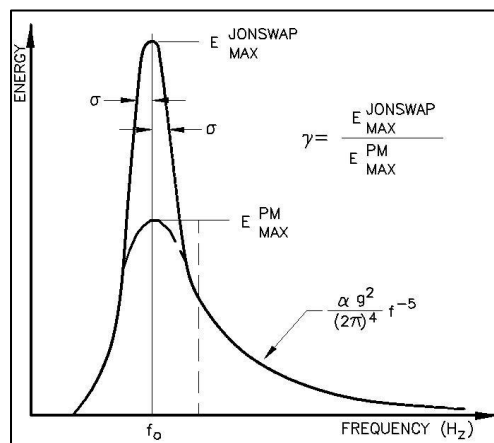


Figura 2.9 Comparación adimensional de espectros JONSWAP y Pierson-Moskowitz (CEM, 2002)

Los espectros antes nombrados solo consideran la frecuencia, sin embargo existen métodos para la definición de un espectro direccional sintético, en base a la función de *dispersión direccional*.

Parámetros Espectrales

A continuación se describen brevemente los principales parámetros estadísticos que ayudan a conocer un temporal determinado.

- Momento de orden n

Se define como momento de orden n de la función de densidad espectral,

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta \quad (2.18)$$

Donde $S(f, \theta)$ corresponde a la densidad espectral en función de la frecuencia angular y la dirección.

- Altura significativa espectral

Suponiendo una distribución de alturas de ola tipo Rayleigh,

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.19)$$

Para el caso particular de un espectro de banda estrecha con una distribución de alturas de ola tipo Rayleigh, la altura de ola significativa espectral (o de momento de orden cero) es igual a la altura de ola significante definida en el análisis estadístico ($H_{m_0} = H_S$).

- Periodo Peak espectral (T_p) y Dirección Peak espectral (D_{pk})

Par periodo-dirección en el que la función de densidad espectral alcanza su máximo.

- Periodo energético (T_e)

Periodo asociado a una ola que contiene toda la energía de un estado de mar. Relaciona las frecuencias más bajas con el momento de orden 0.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.20)$$

2.4. Características del oleaje en Chile

Dada la ubicación de Chile con respecto al Océano Pacífico, así como la extensión de su costa, es posible distinguir variados componentes de oleaje generados en distintos puntos. Se reconocen cuatro formas de oleaje que llegan a las costas chilenas (Nicolau del Roure, 2004):

- **Swell del Hemisferio Sur**
Oleaje generado por ciclones extra-tropicales mar adentro, entre las latitudes 30°S y 70°S. Fenómeno presente durante todo el año, con mayor intensidad en los meses de invierno. A la costa chilena llega con dirección SW y periodos entre los 12 y 16 s, decreciendo su intensidad hacia el Norte.
- **Swell del Hemisferio Norte**
Oleaje generado en los alrededores de las Islas Aleutianas (frente a Alaska), a una distancia de 15 000 km de las costas chilenas. Fenómeno presente principalmente en los meses de verano, llegando con dirección NW y periodos entre los 18 y 25 s, decreciendo su intensidad hacia el Sur.
- **Oleaje de generación local (*Sea*)**
Oleaje generado por vientos locales producidos en cercanías a la costa. Al no desarrollarse completamente, presenta periodos relativamente cortos (entre 6 y 10 s).
- **Olas generadas por Ciclones Tropicales**
Oleaje generado por tormentas producidas cerca de las costas de América Central. Son poco frecuentes, pero deben ser tomadas en cuenta en el clima de oleaje extremo.

2.5. Transferencia de oleaje

2.5.1. Fenómenos que afectan la transferencia del oleaje

A medida que el oleaje se aproxima a la costa sus características se ven afectadas cuando la profundidad comienza a ser menor que la semilongitud de onda (Fernández, 2004). La propagación de las olas se ve afectada por diversos fenómenos, los cuales se explican a continuación:

- Asomeramiento (*Shoaling*)

Se produce cuando el oleaje se propaga hacia la costa y debido a la disminución en la profundidad y a la conservación del flujo de energía, las olas aumentan su altura y disminuyen su longitud.

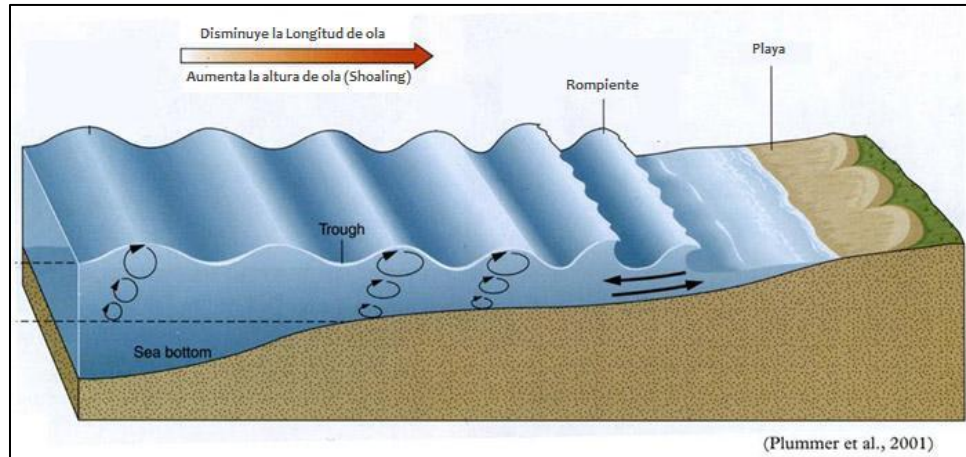


Figura 2.10 Asomeramiento (www.ericbeiers.com)

- Refracción

Cuando el oleaje llega a aguas poco profundas, comienza el proceso de asomeramiento, y estas bajan su velocidad. Si la cresta de la ola no se encuentra paralela a la batimetría de la zona, la ola se refracta y se orienta de forma paralela a los veriles.



Figura 2.11 Refracción (www.geographyfieldwork.com)

- **Difracción**

La difracción del oleaje ocurre cuando el tren de olas se encuentra con obstáculos, tales como islas, pequeños rompeolas, barcos, etc. La energía se difracta a la ‘sombra’ del obstáculo, suavizando la discontinuidad entre la zona expuesta y la protegida.

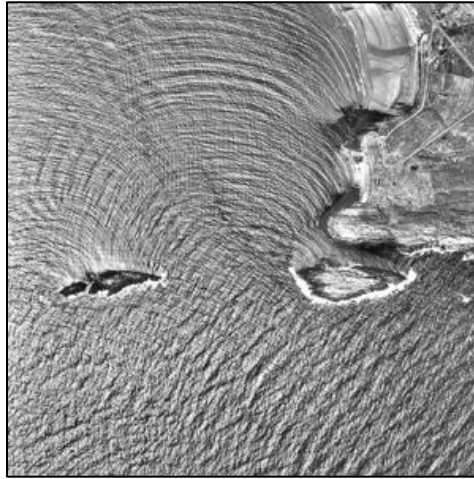


Figura 2.12 Difracción (www.cyberchalky.wordpress.com)

- **Reflexión**

Al chocar la ola contra un obstáculo vertical, esta se refleja, es decir, cambia su dirección dependiendo del ángulo de incidencia, manteniendo casi la totalidad de su energía.



Figura 2.13 Reflexión (www.meted.ucar.edu)

- **Fricción de Fondo**

Perdida de energía a causa de la fricción del agua con el fondo marino.

- Rompimiento
Debido al asomeramiento, las olas se peraltan hasta desestabilizar a las crestas, produciéndose el rompimiento de la ola y disipando una gran cantidad de energía.

2.5.2. Métodos de transferencia

Para realizar la transferencia de oleaje, desde aguas profundas a aguas someras, existen distintas metodologías basadas en el tipo de datos con el que se cuente. Las utilizadas más comúnmente se describen a continuación [CEM, (2002), Nicolau del Roure, (2004)]:

- Transferencia por parámetros de resumen
Conociendo los datos de altura significativa de ola (H_s), periodo peak (T_p) y dirección principal (MWD) en aguas profundas, a partir del resumen de todo el clima en una ola característica, se transfieren mediante modelos numéricos, para luego obtener los parámetros de las olas en aguas someras.
- Transferencia por espectro unidimensional
Se distinguen dos métodos de transferencia. En el primero, a partir del espectro de energía, se obtiene la altura significativa y el periodo peak, para luego propagar los datos de manera similar a la transferencia por parámetros de resumen. El segundo método se basa en el balance energético de las olas. De igual forma, al corresponder los datos al espectro unidimensional, se pierde la variabilidad en las direcciones, ya que solo se cuenta con el valor de la dirección principal.
- Transferencia por espectro bimodal o bidimensional.
Corresponde a la transferencia del oleaje, considerando, además de los datos que entrega el método anterior, la dirección de cada ola. Tiene la ventaja de incluir la interacción ola-ola en la transferencia, sin embargo, el costo computacional que considera su aplicación es muy elevado.

En el caso de la costa chilena, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), en su instrucción 3201 (SHOA, 2005), estipula que la transferencia debe realizarse de manera individual a partir del espectro bidimensional, contando con una base de datos de al menos 20 años, con valores cada 3 horas como máximo. La determinación del oleaje en la costa se debe realizar mediante modelos numéricos de propagación, que permitan tomar en cuenta distintas direcciones de incidencia de oleaje en el rango de periodos de 2 a 30 s, así como los principales efectos de la batimetría y la línea costera. Se debe validar la información, comparando lo obtenido desde el modelo con mediciones *in situ*.

2.5.3. Modelos numéricos

Para representar los fenómenos más importantes que ocurren en la propagación del oleaje, se hace imperativo contar con modelos que entreguen un alto grado de aproximación y resolución, acorde al problema que se busca solucionar.

Los modelos de propagación se pueden dividir en dos grandes clases:

- Resolución de fase (*Phase-resolving models*), y
- Promediados en la fase (*Phase-averaged models*).

Los modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento, son usados para condiciones de oleaje variables, en dominios pequeños y, por lo general, no consideran generación ni disipación de energía. Una de sus principales ventajas corresponde a la buena simulación de los procesos de difracción y refracción.

Los modelos promediados en la fase se basan en la conservación de energía espectral, y asumen que las propiedades de las olas varían lentamente, a escala de longitud de onda. A diferencia de los modelos de resolución de fase, consideran fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales, para un estado de mar descrito a partir de un espectro de energía.

La aplicación de los modelos que resuelven la fase se limita a áreas relativamente pequeñas (del orden de kilómetros), mientras que los modelos promediados en la fase pueden ser aplicados en áreas mayores al no precisar una resolución tan pequeña. Además, en función de las condiciones predominantes, tanto climáticas como geográficas, así como el detalle del estudio que se desea realizar, se debe seleccionar el modelo que entrega de mejor forma los resultados, ya que los diferentes procesos involucrados en la propagación del oleaje (disipación, refracción, difracción, etc.) no son tratados de igual forma en ambos casos.

Dentro de los modelos de resolución de fase se encuentran los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave (Berkhoff, 1972), su versión parabólica (Radder, 1979), entre los que destacan el modelo REF/DIF (Kirby & Dalrymple, 1983) y el modelo REFRAC. También se encuentran los modelos basados en las aproximaciones de Boussinesq [Peregrine, (1967), Madsen & Sorensen, (1992)], dentro de los cuales destacan los modelos: MIKE 21 (Madsen & Sorensen, 1992), FUNWAVE 2D (Wei et al., 1995), BOUSS 2D (Nwogu & Demirbilek, 2001) y COULWAVE (Lynett & Liu, 2004).

Los modelos promediados de la fase se desarrollaron en base al concepto de ola de Pierson & Moskowitz (1964), así como a la ecuación de transporte espectral (Gelci et al., 1956). Dependiendo de cómo se resuelve la ecuación de balance de energía, y la evolución teórica y experimental en la estimación de los términos asociados a ella, los modelos promediados de la fase se clasifican en primera, segunda o tercera generación.

Los modelos de primera generación no incluyen el efecto de las interacciones no lineales entre olas, sobreestiman la acción del viento y subestiman la fuerza de transferencia lineal. Los de segunda generación, a pesar de incorporar las interacciones no lineales mediante la utilización del espectro JONSWAP, se encuentran limitados en la transferencia no lineal de energía y presentan un comportamiento erróneo para condiciones extremas de vientos rápidamente variables. Los modelos de tercera generación, principal avance hasta la fecha en predicción del oleaje, no consideran una forma definida del espectro y, tanto la ecuación de transporte de energía, como los términos no lineales son calculados por completo. Dentro de sus ventajas, permite observar la evolución en el tiempo y el espacio del espectro de frecuencias y la altura significativa de ola, además mejora, con respecto a los predecesores, la simulación en la transferencia desde la zona de generación a la costa.

Los modelos de tercera generación más utilizados por la comunidad científica corresponden a: WAM (WAMDI Group, 1988), WAVEWATCH III (Tolman, 1991) y TOMAWAC (Benoit et al., 1996) para aguas profundas y SWAN (Booij et al., 1999), STWAVE (Smith et al., 2001) y MIKE 21 SW (DHI, 2005) para aguas someras.

2.5.4. SWAN

El presente estudio utiliza este modelo como base para la obtención de los datos en la zona seleccionada. SWAN corresponde a un modelo *phase-averaged* espectral desarrollado por *Delft University of Technology* en Holanda. Es un modelo de tercera generación que estima de manera realista los parámetros del oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios, en base a condiciones de viento, corrientes y batimetría.

En SWAN el oleaje es descrito mediante la densidad espectral de acción de onda $N(\sigma, \theta)$ en lugar de la densidad espectral de energía $E(\sigma, \theta)$, debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de energía no se conserva. La densidad espectral de acción de onda se define como:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (2.21)$$

Las variables independientes corresponden a la frecuencia relativa (σ) y a la dirección del oleaje (θ). La evolución del espectro de oleaje en posición (x, y) y tiempo (t) es descrita por la ecuación de transporte para la densidad espectral de acción de onda (Hasselmann et al., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2.22)$$

Desde izquierda a derecha, el primer término de esta ecuación representa el rango local de variación de densidad espectral de acción en el tiempo; el segundo y tercer término representan su propagación en el espacio (donde C_x y C_y representa la velocidad de propagación en x e y respectivamente); el cuarto término representa el cambio en la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y las corrientes (con la velocidad de propagación C_σ en el campo de las frecuencias); el quinto término representa la

propagación y refracción inducida por la profundidad y las corrientes en el campo direccional (C_θ corresponde a la velocidad de propagación en el campo direccional). El término $S(\sigma, \theta)$ corresponde al término fuente, el cual representa los efectos de la generación, disipación e interacciones ola-ola no lineales. Este término considera un crecimiento lineal y exponencial en el tiempo, debido al viento, disipación por *whitecapping*, fricción de fondo, rompimiento y transferencia de energía debido a interacciones ola-ola (cuadrupletas y triadas).

De esta manera, SWAN considera la mayoría de los procesos que contribuyen al crecimiento y decaimiento de las olas. Estos incluyen el crecimiento debido al viento, el decaimiento por *whitecapping*, la fricción de fondo, el rompimiento inducido por la profundidad y la transferencia no lineal de energía por interacciones ola-ola.

Así como los procesos nombrados determinan como cambia la ola celda a celda en el mallado de cálculo, la propagación de la ola determina como se transfiere la energía de una celda a otra. Para esto SWAN considera la batimetría, los obstáculos y las corrientes presentes.

Con respecto al tipo de grilla, la elección depende de muchos factores, como la configuración costera, posibles anidaciones o acoplamientos de modelos. Por defecto, corresponde a una grilla regular y rectangular, sin embargo existe la posibilidad de utilizar una grilla curvilínea, irregular o no estructurada (figura 2.14).

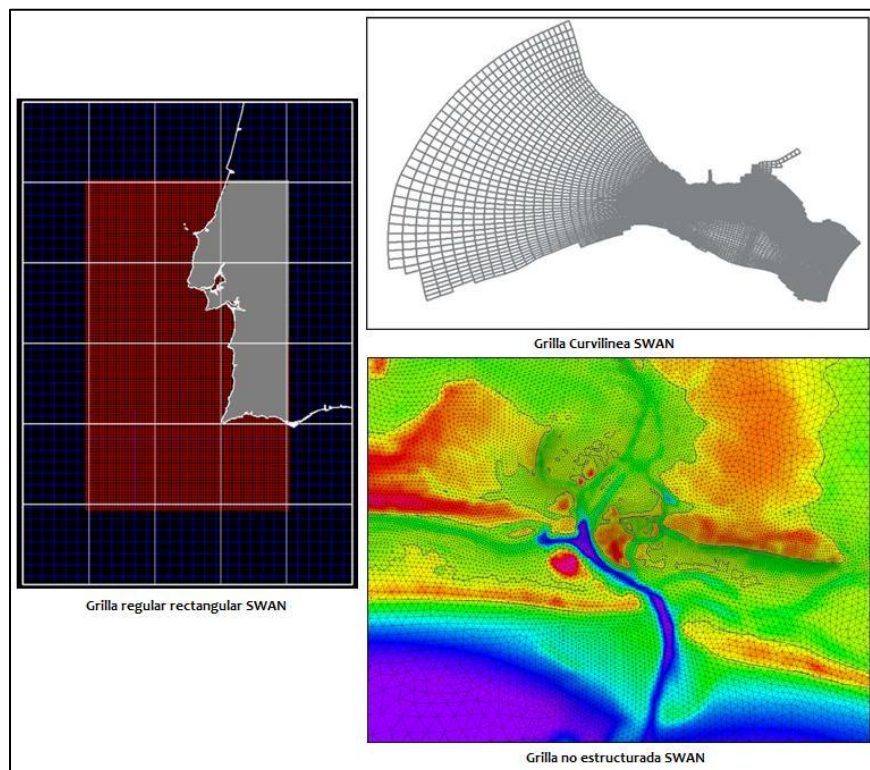


Figura 2.14 Distintos tipos de grillas utilizadas en SWAN (www.meted.ucar.edu)

Otro aspecto importante a tener en cuenta son las condiciones de borde. Estas condiciones corresponden, comúnmente, a datos obtenidos a partir de mediciones *in situ* (boyas) o datos de modelos con un dominio mayor, por ejemplo grillas anidadas o datos pronosticados por el *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

La elección de los límites que definen el área donde se realizarán los cálculos y sobre los cuales se verán impuestas las condiciones de borde, es de sumo cuidado, ya que en las zonas cercanas a los límites de la malla de cálculo, el modelo no funciona con la exactitud que lo realiza en los sectores más alejados a los bordes (Mark Willis et al., 2010).

SWAN puede ser utilizado en dos modos fundamentales: estacionario y no estacionario. En el modo estacionario, comienza, con las condiciones iniciales, un número de iteraciones suficientes para conseguir un estado balanceado. En el modo no estacionario, el modelo funciona como un modelo climatológico con variación en el tiempo. Una consideración de cuidado al momento de seleccionar el modo de trabajo corresponde a que SWAN, ejecutado en modo estacionario, puede generar olas de crecimiento y decaimiento acelerado. Esto puede ser mejorado ejecutando SWAN en modo no estacionario, sin embargo, el tiempo de ejecución del modelo aumenta significativamente (Mark Willis et al., 2010).

Para correr el modelo, se necesita un mínimo de datos esenciales. Estos corresponden a la batimetría y el oleaje incidente (espectro energético o viento). Otros datos dependen de las condiciones locales y de la exactitud con la que se busca modelar el oleaje.

Finalmente, se solicitan al modelo los datos de salida necesarios, teniendo variadas opciones, tanto en el tipo de datos (alturas, periodos, direcciones y cantidades derivadas) como en la ubicación de estos en la zona de estudio. En la figura 2.15 se presenta un ejemplo de la hoja de entrada de comandos, así como un ejemplo de salida de datos, graficados con la ayuda del programa MATLAB.

Comparando su empleabilidad y características con otros modelos, se puede destacar que SWAN puede ser utilizado en cualquier escala, sin embargo fue específicamente diseñado para aplicaciones costeras. En este ámbito, posee la característica de que puede ser acoplado fácilmente a otros modelos de tercera generación, como WAVEWATCH III o WAM (modelos para aguas profundas).

En cuanto a su comparación con modelos de aguas someras, la tabla 2.1 presenta las principales diferencias entre STWAVE y SWAN (Allard et al., 2004). Además, Hsu & Allard (2002) determinan que el desempeño de SWAN depende principalmente de la exactitud de los datos de entrada de otros modelos de tercera generación (WAM, WAVEWATCH III). También definen que su comportamiento es mejor bajo condiciones de *sea* en vez de *swell*. Su estudio demuestra que el modelado con SWAN es superior al de STWAVE, en el cual, su pobre desempeño se debe principalmente a su limitante en la especificación de condiciones de borde y viento.

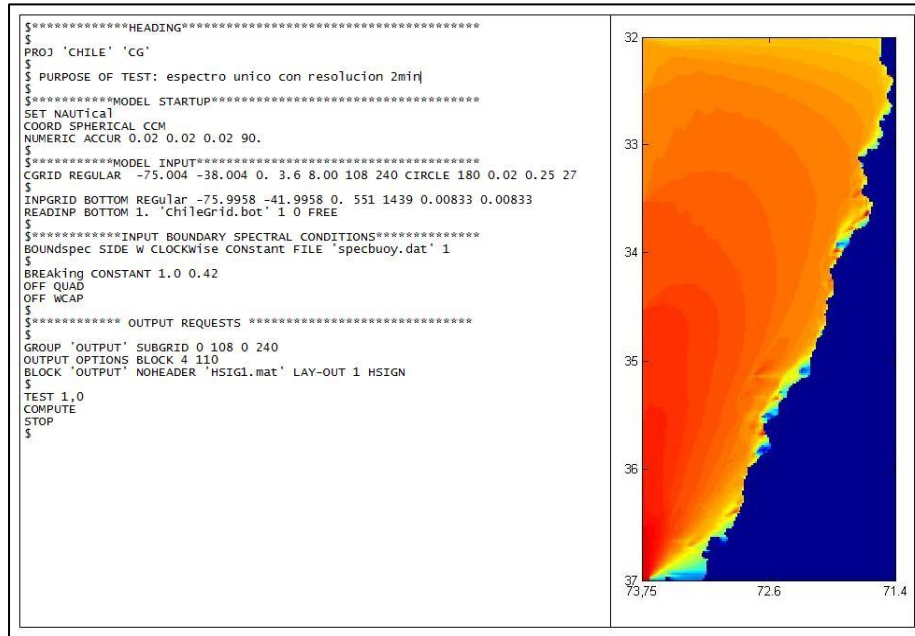


Figura 2.15 Hoja con entrada de datos al modelo y ejemplo de archivo de salida graficado en MATLAB

Tabla 2-1 Comparación de las características de los modelos SWAN y STWAVE (Allard et al., 2004)

Características del Modelo	SWAN	STWAVE
Propagación de oleaje desde cualquier dirección	SI	NO
Condiciones de borde variables	SI	NO
Difracción	NO	SI
El campo de viento puede variar espacialmente sobre la malla de cálculo	SI	NO
Refracción	SI	SI
Coordenadas Cartesianas	SI	SI
Coordenadas Esféricas	SI	NO
Coordenadas Curvilíneas	SI	NO
Modo No-Estacionario	SI	NO

Actualmente, SWAN ha sido adoptado por diversas entidades, como la principal herramienta en modelación costera de oleaje (NOAA, U.S. Navy), así como por distintos investigadores para el estudio de los procesos oceánicos.

2.6. Estudios previos

A continuación se presenta un breve resumen de estudios relacionados con el tema tratado en esta memoria y que se utilizaron como referencia para el presente estudio.

2.6.1. Análisis geo-espacial multi-variado para el uso de un sistema de conversión de energía en base al oleaje (Nobre et al., 2008)

Ana Nobre, en conjunto con un grupo de expertos del Instituto Hidrográfico Portugués y de la Universidad Técnica de Lisboa, desarrollaron un análisis multi-variado basado en referencias geo-espaciales, para determinar las ubicaciones más adecuadas en la instalación de una granja de energía en base al oleaje (GEO). El análisis geo-espacial multi-variado se desarrolló para tomar en cuenta, en una etapa temprana del diseño, una gran cantidad de factores administrativos y medioambientales, asignándoles un peso correspondiente a cada uno, lo cual entrega un valor numérico, que determina la mejor ubicación para la instalación de la GEO.

En relación al criterio adoptado, dos tipos de factores definen el análisis multi-variado: restricciones y factores de peso. Las restricciones definen los sectores a ser excluidos del análisis, por ejemplo: cables submarinos existentes, áreas de protección medioambiental, áreas de ejercicios militares, etc. Los factores de peso son evaluados por el impacto que producen en la implementación del sistema y se les asocia un peso específico de acuerdo a su relevancia. Factores de peso son por ejemplo, profundidad, tipo de fondo, distancia a puertos, distancia a la costa, distancia a la red eléctrica, clima de oleaje, etc.

Con respecto a la metodología utilizada, el primer paso es definir un área de interés general para el análisis e identificación de las características que afectan la decisión de ubicar una GEO. Esta área debe incluir las zonas de restricciones, para que estas queden identificadas en el resultado final del proceso. Es importante definir todas las ubicaciones que caracterizan la zona, ya que en base a estas se derivaran los valores asociados a los factores tomados en cuenta. Por ejemplo, es necesario definir la ubicación de los puertos, ya que se definió como un factor de peso, la distancia al puerto más cercano.

Una vez definidos todos los factores de peso y las ubicaciones que los caracterizan, es necesario definir una escala evaluativa acorde a los valores entregados por los distintos factores, considerando el tipo de dispositivo convertidor de energía a utilizar. En este caso se utiliza una escala de 0 a 100, reclasificación realizada en conjunto con expertos, tanto en medioambiente como en GEO.

El siguiente paso es tan importante como el primero, y corresponde a la determinación del peso específico de cada factor reclasificado. Para esto es necesario estimar el impacto que cada factor tiene en el sistema. Nuevamente, para validar los pesos adoptados, es necesaria la asesoría de expertos, tanto en medioambiente como en GEO.

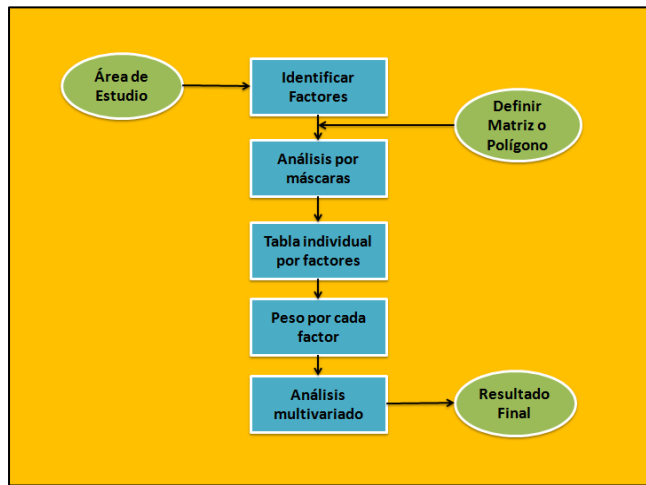


Figura 2.16 Resumen de la metodología aplicada (Nobre et al., 2008)

Finalmente los resultados se obtienen gracias a la utilización de procedimientos geo-espaciales, entregados en una matriz, que se corresponde con el mapa de la zona en estudio, con valores de 0 a 100, donde los valores más altos representan los mejores lugares para ubicar el sistema de GEO.

La figura 2.16 representa de manera esquematizada la metodología utilizada. La figura 2.17 entrega el resultado final del estudio para una zona en el suroeste de Portugal.

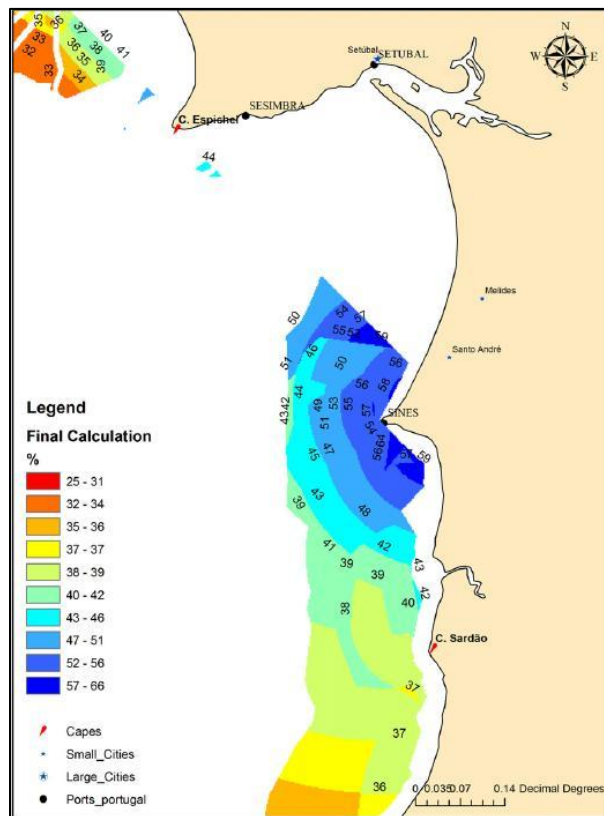


Figura 2.17 Representación del resultado final (Nobre et al., 2008)

2.6.2. Evaluación global del oleaje como recurso energético (Cornett, 2008)

Andrew M. Cornett, perteneciente al *Canadian Hydraulics Center*, presenta en el año 2008, un estudio derivado del análisis de las predicciones del clima de oleaje generadas por el modelo WAVEWATCH-III (Tolman, 1991), desarrolladas por el NOAA para un periodo de 10 años, entre 1997 y 2006.

En su investigación, hace referencia a los anteriores estudios que intentan definir el recurso energético a lo largo del globo. Entre estos, destaca el trabajo de Barstow et al. (1998), quien a partir de los datos obtenidos por la misión TOPEX/POSEIDON, en base a un altímetro satelital, recoge los datos de altura significativa (H_s) y su correspondiente periodo energético (T_e) cada 5 días por un periodo de dos años, globalmente, a lo largo de las costas continentales. Con estos datos realiza un balance estimativo del recurso energético a nivel mundial (figura 2.18). Sin embargo, para Cornett, a pesar de lograr grandes avances en el estudio del recurso, aun se encuentra pobremente definido en varias partes del globo.

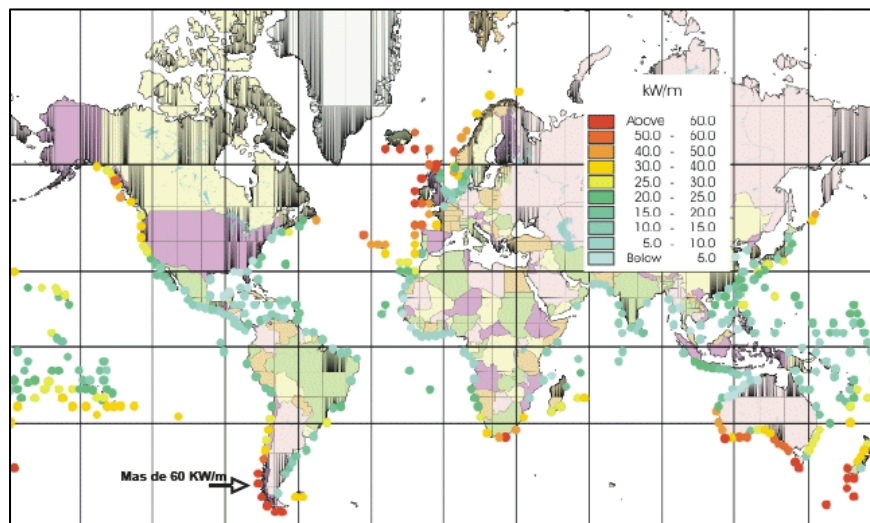


Figura 2.18 Energía de oleaje estimada a nivel global por Barstow (Cornett, 2008)

Marco Teórico

La aproximación utilizada para el cálculo de la potencia de ola transmitida por unidad de ancho, presentada como una variación de la ecuación 2.12, corresponde a:

$$P_o \approx \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad (2.23)$$

Definida para aguas profundas, ya que el modelo NWW3 define su grilla en sectores de aguas profundas, alejados a más de 1 km de la costa.

Cuando solamente se conoce el periodo *peak* (T_p), se utiliza la siguiente aproximación para obtener el periodo energético:

$$T_e = \alpha T_p \quad (2.24)$$

Donde el coeficiente α depende del tipo de espectro utilizado. En este caso $\alpha = 0.9$, ya que se utilizó el espectro JONSWAP.

Análisis y Resultados

A partir del modelo NWW3, entre Febrero de 1997 y Enero del 2006, se recopilieron los datos de: H_s , T_p , dirección principal (D_p) y los componentes de velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel del mar. Con estos datos se calculó: flujo de energía (P_o), velocidad del viento y densidad de potencia del viento. Luego se agruparon los datos, con el fin de describir las condiciones anuales, mensuales y estacionales.

Para validar los resultados obtenidos, estos se compararon con datos de un gran número de boyas canadienses, tanto en el Atlántico, como en el Pacífico norte, entregando esta una razonable correlación, concluyendo que la energía estimada derivada del modelo NWW3 es confiable.

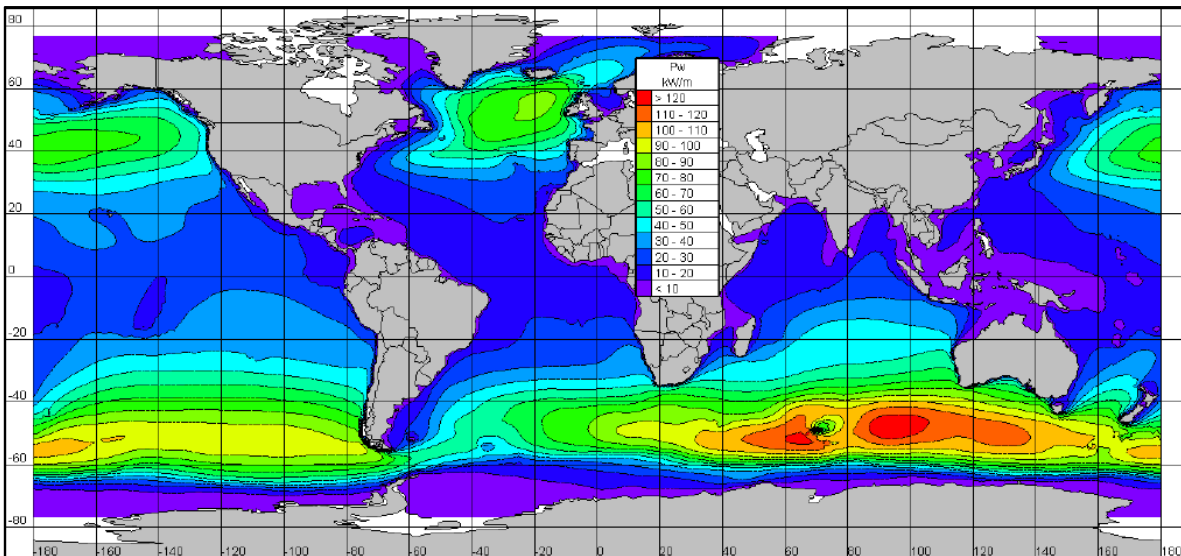


Figura 2.19 Distribución mundial del flujo de potencia medio anual (Cornett, 2008)

La distribución mundial de potencia media de oleaje se presenta en la figura 2.19. De esta distribución se puede concluir que la potencia media anual es mayor en zonas de mayor latitud del hemisferio sur (entre los 40°S y 60°S), particularmente en el sur del Océano Índico y cerca de las costas de Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Chile; el Atlántico Norte, el sur de Groenlandia e Islandia y el oeste del Reino Unido e Irlanda; y el Pacífico Norte, al sur de las Islas Aleutianas y cerca de la costa oeste de Canadá y Estados Unidos.

Con respecto a la variabilidad del recurso energético (figura 2.20), Cornett concluye que durante Enero, la mayor parte de la potencia de oleaje se concentra en el hemisferio norte, mientras que durante Julio es el hemisferio sur el que domina, correspondiéndose esto con la estacionalidad de cada hemisferio. Es claro que, a mayores latitudes, en ambos hemisferios, el recurso energético tiende a una variabilidad estacional más fuerte. En

cambio, en las regiones ecuatoriales el nivel de energía se mantiene más estable durante el año.

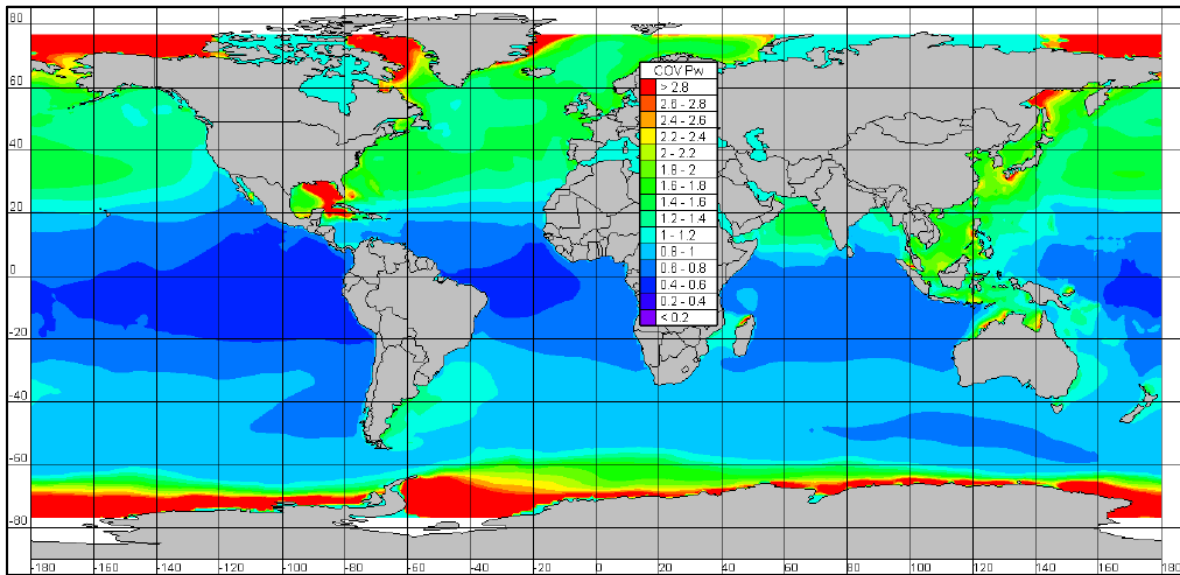


Figura 2.20 Distribución mundial de la variabilidad temporal de flujo de potencia, representada por la covarianza de P (Cornett, 2008)

Utilizando el coeficiente de variación, o covarianza, Cornett busca cuantificar de manera efectiva la variabilidad temporal del recurso. En base a este cuantificador concluye que, tal como era de esperar, la variabilidad es pequeña en la zona ecuatorial. Además, determina que la mayor variabilidad ocurre en las mayores latitudes en ambos hemisferios. Cerca de la costa sur de Chile, Sudáfrica, Tasmania y Nueva Zelanda, donde el recurso energético es alto, la covarianza es menor a 1, lo cual indica que el recurso es moderadamente inestable, detalle de gran importancia al momento de decidir desde donde es más conveniente extraer el recurso energético.

Con respecto a la variabilidad estacional, define el Índice de Variabilidad Estacional:

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_Y} \quad (2.25)$$

Donde P_{S1} corresponde a la potencia media para la estación más energética y P_{S4} es la potencia media para la estación menos energética.

En base a este índice, los resultados muestran que la variación invierno-verano, normalizada con respecto al promedio anual, es generalmente mayor en el hemisferio norte comparada con el hemisferio sur, lo cual se complementa con lo entregado por la covarianza. De igual manera, se presenta la opción de realizar el mismo análisis, pero en base a la variabilidad mensual, considerando el mes más energético y el mes con menos energía.

De esta manera Cornett presenta un análisis global, no solo definido a zonas costeras, y que incluye todo el proceso desde la zona de generación, para un periodo de 10 años, con el fin de entregar un repaso mundial a las propiedades energéticas del oleaje. Sin embargo, se deja bien en claro que el estudio pretende ser una guía para las potenciales ubicaciones y no para ser utilizada en desarrollos ingenieriles, ya que los valores pueden variar en las zonas costeras.

2.6.3. Recurso energético en base a oleaje en el área de Estaca de Bares (España) (Iglesias & Carballo, 2009)

G. Iglesias junto a R. Carballo, de la Universidad de Santiago de Compostela, presentan un estudio del recurso energético en el área de Estaca de Bares, tanto en aguas profundas, como en cercanías a la costa. El Cabo Estaca de Bares corresponde al punto que se encuentra más al norte de la península ibérica, por lo cual, debido a su ubicación, se encuentra expuesto a oleaje de múltiples direcciones.

El estudio se realizó en base a dos tipos de datos: registro de tres boyas en aguas profundas, en operación desde 1998; y registro de oleaje a partir del set de datos SIMAR-44. Este set se compone de valores de viento, nivel marino y clima de oleaje para el periodo comprendido entre 1958 y 2001, con una frecuencia de un dato cada tres horas. La grilla cubierta por estos datos presenta una resolución de 30' x 30', siendo más detallada en zonas cercanas a la costa con una resolución de 15' x 15'. Para el análisis realizado, se extrajo información de 6 puntos de esta grilla (figura 2.21), observando dos aspectos principales: en primer lugar, a mayor profundidad, mayor cantidad de energía; y además, la ubicación al oeste del Cabo Estaca de Bares es más energética que las otras al este. Esto se debe, principalmente, a que se encuentra completamente expuesta al Atlántico.

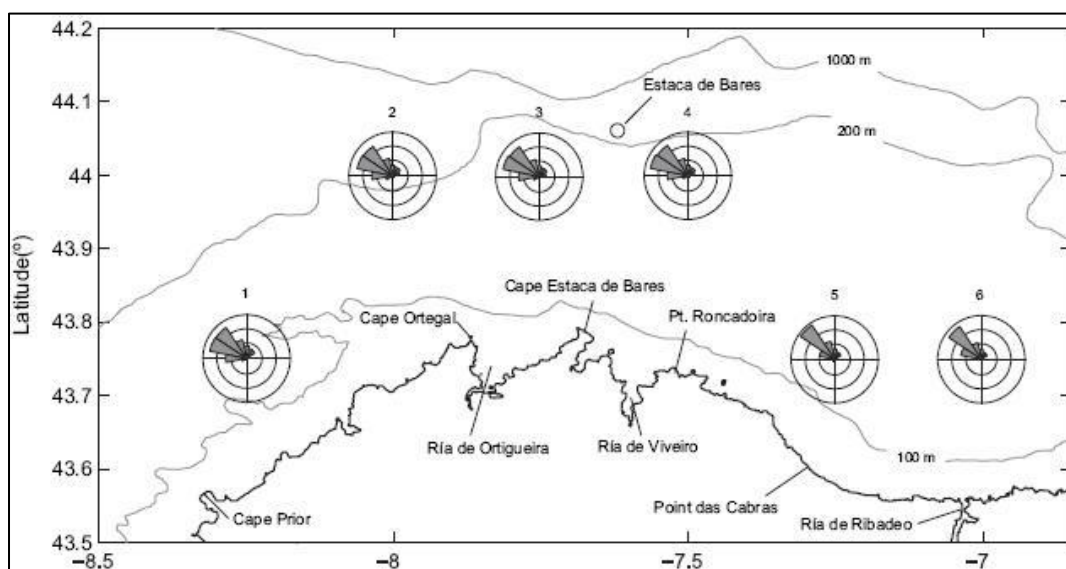


Figura 2.21 Mapa de Estaca de Bares, con las rosas de oleaje en la ubicación de los datos SIMAR-44 y la ubicación de la boya utilizada (Iglesias & Carballo, 2009)

Energía en Aguas Profundas

Los datos provenientes de la boya presente en Estaca de Bares se estudian a partir de rosas de oleaje estacional. Se determinó que el oleaje es mayor en otoño y, particularmente, en invierno. En general, a lo largo del año, la mayor parte de la energía proviene del IV cuadrante, a causa de la gran longitud del *fetch* atlántico y los vientos predominantes del oeste. Para visualizar de mejor manera el set de datos SIMAR-44, estos se presentan como diagramas combinados de energía y período (figura 2.22), indicando la ocurrencia de varios estados de mar, clasificados de acuerdo a su H_s y T_e , y su contribución a la energía anual. El número en cada celda representa la ocurrencia (en número de horas por año) de un determinado estado de mar. Las curvas en los diagramas representan isocurvas de potencia de oleaje, calculadas con la expresión presentada en la ecuación 2.23. Las celdas más pequeñas coloreadas, indican la contribución al total de la energía anual.

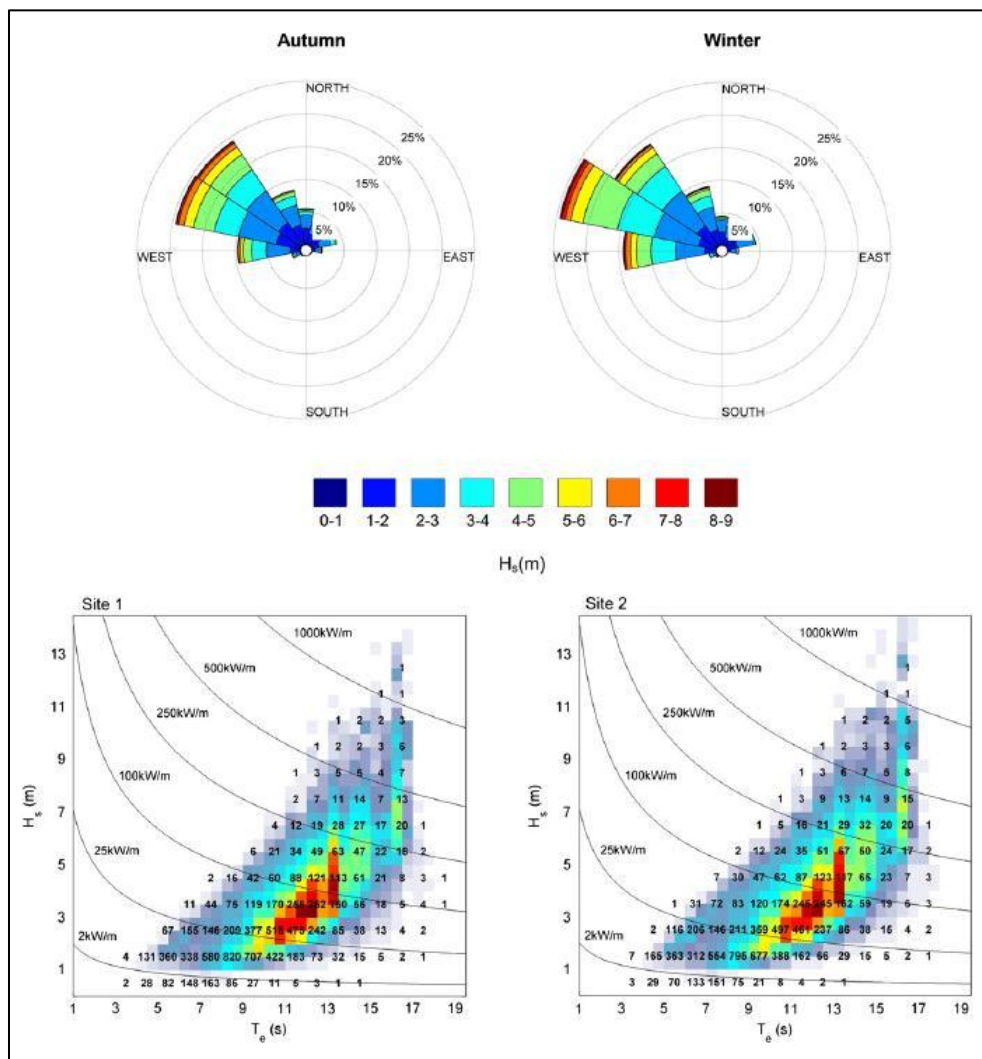


Figura 2.22 Ejemplo de rosas de oleaje estacionales para los datos de la boya y diagramas combinados de dispersión y energía para los datos SIMAR-44 (Iglesias & Carballo, 2009)

Observando estos diagramas se puede concluir que las mayores contribuciones no corresponden a los estados de mar con mayores alturas de ola, ni tampoco a estados con la mayor ocurrencia, los cuales se componen de olas y periodos bajos, entregando una baja potencia. De hecho, la mayor cantidad de energía (zona roja del diagrama) la entregan olas con H_s entre los 2 y 5 m, y T_e entre los 11 y 14 s.

Energía en Aguas Someras

Debido a que las condiciones en aguas cercanas a la costa difieren de las presentadas en aguas profundas, es necesario examinarlas de manera diferente. En este caso se examinó en base al modelo SWAN, obteniendo los datos propagados a lo largo de la costa en estudio. Se utilizó una malla de cálculo curvilínea, ya que este tipo de coordenadas se ajustan mejor a la geografía costera de la zona en estudio.

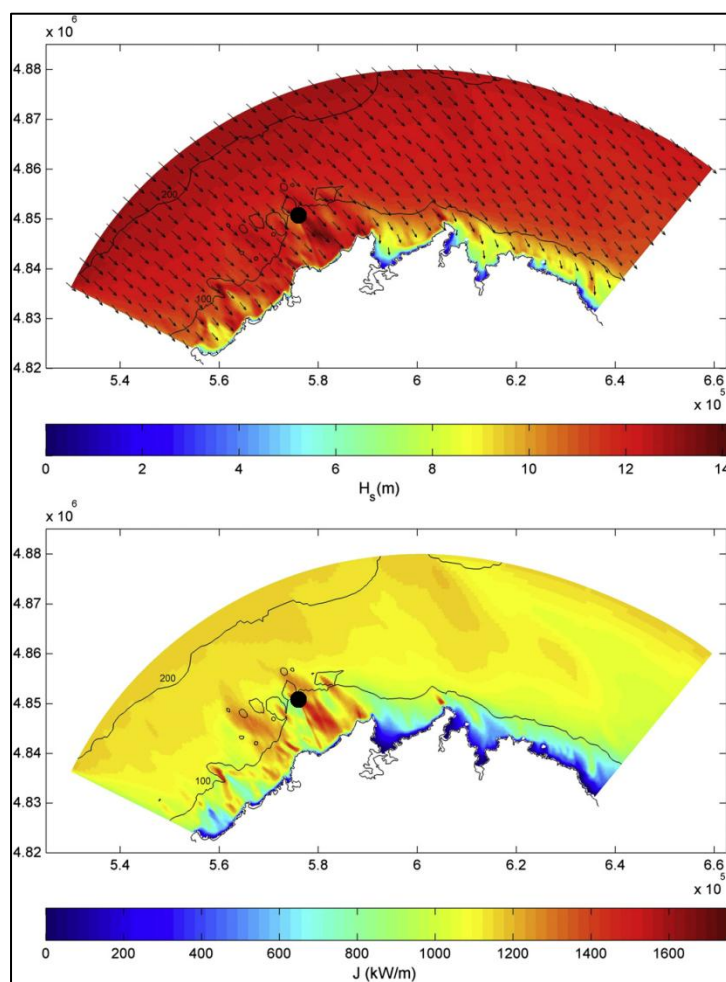


Figura 2.23 Altura significativa y Potencia en tormenta (Iglesias & Carballo, 2009)

Se examinó la zona cercana a la costa en cuatro casos, correspondientes a distintas condiciones presentes en aguas profundas medidas a partir de la boya: energía de oleaje promedio, campo de oleaje en crecimiento (antes de tormenta), energía de oleaje extrema (tormenta) y campo de oleaje en decaimiento (después de la tormenta). En la figura 2.23 se

presenta la altura significativa y la potencia en el caso de mayor energía. El punto negro indica la ubicación del máximo valor en cada uno de los casos.

A pesar de que la fricción de fondo disminuye la potencia de oleaje, la batimetría irregular causa que la energía se concentre en áreas cercanas a la costa. En los cuatro casos estudiados, los valores máximos, tanto de potencia como de altura significativa, ocurren en profundidades bajo los 50 m. Más aún, en cada uno de los estados de mar estudiados, la ubicación de la altura de ola significativa máxima se corresponde con el máximo valor de potencia.

Finalmente, se puede concluir que la parte este de la zona de Estaca de Bares, y en particular, el sector cercano a la costa este del Cabo Ortegale presenten un gran potencial para la explotación del recurso energético.

2.6.4. Potencial energético en base a oleaje a lo largo de la costa atlántica del sureste estadounidense (Defne, 2009)

Zafer Defne, del *Georgia Institute of Technology*, presenta un estudio que investiga la cantidad de energía disponible a lo largo de la costa Atlántica del sureste Estadounidense.

Area de interés y disponibilidad de datos

El área de interés corresponde a la región limitada por los 28°N – 37°N de latitud y los 82°W – 72°W de longitud, en la costa del norte de Florida, Georgia y Carolina del Norte y del Sur. La base de datos utilizada corresponde al Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC), perteneciente al NOAA. Estos datos comprenden un periodo de los últimos 30 años, incluyendo los datos solo hasta el 2005. El formato de los datos recopilados es de dos tipos: datos meteorológicos estándar y datos espectrales de oleaje. Los datos estándar corresponden a alturas significativas de ola (H_s) y periodo medio (T_m), y presentan una cobertura mayor en comparación a los datos espectrales.

Metodología

Ya que los datos en formato estándar están disponibles en más estaciones y por un periodo mayor de tiempo, se utilizan ellos para el cálculo de la potencia de oleaje. La potencia por unidad de cresta se representa a partir de la ecuación 2.12.

Para esta ecuación, C_g es calculada de forma general, y no con las simplificaciones conocidas para aguas profundas, con el fin de determinar de forma más exacta la disponibilidad de potencia en el sector.

Para calcular la potencia espectral, en ausencia de datos espectrales, se asume que esta puede ser estimada a partir de una ola representativa, a través de la siguiente ecuación:

$$P_{spectral} \approx \alpha \cdot P(H_s, T_m) \quad (2.26)$$

Donde α es un coeficiente que depende del tipo de espectro de frecuencias utilizado. Para determinar este valor, Defne realizó un análisis de regresión con los valores de potencia, tanto estándar como espectral (calculados en base al espectro), con lo cual obtuvo un coeficiente $\alpha = 0.61$.

Con el fin de analizar las variaciones de cortos periodo de tiempo, se aplicó un filtro de media móvil. Su principal objetivo es remover los eventos extremos de la serie de datos. Este filtro también se puede aplicar para el estudio de variación en periodos más grandes de tiempo (variación estacional), utilizando una ventana, o paso, mayor de tiempo. La figura 2.24 muestra dos tipos de filtro para la misma serie de datos: el primero más grueso y suavizado, ideal para análisis de variación estacional; y, el segundo más detallado, para análisis de corto plazo.

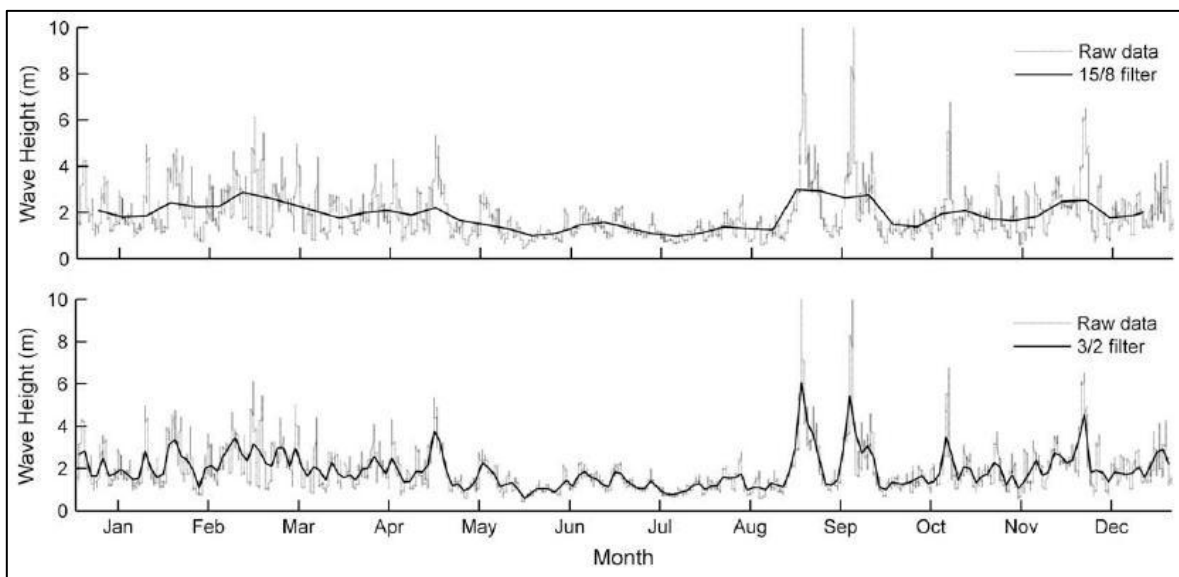


Figura 2.24 Diferentes filtros aplicados a serie de altura de olas (Defne, 2009)

Los datos también son promediados a lo largo de los años, para así obtener las propiedades de variación del recurso en un año. La potencia media en una estación se obtiene del promedio de los promedios de la potencia obtenida en base a los valores de H_s y T_m filtrados. De manera similar se obtiene el máximo, ya que, sin la aplicación del filtro, la potencia máxima entregaría, simplemente, el máximo valor observado para un único evento aislado, y no el valor real de potencia disponible para extracción.

Resultados

Se obtuvieron las H_s para dos ubicaciones, una en aguas profundas (a 250 km de la costa y 3 786 m de profundidad) y otra en aguas someras (a 50 km de la costa y 14 m de profundidad). En ambos casos se puede ver claramente una marcada dependencia estacional, siendo estas, mayores en otoño e invierno. La figura 2.25 muestra los resultados de variación temporal obtenidos para la ubicación presente en aguas profundas. El eje de

las abscisas, de izquierda a derecha, indica el avance temporal durante un año, de Enero a Diciembre. El eje de las ordenadas muestra el avance temporal, en años, desde 1980 al 2004. Como se puede apreciar, históricamente, las alturas de ola más importantes se concentran en los meses de invierno, correspondiendo a las zonas más oscuras en el diagrama.

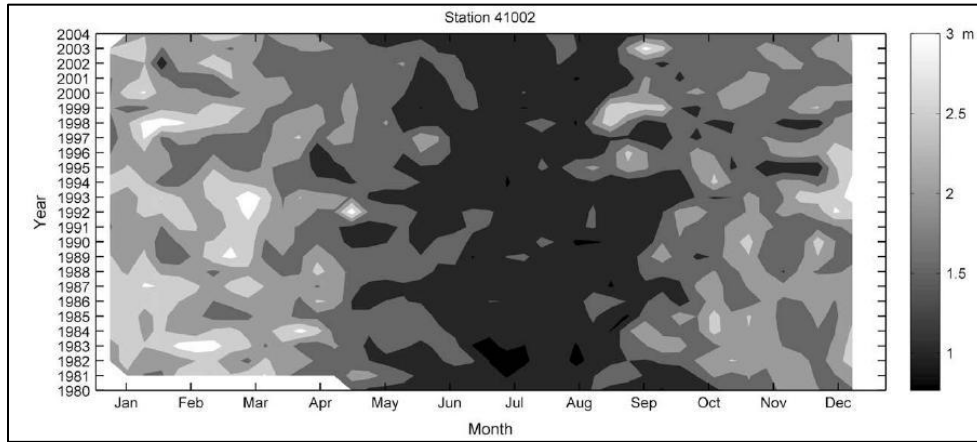


Figura 2.25 Distribución de Hs filtradas durante 25 años (Defne, 2009)

En cuanto a los valores de potencia obtenidos, y ya que el periodo promedio aumenta en conjunto con los valores de altura de ola, estos se muestran compartiendo la tendencia, y por lo tanto, variando de manera similar. La comparación entre las ubicaciones antes mencionadas, determina que el rango de alturas significativas es menor en la zona de aguas someras, por lo cual el rango de potencia disponible también disminuye. La figura 2.26 muestra la distribución espacial de potencia en base a oleaje, así como un mapa de isocías de potencia. El diámetro de los círculos representa la cantidad de potencia calculada en cada estación. El diámetro externo corresponde al valor máximo, mientras que el interno corresponde al promedio. A simple vista se puede determinar que las olas costa afuera tienen mayor potencial energético que las cercanas a la costa.

Con respecto al mapa de isocías, se pudo determinar que estas se asemejan a la batimetría de fondo, principalmente debido a la pérdida de energía por disipación, rompimiento y fricción de fondo. Además, en las zonas cercanas a la costa, la configuración geográfica provee resguardo a los principales vientos del noreste, los cuales corresponden a los generadores del oleaje que afecta este sector, por lo cual, la potencia del oleaje cercano a la costa tiende a ser muy baja, tal cual lo demuestran las isocías de potencia en la figura 2.26.

Finalmente, concluye que, a pesar de que el recurso se ve mucho menor en comparación con las formas convencionales de obtención de energía, si se generan granjas de extracción (WEF) se puede llegar a producir 3.04 MW en una sola ubicación.

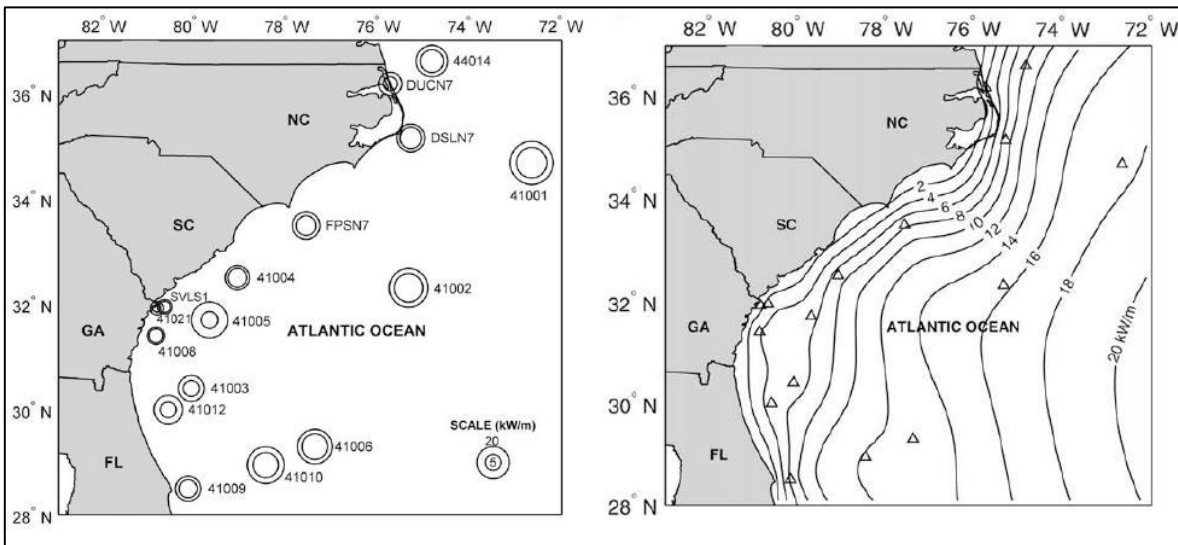


Figura 2.26 Potencia estimada a lo largo de la costa atlántica del sureste estadounidense, para cada boya, así como las isolneas respectivas (Defne, 2009)

2.6.5. Estudio a escala nacional del recurso energético de oleaje en Australia (Hughes & Heap, 2009)

Michael Hughes, del Servicio Hidrográfico Australiano, presenta un estudio a nivel nacional del potencial energético para Australia, con el fin de identificar los principales sitios para un estudio más detallado.

Australia se extiende sobre los 42° de longitud y 35° de latitud, por lo cual se ve influenciado por variados sistemas climáticos, siendo la zona sur, por ejemplo, afectada por los vientos más fuertes desde la zona oeste, generando olas de las más energéticas a nivel mundial. Por esto, los estudios previos realizados en Australia se han enfocado en los lugares más energéticos de la zona sur del continente. Sin embargo, esta información no define el panorama energético a nivel nacional.

Por lo tanto, para lograr una caracterización completa del recurso es necesario: una cobertura nacional; un periodo de estudio suficientemente largo para considerar los ciclos climáticos más importantes; y, un set de datos consistentes. En el caso del presente estudio, los datos utilizados corresponden a predicciones de un modelo de tercera generación llamado AusWAM, que presenta un mallado de alta resolución (0,1° x 0,1°), el cual cubre la zona comprendida entre los 110-156° de longitud y los 7-46° de latitud. Los datos entregados por este modelo corresponden a los parámetros de resumen, con una variación temporal de 6 horas durante 11 años (1997-2008).

Este modelo no incluye el rompimiento inducido por profundidad, razón por la cual se considera no válido para profundidades menores a 25 m. Por otra parte, el estudio está restringido a la energía presente en la plataforma continental australiana, definida para profundidades menores a 300 m.

La metodología utilizada para el cálculo de la densidad de energía E y la potencia P corresponde a formulas derivadas de la teoría lineal del oleaje. De esta forma, las ecuaciones utilizadas corresponden a la 2.12 y 2.13.

Resultados

En primer lugar, se calculó la energía total presente en la plataforma continental australiana, la cual en promedio corresponde a 3 468 TJ, tal como se muestra en la tabla presente en la figura 2.27. Además, se obtuvieron los valores para la energía presente en las costas de cada estado. Esta cantidad refleja no solo la densidad energética, sino que también el área de plataforma continental que le corresponde a cada estado.

Luego se calculó la potencia en toda la plataforma (figura 2.27). En este caso, y en base a los resultados obtenidos, la plataforma puede ser dividida en una región norte, la cual comprende la costa de Queensland, el Territorio Norte (Northern Territory) y la costa norte del Oeste Australiano (Western Australia), y una región sur, constituida por la costa de Tasmania, Victoria, New South Wales, el Sur de Australia (South Australia) y la costa sur del Oeste Australiano. La potencia es mucho mayor en la zona sur, con niveles cercanos a los 25-35 kW/m, en cambio, al sur la potencia típica es menor a 10 kW/m, siendo inadecuada para la extracción de energía con la tecnología actual.

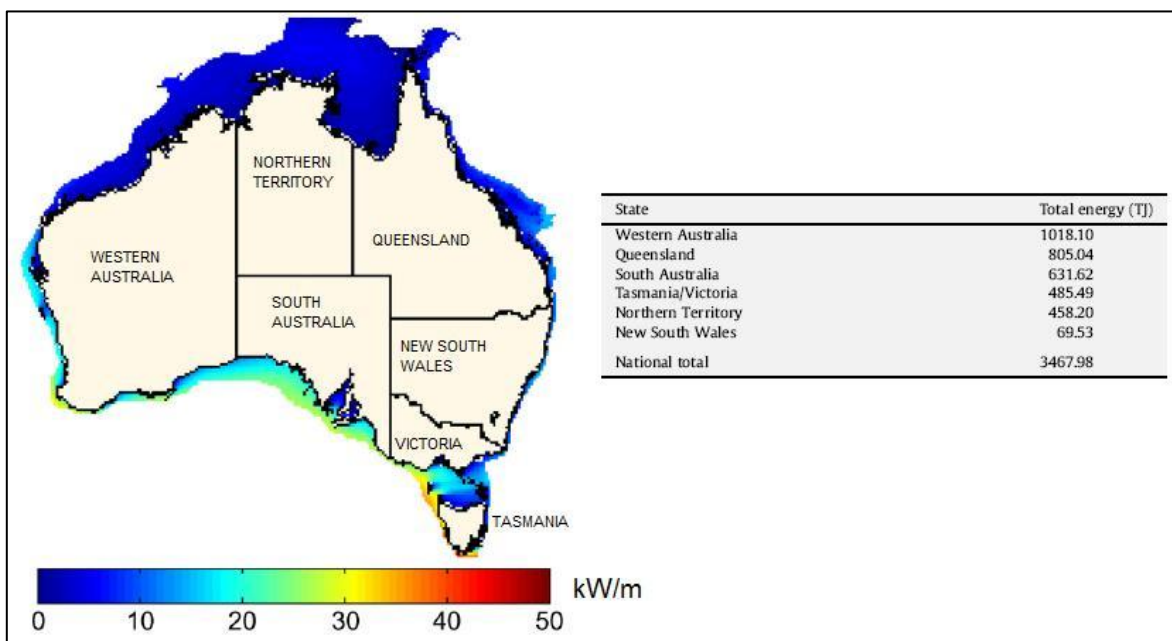


Figura 2.27 Mapa de la potencia media estimada para la plataforma continental australiana y tabla con la energía total por estado (Hughes & Heap, 2009)

La energía entregada en un año se calculó integrando con respecto al tiempo la serie completa de potencia en cada punto de la grilla y dividiéndola por la cantidad total de años. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que mientras más lejos de la costa se encuentra un punto, mayor es la cantidad de recurso energético disponible en esa ubicación,

reflejando el hecho de que las olas pierden energía y potencia a medida que se acercan a la costa.

A partir de los datos obtenidos hasta el momento, se puede concluir que los estados con mayor cantidad de recurso son Tasmania/Victoria, Western Australia y South Australia, lo cual es suficiente para dirigir los estudios directamente sobre estas zonas. Sin embargo, aun se puede rescatar mayor información del análisis a nivel nacional. En la figura 2.28 se presenta la variabilidad estacional del recurso, así como el tiempo promedio de duración de fallas, en un primer caso (a) graficado como los días entre fallas, es decir, en que las alturas de ola no sobrepasan un límite inferior (en este caso 1 m), y en un segundo caso (b), asociado a la cantidad de días en que fallan. Estos últimos dos presentados en escala logarítmica.

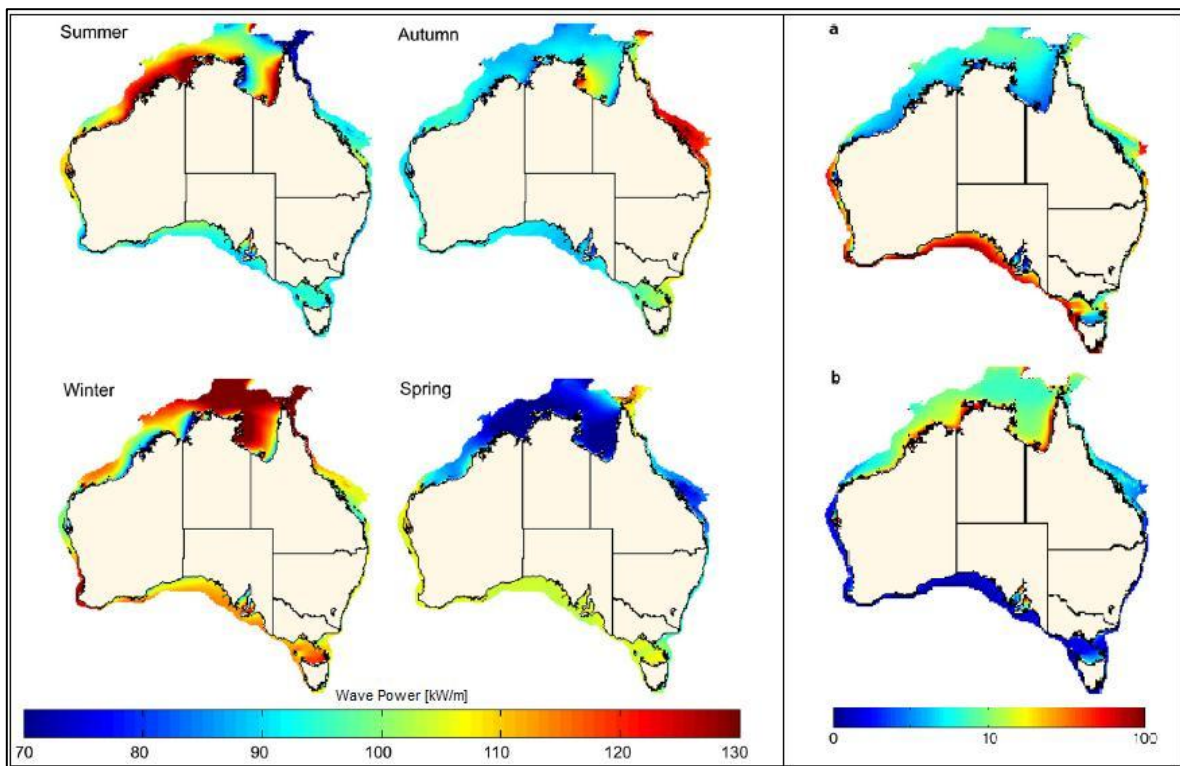


Figura 2.28 Mapa de índices estacionales de potencia e índices de falla (Hughes & Heap, 2009)

No es un objetivo de este estudio obtener una evaluación detallada del recurso, sino que la información obtenida sea usada para dirigir los estudios más detallados en sectores costeros. De esta manera, se puede caracterizar un sitio a través de los datos de resumen, identificando exactamente el lugar en donde es necesario realizar una evaluación más profunda. En este estudio, se realizó un resumen para el sitio más energético, a una profundidad menor a 50 m, en cada estado o territorio de Australia. El resumen contiene: datos medios generales, como H_s , T_m , E y P ; índices estacionales, asociados a la potencia media por estación; análisis de falla, correspondiente a los datos presentados en la figura

2.28; y, parámetros de modelación, correspondientes a los parámetros de distribución que mejor se acomodan a la H_s como al tiempo entre fallos.

De manera consistente con los estudios previos, esta evaluación a nivel nacional determinó que la mitad sur de Australia es la más energética. Sus niveles llegan a ser 5 veces mayores que en la mitad norte. Y, en comparación con los niveles energéticos mostrados a nivel mundial, la mitad sur de Australia presenta valores elevados, con una potencia promedio sobre los 25 kW/m, comparables con los valores de la península Ibérica por ejemplo, que tiene valores medios de potencia entre 15-50 kW/m. Además, los altos niveles de energía y potencia presentes no son lo único que hay que tener en consideración, ya que hay diversos dispositivos que trabajan para niveles moderados de energía (menores a 30 kW/m). De esta manera se incluyen aún más ubicaciones de la plataforma continental australiana.

Este informe pretende guiar en la industria, en una primera instancia, la política de desarrollo y la selección del sitio adecuado para la explotación del recurso energético, entregando la información como una tabla resumen para cada punto en la grilla de cálculo.

2.6.6. Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile (Acuña, 2008)

Hugo Acuña, Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María, presenta una investigación que busca cuantificar y analizar la potencia del oleaje en varias ubicaciones a lo largo de la costa chilena. Además, estima la potencia generada por algunos dispositivos que convierten la energía mecánica del oleaje en energía eléctrica.

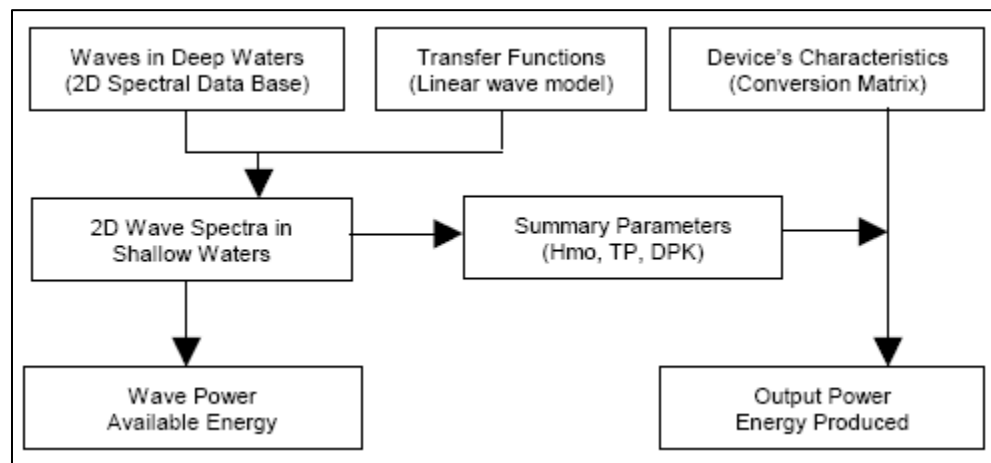


Figura 2.29 Metodología aplicada para el cálculo de la potencia disponible y la potencia generada por dispositivos mecánicos (Acuña, 2008)

Potencia del oleaje estimada

La metodología aplicada para estimar la potencia disponible y la potencia de salida en base a distintos dispositivos se presenta esquemáticamente en la figura 2.29. Se seleccionaron 10 sitios a lo largo de la costa chilena, en base a criterios a favor del desarrollo de eventuales

proyectos, así como la proximidad a la red eléctrica, cercanía a puertos, entre otros. En cada sitio se seleccionaron tres nodos, correspondientes a 10, 25 y 50 m de profundidad.

La base de datos utilizada corresponde a un conjunto de datos de espectros de oleaje direccionales en aguas profundas, conocido como Olas Chile II (Atria Baird Consultores S.A., 2001), con datos cada 3 horas, entre 1985 y 2004.

El clima de oleaje en los nodos seleccionados se obtuvo a partir de una transferencia bidimensional desde aguas profundas utilizando el modelo numérico STWAVE, desde el cual es posible obtener un espectro resultante en aguas someras, e integrándolo es posible la obtención de los datos de resumen de interés (H_s , T_s y DPK).

La potencia del oleaje se calculó a partir del espectro de aguas someras según la siguiente expresión:

$$P = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot C_g(f, h) df d\theta \quad (2.27)$$

Donde ρ es la densidad del agua, S es el espectro de energía en función de la frecuencia y dirección, y C_g es la celeridad de grupo en función de la frecuencia y profundidad.

Para resumir el clima de oleaje en cada sitio, se obtuvieron datos estadísticos para la condición del mar por mes, año, estación y por la totalidad del periodo estudiado. En cuanto a la potencia de oleaje, se calculó para representar la cantidad disponible en cada nodo, obteniendo datos totales, anuales, mensuales y horarios. En general, la potencia presenta una distribución parabólica a lo largo de la costa, variando de 25 kW/m al norte, hasta 110 kW/m en la zona sur, tal como lo muestra la figura 2.30.

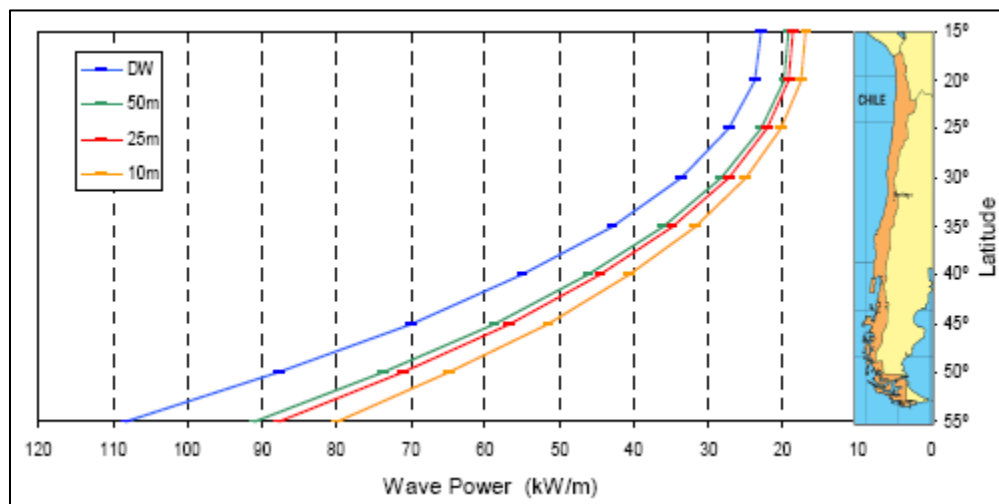


Figura 2.30 Distribución de la potencia del oleaje a lo largo de la costa chilena como función de la profundidad (Acuña, 2008)

La variabilidad del recurso se obtuvo a partir de las distribuciones realizadas. La variabilidad anual se encuentra relacionada a los ciclos atmosféricos, la estacional a los

cambios atmosféricos estacionales, y la diaria a las fluctuaciones debido al día y la noche. De estas tres, la más significativa es la variabilidad anual, entre un 50% y 70%. La variabilidad diaria es menor a un 5%. La variación estacional depende de la latitud, concentrando los mínimos valores en el centro del país. Esto se debe al comportamiento bimodal del oleaje, debido al aporte de *swell* desde el océano antártico y desde el hemisferio norte (principalmente en verano). La variabilidad afecta la producción de energía, por lo cual bajos niveles de esta son preferibles.

Las curvas de excedencia indican el porcentaje de tiempo durante el cual un cierto valor de potencia es excedido. El nivel de potencia excedido un 90% del tiempo, o P90%, es relevante en términos del nivel óptimo de conversión de energía, ya que representa el nivel óptimo de inicio de conversión (*start-up*) en el sitio. En este estudio, el P90% de los sitios seleccionados nunca baja de 10 kW/m, excediendo el mínimo valor de inicio de generación entregado por los dispositivos.

El factor de capacidad corresponde a la relación entre la producción anual de energía y la máxima producción teórica, si el generador opera el 100% del tiempo a su potencia nominal (asociada al nivel de potencia excedido un 10% del tiempo o P10%). En la costa chilena, en aguas profundas, el factor de capacidad varía entre un 50% y 60%.

Potencia de salida estimada

Para este estudio, el análisis se centró en dispositivos que operan mar adentro, ya que, en comparación con la zona costera, existe una mayor disponibilidad de energía.

La potencia de salida se obtuvo a partir de las matrices de conversión de energía de los dispositivos, las cuales relacionan altura significativa de ola (H_s) y periodo energético (T_e) para entregar una potencia de salida bajo distintas condiciones de operación. Además, se considero el efecto de la dirección del oleaje en la reducción del nivel de energía, a través de la obtención del factor de reducción por dispersión direccional. En el caso de la costa chilena, el factor decrece de norte a sur, principalmente debido a que las direcciones del oleaje son más variadas cuando se encuentra cerca de las zonas de generación.

Al analizar la potencia de salida obtenida para todo el periodo en estudio, se aprecia que esta aumenta de norte a sur. Analizando la distribución estacional, se aprecia que en la zona central de Chile la proporción de energía producida en verano e invierno, en relación a la energía total producida, es casi la misma, confirmando la baja variabilidad estacional.

Conclusiones

La zona sur es, lejos, la zona más adecuada para la instalación de una planta generadora de energía eléctrica. Sin embargo, las condiciones climáticas severas implican un incremento en los costos de instalación, mantenimiento y reparación en comparación con otros sitios más al norte. Otro aspecto que pesa en contra de los sitios en la zona sur, son las condiciones de

aislamiento. Sin embargo, esta no sería una desventaja si se piensa en generación para pequeñas comunidades.

La potencia generada por varios dispositivos en un mismo sitio varía considerablemente. Esto debido a que algunos se encuentran mejor adaptados para el clima de oleaje chileno. De esta manera, para lograr una operación óptima, es necesaria la modificación de algunos diseños para que estos rindan adecuadamente al periodo de oleaje reinante en Chile.

2.6.7. Selección preliminar de sitios - recurso energético marino chileno (GARRAD HASSAN, 2009)

El Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID) encargó a Garrad Hassan y asociados Ltda. (GH) conducir una selección preliminar de sitios para identificar ubicaciones adecuadas para la demostración y utilidad de proyectos a escala utilizando convertidores de energía marítima, tanto del oleaje como en base a corrientes.

Las razones para realizar este estudio corresponden, en primer lugar, al desarrollo de una estrategia energética marítima para Chile. Además, el recurso en Chile es particularmente atractivo y puede contribuir de manera significativa a la matriz energética nacional.

Metodología

Para determinar los sitios, se implementó la metodología presentada por Nobre et al. (2009), la cual se resumió con anterioridad en este capítulo. El área inicial de estudio es amplia, por lo cual definir cada capa en donde se puede desarrollar el proyecto, de acuerdo a cada factor asociado, es particularmente relevante.

Aplicando la metodología a Chile, los factores fundamentales corresponden a: batimetría, limitado a un área entre los 50 m y los 200 m de profundidad; áreas de conservación, excluidas de la zona final de estudio; áreas asociadas al SIC y SING, excluyendo la XI y XII región, las cuales representan menos del 1% de la capacidad instalada (Sistema Eléctrico de Magallanes y Aysén); y, zonas protegidas, excluyendo de esta manera la costa desmembrada de la X región (notar que anteriormente ya se excluyeron la XI y XII región).

Tras definir la zona de estudio, se identificaron 4 parámetros principales para la clasificación del área en estudio. Además, para cada uno de estos se creó una categoría, reclasificando la zona en estudio de 0 a 100, así como otorgándole un peso porcentual, definido por GH, a cada una:

- Distancia a la red nacional de electricidad (100 = menor distancia) 25%
- Distancia a puertos (100 = menor distancia) 25%
- Recurso energético (100 = mayor recurso) 40%
- Geología del fondo marino (100 = capa de sedimentos más profunda) 10%

Además se incluyen en el estudio otras capas de información, para ser utilizadas en conjunto con los resultados obtenidos, con el fin de lograr un adecuado criterio al momento de decidir las mejores ubicaciones. Se incluyó: áreas de manejo bentónico, sitios de especial interés científico, áreas costeras protegidas, humedales, sitios arqueológicos, zonas de suelos contaminados y áreas de interés económico. Otras capas adecuadas fueron identificadas, pero no pudieron ser incluidas por el acceso limitado a la información: concesiones marítimas, áreas de ejercicios militares, principales rutas marítimas y rutas de entrada a los puertos.

Tabla 2-2 Fuentes de datos para la selección de zonas (GARRAD HASSAN, 2009)

Data Set	Source
Bathymetry	GEBCO database
Special area of conservation (AMCPs)	CONAMA
National electricity grid layout	CNE
Ports	Ministry of Public Works
Wave energy resource (kW/m)	NOAA's WaveWatchIII model and measured wave data (supplied by SHOA)
Seabed geology (sediment chart)	NGDC
Fishing concessions (Areas de Manejo Bentónico)	SUBPESCAS
Sites of special scientific interest	CNE GIS database
Onshore protected areas	
Wetlands	
Archaeological sites	
Zones of contaminated ground	
Other areas of economical interest (e.g. tourism, denomination of origin)	

La Tabla 2-2 presenta la fuente de los datos implementados en los factores y capas de información utilizados en la selección de los sitios preliminares para proyectos de energía del oleaje.

Resultados

A partir de la metodología presentada anteriormente se presenta un estimativo preliminar para el campo energético (en GWh/año) para superficies de 5 km por 5 km dentro de las zonas en estudio. Estas superficies son lo suficientemente grandes para desarrollar proyectos de demostración, pre-comerciales y comerciales.

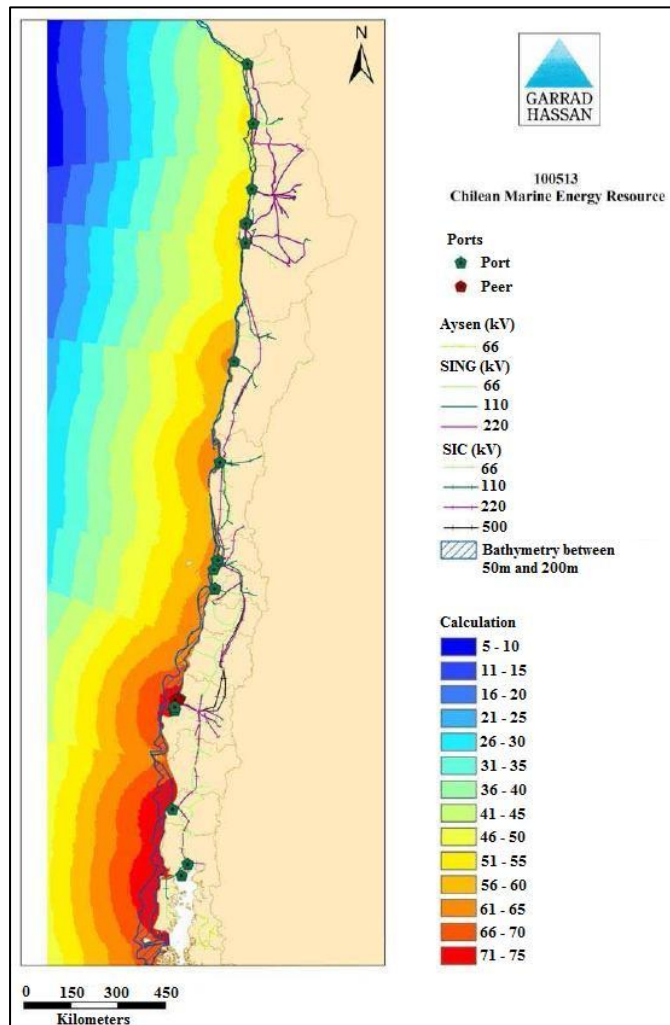


Figura 2.31 Clasificación general (GARRAD HASSAN, 2009)

La figura 2.31 presenta el ranking completo, para todas las zonas incluidas en el estudio así como algunos de los parámetros que influyeron en la clasificación. Se incluye además la zona de aplicación del estudio, entre los 50 y 200 m de profundidad. En general, los sitios en la zona sur son favorecidos en el estudio, ya que la zona de aplicación en el norte del país es muy pequeña y cercana a la costa. Es por esto, que se presentan además mapas detallados para las regiones V, VII, IX y X. En estos mapas se puede apreciar que las zonas más interesantes se encuentran en: cercanías del Puerto Ventanas y del Puerto de San Antonio (V región); entre el Puerto de San Vicente y el Terminal Escuadrón, y al norte del Puerto de San Coronel (VII región); y, costas afueras del Puerto de Corral y en las cercanías a Puerto Montt (X región).

Finalmente, la Tabla 2-3 entrega las ubicaciones prioritarias que han sido identificadas para el desarrollo de proyectos, en base a la metodología y los criterios adoptados.

Tabla 2-3 Ubicaciones prioritarias para el desarrollo de proyectos de energía del oleaje y campo de energía anual estimado para una granja de 30MW en base al dispositivo Pelamis (GARRAD HASSAN, 2009)

Region	O&M base	Average distance to nearest substation – cable routing (km)	Closest Electrical Grid - SIC	Average Local Wave Climate (kW/m)	Estimate of the energy yield for a 30 MW wave farm (GWh/annum)
V	Puerto Ventanas	6	220kV	37	54.55
V	Puerto San Antonio	16	66kV 110kV	37	54.55
VIII	Puerto San Vicente	13	66kV 220kV	44	64.75
VIII	Puerto de Coronel	10	66kV 220kV	44	64.75
X	Puerto de Corral	17	66kV 220kV	51	75.05
X	Puerto Montt	27	66kV 110kV 220kV	58	85.35

2.6.8. Resumen y Comparación

Los estudios presentados anteriormente resumen el estado del arte en cuanto a investigación del recurso energético en base al oleaje, a nivel global. El análisis de cada uno de estos estudios responde tanto a su vigencia, como a la semejanza, o diferencia, con la investigación que se presenta.

El trabajo de Nobre et al. (2008) fue seleccionado debido al análisis multi-criterio que implementa, el cual será utilizado en la jerarquización de las ubicaciones con mayor potencial energético a lo largo de la costa chilena. La investigación realizada por Cornett (2008) fue estudiada debido a su análisis a nivel global del recurso energético en base al oleaje, utilizando datos modelados por el NOAA, utilizando WAVEWATCH III. El trabajo de Iglesias y Carballo (2009) en la costa de España, se seleccionó debido a su semejanza con el estudio a realizar, tanto en la validación de datos modelados a partir de información real (boyas), hasta la utilización de SWAN como programa de modelación costera. Además, presentan la información a partir de diagramas combinados de dispersión de frecuencias y alturas, con energía para cada estado de mar, los cuales serán utilizados en este trabajo.

Las investigaciones propuestas por Defne (2009) y Hughes y Heap (2009) fueron consideradas ya que, en el primer caso, considera el estudio del recurso en EE.UU. solamente a partir de datos reales extraídos desde boyas, en cambio, en el segundo estudio, considera el análisis del recurso para Australia, solamente a partir de datos modelados por un programa de tercera generación.

En cuanto a los estudios realizados por Acuña (2008) y GARRAD HASSAN (2009), estos fueron seleccionados debido a que concuerdan con la zona a investigar presentada en este trabajo, por lo cual se utilizan como punto de comparación. El estudio de GARRAD HASSAN fue seleccionado ya que utiliza el análisis presentado por Nobre et al. en Chile. En cuanto a la investigación de Acuña, su análisis abarca la totalidad del país, sin embargo, las mayores diferencias se encuentran en el modelo de tercera generación utilizado para la propagación costera del oleaje, y el modo de selección de las zonas de estudio. En cuanto al modelo, el trabajo presentado por Acuña utiliza STWAVE (Smith et al., 2001), mientras que el presente informe utiliza SWAN (Booij et al., 1999). La selección de las zonas de estudio realizada por Acuña se basa, en primer lugar, en una selección arbitraria del sector a estudiar, para luego, en una escala local (a nivel de ciudad o provincia), modelar los datos de oleaje y determinar el sector más energético. En cambio, la selección de la zona de estudio para esta investigación, se realiza, en primer lugar, a partir de un modelado global (a nivel país), para luego seleccionar las ubicaciones más energéticas.

De esta manera se logra fundamentar el presente estudio en base a investigaciones a nivel global. La figura 2.34 presenta el desarrollo de distintos estudios a nivel local, en distintas partes del mundo, dentro de los que se encuentran los antes mencionados. Además, presenta una clasificación dependiendo del tipo de datos utilizados para la realización de cada estudio: in situ (boyas), modelados (modelos de tercera generación) y el uso de ambos.

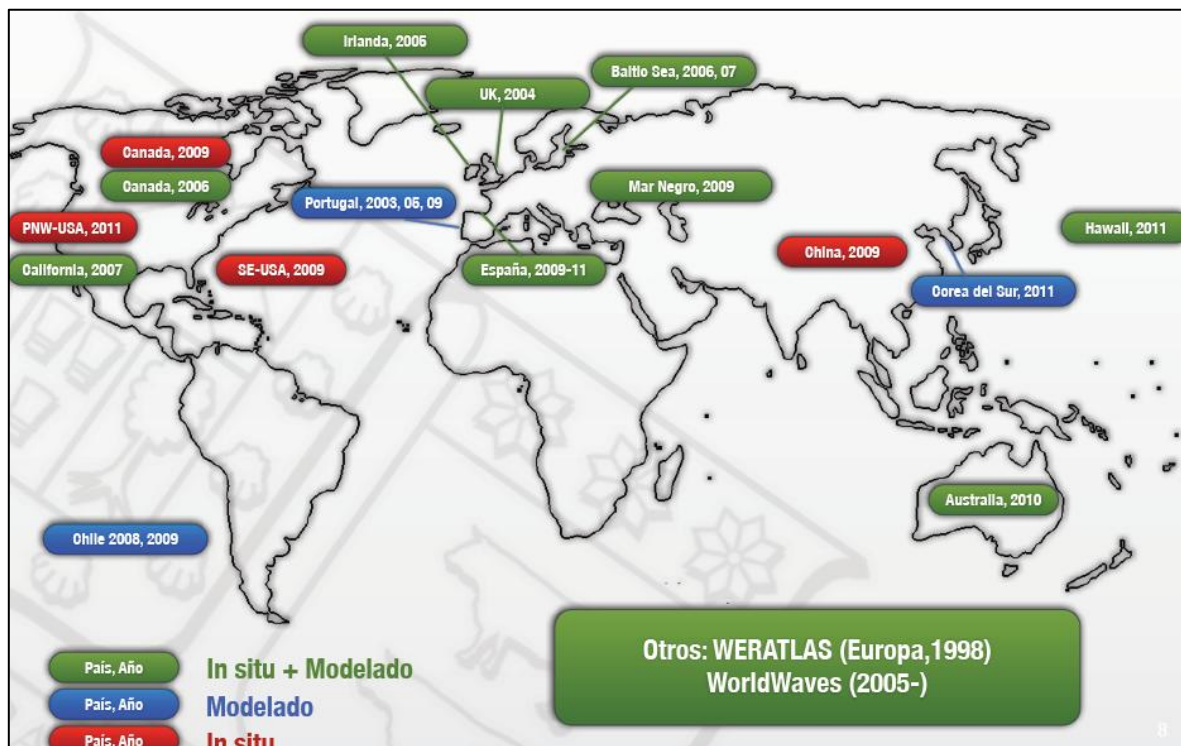


Figura 2.32 Desarrollos recientes a nivel local (Catalán et al., 2011)

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

A continuación se describe la metodología empleada en el presente estudio, aplicable a las costas chilenas, teniendo en cuenta las características y variabilidad de las mismas. Se explica la obtención de los datos utilizados, la validación y propagación de ellos hacia la costa, la obtención de los valores de energía y potencia, y la metodología empleada en la selección de los *hot spots*.

3.1. Área de interés y base de datos disponible

El área de interés del presente estudio corresponde a la costa chilena ubicada entre los 33°S y 39°S de latitud, correspondientes a la zona entre la Región de Valparaíso y la Región de la Araucanía.

En las simulaciones numéricas a realizar, se requiere como parámetro de entrada esencial la batimetría y los antecedentes de oleaje que serán propagados. En cuanto a la batimetría, se utiliza un dominio batimétrico provisto por la información recopilada en el marco del proyecto *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), el cual corresponde a un proyecto internacional que aglomera un gran número de fuentes batimétricas, e interpola en las zonas donde la información no existe. Para efectos del presente estudio, se utiliza la batimetría con una resolución espacial de 30 s de arco, lo que equivale a, aproximadamente, 900 [m]. El dominio utilizado se encuentra definido entre las longitudes 71.4W y 76W, y las latitudes 30S y 42S, tal como se aprecia en la figura 3.1. Cabe destacar que, si bien, existe información con mayor resolución espacial disponible, por ejemplo a partir de las Cartas de Navegación del SHOA, éstas están referidas a los puertos principales y a algunos secundarios, por lo cual no se tiene una cobertura uniforme a lo largo de la costa. Por esta razón, se decidió no utilizarlas en este estudio, de forma tal de evitar sesgar los resultados usando antecedentes de distinta calidad.

El clima de oleaje en aguas profundas utilizado en el análisis, se caracterizó en base a las modelaciones efectuadas por el NOAA, utilizando un modelo WAVEWATCH III para la cuenca del Océano Pacífico, denominado NWW3. El modelo incorpora los mecanismos de generación, propagación y disipación del oleaje, siendo calibrado de forma periódica a partir de altimetría satelital.

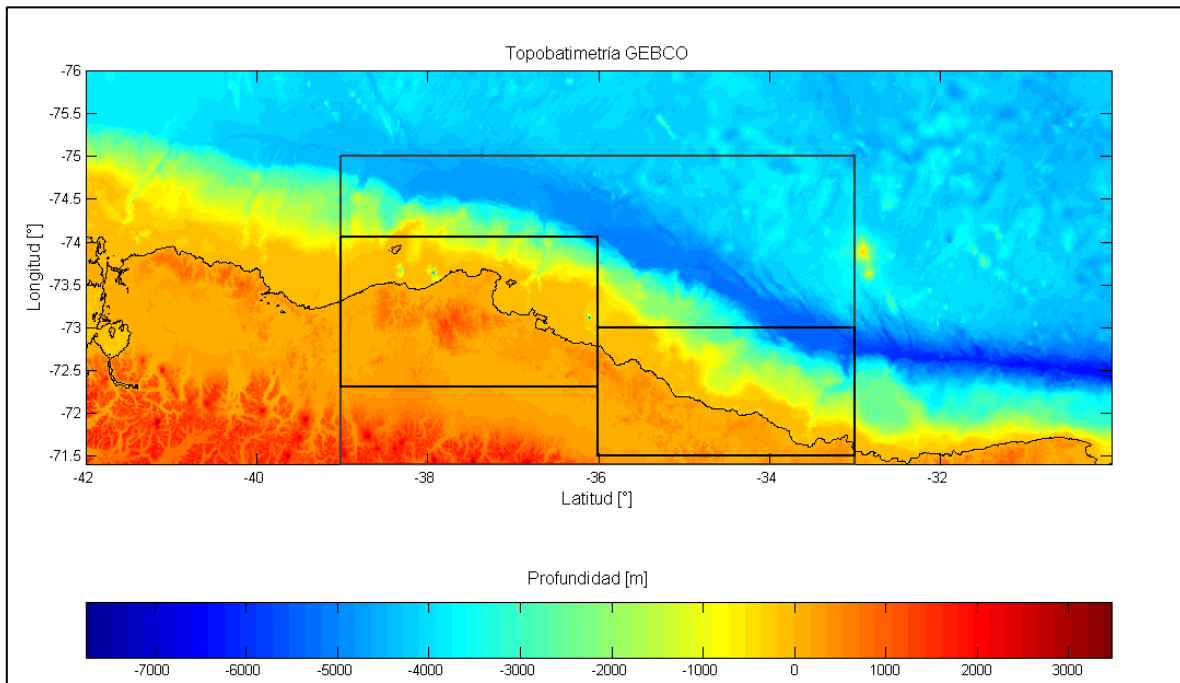


Figura 3.1 Topobatismetría GEBCO. Límites de mallas de cálculo incluidos.
Fuente: Elaboración propia

Los datos utilizados en este estudio consideran resultados calibrados con mediciones (hindcast), de modo que no son datos de pronóstico, sino que pueden ser considerados datos modelados corregidos. Se encuentran en archivos binarios en formato GRIB y se presentan en un mallado de resolución de $1.25^\circ \times 1^\circ$, en longitud y latitud respectivamente. Se recopiló datos para un periodo de 13 años, entre Febrero de 1997 y Marzo del 2010. Estos archivos contienen resultados para las siguientes variables, entre otras, calculadas para un intervalo de 3 horas entre sí:

- Altura significativa de ola (H_s)
- Periodo peak (T_p)
- Dirección principal de oleaje (MWD)

Con el fin de representar en forma realista, pero a la vez eficiente, los distintos estados de mar, se seleccionaron 8 ubicaciones desde las cuales se extrajo información correspondiente a las 3 variables antes mencionadas, para ser utilizadas como condición de borde en el modelo. En la Tabla 3.1 se muestra la ubicación de los puntos de la grilla de NWW3. Si bien existen nodos NWW3 más cercanos a la costa, considerando que se debe cumplir la condición de aguas profundas para realizar la propagación, se optó por puntos discretos separados por 1° de latitud. El punto identificado como 8 (figura 3.2) se incluyó para minimizar los efectos de sombra en el sector sur de la grilla de cálculo, en virtud del litoral chileno.

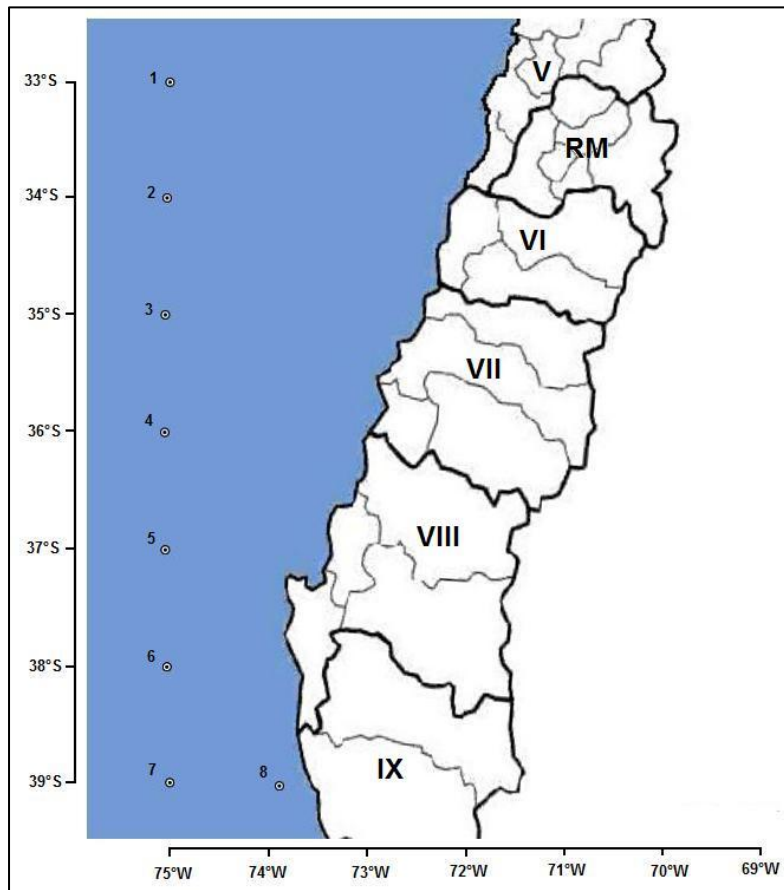


Figura 3.2 Área de interés, y ubicación de los sitios del mallado desde donde se extrajeron los datos NWW3
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-1: Ubicación espacial de los puntos de interés del mallado NWW3

Sitio No.	Ubicación
1	33°S – 75°W
2	34°S – 75°W
3	35°S – 75°W
4	36°S – 75°W
5	37°S – 75°W
6	38°S – 75°W
7	39°S – 75°W
8	39°S – 73,75°W

Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo, la figura 3.3 muestra el registro de oleaje y períodos para el nodo 1. En él se puede apreciar la estacionalidad del oleaje, así como su alto contenido energético, expresado en su altura media, la cual supera los 3.5 m y sus períodos largos.

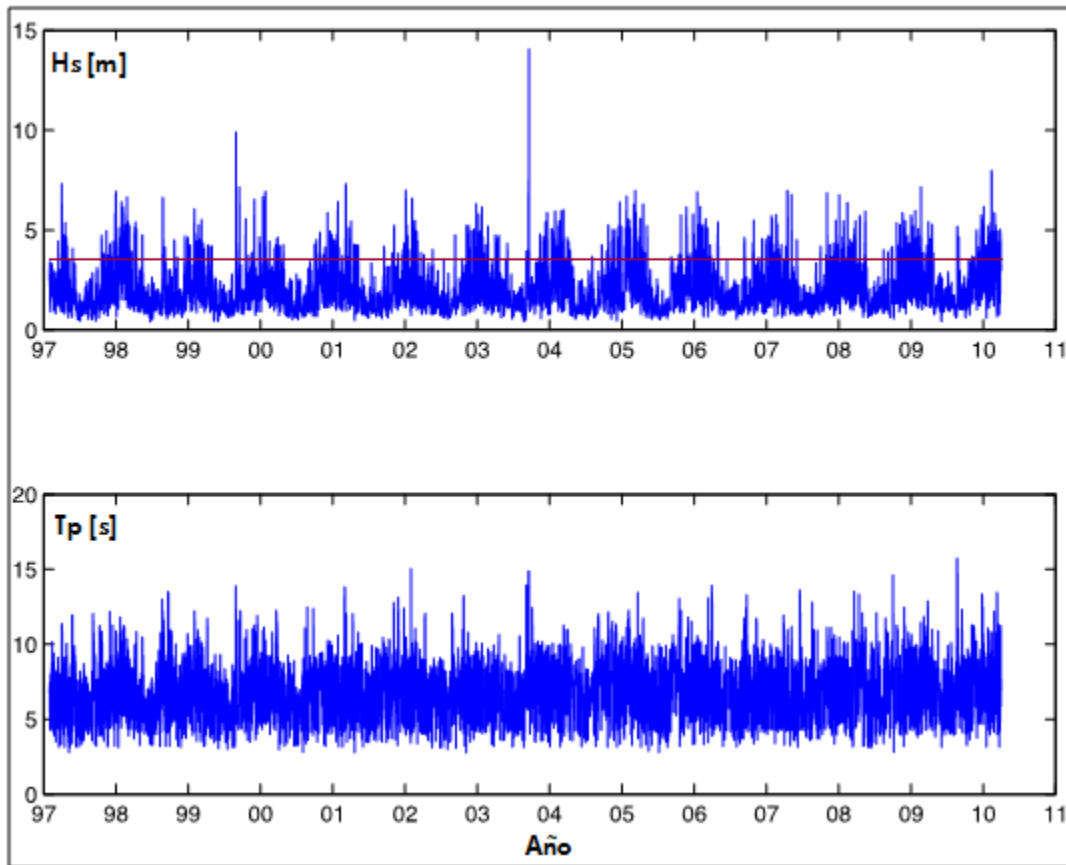


Figura 3.3 Registro de oleaje y altura significativa para el nodo 1.
Fuente: Elaboración propia

3.2. Validación datos

El modelo NWW3 ha sido validado en variadas ocasiones (NOAA, 2011), pero con el fin de presentar un análisis más confiable, se procedió a la validación de los datos a través de la comparación con datos reales del oleaje chileno. Para esto se contactó al SHOA, obteniendo información real del clima de oleaje.

La información corresponde a espectros energéticos, medidos a través de una boya TRIAXYS, la cual se mantuvo fondeada frente a la bahía de Valparaíso desde el año 2001 hasta el 2004. Sus coordenadas de fondeo son, aproximadamente, 32.9°S de latitud y 71.65°W de longitud, con un radio de borneo de 100 metros.

La serie de datos contiene información de 4 meses: Octubre 2002, Enero 2003, Abril 2003 y Julio 2003; con un tiempo de separación entre datos (estado de mar) de 3 horas.

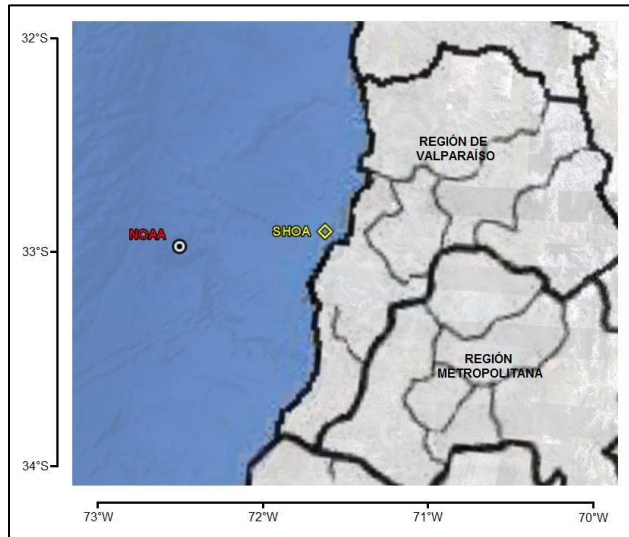


Figura 3.4 Ubicación boya TRIAXYS del SHOA y nodo NWW3 utilizado en la validación
Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el nodo NWW3 más cercano en la validación, ubicado a 80 km de la boya, en los 33°S de latitud y 72.5°W de longitud. La figura 3.4 muestra la ubicación del nodo NWW3 y de la boya fondeada utilizada en la validación.

En un principio, se compararon los parámetros obtenidos del modelo NWW3 (H_s , T_p y MWD), con los parámetros de resumen obtenidos a partir del espectro energético (figura 3.5) para los cuatro meses antes mencionados. Para determinar la altura significativa espectral, se utilizó:

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} = 4 \sqrt{\int \int E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (3.1)$$

El periodo peak se determinó a partir de la frecuencia con mayor contenido energético. De igual manera, la dirección principal corresponde a la que contiene más energía.

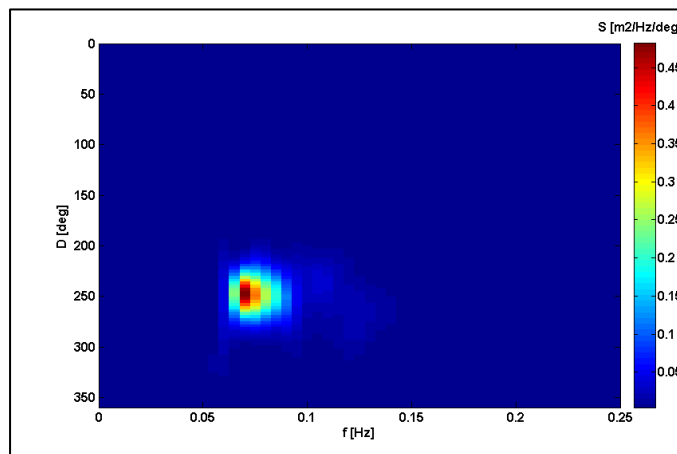


Figura 3.5 Espectro típico recopilado de boya TRIAXYS
Fuente: Elaboración propia

A partir de los parámetros de resumen se realizó la comparación en serie de tiempo. La figura 3.6 muestra la comparación temporal para los tres parámetros en Julio del 2003. Como se puede apreciar en la figura, la tendencia de los datos reales se ve bien representada por los datos modelados a través del NWW3.

El dato más importante a considerar corresponde a la H_s , ya que en el cálculo de la energía este parámetro influye de forma cuadrática. Por esta razón, se realizó un análisis de correlación entre los datos para este parámetro, obteniendo, en la mayoría de los casos, una correlación cercana al 75%.

Se calculó también el error cuadrático medio (RMS), el cual arrojó una diferencia de 0.5 m en el caso de la H_s , 1.6 s en T_p y 8.6° en la D_p . A pesar de estar muy bien relacionados entre sí, es claramente visible, en el caso de las H_s , una diferencia a favor de los datos modelados. Esto se explica principalmente por la distancia a la costa del punto utilizado para la comparación.

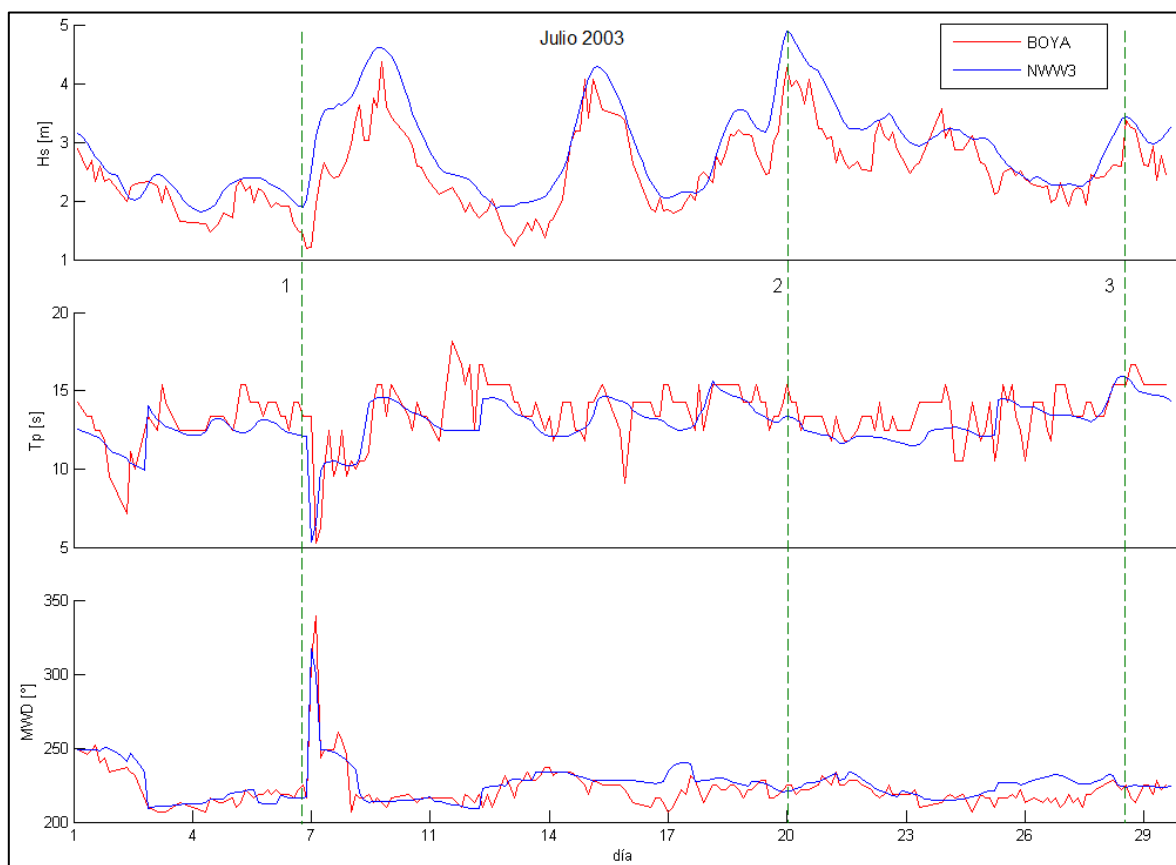


Figura 3.6 Comparación en serie de tiempo de altura significativa H_s , periodo peak T_p y dirección principal MWD para datos de boya TRIAXYS v/s NWW3. Las líneas segmentadas corresponden a los estados de mar propagados con SWAN.

Fuente: Elaboración propia

Para obtener una comparación aún más realista, se realizó una propagación de datos, utilizando SWAN, desde el sitio NWW3 hasta donde se encuentra la boya. Esta propagación se realizó para 3 estados de mar por cada mes, obteniendo en la ubicación de la boya los parámetros de resumen asociados a NWW3. La tabla 3.2 entrega los datos obtenidos de la propagación realizada para los estados de mar seleccionados para Julio del 2003 (figura 3.6).

Cabe destacar que al realizar la propagación, no se incluyó el efecto de *whitecapping*, interacciones ola-ola, la acción del viento, ni fricción de fondo. Se decidió no incluir la acción del viento como variable, en primer lugar por no disponer de un campo de vientos detallado para la zona en estudio, así como considerar que el modelo NWW3 incorpora vientos de mayor escala, desde la zona de generación, y no a nivel local.

Se realizó un análisis de sensibilidad con estas variables activadas, para un viento constante de 4.3 m/s con dirección SW, basados en valores medios en el litoral costero chileno (Aceituno et al., 1994). Al comparar los resultados, para el modelado con y sin las variables activadas, se constató un aumento en el tiempo de cálculo de 5 a 30 minutos por propagación realizada. Además, se calculó el error cuadrático medio para los valores de altura significativa, siendo este de 0.02 m, menor al 1% del valor medio de altura significativa de la zona en estudio, razón por la cual, para el alcance de este estudio, se justifica la no inclusión de estas variables. Si se utilizó rompimiento, ya que al desactivar esta opción, los valores de H_s obtenidos en la zona costera divergen a valores muy altos, tal cual lo advierte el manual de SWAN (SWAN, 2008).

Como se puede observar en la tabla, al propagar los datos, tanto el periodo como la altura significativa disminuyen, correspondiendo a lo esperado debido al contacto con el fondo marino en la zona costera, acercándose a los valores registrados por la boya (salvo en el caso 3). En cuanto a la dirección, varía levemente hacia el sur, presumiblemente debido también a la disminución de la profundidad, con lo cual el frente de olas se alinea a los veriles, por lo tanto la dirección se presenta perpendicular a ellos.

Tabla 3-2: Parámetros de resumen para distintos estados de mar, obtenidos en sitio NWW3, en boya triaxys y propagados con SWAN a ubicación de boya.

JULIO 2003			
1	07.07.2003 09:00:00		
	H_s [m]	MWD [°]	T_p [s]
NWW3	1,89	216,5	12,11
BOYA	1,43	225	13,33
SWAN	1,51	217,5	12,04
2	21.07.2003 03:00:00		
	H_s [m]	MWD [°]	T_p [s]
NWW3	4,89	221	13,35
BOYA	4,26	225	15,38
SWAN	4,02	223,5	13,29
3	30.07.2003 18:00:00		
	H_s [m]	MWD [°]	T_p [s]
NWW3	3,42	224	15,82
BOYA	3,37	225	15,38
SWAN	2,77	229,5	15,68

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.7 se presenta la comparación de alturas significativas para todos los estados de mar analizados. A partir de ella se puede concluir que hay una relación aceptable entre los datos propagados y los registrados por la boya. Calculando el error porcentual entre estos datos con respecto a los datos de la boya, se observa que el error más grande corresponde a un 17.8% y el error porcentual promedio es de un 7%. Con estos valores, es aceptable utilizar los datos NWW3 para el alcance de este estudio, ya que, en la gran mayoría de los casos, la propagación subestima la H_s, por lo cual en los cálculos futuros de energía nunca sobrevalorará el recurso.

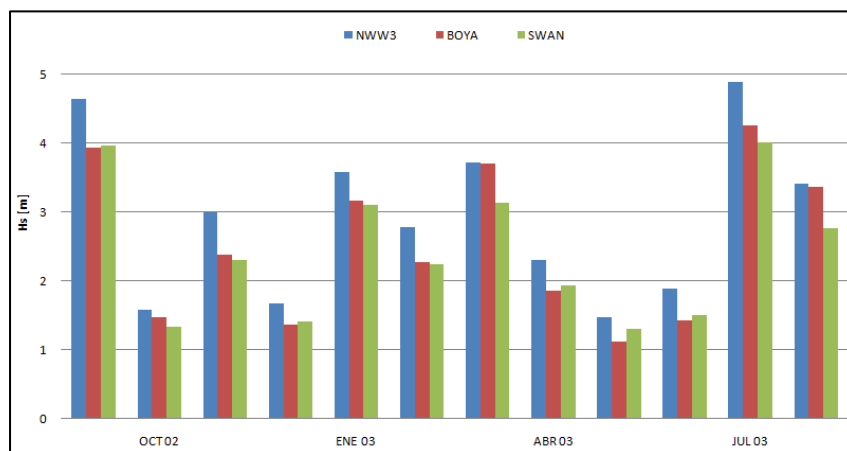


Figura 3.7 Altura significativa para distintos estados de mar durante los meses en estudio, obtenidas en nodo NWW3, en boya TRIAXYS y propagados con SWAN a ubicación de boya.

Fuente: Elaboración propia

3.3. Transferencia de oleaje

Tras validar los datos recopilados del modelo NWW3, se procedió a la transferencia de los parámetros de oleaje hacia la costa. Para esto, se utilizó, en conjunto, el programa de modelado costero SWAN y la herramienta matricial MATLAB. Se decidió utilizar SWAN ya que es numéricamente más estable, así como presenta un buen desempeño bajo condiciones de borde definidas, a diferencia de otros modelos específicos de aguas someras, como STWAVE (Hsu & Allard, 2002). A continuación se detallará una propagación típica.

La propagación hacia la costa se divide en dos pasos: la primera propagación, desde los sitios NWW3 para obtener condiciones límites en mallas anidadas de mayor resolución; y luego, la propagación en estas mallas anidadas para obtener los datos en la costa.

3.3.1. Primera propagación

Esta primera propagación tiene como único fin, la obtención de dos mallas anidadas, cercanas a la costa, y de mayor resolución. Se necesita realizar este paso, ya que el costo computacional para realizar los 13 años, en todo el dominio, con una resolución más detallada serían altísimos. Estudios de sensibilidad respecto a la resolución arrojaron tiempos de cálculos excesivos para esta primera propagación, cercanos a 1 hora para solo un estado de mar, frente a los 5 minutos que tardaron ambas propagaciones utilizando la resolución seleccionada.

La resolución de esta primera propagación es de 1' x 1', sobre una batimetría con resolución de 30'' x 30''. Los límites de la malla utilizada en SWAN están determinados por la franja latitudinal a estudiar, la ubicación de los nodos NWW3 y la costa chilena. De esta manera, la malla se ubica entre los 71.4°W y 75°W de longitud y los 33°S y 39°S de latitud.

Se verificó que las ubicaciones NWW3 seleccionadas cumplieran la condición de aguas profundas, tal como lo estipula el SHOA (2005). Las condiciones de borde asociadas a esta malla la entregan los parámetros de resumen recopilados de estos sitios. Cabe destacar que no se están utilizando espectros bidimensionales, por lo que con los parámetros de resumen, es posible construir espectros sintéticos en cada punto. Se utilizaron espectros JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), ya que tras realizar pruebas de validación de datos, se confirmó que este tipo de espectros es el que más se asemeja a las condiciones reales. La figura 3.8 presenta una de las comparaciones realizadas entre el espectro registrado por la boya TRIAXIS y el espectro JONSWAP generado a partir de los parámetros de resumen, para un estado de mar seleccionado arbitrariamente.

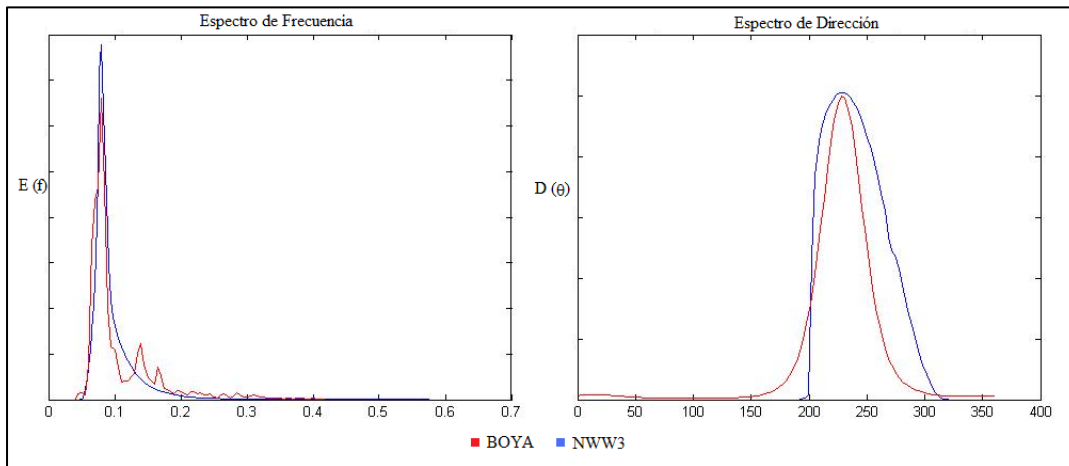


Figura 3.8 Comparación entre espectro real registrado en boya triaxys, y espectro JONSWAP generado por parámetros de resumen NWW3 a partir de SWAN
Fuente: Elaboración propia

Se definió que cada espectro generado cubre un segmento del borde al cual se le impondrán condiciones. En este caso los segmentos se encuentran limitados por los puntos medios entre cada sitio NWW3 seleccionado (figura 3.9).

Cabe destacar que las simulaciones de llevaron adelante con rompimiento en aguas poco profundas activado, pero sin incorporar generación por viento, y con interacciones ola-ola y *whitecapping* desactivado, tal cual se explicó anteriormente.

Por último, en esta primera propagación, se solicitaron, como archivos de salida, dos mallas anidadas de resolución $30'' \times 30''$, cuyos límites quedan definidos en longitud por la zona costera y el veril 200 [m], límite aproximado para aguas profundas calculado a partir de la Teoría Lineal del Oleaje (TLO), utilizando la aproximación de Fentón y McKee (1990) y la clasificación de ondas en base a la profundidad relativa, y en latitud por la mitad del dominio en estudio.

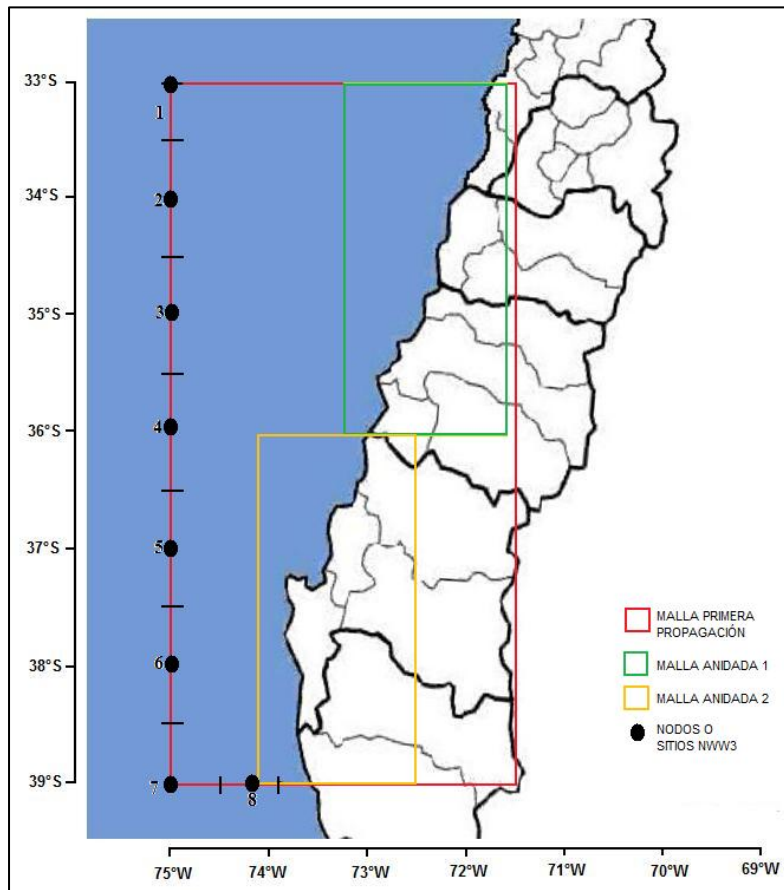


Figura 3.9 Ubicación de la primera malla de cálculo, así como de las mallas anidadas. Se especifican además los segmentos cubiertos por los distintos espectros JONSWAP.
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Segunda propagación

Las mallas anidadas obtenidas en la primera propagación sirven como condiciones de borde para una siguiente propagación en SWAN. Por lo tanto, el siguiente paso es realizar dos propagaciones más, una por cada malla obtenida en el paso anterior. Los límites de estas mallas corresponden a:

- Malla 1: 33°S - 36°S Lat. y 71.5°W – 73°W Lon.
- Malla 2: 36°S - 39°S Lat. y 72.3°W – 74.1°W Lon.

La diferencia entre esta propagación y la anterior, radica principalmente en la resolución utilizada y en las condiciones de borde. La resolución es la mínima que se puede utilizar para obtener datos validos, ya que coincide con la resolución de la batimetría disponible (30'' x 30''). En cuanto a las condiciones de borde, estas vienen registradas, en la malla anidada conseguida en la primera propagación, como espectros bidimensionales para todos los límites de la malla solicitada.

Considerando los datos anteriores, se escribe el archivo de entrada a SWAN, y se solicitan como archivos de salida los datos de altura significativa, dirección principal y periodo peak.

Cabe destacar que en el caso del periodo peak, se solicitó el periodo peak suavizado, que, por recomendación del mismo programa, entrega una mejor aproximación del periodo peak real (SWAN, 2008).

El procedimiento detallado corresponde al utilizado para el cálculo de los parámetros de resumen en la zona de estudio para una hora y día en específico, es decir, se deben realizar tres propagaciones distintas en SWAN para obtener los datos de interés, para un estado de mar en concreto.

3.3.3. Programación en MATLAB

Para realizar el cálculo de los datos de interés en forma más eficiente, se utilizó el programa MATLAB, el cual está recomendado por los desarrolladores de SWAN como herramienta complementaria en la interpretación de los datos obtenidos, ya que estos pueden ser solicitados en formato .mat, y manejados de la manera que uno estime adecuada.

Además, MATLAB presenta la capacidad de programar, con lo cual, si se especifican bien las condiciones y comandos, se puede automatizar gran parte del trabajo a realizar.

La obtención de los datos para un estado de mar, en las mejores condiciones disponibles, tardó aproximadamente 5 minutos. Pese al bajo costo computacional, simular la totalidad de los estados de mar suponía un tiempo excesivo, razón por la cual se seleccionaron dos estados de mar por día, lo que hace un total de 9 618 estados de mar durante los 13 años. Los estados de mar seleccionados corresponden a las 09:00 y a las 18:00 hrs. La selección fue arbitraria, asumiendo que no afecta las estadísticas de largo plazo de forma significativa, así como no influye en la selección de las ubicaciones con mayor concentración de energía.

Para automatizar la tarea de ingresar los datos en las hojas de comandos de SWAN, así como iniciar cada corrida en el programa, se utilizó MATLAB. La figura 3.10 describe a partir de un esquema lo que realiza el programa desarrollado para la automatización de estas tareas. Los rectángulos representan los datos iniciales, las elipses los datos y resultados intermedios, los hexágonos las propagaciones hechas en SWAN y los trapecoides los resultados finales.

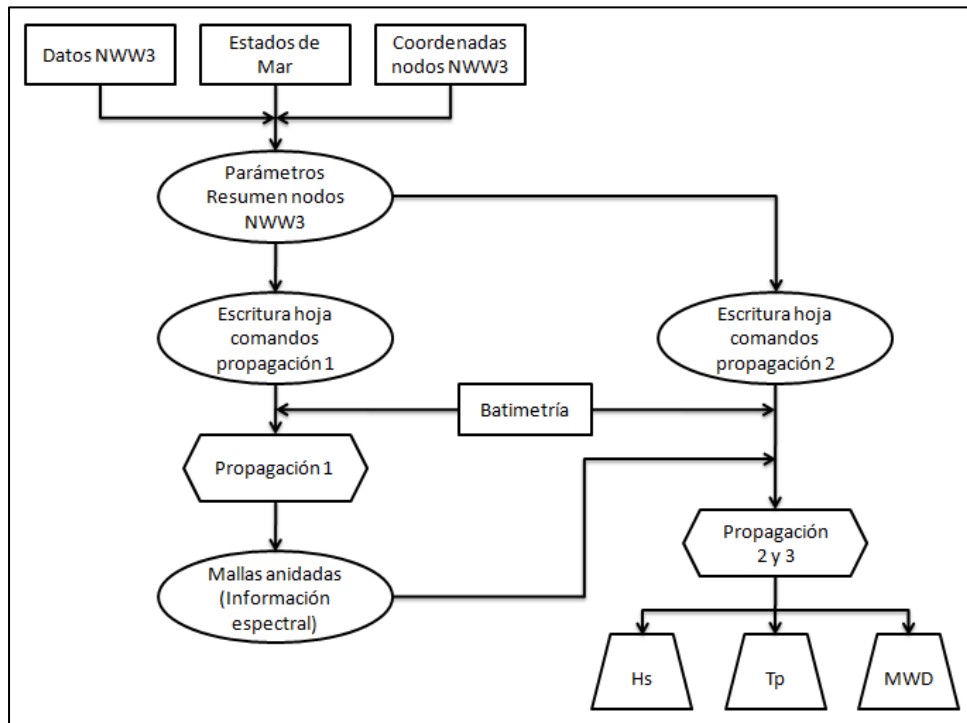


Figura 3.10 Esquema general del proceso MATLAB para la obtención de los parámetros de resumen en la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, almacena en una matriz los datos necesarios para la confección de los espectros JONSWAP en SWAN. Para esto, se le debe entregar, como datos de entrada: los archivos .GRB con los datos del modelo NWW3; los estados de mar considerados en el estudio, es decir, las horas desde las cuales se recopilaban los datos; y, las coordenadas de los sitios NWW3 desde donde se recopilaban los datos necesarios para la propagación.

Tras obtener los parámetros de resumen en los sitios NWW3, el programa escribe las hojas de comando de SWAN para todos los estados de mar seleccionados a lo largo de los 13 años, y estas son almacenadas en la misma carpeta donde se encuentra la batimetría a utilizar. La hoja de comandos en la primera propagación solo varía en los parámetros de resumen que definen los espectros a lo largo de cada segmento, en tanto, las hojas de comandos de la segunda y tercera propagación, varían en el nombre de la malla anidada que define las condiciones espectrales en cada una de las zonas definidas.

Luego, considerando la batimetría, el programa hace correr SWAN para la primera propagación, obteniendo de esta las 2 mallas anidadas necesarias para las otras propagaciones. Estas son almacenadas en la misma carpeta en donde se encuentran las hojas de comando. Luego, por separado, considerando la batimetría y las mallas anidadas con información espectral, se realiza la propagación 2 y 3.

Como resultado de cada propagación, se obtienen 3 matrices, donde cada celda representa un área de 30'' x 30'' (aproximadamente 0.85 km²), las cuales contienen la información de

altura significativa (H_s), periodo peak (T_p) y dirección principal (MWD) para cada uno de estos sectores. Estas matrices son almacenadas en carpetas distintas, una por cada parámetro.

Este proceso se repite para todos los estados de mar considerados, obteniendo finalmente 9 618 matrices por cada parámetro.

En el anexo A se entregan las 3 hojas de comando típicas utilizadas en SWAN y en el anexo B las funciones desarrolladas en MATLAB utilizadas en el proceso de propagación.

3.4. Cálculo de energía y potencia

El flujo de energía medio, o potencia media, se define como la tasa media de transferencia de energía por unidad de ancho. A continuación se expone la metodología utilizada y programada en MATLAB para el cálculo de la potencia media de oleaje en la zona de estudio, en una profundidad específica a partir de los resultados obtenidos en la propagación realizada (H_s y T_p).

La potencia media de oleaje se deriva de la teoría lineal de oleaje, y se obtiene a partir de la ecuación 2.12. La energía total se define a partir de la ecuación 2.13. Es importante notar que la expresión de energía utilizada está definida para una ola monocromática, es decir, una ola de período y altura dada, no un espectro de energía. Según diversos estudios [Acuña, (2008), Hughes & Heap, (2009)], la altura de ola que mejor representa la energía contenida en un estado de mar corresponde a la altura cuadrática media (H_{rms}). Asumiendo una distribución Rayleigh, y a partir de la ecuación de dispersión, se obtiene la siguiente relación para la altura significativa (H_s), (Goda, 2000):

$$H = H_{rms} = \frac{\sqrt{2}H_s}{2} \quad (3.2)$$

La celeridad de grupo se obtiene a partir de la teoría lineal del oleaje, según la ecuación 2.11. Según diversos autores [Cornett, (2008), Iglesias & Caraballo., (2009)], el periodo energético corresponde a la estadística más aceptada con respecto a los cálculos de energía de oleaje. La relación entre el periodo energético (T_e) y el periodo peak (T_p) se encuentra definida por el espectro utilizado (JONSWAP) y por la constante definida en la aproximación para oleaje completamente desarrollado de Pierson-Moskowitz. De esta manera:

$$T_e = 0.9T_p \quad (3.3)$$

Para obtener la longitud de onda, se utiliza la ecuación 2.9, correspondiente a la aproximación de Fenton y McKee (1990). La figura 3.11 esquematiza el proceso desarrollado para obtener los valores de potencia media en las zonas de interés.

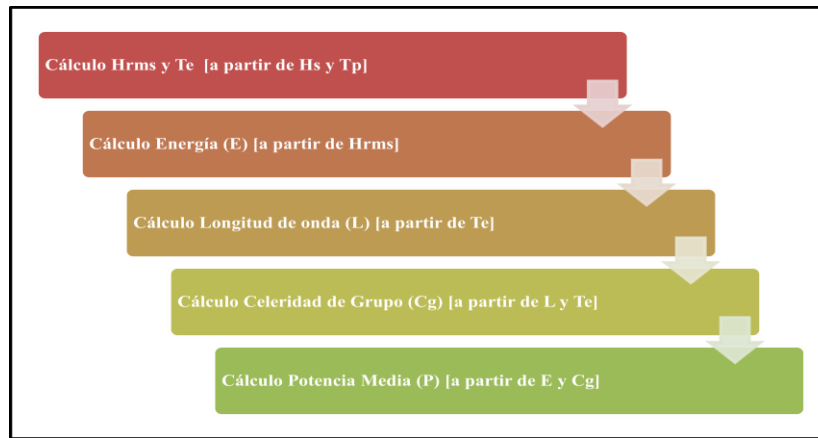


Figura 3.11 Esquema general del proceso MATLAB para la obtención de la potencia media
Fuente: Elaboración propia

3.5. Medida de tendencia central

Para describir el grupo de observaciones con las que se cuenta, y ya que en este caso es un número muy elevado, se hace imperativo resumir la información con un solo indicador estadístico, en este caso, una medida de tendencia central. Si bien, tradicionalmente se recurre al promedio aritmético como el indicador de preferencia, este es susceptible a la influencia de los valores extremos cuando la distribución de los datos no sigue una distribución normal. Aquí se justifica el uso de la mediana como indicador de preferencia.

Para la comparación se empleará la información de altura significativa (H_S), para la totalidad de años en estudio (9 618 datos), de un sitio cualquiera ubicado a una profundidad conocida (en este caso 50 m). La razón por la cual solo se considerará la H_S radica en su directa relación para la determinar la energía en base al oleaje.

La figura 3.12 muestra el histograma de H_S asociado al punto seleccionado. En esta figura además se ha identificado la ubicación de las dos medidas de tendencia central en estudio.

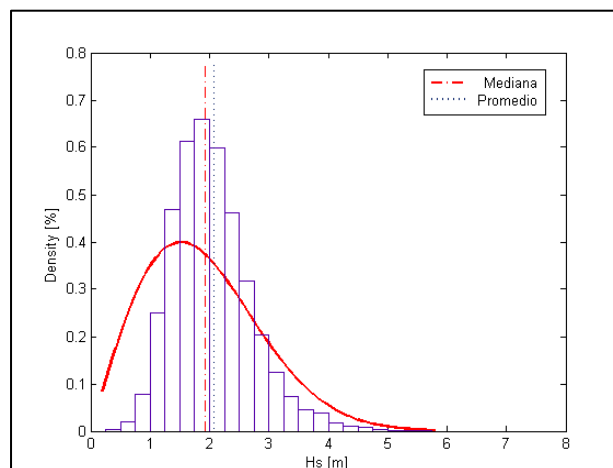


Figura 3.12 Histograma de H_S para un punto cualquiera con datos entre 1997 y 2010.
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, en primer lugar la distribución de alturas se ajusta a una distribución Rayleigh (Longuett-Higgins, 1952), luego se desvía claramente de una distribución normal. Se observa que el valor de la mediana se acerca a los valores que más se repiten durante el periodo en estudio, en cambio, el valor entregado por el promedio se aleja con cierta tendencia a los valores más altos. La principal razón de que ocurra esto corresponde a la influencia que provocan los valores extremos sobre el promedio, ya que valores muy altos la aumentan y valores muy bajos la disminuyen, no siendo muy representativa para una muestra con estos tipos de valores. Esta condición no la presenta la mediana, ya que sin importar los valores extremos, y una vez ordenados los datos, entrega el valor que se encuentra en el 50% de los datos registrados. Esto se considera un buen resultado, pues entrega estimaciones conservadoras no sesgadas por los máximos.

3.6. Criterio de selección de *hotspots*

Al contar con los datos del potencial energético de la zona de estudio, es posible clasificar la región en base a los sitios con mayor contenido de energía, o mejor aún, con mejor capacidad de extracción del recurso, teniendo en cuenta no solo la energía disponible, sino que también los diversos factores que influyen en su extracción. Para esto se confeccionó un ranking con estos sitios, o *hot spots*, a partir de distintos criterios.

La elección de los factores se basa en un análisis técnico, el cual busca realizar un catastro de la zona seleccionada y en base a los valores obtenidos y procesados determinar los posibles sitios con mayor contenido energético, no necesariamente siendo estos lugares desde donde finalmente se extraerá el recurso.

Para este estudio, se extrajo la información para una profundidad de 50 m, en el veril más cercano a la costa, pensando en dispositivos que trabajen a esa profundidad.

Luego, con la información obtenida, las ubicaciones fueron ordenadas de mayor a menor flujo medio de potencia (P50%), y con ayuda del gráfico que representa la variación latitudinal del recurso, se determinaron los sitios con mayor potencial energético. En caso de encontrar una concentración de sitios muy cercanos en las ubicaciones más altas del listado, se considera solo él con mayor contenido energético con el fin de comparar distintas localidades. Además, se incluyó en el listado sitios que, teóricamente, se deberían encontrar dentro de los más energéticos debido a su configuración geográfica, pero que no se encontraron en los primeros lugares del listado. Estos sitios corresponden a configuraciones geográficas denominadas ‘puntas’, y que consisten en una porción de tierra que penetra en el mar.

De esta manera se cuenta con un listado inicial de 24 sitios. Luego, tal como el estudio realizado por Nobre et al. (2009), se realizó un análisis multicriterio para estos sitios, el cual considera entre sus variables:

- Potencial energético del sitio.
- Cercanía al SIC.

- Pendiente media del fondo marino
- Ubicación con respecto al puerto más cercano.

El potencial energético del sitio corresponde a una ponderación asociada a la potencia media obtenida para ese lugar. La cercanía al SIC se determinó para la distancia en línea recta entre el sitio, y el nodo más cercano, utilizando Google Earth. De igual manera se calculó la distancia al puerto más cercano. Para determinar la pendiente media se utilizó la batimetría disponible (GEBCO) y se calculó la pendiente media entre los 20 y 100 metros de profundidad. En estos casos, tras obtener la distancia y la pendiente, se escalaron los valores obtenidos, para ponderarlos en conjunto con los valores del potencial energético.

- La potencia media es la que principalmente determina la disponibilidad del recurso. De esta manera, su ponderación frente a los otros factores considerados es mayor. A mayor flujo de potencia, mayor ponderación para el sitio.
- La distancia al SIC se obtuvo gracias al mapa dispuesto por la Comisión Nacional de Energía (CNE). A menor distancia a una subestación, mayor ponderación para el sitio.
- La pendiente media del fondo marino es de importancia para la instalación del dispositivo conversor de energía. A mayor pendiente, menor ponderación para el sitio.
- En el caso de la distancia a los puertos, se consideraron los puertos más importantes en la zona de estudio, es decir, los más adecuados para transferir carga, pensando en la ubicación y mantención del dispositivo de extracción. A mayor cercanía a algún puerto, mayor ponderación para el sitio. La tabla 3.3 muestra el listado de puertos considerados, de norte a sur, así como sus coordenadas.

Tabla 3-3: Puertos utilizados para el análisis multicriterio y su ubicación.

Puerto	Latitud S [°]	Longitud W [°]
Valparaíso	33.03	71.61
San Antonio	33.60	71.61
Maguelines (Constitución)	35.35	72.45
Lirquen – Talcahuano	36.70	73.04
San Vicente	36.74	73.14
Coronel	37.02	73.16
Corral	39.86	73.42

Fuente: Elaboración propia

Los puertos de Maguelines y de Corral se agregaron a pesar de no ser importantes, ya que cubren parte del sector en estudio que no se encuentra en las cercanías de otros puertos más importantes.

Es importante establecer que, si bien las variables seleccionadas pueden ser asociadas a un criterio de elección económico, este estudio se enfoca únicamente en el análisis técnico del recurso, para ser utilizado como una evaluación preliminar que funcione como base para futuros estudios. El alcance de este estudio se basa en lo técnico, para obtener un catastro de las mediciones y analizarlas estadísticamente. La decisión final para determinar los lugares más atractivos para la extracción del recurso debe ser estudiada económicamente, análisis que se encuentra fuera del alcance de este proyecto.

Este estudio, a diferencia de otros estudios previos, no considera la resolución de batimetría en la zona como una variable importante al momento de decidir el mejor lugar para la extracción del recurso energético, ya que la investigación se realizó en base a una batimetría equiespaciada en el mallado de cálculo. Sin embargo, la pendiente media del sector se considera de importancia ya que define la facilidad de instalación de un dispositivo. Por esto, mientras menor fuese la pendiente en el sector, mayor ponderación obtiene ese sitio.

En Chile, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) realizó un estudio a través de la consultora GARRAD HASSAN (Cruz et al., 2007), basado en el estudio realizado por Nobre et al. (2009), en el cual cuantifican el recurso a través de un análisis multicriterio. Se utilizará como base una variación a la ponderación presentada en el estudio de GARRAD HASSAN, al no incluir la batimetría como variable, así como otorgar mayor importancia al recurso energético e incluir la pendiente media de fondo. Otro estudio semejante fue realizado por Acuña (2008), sin embargo, la selección de las ubicaciones se realizó sin considerar el recurso energético, para luego, en los sitios determinados, calcular la energía disponible.

Se realizará un análisis de sensibilidad para los ponderadores seleccionados, con el fin de estudiar la variación del ranking elaborado ante diferentes niveles de importancia para las variables consideradas. En la tabla 3.4 se muestran los valores para la escala y ponderación utilizada. La ponderación asociada a cada variable fue establecida en base a estudios previos [Nobre et al. (2009), GARRAD HASSAN (Cruz et al., 2007)] y a recomendaciones de expertos.

Tabla 3-4: Factores, escala y ponderación para la determinación del ranking de hotspots

Variable	Recurso Energético [kW/m]	Distancia al SIC [Km]	Distancia Puerto [Km]	Pendiente Media
Ponderación	60%	20%	10%	10%
Escala	0 - 100	0 - 100	0 - 100	0-100
Valor	0 - máx	100 - 0 [km]	150 - 0 [km]	0,4 - 0

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta tabla, se puede conseguir un segundo ranking de potenciales *hotspots*. Finalmente, para todas las ubicaciones se realizará un análisis estadístico, para estudiar la

variabilidad del recurso, con el fin de elaborar un listado final con todas las observaciones y recomendaciones asociadas a la elección de los sitios, así como un breve análisis de la potencia de salida asociada a tres dispositivos distintos.

4. RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos. En primer lugar se exponen los resultados para toda la zona en estudio, para luego detallar la elección de los *hotspots*, así como el análisis estadístico y de variabilidad para todos los sitios seleccionados. Finalmente se presenta un breve análisis de potencia de salida para tres dispositivos distintos.

4.1. Resultados propagación y determinación *hotspots*

Al realizar la totalidad de las propagaciones, se obtiene para cada uno de los estados de mar la información del clima de oleaje en toda la zona en estudio. La figura 4.1 muestra un registro de alturas significativas para un estado de mar cualquiera en la zona estudiada, generado a partir de una propagación en SWAN. En esta imagen se nota claramente el sector que abarcan las 2 propagaciones generadas. Además, se puede apreciar el aumento de H_s de norte a sur, principalmente en aguas profundas, ya que al acercarse a la costa, se hacen presentes los efectos físicos típicos de estas zonas (asomeramiento, difracción, etc.). En la costa se puede apreciar la baja altura en zonas protegidas, así como sectores que presentan concentración de altura de oleaje.

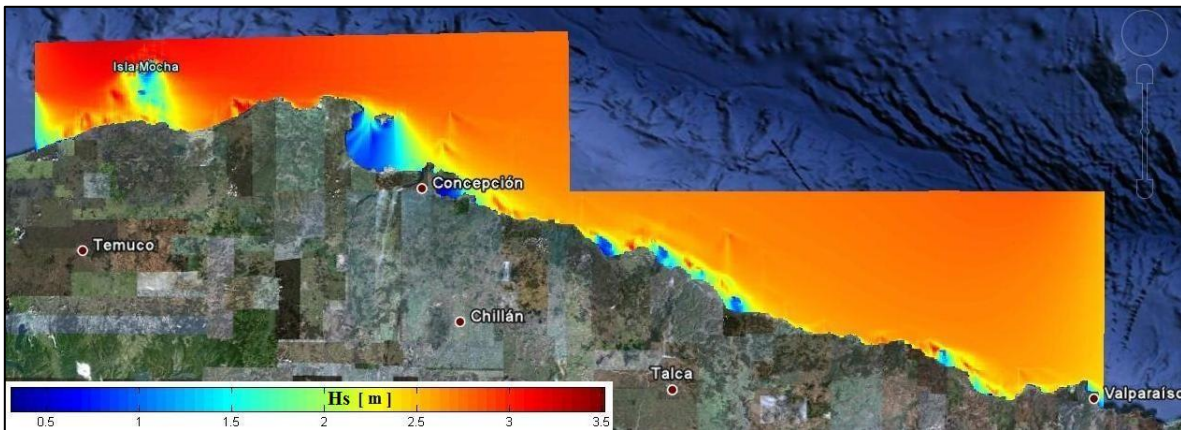


Figura 4.1 Registro de alturas significativas para un estado de mar cualquiera, generado a partir de SWAN, graficado en Google Earth gracias a MATLAB
Fuente: Elaboración propia

Este tipo de información se obtuvo para los 9 618 estados de mar en donde se propagó, tanto para H_s , T_p y MWD. Por lo tanto, también es posible obtener la potencia en toda la zona estudiada. La figura 4.2 muestra la información del flujo de potencia para el mismo estado de mar mostrado en la figura anterior. Al igual que en la imagen anterior, en esta figura se puede apreciar la variación que presenta de norte a sur la potencia, así como concentraciones de energía a lo largo de la costa. Son estas ubicaciones las de real importancia para este estudio, ya que corresponden a los denominados *hotspots*.

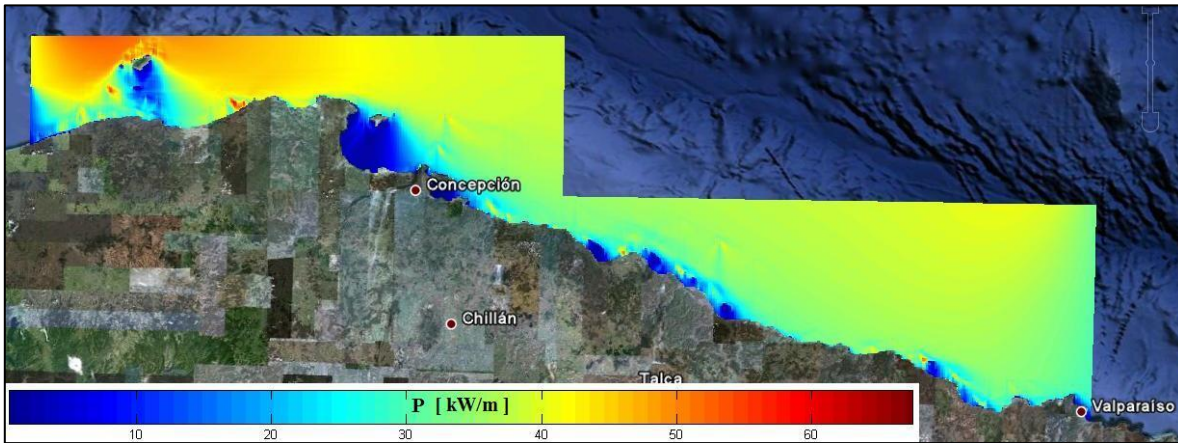


Figura 4.2 Registro de flujo de potencia para un estado de mar cualquiera, generado a partir de SWAN, graficado en Google Earth mediante MATLAB
 Fuente: Elaboración propia

Con el fin de caracterizar la información obtenida de mejor manera, y también obtener los datos que ayuden en la determinación de los *hotspots*, se extrajo la información correspondiente a H_s , T_p , MWD y P para una profundidad de 50 m. Sin embargo, debido a la resolución que presenta la batimetría con la que se cuenta, resulta imposible, en la totalidad de los casos, obtener una profundidad cercana a los 50 m. Debido a esto, se extrajo la información para las ubicaciones más cercanas a la costa con una profundidad cercana a lo deseado. La figura 4.3 muestra la profundidad que presenta en la batimetría las ubicaciones desde donde se extrajo la información para el análisis de *hotspots*.

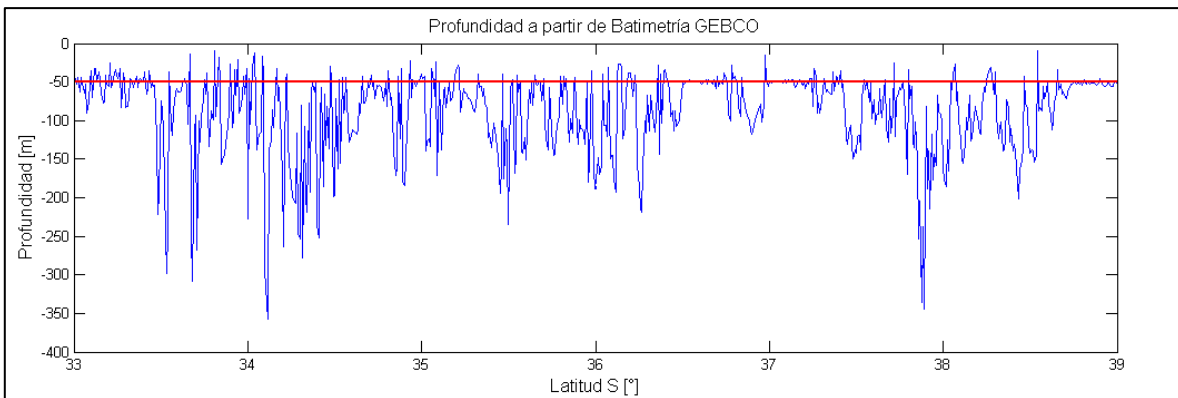
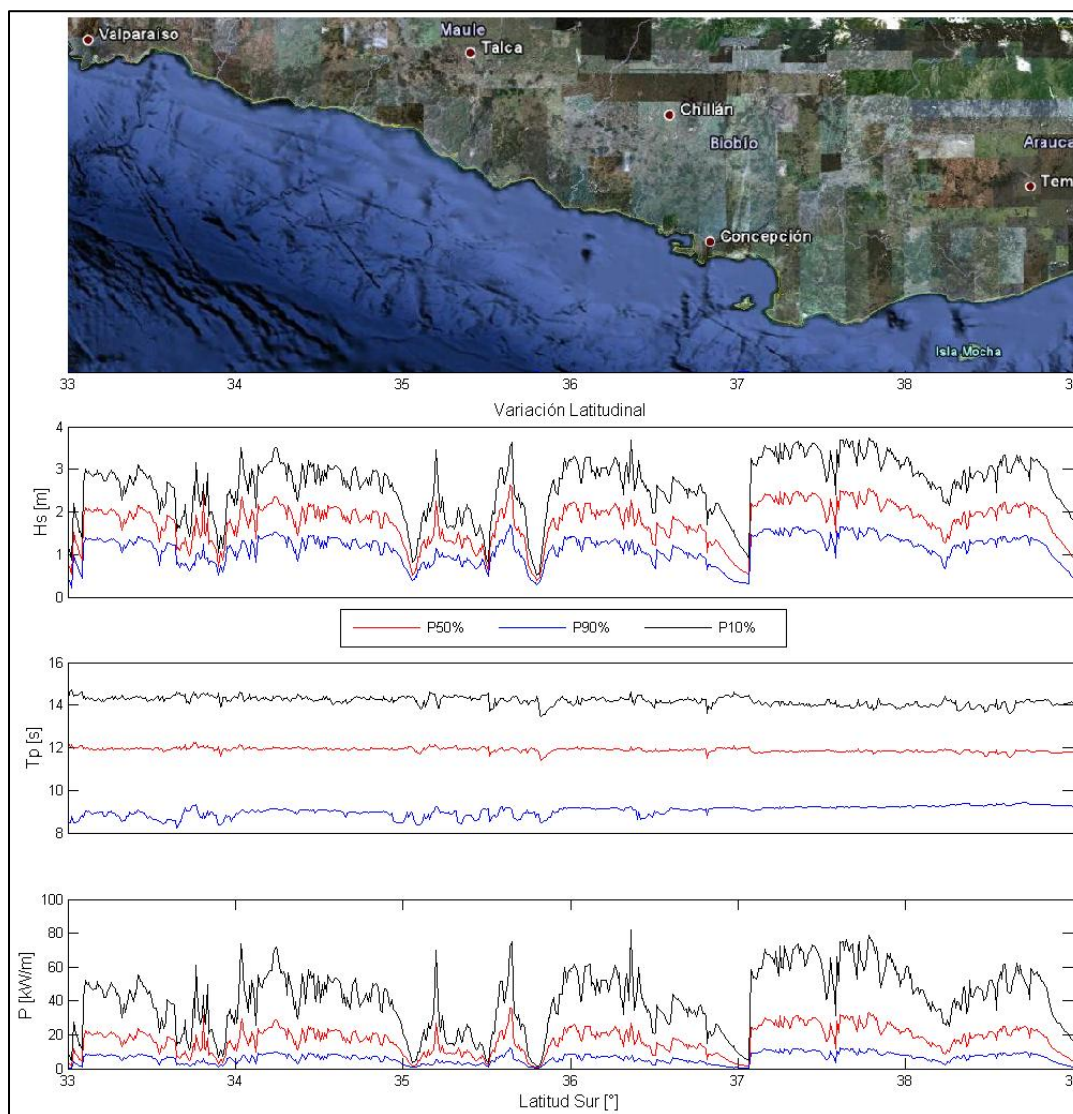


Figura 4.3 Profundidad en zonas seleccionadas para análisis de datos, a partir de batimetría GEBCO.
 Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3 se aprecia la variabilidad de profundidades que existen en los sitios seleccionados. La línea roja representa los 50 m de profundidad. El menor valor se encuentra cercano a los 10 m y el mayor valor a los 350 m. Esta variabilidad responde principalmente a la resolución de batimetría disponible, ya que al filtrar la información batimétrica para extraer los datos más cercanos a una profundidad de 50 m, se encontró, de nodo a nodo en el mallado, saltos muy grandes en la profundidad. Por ejemplo, existen zonas en que se pasa de no tener datos (zona sobre el nivel del mar) a profundidades sobre

los 200 m, así como zonas en que los datos pasan de muy pequeños a grandes profundidades. Sin embargo, considerando que si se realiza una interpolación entre los nodos cercanos, los 50 [m] de profundidad quedan en el nodo seleccionado, y asumiendo que la batimetría GEBCO es la de mayor resolución disponible, la selección realizada corresponde a una buena aproximación para el veril 50, y estaría justificado su uso como datos para una profundidad de 50 m. Para considerar aún más esta variación, se incluyó la pendiente media del sector como variable para la selección de la mejor ubicación en la extracción del recurso energético.

La figura 4.4 presenta la variación latitudinal del flujo de potencia para el veril 50 m, así como los parámetros involucrados en su obtención. Estos resultados son muy importantes, ya que, principalmente, en base a ellos es que se determinan los *hotspots*.



**Figura 4.4 Variación Latitudinal de altura significativa (HS), periodo peak (TP) y flujo medio de potencia (P), a una profundidad de 50 m.
Fuente: Elaboración propia**

A partir de la figura 4.4, se puede apreciar que latitudinalmente el flujo de potencia está condicionado solamente por la altura significativa, ya que el periodo peak se mantiene relativamente constante a lo largo de la costa chilena, con un valor medio cercano a los 12 [s]. Es por esto que el gráfico correspondiente al flujo de potencia es bastante similar al de H_s , con un marcado aumento en los valores extremos, debido principalmente a la participación cuadrática de la altura en la fórmula para el cálculo de la potencia. Otra forma de observar la variación latitudinal se presenta en la figura 4.5. En esta se observan los valores medios anuales de potencia a lo largo del veril 50, para toda la zona estudiada. Las zonas rojas corresponden a potenciales *hotspots*, y se puede verificar la constancia de estos valores a lo largo de los años, lo cual entrega más datos para la elección de estos sitios. También se nota la presencia de zonas protegidas, lo cual coincide con la distribución de potencias mostrada en la figura anterior.

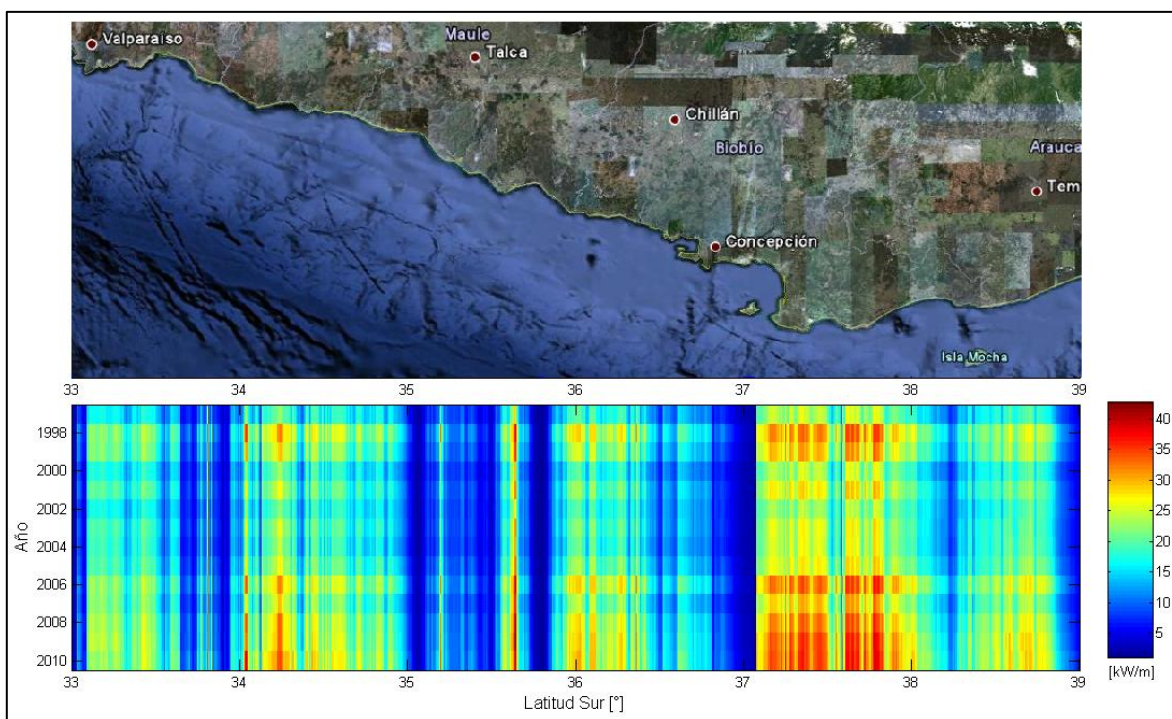


Figura 4.5 Variación latitudinal anual de flujo medio de potencia (P) a una profundidad de 50 m.
Fuente: Elaboración propia

Utilizando los datos correspondientes a la mediana del flujo de potencia para el veril 50 m, y siguiendo los pasos mencionados en la metodología adoptada, se elaboró un ranking preliminar de los sitios con mayor potencia. La tabla 4.1 muestra este ranking.

En esta tabla también se muestra la probabilidad de excedencia del 10% (P10%), con el fin de mostrar la variabilidad del recurso en estos puntos. Las ubicaciones presentan el nombre del sector correspondiente, ubicado gracias a programas de geoposición global (Google Earth, Tago).

Para cada una de las ubicaciones del listado se incluyó la distancia al SIC y al puerto más cercano. Con estos datos se desarrolló el análisis multicriterio, el que permite jerarquizar los sitios con el puntaje ponderado de cada uno. Las figuras 4.6 y 4.7 muestran el mapa del SIC, incluyendo además los 24 sitios en estudio y los puertos considerados. La tabla 4.2 muestra los valores de cada variable por sitio, así como el nombre de la subestación y del puerto más cercano. La tabla 4.3 muestra el valor escalado por variable para cada sitio según el criterio establecido, además del resultado final calculado en base a la ponderación otorgada a cada una de las variables. Esta tabla se encuentra ordenada de acuerdo al resultado final. Como ayuda a la comparación de ambos rankings, se incluye una columna con la ubicación del sitio en el ranking basado en el valor de potencia.

Tabla 4-1: Ranking preliminar para selección de hotspots, en base al valor de potencia para el cuantil 50%

Nº	UBICACION	Latitud [°]	Longitud W [°]	Potencia (P50%) [kW/m]	Potencia (P10%) [kW/m]
1	PUNTA CARRANZA	-35,64	-72,62	35,57	72,07
2	PUNTA MORHUILLA	-37,78	-73,60	33,22	78,74
3	PUNTA LEBU	-37,61	-73,68	31,71	75,03
4	PUNTA LA ROSA	-37,36	-73,69	31,25	73,58
5	PUNTA LAVAPIE	-37,25	-73,68	31,13	72,26
6	PUNTA DEL TORO	-33,81	-71,81	31,12	43,23
7	TOPOCALMA	-34,04	-71,94	29,44	67,99
8	MELA - NORTE ITATA	-36,36	-72,86	27,09	82,01
9	CONSTITUCION NORTE	-35,20	-72,36	26,95	70,07
10	PUNTA NUGURE - PUYAI	-36,03	-72,78	25,95	61,84
11	LOBERIA	-38,71	-73,47	25,22	52,83
12	IGLESIA DE PIEDRA - COBQUECURA	-36,09	-72,82	25,03	60,44
13	MONTE ZORRO	-36,27	-72,82	24,97	61,03
14	PUNTA LOBOS	-34,43	-72,05	24,80	58,61
15	PUNTA DE TRALCA	-33,42	-71,73	23,51	55,35
16	RUCALONCO	-34,60	-72,05	22,94	53,57
17	PUNTA CURAUMILLA	-33,11	-71,75	22,41	52,25
18	BOYERCURA	-34,72	-72,11	22,26	53,37
19	PUNTA LOROS	-33,18	-71,71	22,13	51,51
20	PUNTA DE GALLO - TUNQUEN	-33,26	-71,68	21,59	51,06
21	PUNTA PEÑABLANCA	-33,37	-71,71	20,45	46,59
22	PUNTILLA DEL INFIERNO - DUAO	-34,89	-72,18	19,88	47,33
23	PUNTA VERA	-33,59	-71,70	18,66	40,94
24	NORTE PENINSULA TUMBES	-36,61	-73,14	18,35	43,98

Fuente: Elaboración propia

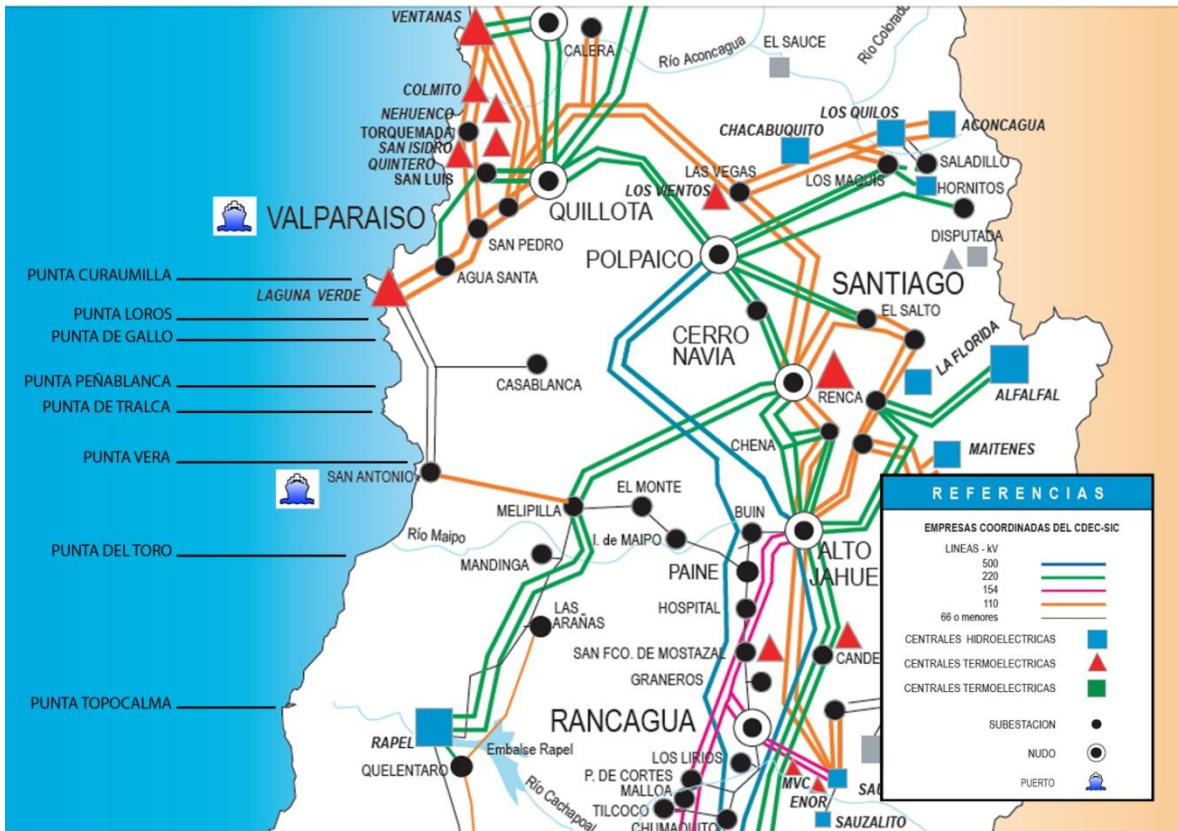


Figura 4.6 Mapa 1 de sitios seleccionados, incluyendo ubicación del SIC y los puertos utilizados
Fuente: Elaboración propia

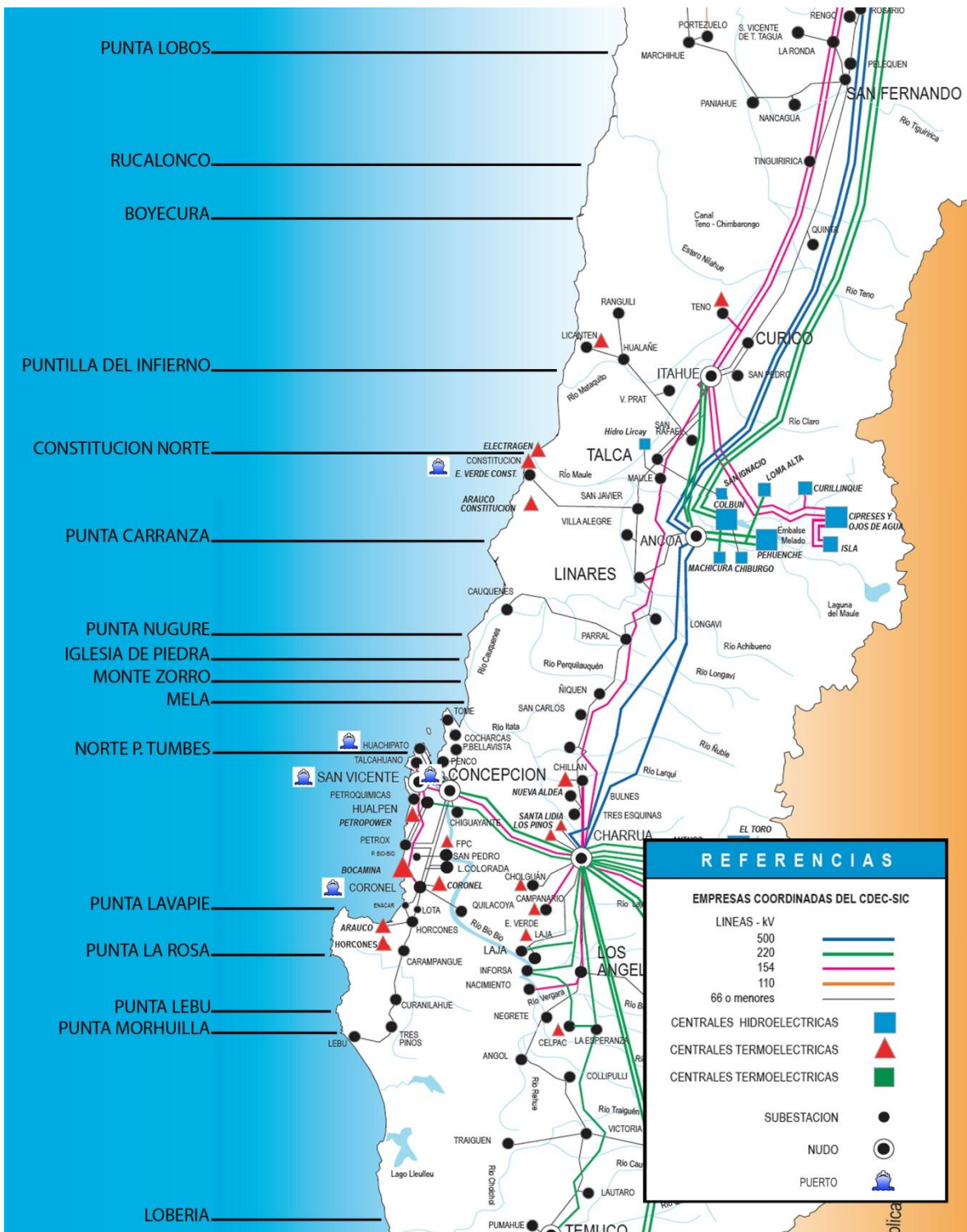


Figura 4.7 Mapa 21 de sitios seleccionados, incluyendo ubicación del SIC y los puertos utilizados.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2: Variables con sus valores, nombres de la subestación y puerto más cercano a cada uno de los sitios, ordenados por valor de potencia.

N°	UBICACION	Potencia (P50%) [kW/m]	Distancia al SIC [Km]	Subestación SIC	Distancia puerto [Km]	Puerto	Pendiente Media
1	PUNTA CARRANZA	35,57	38	CONSTITUCION	40	MAGUILLINES	0,103
2	PUNTA MORHUILLA	33,22	20	LEBU	97	CORONEL	0,072
3	PUNTA LEBU	31,71	4	LEBU	83	CORONEL	0,120
4	PUNTA LA ROSA	31,25	28	LEBU	62	CORONEL	0,051
5	PUNTA LAVAPIE	31,13	37	CAMPANGUE	55	CORONEL	0,016
6	PUNTA DEL TORO	31,12	32	SAN ANTONIO	31	SAN ANTONIO	0,120
7	TOPOCALMA	29,44	36	QUELENTARO	62	SAN ANTONIO	0,144
8	MELA - NORTE ITATA	27,09	24	TOME	37	LIRQUEN	0,120
9	CONSTITUCION NORTE	26,95	16	CONSTITUCION	14	MAGUILLINES	0,144
10	PUNTA NUGURE - PUYAI	25,95	40	CAUQUENES	73	LIRQUEN	0,240
11	LOBERIA	25,22	55	CHIVILCAN	118	CORRAL	0,003
12	IGLESIA DE PIEDRA - COBQUECURA	25,03	44	CAUQUENES	66	LIRQUEN	0,180
13	MONTE ZORRO	24,97	35	TOME	48	LIRQUEN	0,240
14	PUNTA LOBOS	24,80	38	MARCHIHUE	105	SAN ANTONIO	0,360
15	PUNTA DE TRALCA	23,51	21	SAN ANTONIO	20	SAN ANTONIO	0,045
16	RUCALONCO	22,94	35	RANGUILI	87	MAGUILLINES	0,180
17	PUNTA CURAUMILLA	22,41	20	AGUA SANTA	15	VALPARAISO	0,055
18	BOYERCURA	22,26	31	RANGUILI	72	MAGUILLINES	0,019
19	PUNTA LOROS	22,13	20	AGUA SANTA	19	VALPARAISO	0,021
20	PUNTA DE GALLO - TUNQUEN	21,59	24	AGUA SANTA	28	VALPARAISO	0,015
21	PUNTA PEÑABLANCA	20,45	26	SAN ANTONIO	24	SAN ANTONIO	0,027
22	PUNTILLA DEL INFIERNO - DUAO	19,88	22	LICANTEN	52	MAGUILLINES	0,180
23	PUNTA VERA	18,66	9	SAN ANTONIO	7	SAN ANTONIO	0,008
24	NORTE PENINSULA TUMBES	18,35	4	HUACHIPATO	10	SAN VICENTE	0,013

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3: Nuevo ranking con valores escalados por variable y resultado final a partir de la ponderación de cada una de las variables. Se presenta además el ranking anterior de cada sitio.

Nº	UBICACION	Escala Potencia (Pond. 0.6)	Escala SIC (Pond. 0.2)	Escala Puertos (Pond. 0.1)	Escala Pendiente (Pond. 0.1)	Resultado Ponderación	Ranking Anterior
1	PUNTA CARRANZA	100,0	62,0	73,3	74,3	87,2	1
2	PUNTA LEBU	89,1	96,0	44,7	70,0	84,2	3
3	PUNTA MORHUILLA	93,4	80,0	35,3	82,0	83,8	2
4	PUNTA LA ROSA	87,9	72,0	58,7	87,1	81,7	4
5	PUNTA LAVAPIE	87,5	63,0	63,3	95,9	81,0	5
6	PUNTA DEL TORO	87,5	68,0	79,3	70,0	81,0	6
7	CONSTITUCION NORTE	75,8	84,0	90,7	64,0	77,7	9
8	MELA - NORTE ITATA	76,1	76,0	75,3	70,0	75,4	8
9	TOPOCALMA	82,8	64,0	58,7	64,0	74,7	7
10	PUNTA DE TRALCA	66,1	79,0	86,7	88,7	73,0	15
11	PUNTA LOROS	62,2	80,0	87,3	94,9	71,5	19
12	PUNTA CURAUMILLA	63,0	80,0	90,0	86,1	71,4	17
13	PUNTA DE GALLO - TUNQUEN	60,7	76,0	81,3	96,3	69,4	20
14	NORTE PENINSULA TUMBES	51,6	96,0	93,3	96,8	69,2	24
15	PUNTA VERA	52,5	91,0	95,3	98,0	69,0	23
16	PUNTA PEÑABLANCA	57,5	74,0	84,0	93,3	67,0	21
17	BOYERCURA	62,6	69,0	52,0	95,3	66,1	18
18	MONTE ZORRO	70,2	65,0	68,0	39,9	65,9	13
19	PUNTA NUGURE - PUYAI	73,0	60,0	51,3	39,9	64,9	10
20	IGLESIA DE PIEDRA - COBQUECURA	70,4	56,0	56,0	55,0	64,5	12
21	LOBERIA	70,9	45,0	21,3	99,3	63,6	11
22	RUCALONCO	64,5	65,0	42,0	55,0	61,4	16
23	PUNTILLA DEL INFIERNO - DUAO	55,9	78,0	65,3	55,0	61,2	22
24	PUNTA LOBOS	69,7	62,0	30,0	9,9	58,2	14

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre este nuevo ranking, y el presentado en la tabla 4.1 radica principalmente en la cercanía a centros de consumo, ya que los lugares donde existe un puerto, o una subestación, corresponden generalmente a zonas con una gran concentración de población.

Se realizó un análisis de sensibilidad de los ponderadores utilizados, distinguiendo 3 casos, con el fin de estudiar la variabilidad del ranking ante el cambio en la ponderación utilizada. La tabla 4.4 detalla los tres casos estudiados y la tabla 4.5 presenta los resultados obtenidos. Las celdas verdes representan inmovilidad en el ranking, las rojas una alza y las azules un descenso.

Tabla 4-4 Variación de ponderadores para Análisis de Sensibilidad.

CASO	Ponderación Potencia	Ponderación SIC	Ponderación Puertos	Ponderación Pendiente
1	0.65	0.2	0.1	0.5
2	0.6	0.2	0.2	0.0
3	0.7	0.2	0.1	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5 Resultados obtenidos para distintos ponderadores por cada variable. El color verde indica que mantiene su posición en el ranking con respecto a la ponderación inicial, el azul que baja y el rojo que sube.

Ranking	Ponderación Base	Ranking Caso 1	Ranking Caso 2	Ranking Caso 3	Dif. Máx c/r a Ranking Base
1	PUNTA CARRANZA	1	1	1	0
2	PUNTA LEBU	2	3	2	1
3	PUNTA MORHUILLA	3	5	3	2
4	PUNTA LA ROSA	5	6	5	2
5	PUNTA LAVAPIE	6	7	6	2
6	PUNTA DEL TORO	4	2	4	-4
7	CONSTITUCION NORTE	7	4	7	-3
8	MELA - NORTE ITATA	8	8	9	1
9	TOPOCALMA	9	9	8	-1
10	PUNTA DE TRALCA	10	10	10	0
11	PUNTA LOROS	12	12	13	2
12	PUNTA CURAUMILLA	11	11	11	-1
13	PUNTA DE GALLO - TUNQUEN	13	16	16	3
14	NORTE PENINSULA TUMBES	15	13	17	3
15	PUNTA VERA	16	14	18	3
16	PUNTA PEÑABLANCA	19	17	20	4
17	BOYERCURA	20	21	21	4
18	MONTE ZORRO	14	15	12	-6
19	PUNTA NUGURE - PUYAI	17	18	14	-5
20	IGLESIA DE PIEDRA - COBQUECURA	18	19	15	-5
21	LOBERIA	21	24	24	3
22	RUCALONCO	22	23	22	1
23	PUNTILLA DEL INFIERNO - DUAO	23	20	23	-3
24	PUNTA LOBOS	24	22	19	-5

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se aprecia que al variar los ponderadores utilizados, las primeras 5 ubicaciones no se ven tan afectadas, ya que su posición en el ranking depende principalmente de la potencia. Las mayores diferencias se presentan en el caso 3, en el cual se elimina el ponderador asociado a la pendiente del fondo marino, y se aumenta a 0.7 el ponderador de la potencia. Este caso se incluye, ya que la base de datos topobatimétrica disponible, al presentarse en un mallado de 30'' x 30'', otorga un bajo nivel de precisión. En este caso, el ranking obtenido se acerca al presentado en la tabla 4.1, el cual depende solamente de la

energía disponible. Finalmente, y ya que la variación presente en los tres casos es baja, más aún en las primeras ubicaciones del ranking, se acepta la ponderación seleccionada, dejando además, como referencia, el ranking elaborado a partir del valor de potencia para cada ubicación.

De esta manera se logró clasificar, evaluando todas las aristas al alcance de este estudio, los sitios con mayor potencial energético. Para cada uno de estos sitios se realizará un análisis estadístico y de variabilidad, con el fin de estudiar en profundidad el recurso, y así determinar las características de cada sitio.

4.2. Cuantificación de la energía del oleaje en los *hotspots* seleccionados

4.2.1. Clima de oleaje

A continuación, a partir de los parámetros de resumen obtenidos, se presentan registros de distintos estados de mar, asociados a cada uno de los *hotspots* seleccionados.

La figura 4.8 muestra gráficamente la serie temporal de datos para altura significativa de uno de los *hotspots* seleccionados, graficada a partir del valor medio mensual. En este caso corresponde al sitio ubicado en Punta Carranza, el cual cuenta con la mayor cantidad de potencia de oleaje registrada.

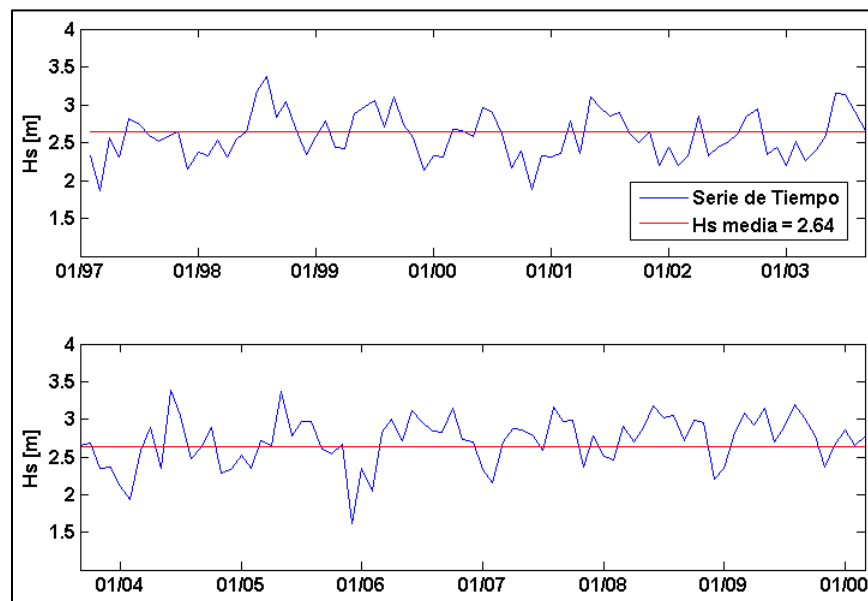


Figura 4.8 Serie de tiempo para HS utilizando valores medios mensuales, para el sitio en estudio ubicado en Punta Carranza.

Fuente: Elaboración propia

En esta serie de tiempo se aprecia claramente el carácter cíclico que adquiere el oleaje, encontrándose los máximos en el periodo invernal y los mínimos asociados al verano. Se explica su alto contenido energético debido a la baja variabilidad del recurso y a los elevados valores de H_s .

Con estos registros de oleaje, para cada uno de los *hotspots* seleccionados, es posible caracterizar de distintas formas el clima de oleaje. La figura 4.9 presenta los histogramas de densidad de probabilidad de H_s y T_p para los 3 primeros sitios en el ranking presentado en la tabla 4.3. Además se presenta el ajuste Rayleigh para cada uno de los histogramas de H_s .

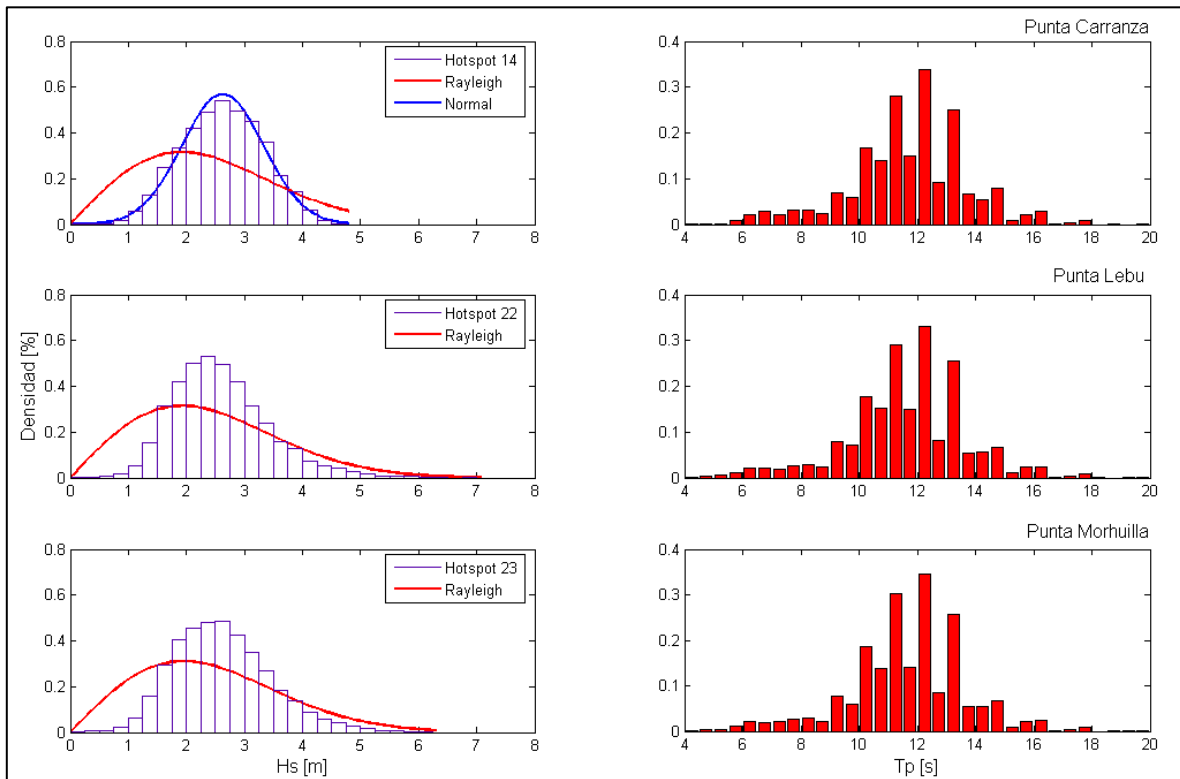


Figura 4.9 Histogramas de densidad de altura significativa y periodo peak para los primeros tres sitios en la selección realizada.

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos histogramas se puede apreciar que la distribución de alturas significativas se presenta, generalmente, con una leve asimetría hacia la izquierda, lo cual reafirma la utilización de la mediana como medida de tendencia central. En el caso más energético, correspondiente a Punta Carranza, la distribución de alturas presenta una tendencia normal, tal como lo muestra la figura. Al analizar la batimetría y el comportamiento de los puntos cercanos no se encuentra ninguna anomalía que explique la diferencia de su distribución con el comportamiento de los otros sitios. Existe otra ubicación que presenta un comportamiento totalmente distinto a los presentados por los otros sitios seleccionados. El caso corresponde al sitio ubicado en Punta del Toro, sexto lugar en el ranking elaborado, la cual presenta su distribución sesgada hacia la derecha, con una marcada concentración de altura de olas. Este comportamiento tendría su explicación en la profundidad del sitio seleccionado, la cual no supera los 10 m, siendo esta la menor profundidad de las seleccionadas como *hotspots*. Además, la zona correspondiente a Punta del Toro presenta una geografía costera irregular, por lo cual, los fenómenos como difracción y reflexión pueden afectar los valores obtenidos. La figura 4.10 presenta este caso.

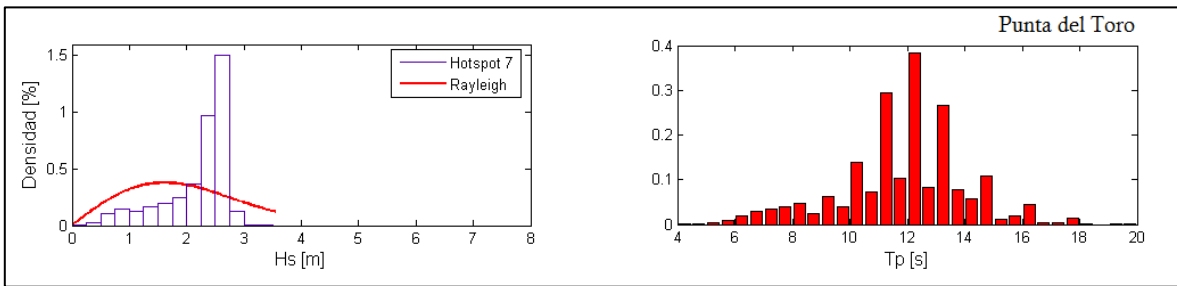


Figura 4.10 Histograma de densidad de altura significativa y periodo peak en Punta del Toro.
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución de los valores de periodo peak, esta responde de igual manera para todas las ubicaciones en estudio, tal como era de esperar al identificar la casi nula variabilidad latitudinal de este parámetro. Cabe destacar que en todas las ubicaciones, la moda se concentra en valores cercanos a los 12 s. Los restantes histogramas se presentan en el anexo C.

La tabla 4.6 presenta los valores correspondientes al P50% para los parámetros de resumen de cada sitio seleccionado, ordenados de norte a sur, exponiendo el valor para las dos estaciones más características, invierno y verano.

En cuanto a la altura significativa de ola, la tendencia general de los datos indica un leve aumento de norte a sur, el cual se aprecia aun más en invierno. Además, se nota claramente que los valores en invierno son mayores a los presentes en verano. Sin embargo la variabilidad que presenta es baja, ya que la diferencia entre estas dos estaciones nunca supera los 0.7 m.

La variación latitudinal del periodo peak, tal como se expresó con anterioridad, es casi nula. En cuanto a la variación del parámetro entre las dos estaciones, presenta una leve diferencia a favor en invierno, pero, al igual que el caso de la H_s , no presenta una variación significativa, ya que nunca supera 1 segundo de diferencia entre ambas.

En el caso de la dirección de oleaje principal, esta se encuentra influenciada por la batimetría de fondo así como por la ubicación del campo generador de oleaje. En este caso se aprecia levemente la diferencia entre ambas estaciones, debido principalmente a la acción de los dos principales campos generadores que afectan la costa chilena, pasando de un oleaje SW en verano a un SWS en invierno. De igual manera, se puede apreciar que, salvo algunas locaciones, mientras más al sur del territorio se encuentra el sitio en estudio, mayor es la componente sur del oleaje medio en esa ubicación.

Tabla 4-6: Parámetros de resumen estacionales por sitio seleccionado, ordenados de norte a sur

HOTSPOT	HS [m]		TP [s]		MWD [°]	
	VERANO	INVIERNO	VERANO	INVIERNO	VERANO	INVIERNO
PUNTA CURAUMILLA	1,94	2,31	11,2	12,0	232,0	234,8
PUNTA LOROS	1,92	2,29	11,2	12,0	237,4	241,1
PUNTA DE GALLO - TUNQUEN	1,90	2,29	11,2	12,1	232,3	234,1
PUNTA PEÑABLANCA	1,87	2,23	11,1	12,0	238,5	242,3
PUNTA DE TRALCA	1,96	2,39	11,2	12,1	235,8	238,9
PUNTA VERA	1,76	2,14	11,1	12,0	239,1	242,2
PUNTA DEL TORO	2,34	2,48	11,3	12,2	286,5	284,4
TOPOCALMA	2,06	2,68	11,3	12,2	267,8	270,9
PUNTA LOBOS	2,01	2,49	11,2	12,1	239,0	242,7
RUCALONCO	1,94	2,39	11,2	12,0	242,3	246,4
BOYERCURA	1,90	2,37	11,2	12,1	243,4	246,8
PUNTILLA DEL INFIERNO - DUAO	1,79	2,25	11,2	12,0	246,6	250,0
CONSTITUCION NORTE	1,95	2,60	11,4	12,2	278,3	281,4
PUNTA CARRANZA	2,36	2,90	11,2	12,0	234,8	237,7
PUNTA NUGURE - PUYAI	2,01	2,58	11,2	12,1	243,0	245,9
IGLESIA DE PIEDRA - COBQUECURA	1,96	2,54	11,2	12,1	243,9	246,8
MONTE ZORRO	1,96	2,54	11,2	12,0	245,1	247,7
MELA - NORTE ITATA	1,96	2,66	11,3	12,1	265,3	271,5
NORTE PENINSULA TUMBES	1,72	2,19	11,2	12,0	252,0	255,9
PUNTA LAVAPIE	2,27	2,81	11,2	12,0	236,3	240,8
PUNTA LA ROSA	2,26	2,82	11,2	12,0	236,3	240,8
PUNTA LEBU	2,28	2,85	11,2	12,0	237,7	242,2
PUNTA MORHUILLA	2,31	2,87	11,2	12,0	237,4	239,4
LOBERIA	2,04	2,47	11,3	12,0	249,6	254,0

Fuente: Elaboración propia

Para apreciar de mejor manera la diferencia estacional, se elaboraron rosas de oleaje para cada uno de los sitios en estudio. La figura 4.11 presenta las rosas de oleaje para los 3 primeros sitios en el ranking mostrado en la tabla 4.3. Estos gráficos muestran la concentración de alturas de olas para distintas direcciones. Los círculos punteados representan el porcentaje de olas que tienen la dirección indicada por las barras, los colores indican los distintos valores de H_s presentes en cada dirección, y la división de cada barra la cantidad de olas con esa H_s . Se puede apreciar el leve cambio en la dirección en ambas estaciones, manteniendo una tendencia marcada desde el SW, así como el aumento en los valores de altura significativa de ola en invierno.

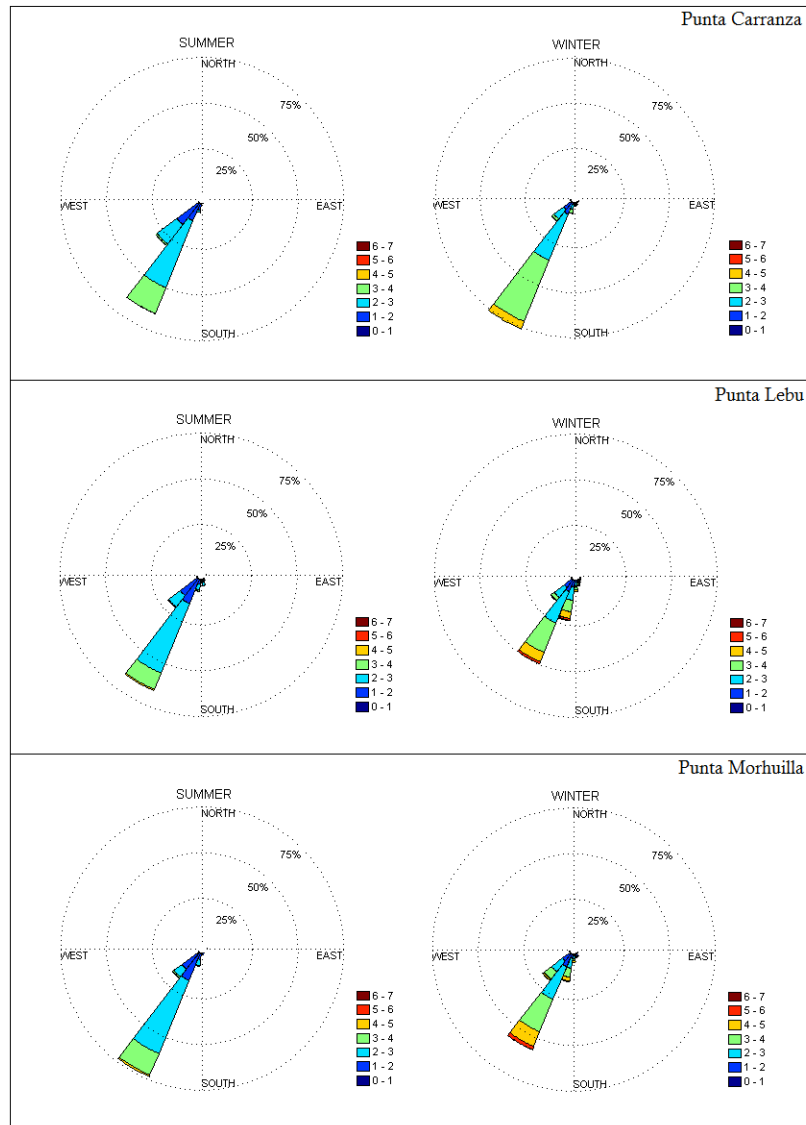


Figura 4.11 Rosas de oleaje estacional para los primeros tres sitios en la selección realizada.
Fuente: Elaboración propia

Al analizar las rosas de oleaje cabe destacar que, a diferencia de lo esperado debido al clima de oleaje que afecta a Chile durante los meses de verano, es escasa la participación del *swell* del norte en los sitios estudiados. Esto puede tener relación con los errores cometidos al modelar los datos y a la propagación de ellos. Tras revisar los datos utilizados del modelo NWW3, no existe una participación dominante del *swell* del norte en los meses de verano, razón por la cual los datos extraídos como resultados de la propagación no presentan una concentración de oleaje proveniente del hemisferio norte. Además, hay que tener en cuenta la participación de la batimetría en la determinación de la dirección del oleaje en estas zonas, y lo grueso que es el mallado disponible.

Existen un par de casos en que la dirección reinante es principalmente sur (S). El más claro de estos casos corresponde a Punta del Toro, sitio que además presenta una distribución de alturas significativas fuera de lo normal. Este comportamiento, al igual que la distribución

de alturas, se explicaría por la baja profundidad del sitio seleccionado y por su configuración geográfica. La figura 4.12 grafica este caso. Las restantes rosas de oleaje se presentan en el anexo D.

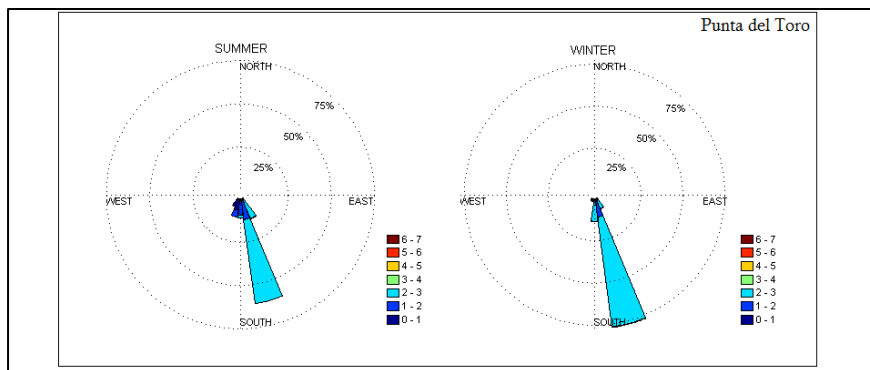


Figura 4.12 Rosas de oleaje estacional Punta del Toro.
Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Distribución espacial de la potencia

En base a los parámetros de resumen obtenidos, es posible obtener los valores de potencia para cada uno de los estados de mar de los sitios seleccionados. Considerando el valor de potencia excedido el 50% de las veces, se elaboró un gráfico que muestra su distribución espacial (en este caso latitudinal), tanto para la totalidad de datos en el veril 50 como para los *hotspots* seleccionados. El gráfico se muestra en la figura 4.13.

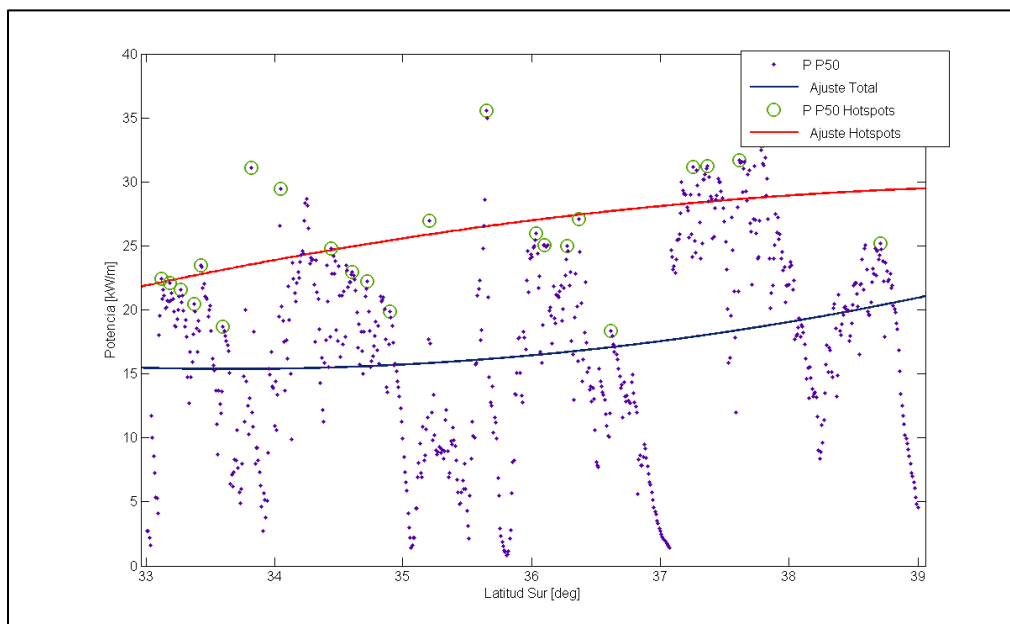


Figura 4.13 Distribución latitudinal de la potencia para toda la costa estudiada y en cada hotspot, y su regresión cuadrática
Fuente: Elaboración propia

A partir de este gráfico se logra verificar la tendencia al aumento que adquiere la potencia a medida que se avanza más hacia el sur. Sin embargo, en comparación con otros estudios semejantes (Acuña, 2008), la relación encontrada al realizar una regresión cuadrática de los datos es muy baja para decir que existe una buena correlación entre los datos muestreados y la curva ajustada. Esto se debe principalmente a cuatro razones. En primer lugar, la zona investigada en este estudio es de menor tamaño que la presentada en el estudio referido, por lo tanto la variación latitudinal debe ser menor en este trabajo. Por otra parte, la cantidad de puntos utilizados (*hotspots*) es mayor a la utilizada en ese trabajo, por consiguiente, la distancia entre estos puntos es mucho menor. Además, en esta investigación se incluyen sitios que no son necesariamente los de mayor contenido de potencia, sino que corresponden a sitios donde teóricamente debería existir gran concentración de energía o sitios que se eligieron con el único motivo de estudiar su variabilidad. Y finalmente, la diferencia en la resolución de batimetría utilizada es realmente importante, siendo ésta mucho menos detallada en este estudio. En la figura 4.14 se muestra la distribución espacial obtenida en el estudio referido (Acuña, 2008), analizado en los primeros capítulos de esta investigación.

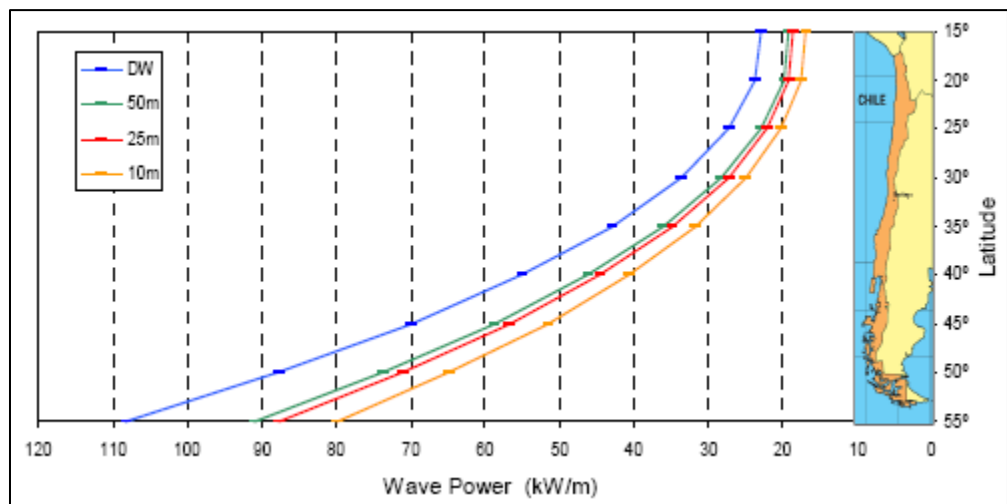


Figura 4.14 Distribución de la potencia del oleaje a lo largo de la costa chilena como función de la profundidad
Fuente: Acuña, 2008

A pesar de esto, el gráfico obtenido en este estudio indica claramente, tal como lo afirman estudios anteriores [Acuña, (2008); Barstow et al., (1998)], que la potencia tiende a aumentar de norte a sur.

4.2.3. Histogramas de flujo de potencia media

A continuación se presentan algunos histogramas de flujo de potencia media, tanto en régimen anual como mensual. A partir de ellos es posible apreciar la variabilidad del recurso a nivel estacional y anual, así como determinar periodos que presentan mayores alturas significativas de ola.

La figura 4.15 muestra los histogramas de potencia media mensual de oleaje para los 2 primeros sitios en el ranking de la tabla 4.3, así como uno intermedio y el con menor contenido energético. Para calcular el valor medio de cada mes por cada año, se utilizó la mediana, para evitar influencia de los valores extremos. Luego, para obtener el valor medio para un mismo mes, considerando los valores mensuales de todos los años, se utilizó la media aritmética, ya que al corresponder a un número menor de datos, se deben considerar los valores extremos, teniendo en cuenta que en este caso la diferencia en la utilización de media aritmética o mediana es mínima. Se incluye también, la serie de valores máximos y mínimos de potencia de oleaje en cada mes, con el fin de ilustrar la variabilidad presente entre los meses de distintos años.

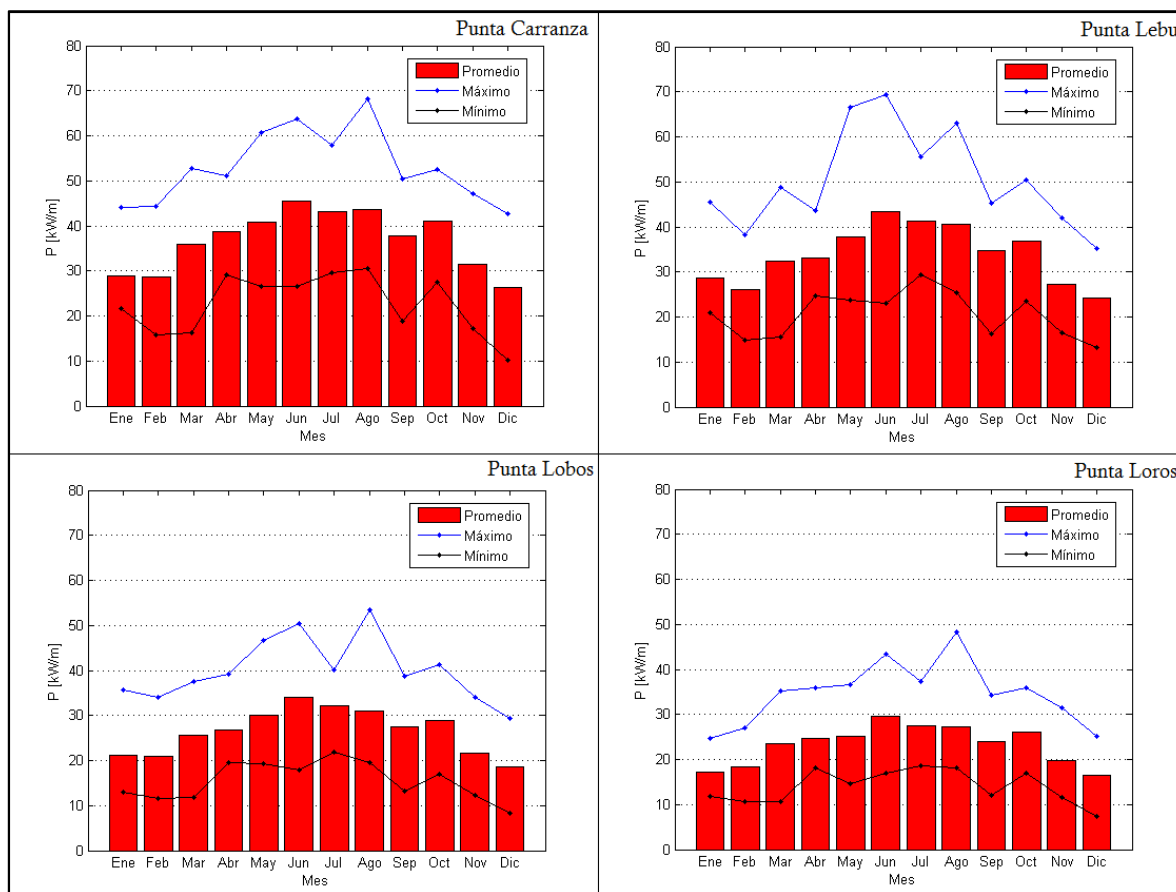


Figura 4.15 Histogramas de potencia media mensual de oleaje para Punta Carranza, Punta Lebu, Punta Loros y Punta Lobos.

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia claramente que los valores máximos se encuentran en los meses de invierno, así como los mínimos se presentan en verano. Todos los sitios estudiados presentan configuraciones semejantes.

La figura 4.16 muestra los histogramas de potencia media anual de oleaje para los mismos sitios mostrados en la figura anterior. Se incluye también el valor medio de potencia para cada sitio. A partir de estos gráficos se puede inferir un comportamiento cíclico de la

variación interanual, sin embargo es necesario una mayor cantidad de años para poder justificarlo. En el anexo E se incluyen los histogramas, tanto mensuales como anuales, para cada uno de los sitios en estudio.

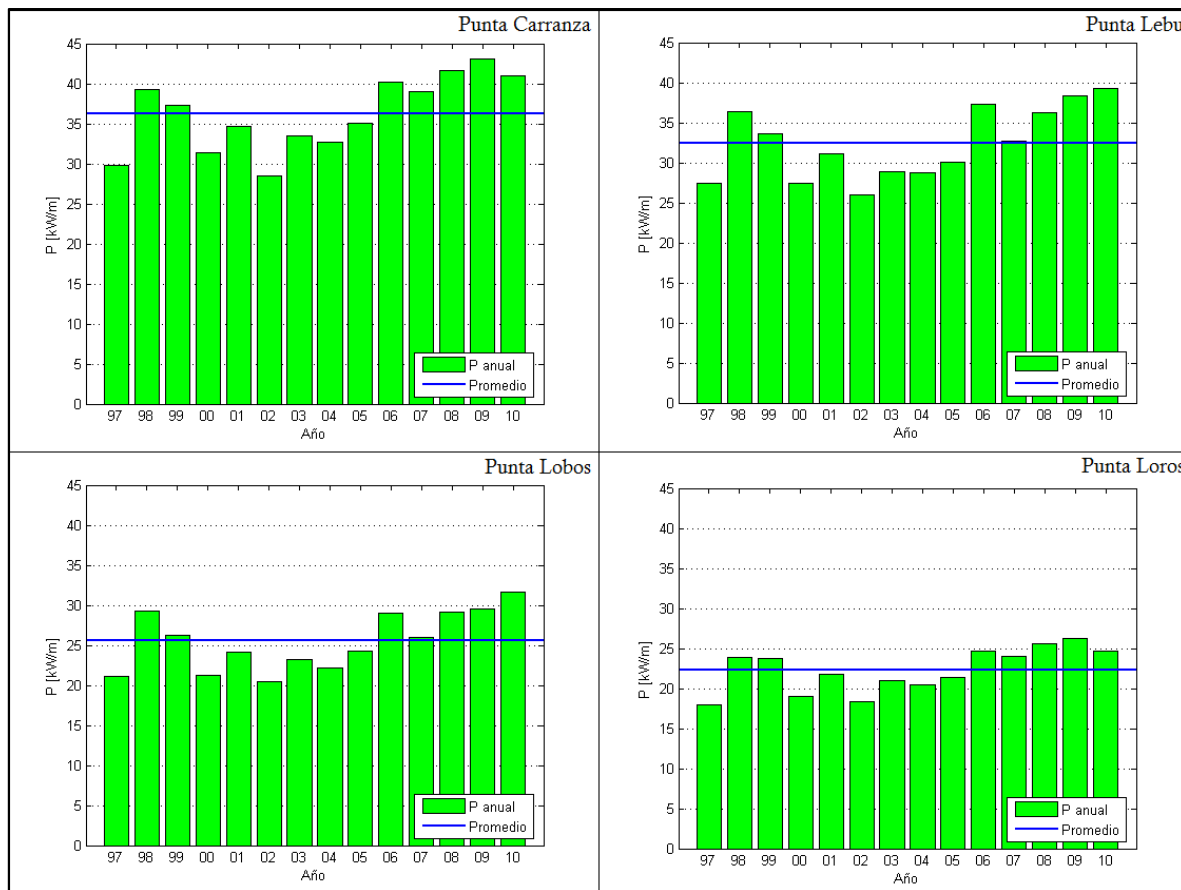


Figura 4.16 Histogramas de potencia media anual de oleaje para Punta Carranza, Punta Lebu, Punta Loros y Punta Lobos.

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Variabilidad del flujo de potencia media

A partir de la información recopilada en los histogramas, es posible analizar la variabilidad del recurso en cada sitio seleccionado. De esta manera, se calculó la variabilidad interanual e intermensual (o estacional) del recurso, a partir de la diferencia entre el valor máximo y mínimo presente en un histograma, con respecto al valor medio del recurso en ese sitio (correspondiente al valor utilizado para la elaboración del ranking de la tabla 4.1). La figura 4.17 presenta la variabilidad de la potencia de oleaje, tanto interanual como estacional, para cada uno de los sitios seleccionados, ordenados de norte a sur.

Cabe destacar que en todos los sitios, la variabilidad intermensual supera a la interanual. Esto se debe, principalmente, a la diferencia de altura de ola entre las estaciones, principalmente de verano e invierno, lo cual, al influir de manera cuadrática en la obtención de la potencia de oleaje, se traduce en una mayor diferencia entre los valores de potencia para los meses de cada una de las estaciones.

En el caso de la variabilidad intermensual, la cual es la más importante en el sector en estudio, esta varía, principalmente, entre un 50% y 80%, a excepción de dos valores que se escapan a la regla. El *hotspot* 7, el cual corresponde a Punta del Toro, presenta la menor variabilidad intermensual, con un valor cercano al 35% con respecto a su valor medio. En tanto, el *hotspot* 18, correspondiente a Mela, al norte del Itata, presenta la mayor variabilidad, con un valor cercano al 85%.

En tanto, con respecto a la variabilidad interanual, esta oscila, generalmente, entre un 35% y 50%, sin embargo, al igual que el caso anterior, existen dos valores que escapan a esta regla. Nuevamente Punta del Toro presenta el menor valor de variabilidad, con un 30%. Por otra parte, el mayor valor lo presenta el *hotspot* 8, correspondiente a Topocalma, con una variabilidad cercana al 60%.

Finalmente, se puede concluir que el sitio ubicado en Punta del Toro presenta la menor variabilidad, tanto estacional como interanual, resultando muy atractivo para este estudio. Por otra parte, los sitios ubicados en Topocalma, Constitución Norte y Mela presentan un alto porcentaje de variabilidad con respecto a su valor medio.

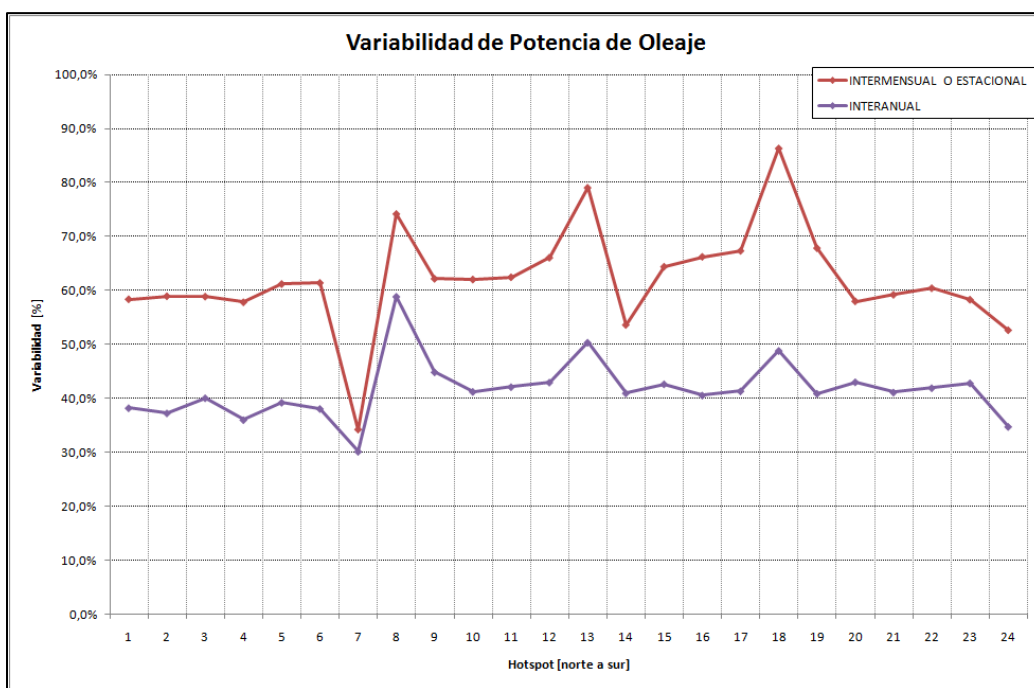


Figura 4.17 Variabilidad de potencia de oleaje – Interanual e intermensual.
Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Probabilidad de excedencia

A partir de la serie de datos de potencia, tanto la serie completa como los datos estacionales, se elaboraron las curvas de probabilidad de excedencia. La figura 4.18 muestra dicha curva para 4 ubicaciones distintas, que corresponden a las mismas ilustradas en las figuras 4.15 y 4.16. El anexo F contiene los gráficos para todas las ubicaciones.

La figura 4.19 muestra la potencia de oleaje para tres niveles de excedencia, tanto para la totalidad de datos, como para los datos estacionales de verano e invierno. Este gráfico se elaboró a partir de las curvas de probabilidad de excedencia. Se puede apreciar que a mayor valor de excedencia, menor es la variación estacional, es decir, para los valores que son excedidos el 90% del tiempo, la diferencia entre invierno y verano es mínima, menor a 5 kW/m. Sin embargo, para los valores que son excedidos un 10% del tiempo, puede ser hasta de 50 kW/m.

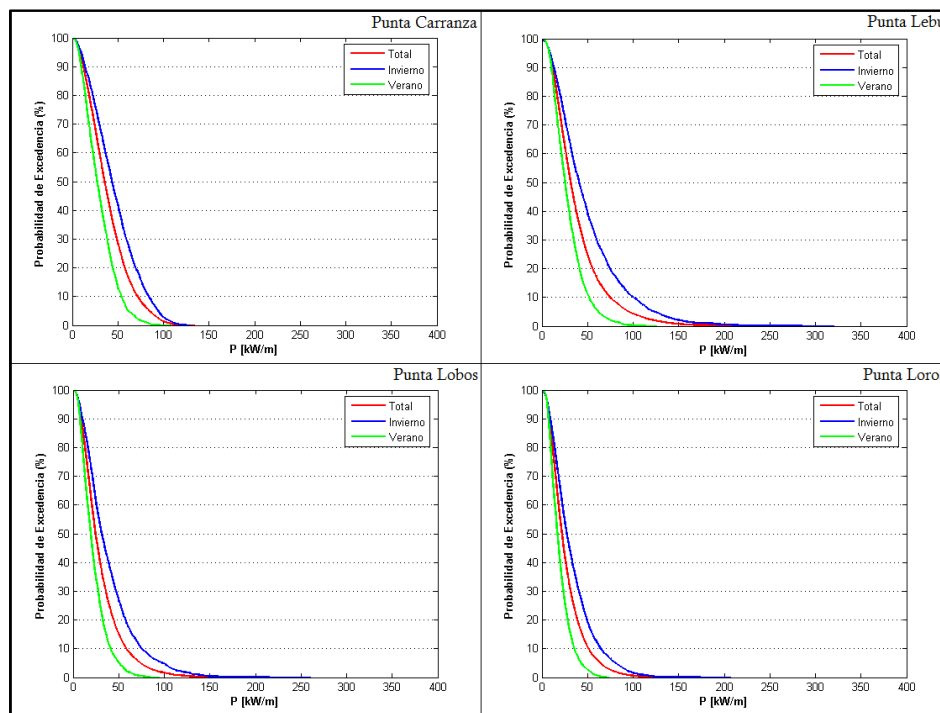


Figura 4.18 Curvas de probabilidad de excedencia de potencia de oleaje.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar también, que de norte a sur, la diferencia estacional tiende a aumentar, pero de manera leve. Llama la atención el comportamiento del *hotspot* 7, ubicado en Punta del Toro, el cual presenta un comportamiento inverso a los demás sitios, al poseer una mayor variabilidad en las probabilidades de excedencia más altas (P90%), y en los valores mínimos de excedencia, prácticamente no presenta variabilidad. Esto se explica por ser una zona de escasa profundidad, así como por su configuración geográfica local.

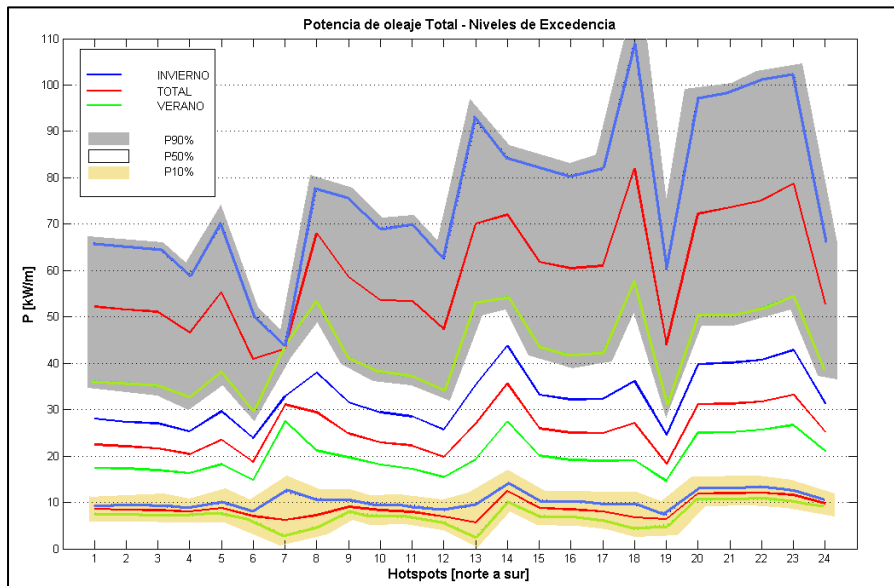


Figura 4.19 Potencia de oleaje para distintos niveles de excedencia – Datos totales y estacionales para los sitios seleccionados.

Fuente: Elaboración propia

4.2.6. Diagramas de energía y dispersión

Con el fin de visualizar de mejor manera la composición del recurso energético, en términos de la altura significativa de ola y del periodo peak, los datos obtenidos para cada uno de los sitios en estudio se presentan como diagramas combinados de energía y dispersión (Iglesias & Caraballo, 2009). Estos diagramas indican la ocurrencia de distintos estados de mar, clasificados a partir de la altura significativa y el periodo peak, y su contribución a la energía anual total, calculada para un año cualquiera de 365 días. La figura 4.20 presenta este tipo de diagramas para 3 sitios ubicados en distintas zonas geográficas.

El gráfico de la figura 4.20 muestra, con el fin de realizar un mejor análisis de cada sitio, las curvas de distintos niveles de potencia. Cabe destacar que el cálculo realizado para la obtención de los valores de potencia, tanto para las curvas de nivel, como para la energía anual, se realizó con la aproximación del periodo energético ($T_e=0.9T_p$).

El área que ocupa cada diagrama se encuentra dividida en pequeños rectángulos, de 0.5 m x 0.5 s, en los cuales el número en cada uno de ellos representa la ocurrencia (en número de horas por año) de un estado de mar, determinado por la altura y el periodo correspondiente. Los bajos valores en la parte alta del diagrama reflejan la escasa probabilidad de alturas de ola elevadas. La disposición típica de los valores en las zonas en estudio representa la correspondencia de alturas con los periodos altos, característicos de la costa chilena.

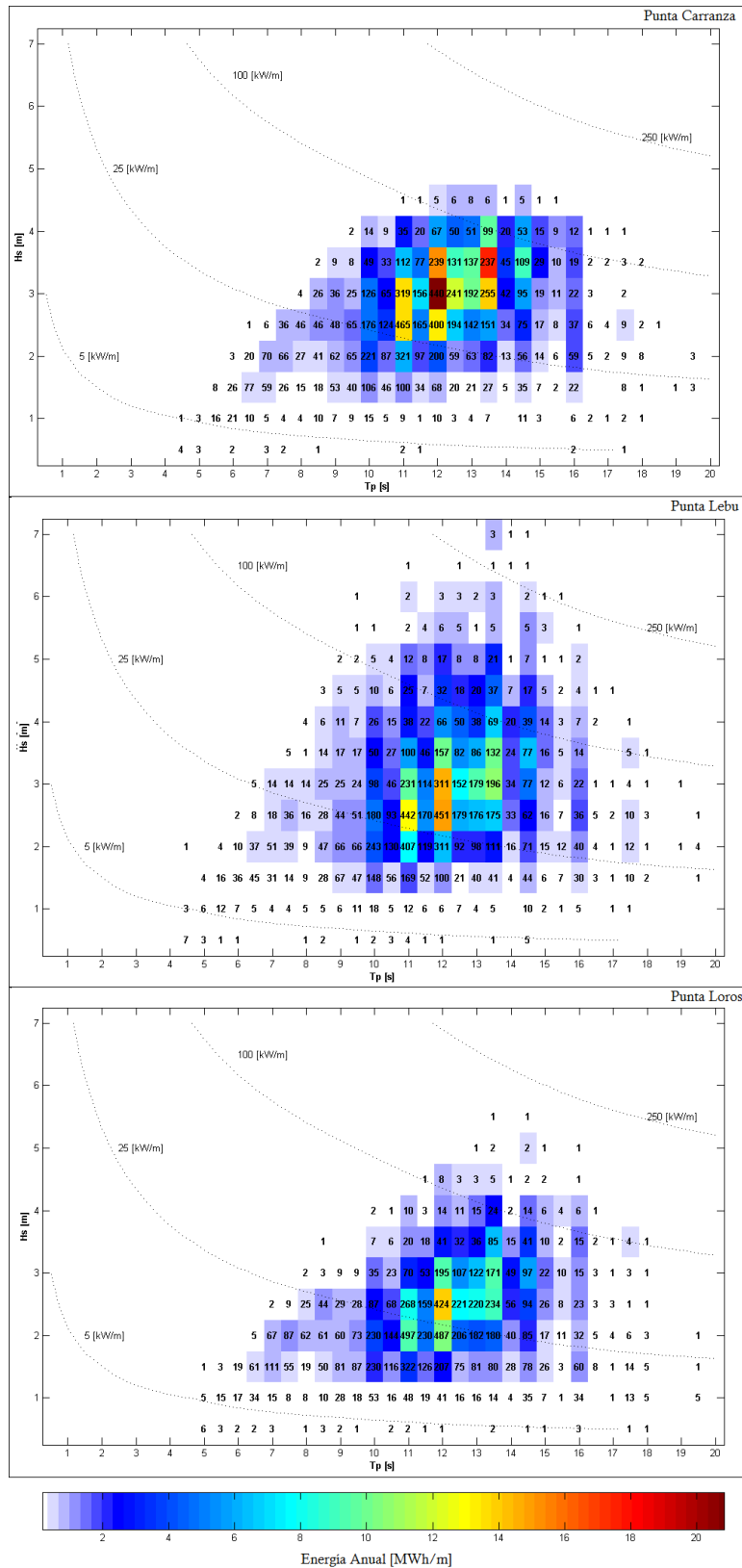


Figura 4.20 Diagrama combinado de energía y dispersión. La escala a color representa la energía total por metro de frente de ola. Los números en cada celda indican la ocurrencia de estados de mar en número de horas por año, y las curvas corresponden a las isolíneas de potencia.
Fuente: Elaboración propia

Además, cada uno de los rectángulos que subdividen el diagrama, presentan un color, el cual corresponde a la contribución, de cada estado de mar, a la energía anual total. Se puede apreciar que, no necesariamente las más altas ocurrencias se corresponden con los estados de mar que más contribuyen, debido a que, generalmente, las mayores ocurrencias se encuentran con valores de altura y periodo que generan valores de potencia relativamente bajos.

Tampoco son los valores de altura significativa más altos los que entregan una mayor contribución energética, debido a su poca ocurrencia. De hecho, la mayor cantidad de energía es entregada por olas cuya altura significativa varía entre 2 y 4 m, y su periodo oscila entre los 11 y 14 s.

Cabe destacar el comportamiento del *hotspot* ubicado en Punta del Toro, el cual se presenta en la figura 4.21. A diferencia de las otras ubicaciones, en este caso se utilizó una escala propia de energía, hasta los 36 MWh/m, ya que concentra una alta ocurrencia para los 2.5 m de altura de ola, elevando la contribución de energía para este nivel. Esto principalmente a la nula variabilidad de este sitio en cuanto a altura de ola, tal como se apreció en las secciones anteriores. Los restantes diagramas se presentan en el anexo G.

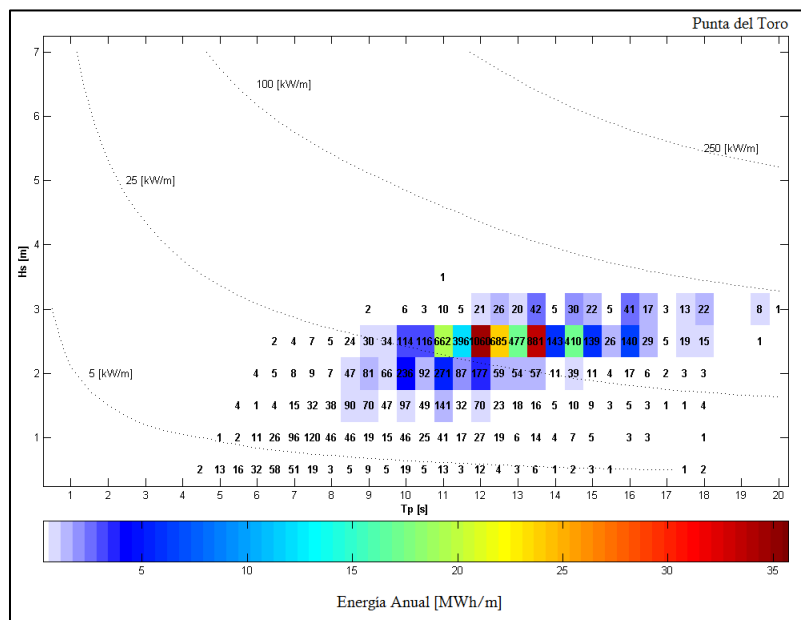


Figura 4.21 Diagrama combinado de energía y dispersión – Punta del Toro. La escala a color representa la energía total por metro de frente de ola. Los números en cada celda indican la ocurrencia de estados de mar en número de horas por año, y las curvas corresponden a las isocurvas de potencia.

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.7 entrega los datos de resumen de cada uno de estos diagramas, indicando el estado de mar asociado a la mayor contribución de energía, así como la contribución que realiza este estado al total de la energía anual, ordenados por cada *hotspot* de norte a sur.

Tabla 4-7: Mayor contribución, su estado de mar correspondiente y porcentaje de ocurrencia para cada uno de los hotspots, ordenados de norte a sur

HOTSPOT	1	2	3	4	5	6	7	8
Hs [m]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3
Tp [s]	12	12	12	12	12	12	12	13,5
Ocurrencia [%]	4,3	4,4	4,0	3,9	4,4	3,7	11,0	3,9
E [MWh/m]	13,65	13,94	12,60	12,33	13,78	11,61	34,86	20,36

HOTSPOT	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs [m]	2,5	2,5	2,5	2	3	3	2,5	2,5
Tp [s]	12	12	12	12	13,5	12	12	12
Ocurrencia [%]	4,3	4,1	3,7	5,3	2,6	4,6	4,4	4,2
E [MWh/m]	13,71	12,86	11,74	10,67	13,83	20,84	13,88	13,22

HOTSPOT	17	18	19	20	21	22	23	24
Hs [m]	2,5	3	2	2,5	3	2,5	3	2,5
Tp [s]	12	13,5	12	12	12	12	12	12
Ocurrencia [%]	4,2	2,8	5,5	4,8	3,2	4,7	3,7	4,9
E [MWh/m]	13,25	14,65	11,09	15,10	14,78	14,83	16,77	15,46

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de ocurrencia para cada estado de mar corresponde a una información muy valiosa, ya que permite el análisis individual, para cada sitio, de la potencia de salida para los distintos dispositivos presentes en la actualidad. Como se aprecia en la tabla, el porcentaje de ocurrencia se encuentra cercano al 4% para la mayoría de los sitios. Además, en algunos sitios, a pesar de existir estados de mar con mayor porcentaje de ocurrencia, los mostrados en la tabla presentan la combinación más energética de Hs y Tp.

4.2.7. Potencia de salida

En la siguiente sección se realizará un análisis general de la potencia de salida para cada sitio seleccionado, a partir de tres dispositivos presentes en la actualidad.

Los dispositivos seleccionados corresponden a convertidores offshore, los cuales se clasifican según su disposición frente a la dirección de propagación de oleaje. Los tres dispositivos han sido probados a escala precomercial, por lo cual se dispone de mayor información de cada uno de ellos. Los fabricantes proporcionan la potencia que el dispositivo extraería de una altura de ola y periodo determinado, en forma de matriz de conversión de energía. Dichas matrices corresponden a la herramienta básica para analizar cada caso. A continuación se detalla cada dispositivo [Cavia, (2009), Medel, (2010)].

AquaBuOY

Dispositivo de absorción puntual, consistente en una estructura flotante que reacciona ante un cilindro vertical hueco, montado rígidamente bajo el cuerpo de la boya. Al estar abierto

en ambos extremos, el agua pasa a través del cilindro forzando la movilidad del pistón, dilatando o comprimiendo las bombas de generación internas.

El factor de capacidad entregado por el fabricante es de un 12%, sin embargo, el informe desarrollado por la agencia estadounidense EPRI (2006) fija el factor de capacidad en un 40%, considerando un balance entre la inversión realizada y la energía obtenida.

La figura 4.22 muestra un esquema del dispositivo, así como la matriz de conversión de energía asociada.

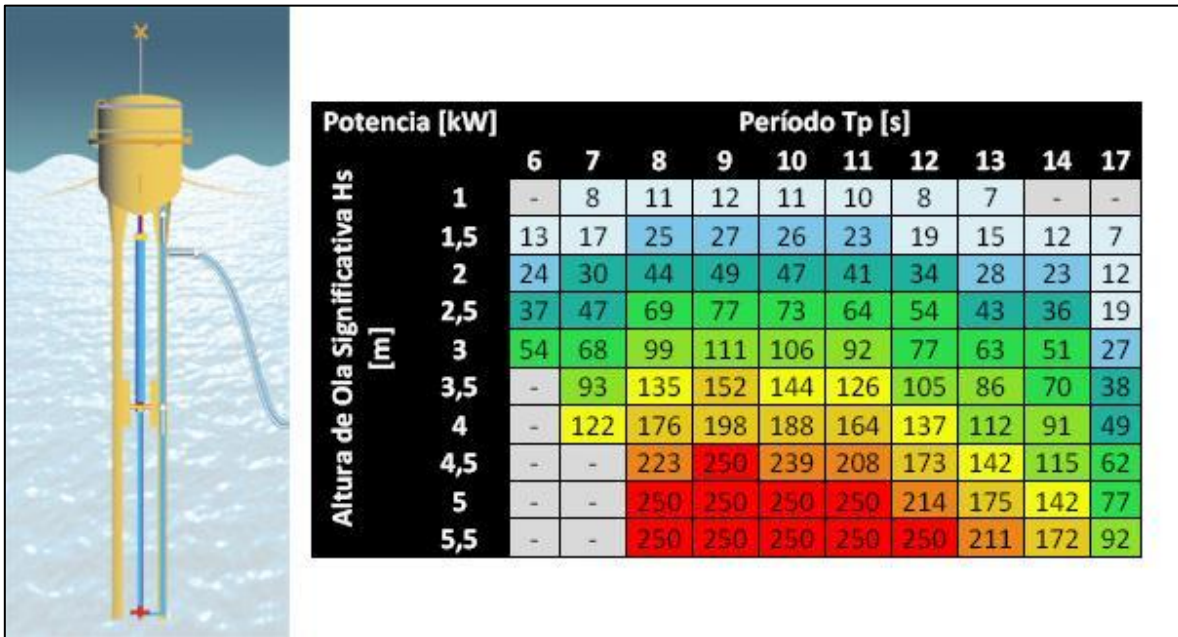


Figura 4.22 Diagrama y matriz de energía – Dispositivo AquaBuOY
Fuente: Medel, 2010

Pelamis

Dispositivo atenuador semi-sumergido, compuesto por cuatro secciones cilíndricas unidas entre sí, cuyo movimiento relativo inducido por el oleaje es resistido por cilindros hidráulicos, los cuales bombean aceite a alta presión a motores hidráulicos a través de acumuladores.

El dispositivo está diseñado para obtener un rendimiento del sistema de un 80%, y un factor de capacidad entre un 25% y 40%. Según el EPRI (2006), el factor de capacidad de equilibrio corresponde a un 40%.

La figura 4.23 muestra un esquema del dispositivo, así como la matriz de conversión de energía asociada.

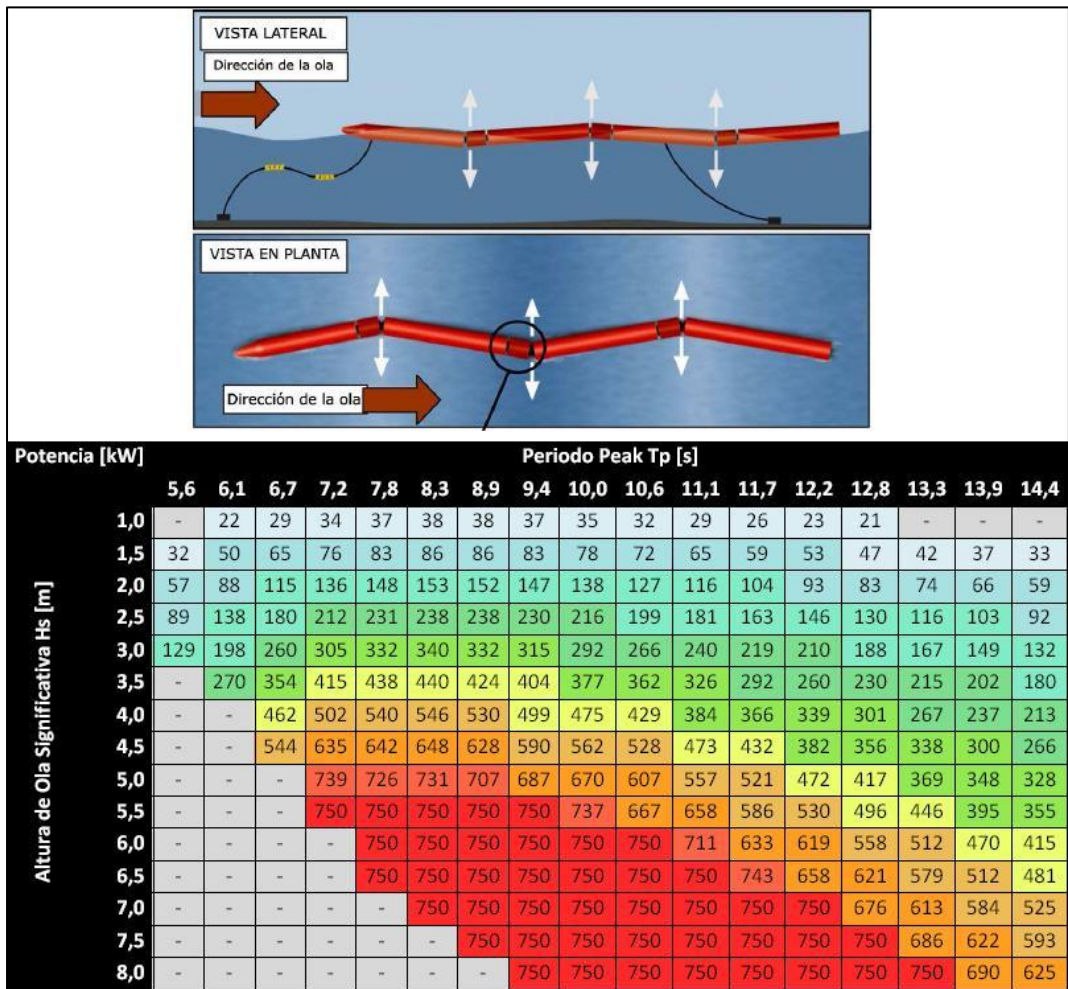


Figura 4.23 Diagrama y matriz de energía – Dispositivo Pelamis
Fuente: Medel, 2010

Wave Dragon

Terminador de sobrepaso elevado de 2 a 3 m sobre el nivel del mar, que consta de un reflector de dos brazos, el cual concentra el oleaje hacia una rampa, a través de la cual se conduce el oleaje hacia un depósito con un desagüe y turbinas Kaplan, las cuales se conectan directamente con generadores de imanes permanentes.

El fabricante proporciona un factor de capacidad estimado de un 35%, el cual está validado por EPRI (2006) para el prototipo precomercial.

La figura 4.24 muestra un esquema del dispositivo, así como la matriz de conversión de energía asociada.

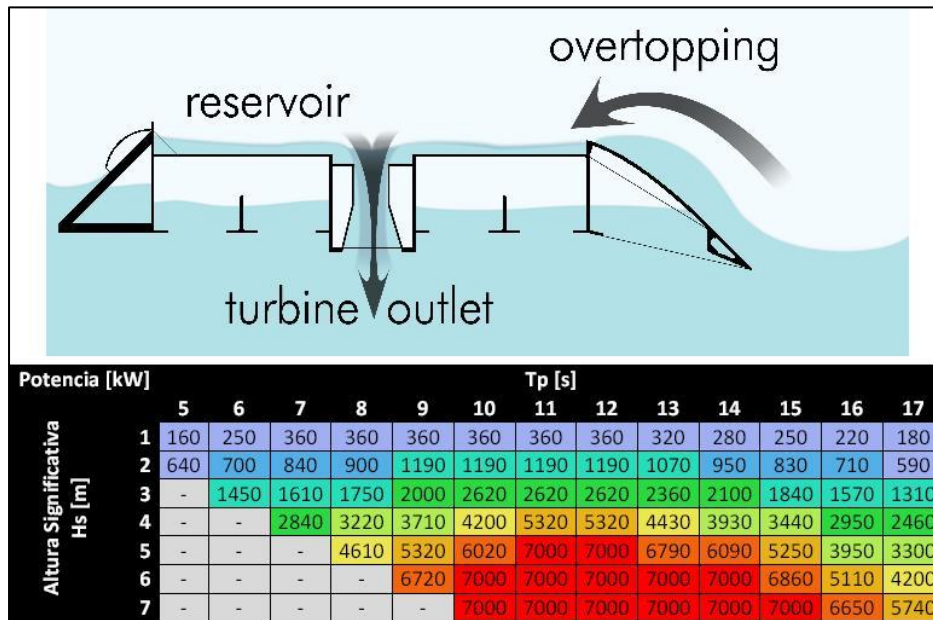


Figura 4.24 Diagrama y matriz de energía – Dispositivo Wave Dragon
Fuente: www.wavedragon.net

La tabla 4.8 entrega las especificaciones para cada uno de los prototipos según los datos entregados por EPRI (2006). En base a estos datos, y a los entregados por las distintas matrices de conversión de energía, a continuación se presentará un análisis de la potencia anual de salida por dispositivo para cada uno de los sitios en estudio.

Tabla 4-8: Resumen especificaciones por dispositivo

Dispositivo	Largo [m]	Ancho [m]	Potencia Media [kW]	Peso [ton]	Principio de Operación	Sistema de Extracción	Potencia Peak [kW]
AquaBuOY	6	6	17	22	Absorbedor puntual	Bomba Hidráulica	250
Pelamis	120	4,6	153	380	Atenuador	Oleohidraulico	750
Wave Dragon	150	260	1369	22000	Rampa terminal	Turbinas Kaplan	7000

Fuente: Elaboración propia

Energía, Potencia y Factor de Capacidad

Utilizando los datos de ocurrencia asociados a cada sitio, en conjunto con las matrices de conversión de energía de cada dispositivo, es posible obtener la energía de salida (E) que aporta cada estado de mar. Más específicamente, para cada dispositivo se multiplica la cantidad de horas anuales que ocurre un estado de mar con la potencia de salida asociada, definida en la matriz de cada dispositivo. Al sumar la totalidad de estos resultados, es posible obtener, en este caso, la energía anual entregada por un dispositivo en específico. Luego, en base a las dimensiones de cada dispositivo, es posible la obtención del flujo de energía o potencia por metro de cresta de ola (P) entregada por cada uno. La siguiente ecuación relaciona estas cantidades:

$$P = \frac{E}{L} [Wh/m] \quad (4.1)$$

Donde L corresponde a la longitud de cresta en la cual actúa el dispositivo.

Al ser un análisis general de la conversión del recurso, no se ha considerado la influencia de la dirección de oleaje ante cada uno de los dispositivos utilizados, dejando en claro que esta corresponde a un importante factor, tanto para el atenuador (Pelamis), como para la rampa terminal (Wave Dragon).

Ya que los dispositivos poseen distintas características, tanto la energía como la potencia generada no son variables ideales para realizar alguna comparación entre ellos. Debido a esto, se introduce el Factor de Capacidad (o de Planta), el cual funciona como un indicador de la utilización de la capacidad de la central o dispositivo en estudio. Se obtiene como el cociente entre la energía generada en un periodo de tiempo dado, y la energía que se podría generar en el mismo periodo con la planta produciendo a plena carga durante todo el tiempo. La tabla 4.9 entrega un resumen del análisis de potencia de salida en cada sitio.

Tabla 4-9: Tabla resumen por dispositivo, de la energía y potencia anual generada en cada sitio en estudio, y su factor de capacidad asociado

HOTSPOT	Energía Anual [MWh]			Potencia Anual [MWh/m]			Factor de Capacidad [%]		
	AquaBuOY	Pelamis	Wave Dragon	AquaBuOY	Pelamis	Wave Dragon	AquaBuOY	Pelamis	Wave Dragon
1	410,1	326,6	13.608	68,4	71,0	52,3	19%	5%	22%
2	405,1	322,4	13.441	67,5	70,1	51,7	18%	5%	22%
3	394,1	310,9	13.130	65,7	67,6	50,5	18%	5%	21%
4	377,6	321,8	12.507	62,9	69,9	48,1	17%	5%	20%
5	429,0	330,9	14.266	71,5	71,9	54,9	20%	5%	23%
6	342,0	298,5	11.278	57,0	64,9	43,4	16%	5%	18%
7	400,5	240,7	14.480	66,7	52,3	55,7	18%	4%	24%
8	473,7	289,7	16.029	78,9	63,0	61,7	22%	4%	26%
9	459,2	352,4	15.164	76,5	76,6	58,3	21%	5%	25%
10	427,6	335,4	14.101	71,3	72,9	54,2	20%	5%	23%
11	411,1	327,1	13.633	68,5	71,1	52,4	19%	5%	22%
12	374,4	302,3	12.406	62,4	65,7	47,7	17%	5%	20%
13	481,7	245,2	16.391	80,3	53,3	63,0	22%	4%	27%
14	602,5	443,7	19.708	100,4	96,5	75,8	28%	7%	32%
15	484,1	358,9	15.890	80,7	78,0	61,1	22%	5%	26%
16	467,8	353,1	15.357	78,0	76,8	59,1	21%	5%	25%
17	467,8	345,2	15.394	78,0	75,0	59,2	21%	5%	25%
18	500,7	301,2	17.061	83,5	65,5	65,6	23%	5%	28%
19	358,7	322,3	11.691	59,8	70,1	45,0	16%	5%	19%
20	597,3	495,5	19.178	99,5	107,7	73,8	27%	8%	31%
21	600,4	500,6	19.318	100,1	108,8	74,3	27%	8%	32%
22	611,9	498,6	19.718	102,0	108,4	75,8	28%	8%	32%
23	624,8	453,0	20.437	104,1	98,5	78,6	29%	7%	33%
24	454,3	381,0	14.657	75,7	82,8	56,4	21%	6%	24%

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla anterior se puede apreciar que la energía aumenta de norte a sur, salvo algunas excepciones, para los tres dispositivos estudiados. Además, se observa, que pese a tener una menor potencia nominal, el dispositivo AquaBuOY supera al Pelamis en la energía anual entregada. Esto responde principalmente al rango óptimo en el que trabaja cada dispositivo, en comparación con el rango en el que oscilan los estados de mar que comúnmente presenta la costa chilena. En el caso de Pelamis, el rango de las costas chilenas entrega muy poca energía, ya que este dispositivo se encuentra diseñado para trabajar, principalmente, a periodos más bajos que los presentes en nuestro país. Los valores de energía entregados por Wave Dragon son mucho más grandes que los de los otros dispositivos (30 veces), pero esto responde principalmente a su dimensión en comparación con los otros dos.

En cuanto a la potencia generada por metro de cresta de ola, los valores para AquaBuOY y Pelamis son muy cercanos, y a la vez, mayores que los entregados por Wave Dragon. Esto se debe a la dimensión del dispositivo que le hace frente a la ola, que en ambos casos es mucho más pequeña.

Finalmente, el factor de capacidad obtenido demuestra una mayor eficiencia para Wave Dragon, levemente superior a la de AquaBuOY. Por otra parte, el factor de capacidad para Pelamis es muy insatisfactorio, y responde a la baja cantidad de energía generada, debido a que su configuración no es la adecuada para los periodos de ola de la costa chilena. Comparando los factores obtenidos, con los entregados por los fabricantes y el EPRI (2006), se puede concluir que Wave Dragon entrega el factor más cercano al 35% previamente estipulado. En el caso del AquaBuOY, se encuentra bajo el valor recomendado por el EPRI. El peor de los casos lo presenta el dispositivo Pelamis, el cual se aleja demasiado del 40% recomendado por el EPRI.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto al análisis general de la zona en estudio, se logró apreciar en los mapas de altura significativa generados a partir de SWAN, que esta aumenta de norte a sur, principalmente en la zona de aguas profundas. En estos mapas se logra apreciar también el comportamiento en la zona costera, tanto las zonas protegidas, que presentan bajas alturas de ola, como las zonas de concentración de energía, las cuales presentan alturas de ola comparables con ubicaciones en aguas profundas.

En base a los datos obtenidos para cada parámetro en la zona de estudio, se calculó el flujo de energía o potencia, y se graficó su distribución espacial. En estos mapas graficados se aprecian los sitios en los cuales se concentra la energía, debido principalmente a la participación cuadrática de la altura de ola en su obtención.

Ya que la finalidad del trabajo se encuentra en la zona costera, se extrajeron los datos asociados a una profundidad de 50 m. Debido a la baja resolución que presenta la topobatemetría utilizada, no todos los lugares de extracción de datos presentan esta profundidad. Por esto se utiliza, para la extracción de los parámetros, la celda que presenta la profundidad más cercana a los 50 m. Al graficar los valores de profundidad extraídos, se aprecian valores que se escapan del rango de los 50 m, debido principalmente a sectores en donde la plataforma continental cae abruptamente, en distancias menores a las que se encuentran representadas en la resolución del mallado disponible. Sin embargo, y a pesar de existir sectores en la costa con batimetrías de mejor resolución, se optó por utilizar la batimetría GEBCO para evaluar, bajo las mismas condiciones, la totalidad de la zona en estudio. De esta manera, a pesar de no corresponder con exactitud a una profundidad de 50 m en el mallado, se utilizarán estos datos como los correspondientes al veril 50 m.

Para todo el veril 50 m fueron extraídos los parámetros de resumen de oleaje y a partir de estos fue calculada la potencia para cada uno de estos puntos. En cuanto a la altura significativa de ola, se aprecia, de forma general, el aumento de los valores de norte a sur, con valores medios que oscilan entre los 0.5 y 2.7 m. Además, las zonas con bajos valores de altura, se corresponden con las zonas protegidas, así como ciertas zonas con altos valores de altura, corresponden a zonas geográficas con potencial teórico para la concentración del oleaje. Con respecto a los datos de periodo peak, se observa claramente una baja variabilidad en los valores medios presentes en la zona en estudio. El análisis realizado espacialmente entrega una media cercana a 12 s para todo el sector en estudio.

En cuanto al flujo de potencia para el veril 50 m, este se presenta como una ampliación del análisis de alturas significativas, principalmente debido a la baja variabilidad del periodo peak y a la participación cuadrática de la altura. De esta forma, se observa con mayor facilidad los sitios donde es más vasto el recurso, remarcando las excelentes condiciones presentes en la zona sur, así como sitios aislados, pero con un excelente potencial más al norte.

Se aprecia también la condición que presenta el análisis con SWAN en las zonas límites del mallado de cálculo. Tanto al límite norte, como al sur de lo analizado, los valores tienden a bajar, por lo cual los valores entregados no necesariamente corresponden a los valores reales, sino que pueden entregar estos resultados al encontrarse en zonas cercanas a los límites de la malla de cálculo. Cabe destacar que esto corresponde a un problema del modelado, y no de la física de la costa de Chile.

Si se considera que el estudio abarca una zona costera de aproximadamente 670 km de largo, y utilizando los datos medios de potencia para el veril 50, se puede obtener, de manera general, la potencia disponible en base a oleaje para esta zona de la costa chilena. De esta forma, la potencia disponible (no necesariamente aprovechable) en esta zona, es del orden de 11.5 GW, lo cual se traduce en 100 TWh por año, correspondiente a un 65% más de lo generado en el país el año 2008 (CNE, 2008).

A partir del flujo de potencia obtenido para el veril 50, se seleccionaron sitios con la mayor cantidad de potencia disponible. En este caso se utilizó la mediana como el valor de tendencia central representativo para clasificar los lugares, desde los más a los menos energéticos. Cabe destacar que al clasificar los lugares, se encuentran aglomeraciones de valores, por lo cual los lugares seleccionados no necesariamente corresponden a los primeros del ranking, sino que al más alto del sector seleccionado. Esto se debe a que el fin de este estudio corresponde al análisis completo de la zona costera seleccionada. Además, dentro de las ubicaciones seleccionadas se incluyó sectores que teóricamente deberían presentar un mayor potencial, pero que no se encontraban en los primeros lugares de la clasificación. Dentro de estas ubicaciones están Puntilla del Infierno en Duao, Punta Vera en San Antonio y el sector norte de la Península de Tumbes. Estas ubicaciones presentan valores medios de flujo de potencia menores a 20 kW/m, pero debido a su ubicación, así como su condición geográfica se decidió incluirlas en el estudio.

De los 24 sitios seleccionados, se puede apreciar que de los 5 primeros, los cuales superan los 30 kW/m, 4 se encuentran en la zona sur del estudio, bajo los 37° de latitud sur. Además, se aprecia que no necesariamente los sitios con mayor flujo medio de potencia, presentan los valores máximos de esta. De hecho, el sitio seleccionado en la localidad de Mela presenta el mayor valor correspondiente al P10%. Es decir, en este sector, que presenta una potencia media del orden de los 27 kW/m, el 10% del tiempo el flujo de potencia supera los 82 kW/m. En comparación, la ubicación listada como la con mayor contenido energético (Punta Carranza, con 36 kW/m), presenta un P10% igual a 72 kW/m.

Este listado, definido con respecto al flujo de potencia, representa la base del estudio realizado, ya que a partir de los sitios seleccionados en él se realizó un análisis multicriterio, el cual considera distintas variables, analizadas desde una perspectiva técnica, las cuales influyen en la selección del mejor lugar para la extracción del recurso energético.

Las variables utilizadas para este análisis responden a factores técnicos que favorecen el desarrollo, generación y extracción de este recurso. Así, además de la potencia media, se incluyó la cercanía al SIC, cercanía a puertos y pendiente media del fondo marino. En cuanto a la cercanía, tanto al SIC como a algún puerto, se observan sectores que se encuentran muy alejados (como Lobería o Rucalonco), y que se concentran entre la VI y VII región, y en la zona sur del estudio realizado, sector correspondiente a la IX región. Más aún, para considerar estos sectores como potenciales ubicaciones, se incluyó el puerto de Maguillines y de Corral, los cuales no se encontraban estipulados en un principio en el estudio, dado que no corresponden a los puertos principales del territorio en investigación. En el caso de la pendiente del fondo marino, en el sector correspondiente a los sitios seleccionados, esta entrega indirectamente información asociada a la abrupta caída de la plataforma en algunos sitios (Punta Lobos o Monte Zorro), lo que se traduce en mayores dificultades para la ubicación de los dispositivos generadores de energía, y a la vez confirma lo observado en la extracción de los datos de profundidad asociados al veril 50.

Al ponderar cada una de las variables, se logró obtener el ranking final, el cual indica, según el criterio adoptado y explicado en la metodología empleada, los mejores lugares para la extracción del recurso energético. En este contexto, y debido principalmente a que el factor más importante corresponde al recurso en sí, el ranking no varió mucho en comparación al presentado según los valores de flujo medio de potencia. Cabe destacar el reposicionamiento de lugares que no presentan un elevado recurso energético como otras ubicaciones, pero que en las otras variables encuentran su máximo, como por ejemplo Punta de Tralca, Punta Curaumilla, Punta Loros y la Península de Tumbes (que anteriormente ocupaba el último lugar). Por otra parte, los últimos lugares se definen no tan solo por el contenido energético, sino que, principalmente a los mínimos valores de las otras variables incluidas en el estudio, siendo los principales descensos los correspondientes a Punta de Lobos (debido a su alta pendiente), Lobería y Rucalonco (ambas debido a su lejanía de los centros de consumo).

De esta manera se logró clasificar los lugares seleccionados de acuerdo, en un principio a la cantidad de recurso disponible, para luego listarlos de acuerdo a los mejores lugares para la extracción de dicho recurso.

Con respecto al análisis estadístico realizado a cada uno de los 24 sitios, este se realiza con el fin de estudiar en profundidad el recurso a partir de la serie de tiempo obtenida, determinando histogramas, variabilidad y excedencias, entre otras cantidades, las cuales entregan información detallada de cada lugar, con el fin de entregar una recomendación adecuada como resultado final.

En primer lugar se estudió el clima de oleaje para cada *hotspot* seleccionado. Se desarrollaron los histogramas tanto para altura significativa como para el periodo peak. En cuanto a la altura de ola, se logra apreciar la tendencia a concentrar la mayor ocurrencia en los valores más bajos, quedando demostrado en su forma asimétrica hacia la izquierda. Esto

responde plenamente a lo esperado, tal cual expone Goda (2000). De hecho, si se normalizan los valores de altura con respecto al promedio, se logra apreciar que la distribución obtenida se acomoda a una distribución Rayleigh.

Dentro de todos los casos estudiados, existe uno que se escapa a la norma y que corresponde al sitio ubicado en Punta del Toro. Este se encuentra extremadamente sesgado hacia la derecha, con un valor peak muy marcado. Analizando las variables que determinan su valor, se logró dar con la posible causante de esta distribución. En este caso, la profundidad entregada por el mallado corresponde a 10 m para esta ubicación, alejándose bastante de la profundidad de 50 m seleccionada. Sin embargo existen valores de profundidad cercanos en los otros sitios seleccionados, pero nunca tan bajos como este.

Con respecto a los histogramas de periodo peak, se puede apreciar un comportamiento bimodal para todas las ubicaciones (incluido Punta del Toro). Esto se debe principalmente a la coexistencia del *swell* y el *sea*. Además, la distribución de los periodos no sigue ninguna regla universal, como en el caso de las alturas de ola (Goda, 2000). También se explica la concentración de los valores debido a las diferencias entre los periodos de distintas estaciones.

Para analizar el comportamiento estacional del clima de oleaje se calcularon los valores medios de cada parámetro en las dos estaciones más características, como son invierno y verano. Con estos datos se analizó la variabilidad estacional del clima. En el caso de la altura significativa de ola, cabe destacar el caso de Punta del Toro, el cual presenta una muy baja variabilidad (del orden de 0.1 m) en comparación con la media. Además, se logra apreciar que en líneas generales, la variación invierno-verano aumenta de norte a sur, logrando su máximo en el sector de Mela, al norte del Itata. Aún así, la variación estacional que muestra la costa chilena es relativamente baja (en el mayor de los casos estudiados 0.7 m), si se piensa que en otras zonas, en donde la energía a partir del oleaje también es una opción, como por ejemplo las islas británicas, la variación estacional es del orden de los 2 m (Acuña, 2008).

En el caso del periodo peak, se nota claramente un aumento de invierno a verano (lo que puede traducirse en la tendencia bimodal explicada anteriormente). Además cabe destacar la tendencia a disminuir que presenta la variabilidad del periodo de norte a sur, comportándose de forma inversa a como lo hace la altura de ola. De hecho, la ubicación que presenta la menor variabilidad corresponde a la más austral del estudio (Lobería con 0.7 s).

Para analizar el comportamiento de la dirección principal de oleaje, además de realizar la comparación entre los valores medios estacionales, se elaboraron rosas de oleaje. Comparando el comportamiento en ambas estaciones se puede apreciar que, como es de esperar, la componente sur aumenta en el invierno, con la única excepción del caso de Punta de Toro, cuyas razones ya han sido explicadas. Aún así, extraña la escasa participación del *swell* del hemisferio norte en todas las ubicaciones, ya que teóricamente,

este se debería presentar fuertemente en los meses de verano. Este fenómeno, puede tener su causa en la validez de datos seleccionados desde el NOAA para el caso de la dirección principal, ya que de los tres parámetros de resumen, es el que presenta un menor grado de correlación con los datos reales. En el mismo contexto, analizando los valores para un mes de verano (Enero 2003), se aprecia la divergencia de algunos valores, lo cual no entrega una buena aproximación a los datos reales (figura 5.1).

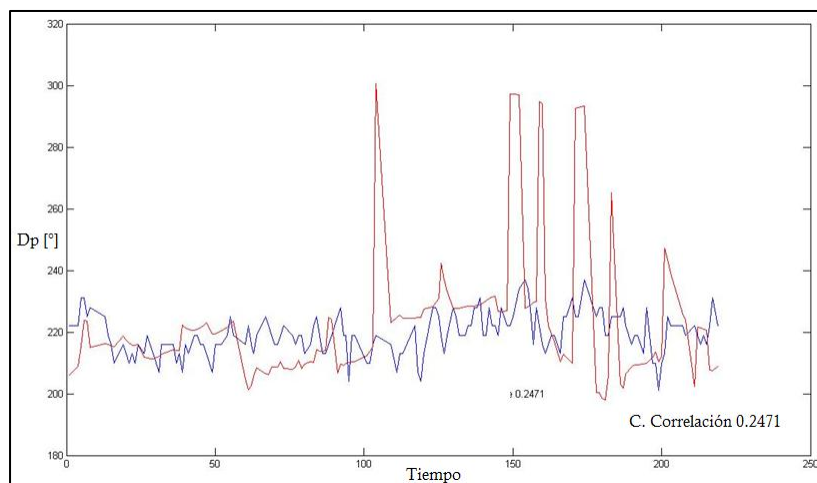


Figura 5.1 Comparación datos NOAA (rojo) y SHOA (azul) – Enero 2003.
Fuente: Elaboración propia

Tras analizar el comportamiento del clima de oleaje, se estudió el flujo de potencia en cada punto seleccionado. En primer lugar se analizó la distribución espacial del recurso para los *hotspots* seleccionados, encontrando una tendencia al aumento del recurso de norte a sur. De todas maneras, el análisis espacial en aguas someras no tiene porque presentar una relación marcada, ya que son variados los factores que influyen en la cantidad de energía en un cierto punto. Al analizar los datos entregados por el NOAA para los puntos del modelo global con el que cuentan, en el caso de los datos asociados a la costa chilena, estos si presentan una marcada tendencia al aumento de norte a sur, pero en este caso las ubicaciones que ellos entregan se encuentran todas en aguas profundas.

Con el fin de analizar en el tiempo la distribución del recurso, se desarrollaron histogramas intermensuales (o estacionales) e interanuales. En el caso de los histogramas intermensuales se aprecia, en la totalidad de ellos, una marcada diferencia estacional, siendo los meses de invierno los que contienen un mayor contenido medio de energía. A partir de estos datos es posible analizar la variabilidad para cada uno de los *hotspots*, encontrando una tendencia cercana al 60% de variación entre el mes con más energía y el mes con menor cantidad (generalmente junio y diciembre). Existen ubicaciones que se alejan de esta tendencia, y que hay que analizarlos con cuidado al momento de evaluar la extracción del recurso, ya que una alta variabilidad puede acarrear problemas en los dispositivos de extracción, debido a que se corresponde con una elevada variación en el clima de oleaje (sitios como Mela, Constitución Norte y Topocalma).

En el caso del análisis interanual, se aprecia que los máximos valores se encuentran en los últimos años del estudio, además de entregar información de un posible comportamiento cíclico de la cantidad de recurso. Esto se ve limitado por la cantidad de años analizados, ya que de ser esta mayor, se podría apreciar con mayor claridad si el comportamiento es cíclico. De ser así, los años venideros deberían presentar un descenso en la cantidad de recurso energético disponible. Analizando la variabilidad del recurso se observa una tendencia cercana al 40% de variación entre el año más y menos energético. Para este caso, las mismas ubicaciones que presentan elevados valores de variabilidad estacional escapan del valor medio observado, sobrepasando el 50% de variabilidad.

Cabe destacar la baja variabilidad de Punta del Toro, tanto estacional como interanual, con valores cercanos al 30%. Estos indicadores pueden ser muy atractivos para la extracción de energía, sin embargo, no hay que olvidar que su distribución presenta una tendencia anómala en comparación con los otros sitios.

Al analizar la excedencia de los valores de potencia, se establecen límites que son de gran importancia, principalmente porque tienen relación con los dispositivos capaces de captar la energía. De esta manera, los valores de potencia excedida el 90% de las veces (o P90%) entregan el límite inferior asociado al valor mínimo para comenzar a generar energía de manera eficiente. En este caso su valor tiende a los 10 kW/m, lo cual se asocia a valores de altura mayor a 1 m, y en comparación con los valores entregados por los fabricantes de dispositivos (0.5 m) demuestra que las ubicaciones seleccionadas deberían funcionar más del 90% del tiempo.

Con respecto al valor excedido el 10% del tiempo (P10%), este se asocia a la potencia nominal que debería presentar el dispositivo generador de energía (Acuña, 2008). La ubicación que presenta la mayor P10% indica que, el dispositivo a instalar debiera tener una potencia nominal de 80 kW por metro de frente de ola interceptado por el dispositivo.

Finalmente se analizó la ocurrencia de distintos estados de mar, definidos por la combinación altura significativa y periodo peak. Estos datos permiten el análisis de la potencia de salida de cada sitio, asociado a un dispositivo específico.

Al analizar los tres dispositivos seleccionados, se utilizó el factor de capacidad como medio de comparación, ya que compara la energía generada con el potencial a generar. De esta manera se logra encontrar cual es el dispositivo más adecuado para cada locación seleccionada. Para todas las ubicaciones, el dispositivo Wave Dragon asoma como el más indicado, sin embargo el impacto producido por su envergadura no favorece su instalación, al ser un dispositivo muy invasivo. En cuanto al dispositivo AquaBuOY, este presenta un factor de capacidad un poco menor que el Wave Dragon y su impacto es mucho menor. Por otra parte, el dispositivo Pelamis debe ser acondicionado para el mar chileno. De ser así, la energía generada podría superar la pronosticada para los otros dispositivos.

6. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas de este estudio.

- La zona en estudio presenta un gran número de ubicaciones que concentran altos valores de flujo de potencia, con un valor medio sobre los 30 kW/m y una energía anual sobre los 250 MWh/m, utilizando aproximaciones conservadoras para su obtención. Por lo tanto, la extracción de energía a partir de este recurso corresponde a una opción concreta frente a otras fuentes.
- Las características del oleaje en la zona estudiada son óptimas para la extracción de energía, ya que presentan una baja variabilidad, condición necesaria para garantizar una buena operación de los dispositivos que extraen la energía.
- Al analizar los datos de norte a sur, no se encuentra una dependencia marcada de la latitud en el recurso. Esto se debe principalmente a las características batimétricas y geográficas de cada sector, por lo cual, en aguas someras, a pesar de existir una leve tendencia, se descarta una relación definida.
- Los datos paramétricos modelados por el NOAA son lo suficientemente exactos para aproximar el comportamiento real del mar, particularmente en los parámetros que determinan el contenido energético del oleaje, como son altura de ola significativa y periodo peak. Con respecto a los datos de dirección de oleaje, es necesario realizar un mayor estudio, más aún en los meses de verano del hemisferio sur.
- SWAN responde de manera satisfactoria antes la transferencia desde aguas profundas a aguas someras. Pese a la baja resolución de la base de datos obtenida en cuanto a batimetría, modela de buena manera los fenómenos asociados a la propagación del oleaje hacia la costa.
- Dado que cada uno de los datos obtenidos representa una superficie de 80 [há], se recomienda un estudio detallado en cada una de las zonas seleccionadas, con particular atención en la resolución de la batimetría disponible.
- La zona entre Punta Lavapie y Punta la Rosa (Arauco) es particularmente energética, concentrando los valores más altos en el listado completo de los datos correspondientes al veril 50. Por lo tanto se recomienda un análisis más detallado en ese sector.
- A partir de los diagramas combinados de energía y dispersión se logró caracterizar de muy buena forma el recurso, en términos de los estados de mar asociados. Se encontró que la mayor cantidad de energía la proveen olas con altura significativa entre 2 y 4 m y periodos peak entre 11 y 14 s.
- Al analizar la potencia de salida, generada a partir de los 3 dispositivos considerados en este estudio, se aprecian grandes diferencias en la cantidad de energía generada. Sin embargo estas responden principalmente al tamaño de cada uno de ellos. Además, los niveles de generación son relativamente bajos, y esto se debe a que su configuración no es la adecuada para el estado característico del mar

chileno, por lo cual se aconseja un estudio detallado de los distintos dispositivos, así como nuevas configuraciones que presenten matrices de energía más eficientes para la extracción a nivel nacional.

7. REFERENCIAS

ACEITUNO, P., SANTANA, C., ULRIKSEN, P., Evaluación del potencial de energía eólica en Chile: Resultados Generales. En: Congreso internacional de Energías Renovables, SENESE VII. Arica – Chile, 1994.

ACUÑA, Hugo. Evaluación del Potencial de la Energía del Oleaje en Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2008.

ALLARD, R., ROGERS , W.E., CARROLL, S.N, Validation Test Report for the Simulating Waves Nearshore Model (SWAN): Cycle III, Version 40.11. Naval Research Laboratory., 2004

ATRIA BAIRD CONSULTORES S.A, Project SHOA Olas Chile, Report on the Results of Hindcasting and Submittal of Database. Technical report submitted to the Hydrographic and Oceanographic Department of the Chilean Navy, Santiago, 2001

BARCELONA Field Study Center [en línea]
<geographyfieldwork.com/WaveRefraction.htm> [consulta: 22 febrero 2011]

BARSTOW, S., HAUG, O. KROGSTAD, H., Satellite Altimeter Data in Wave Energy Studies. Proc. Waves'97, ASCE, 1998.

BENOIT, M., MARCOS, E., BECQ, E., Development of a third-generation wave shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, 1996.

BERKHOFF, J.C.W., Computation of Combined Refraction-diffraction. Proc. 13th Intl. Coastal Engineering Conference, ASCE, Vancouver, 1972.

BOOIJ, N., RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H., A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, Journal of Geophysical Research, 1999.

CATALÁN, P. et al., Evaluación del Recurso Undimotriz. Revisión, Análisis, y planes de corto y mediano plazo, 2011.

CAVIA, B., Explotación del Potencial de Energía del Oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona., 2009.

CEM., Coastal Engineering Manual. US Army Corps of Engineers., 2002.

COOPER, B., Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources, Technical Report. ABPmer. Garrad Hassan. Met Office and Proudman Oceanographic Laboratory. Southampton., 2004.

CORNETT, A., Aglobal wave energy resource assessment. International offshore and polar engineering conference. Vancouver, 2008.

CNE., Balance Nacional de Energía <http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/Balances_Energ.html>, 2008.

DEAN, R., DALRYMPLE, R., Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering. Volumen 2. World Scientific. Singapur., 1991.

DEFNE, Z., Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. Renewable Energy 2009.

DHI, Mike21 spectral wave module, Scientific documentation. Danish Hydraulic Institute (DHI). <<http://www.mikebydhi.com/>>, 2005.

EPRI, Renewable Energy Technical Assessment Guide – TAG-RE, Palo Alto, CA: 2007.1012722., 2006.

ERIC Beiers archives [en línea] <ericbeiers.com/archive/sediment/shorelineErosion.html> [consulta: 22 febrero 2011]

FENTON, J.D., MCKEE, W.D., On calculating the lengths of water waves, Coastal Engineering, vol. 14., 1990.

FERNÁNDEZ, P., Energía de las Olas. Universidad de Cantabria. Santander. <<http://libros.redsauce.net/EnergiasAlternativas/mar/PDFs/01Olas.pdf>>, 2004.

GARRAD HASSAN, Preliminary Site Selection – Chilean Marine Energy Resources., 2009.

GELCI, R., CAZALE, H., VASSAL, J., Prediction of waves. The method of frequency-directional spectral densities. Bulletin d'Information. Comite Central d'Océanographie d'Etude des Cotes, 1956.

GIOC UC, Universidad de Cantabria. Documento de Referencia – Proyecto “Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral”. Ministerio de Medio Ambiente. España. Santander., 2000.

GODA, Y., Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering. Volumen 15. World Scientific. Singapur, 2000.

GOOGLE EARTH [en línea] <<http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>> [consulta: 13 agosto 2010]

HASSELMANN, K., et al., Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP), Deutches Hydrographisches Institut, Hamburgo, 1973.

- HOLTHUIJSEN, L., Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press. Cambridge., 2007.
- HUGHES, M., HEAP, A., National-scale wave energy resource assessment for Australia. Renewable Energy, 2009.
- IGLESIAS, G., CARBALLO, R., Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). Renewable Energy, 2009.
- JOURNÉE J.M.J., MASSIE, W.W., Offshore Hydromechanics, Delft University of Technology, 2001.
- KIRBY, J.T., DALRYMPLE, R.A., A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography. Journal of Fluid Mechanics, 1983.
- KOUTITAS, C., Mathematical Models in Coastal Engineering. Penetech Press. London, 1988.
- LONGUET-HIGGINS, M.S., On the statistical distribution of the heights of sea waves, J Marine Research, vol. 11., 1952.
- LYNETT, P., LIU, PL-F., Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive wave equations. COULWAVE Code Manual. Cornell University. Long International Wave Modelling Package., 2004.
- MADSEN, P.A., SØRENSEN, O.R., A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry. Journal of Coastal Engineering, 1992.
- MASSEL, STANISLAW R., Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. Advanced Series on Ocean Engineering. Volumen 11. World Scientific. Singapur., 1996.
- MEDEL, S., Estudio de implantación de tecnologías mereomotrices y undimotrices como pequeños medios de generación distribuida. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, 2010.
- NATIONAL Oceanic and Atmospheric Administration [en línea] <<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/references.html>> [consulta: 13 marzo 2011]
- NICOLAU DEL ROURE, F. Evaluación de metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago., 2004.
- NOBRE, A. et al., Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment. Renewable Energy, 2008.

NWOGU, O., DEMIRBILEK, Z., BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors Report. ERDC/CHL TR-01-25. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2001.

PEREGRINE, D.H., Long waves on a beach. Journal of Fluid Mechanics, 1967.

PIERSON, W.J., MARKS, W., The power spectrum analysis of ocean wave records, TransAmer GeophysK, Union, 1952.

PIERSON, W.J., MOSKOWITZ, L.A., A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, J Geoph Res, 1964.

RADDER, A.C., On the parabolic equation method for water-wave propagation. Journal of Fluid Mechanics, 1979.

READ Grib Matlab compilation [en línea] <http://www.renci.org/~bblanton/files/ReadGrib/read_grib.html> [consulta: 25 mayo 2011]

RICE, S.O., The mathematical analysis of random noise, Bell System Technical Journal, 1945.

SET-TE OCEANS., Programa de Investigación Focus-Abengoa-Fedea. <<http://www.energiaycambioclimatico.com>>, 2010.

SHOA., Publicación 3201. Tercera Edición., 2005.

SILVA, R., Análisis y Descripción Estadística del Oleaje. UNAM. Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria. México DF., 2005.

SMITH, J. M., SHERLOCK, A.R., RESIO, D.T., STWAVE: Steady State wave model user's manual for STWAVE V3.0. ERDC/CHL SR-01-1, US. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 2001.

DELFT UNIVERISITY OF TECHNOLOGY, SWAN. User Manual. Netherlands., 2008.

TAGEO [en línea] <<http://www.tageo.com>> [consulta: 3 marzo 2011]

TODO surf [en línea] <todosurf.com/surfologia/anatomia_olas.php> [consulta: 30 enero 2011]

TOLMAN, H. L., A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. Journal of Physical Oceanography, 1991.

UCAR Community Programs [en línea] <www.met.ed.ucar.edu/oceans/nearshore_wave_models/print.htm> [consulta: 16 abril 2011]

VILLAVERDE, J., Oscilaciones del Mar. Universidad Europea de Madrid. <es.scribd.com/doc/16289653/Apuntes-de-oleaje>, 2009.

WAMDI Group (13 authors), The WAM model. A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 1988.

WAVE Dragon Technology [en línea] <<http://www.wavedragon.net>> [consulta: 23 julio 2011]

WEI, G., KIRBY, J.T., GRILLI, S.T., A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear, unsteady waves. Journal of Fluid Mechanics, 1995.

WILLIS, M.C. et al., Implementing the SWAN Wave Model at Three East Coast National Weather Service Offices., 2010.

WORDPRESS Blog, Tech and teach [en línea] <cyberchalky.wordpress.com/2008/03/09/diffraction-dilemmas/> [consulta: 23 febrero 2011]

8. ANEXOS

8.1. Anexo A. Hojas de comando SWAN

A continuación se presentan los tres tipos de hojas de comando ingresadas a SWAN para la realización de las propagaciones desde aguas profundas a la costa.

Primera Propagación (Determinación de mallas anidadas)

```
*****HEADING*****
$
PROJ 'CHILE' 'CG'
$
$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS SEGUN 199701300900
$
*****MODEL STARTUP*****
SET NAUTICAL
COORD SPHERICAL CCM
NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 96.
$
*****MODEL INPUT*****
CGRID REGULAR -75.004 -39.004 0. 3.6 6 216 360 CIRCLE 180 0.02 0.25 27
$
INPGRID BOTTOM REGULAR -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833 0.00833
READINP BOTTOM 1. 'chilegrid.bot' 1 0 FREE
$
*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -39.004 -75.004 -38.504 Constant PAR 3.89 11.71 238.26
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -38.504 -75.004 -37.504 Constant PAR 3.67 11.87 235.92
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -37.504 -75.004 -36.504 Constant PAR 3.51 11.99 234.08
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -36.504 -75.004 -35.504 Constant PAR 3.38 12.05 232.54
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -35.504 -75.004 -34.504 Constant PAR 3.24 12.08 231.28
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -34.504 -75.004 -33.504 Constant PAR 3.09 12.08 230.29
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -33.504 -75.004 -33.004 Constant PAR 2.93 12.09 229.55
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -39.004 -74.374 -39.004 Constant PAR 3.89 11.71 238.26
BOUNDspec SEGMENT XY -74.374 -39.004 -73.754 -39.004 Constant PAR 3.62 11.78 239.51
BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -33.004 -73.704 -33.004 Constant PAR 2.93 12.09 229.55
$
BREAKING CONSTANT 1.0 0.42
OFF QUAD
OFF WCAP
$
***** OUTPUT REQUESTS *****
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 216 0 360
OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 216

BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'hsign.mat' LAY-OUT 1 HSIGN
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'depth.mat' LAY-OUT 1 DEPTH
NGRID 'NG1' -73.004 -36.004 0. 1.5 3 180 360
NESTout 'NG1' 'NEST1.dat'
NGRID 'NG2' -74.104 -39.004 0. 1.8 3 216 360
NESTout 'NG2' 'NEST2.dat'
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$
```

Segunda Propagación

- Caso 1: Desde los 33° a los 36° de Lat. Sur

```
$*****HEADING*****
$
$ PURPOSE OF TEST: ANIDACION 1 SEGUN 199701300900
$
$*****MODEL STARTUP*****
SET NAUTICAL
COORD SPHERICAL CCM
NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 90.
$
$*****MODEL INPUT*****
CGRID REGULAR -73.004 -36.004 0. 1.5 3 180 360 CIRCLE 180 0.02 0.25 27
$
INPGRID BOTTOM REGULAR -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833 0.00833
READINP BOTTOM 1. 'ChileGrid.bot' 1 0 FREE
$
$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****
BOUNDnest1 NEST 'NEST1.dat'
$
BREAKING CONSTANT 1.0 0.42
OFF QUAD
OFF WCAP
$
$***** OUTPUT REQUESTS *****
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 180 0 360
RAY 'RAY01' -71.504 -36.004 -73.004 -36.004 360 -71.504 -33.004 -73.504 -33.004
ISOLINE 'veril50' 'RAY01' DEPTH 50
OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 180

BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'HSIG3_1.mat' LAY-OUT 1 HSIGN
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'DEPTH3_1.mat' LAY-OUT 1 DEP
TABLE 'veril50' NOHEADER 'HS50.mat' HSIGN
TABLE 'veril50' NOHEADER 'DP50.mat' DIR
TABLE 'veril50' NOHEADER 'TP50.mat' TPS
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$
```

- Caso 2: Desde los 36° a los 39° de Lat. Sur

```

$*****HEADING*****
$
$ PURPOSE OF TEST: ANIDACION 1 SEGUN 199701300900
$
$*****MODEL STARTUP*****
SET NAUTICAL
COORD SPHERICAL CCM
NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 90.
$
$*****MODEL INPUT*****
CGRID REGULAR -74.104 -39.004 0. 1.8 3 216 360 CIRCLE 180 0.02 0.25 27
$
INPGRID BOTTOM REGULAR -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833 0.00833
READINP BOTTOM 1. 'chileGrid.bot' 1 0 FREE
$
$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****
BOUNDnest1 NEST 'NEST2.dat'
$
BREAKING CONSTANT 1.0 0.42
OFF QUAD
OFF WCAP
$
$
$***** OUTPUT REQUESTS *****
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 216 0 360
RAY 'RAY01' -72.304 -39.004 -74.104 -39.004 360 -72.304 -36.004 -74.104 -36.004
ISOLINE 'veril50' 'RAY01' DEPTH 50
OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 180

BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'HSIG3_2.mat' LAY-OUT 1 HSIGN
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'DEPTH3_2.mat' LAY-OUT 1 DEP
TABLE 'veril50' NOHEADER 'H50.mat' HSIGN
TABLE 'veril50' NOHEADER 'DP50.mat' DIR
TABLE 'veril50' NOHEADER 'TP50.mat' TPS
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$

```

8.2. Anexo B. Funciones MATLAB

- datnoaa.m

```
function [imp]=datnoaa(x);
% Funcion que determina los parametros espectrales del oleaje, en la costa
% chilena, entre los paralelos 33 y 39 de lat sur, a la altura del veril
% 50, en base a los datos meteorologicos propiciados por el NOAA, asi como
% la utilizacion del programa de modelación SWAN.
% Para su determinación es necesaria una carpeta 'x' en donde se encuentren
% alojados los datos modelados por el NOAA, asi como dos documentos de
% texto, uno con las horas a las cuales se necesitan los datos (en columna y de
% la forma HH:MM), y otro con dos columnas en donde se entregan las
% coordenadas desde donde se rescatan los valores a propagar a la costa
% (Lat y Longitud respectivamente, de la forma -LAT(0 a 90) y LON(0 a 360))
cd(x);
% ingreso a carpeta en donde se encuentran los archivos de datos NOAA
a=dir(x);
[m,n]=size(a);
q=0;
% Diferencia archivos NOAA de algún otro archivo diferente existente en la
% carpeta.
for i=1:m
    if (a(i,1).isdir==false);
        if (a(i,1).name(end-2:end)=='grb');
            q=q+1;
        end;
    end;
end;
b={};
nn=0;
for i=1:m
    if (a(i,1).isdir==false);
        if (a(i,1).name(end-2:end)=='grb');
            nn=nn+1;
            b{nn,1}=a(i,1).name;
        end;
    end;
end;
qq=q/3;
hs={};
dp={};
tp={};
n1=0;
n2=0;
n3=0;
%Separa los archivos NOAA por parametro, almacenandolos en distintas celdas
for jj=1:q;
    if (b{jj}(end-12:end-11)=='hs');
        n1=n1+1;
        hs{n1}=b{jj};
    elseif (b{jj}(end-12:end-11)=='dp');
        n2=n2+1;
        dp{n2}=b{jj};
    end;
end;
```

```

        else (b{jj}(end-12:end-11)=='tp');
            n3=n3+1;
            tp{n3}=b{jj};
        end;
    end;
end;
% Identifica la cantidad de meses correspondientes a los datos entregados,
% entregando un mensaje de error si la cantidad de datos no es igual para
% cada parametro
if qq/floor(qq)==1;
    disp(['Corresponde a ', num2str(qq), ' meses de datos']);
else
    disp(['No existe igual numero de datos por parametro para todos los meses']);
end;
clear n1 n2 n3 nn q m n a i jj f c;
% Determina el numero de ubicaciones y las coordenadas de estas a partir
% del archivo coord.txt.
M = dlmread('coord.txt');
[f c]=size(M);
disp(['Corresponde a ', num2str(f), ' coordenadas']);
%Horas de interes (H)
H = dlmread('horas.txt');
%Entrega una matriz de estructuras de datos, en donde las filas representan
%la fecha (mes o nombre se archivo) y las columnas representan la ubicaci3n
% (nodos correspondientes al grid del NOAA).
for ii=1:qq;
    for jj=1:f;
        [imp(ii, jj)]=var3ReadGribNOAAWW3SinglePoint(ii,M(jj,1),M(jj,2),...
            hs, tp, dp, qq, f, H);
    end;
end;
clear ii jj i c;
% Escritura de los comandos en SWAN, en base a los parametros obtenidos. Se
% debe introducir la estructura con los parametros [imp], los meses de
% datos (i), y la cantidad de dias por
% mes (k).
[g h]=size(imp);
mkdir('SWAN');
cd SWAN;
%Escritura para la 1ra hora en estudio
for i=1:g;
    d=length(imp(i,1).Date1);
    for k=1:d;
        EscribirArchivoSWAN1(imp,i,k);
        EscribirArchivoSWANAnidacion1_1(imp,i,k);
        EscribirArchivoSWANAnidacion1_2(imp,i,k);
    end;
end;
clear k i;
%Escritura para la 2da hora en estudio
for i=1:g;

```

```

        d=length(imp(i,1).Date2);
        for k=1:d;
            EscribirArchivoSWAN2(imp,i,k);
            EscribirArchivoSWANAnidacion2_1(imp,i,k);
            EscribirArchivoSWANAnidacion2_2(imp,i,k);
        end;
    end;
clear d g h i k;
%Ejecucion de los comandos en SWAN
cd ('..')
!cp ChileGrid.bot ../SWAN
cd SWAN;
mkdir('HS50');
mkdir('DP50');
mkdir('TP50');
[g h]=size(imp);
    for i=1:g;
        d=length(imp(i,1).Date1);
        for k=1:d;
            cmd1=sprintf('swanrun -input %s.swn -omp 8',char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd1');
            cmd2=sprintf('swanrun -input %sNEST1.swn -omp 8',...
                char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd2');
            cmd3=sprintf('swanrun -input %sNEST2.swn -omp 8',...
                char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd3');
            cmd4=sprintf('cp HS50_N1_%s.mat ../HS50',char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd4');
            cmd5=sprintf('cp DP50_N1_%s.mat ../DP50',char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd5');
            cmd6=sprintf('cp TP50_N1_%s.mat ../TP50',char(imp(i,1).Date1(k)));
            system('cmd6');
            cmd11=sprintf('swanrun -input %s.swn -omp 8',char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd11');
            cmd12=sprintf('swanrun -input %sNEST1.swn -omp 8',...
                char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd12');
            cmd13=sprintf('swanrun -input %sNEST2.swn -omp 8',...
                char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd13');
            cmd14=sprintf('cp HS50_N1_%s.mat ../HS50',char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd14');
            cmd15=sprintf('cp DP50_N1_%s.mat ../DP50',char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd15');
            cmd16=sprintf('cp TP50_N1_%s.mat ../TP50',char(imp(i,1).Date2(k)));
            system('cmd16');
        end;
    end;
end;

```

- var3ReadGribNOAAWW3SinglePoint.m (variación read_grib.r3 [36])

```

%function to read the GRB data from NOAA's wave Watch III model, and to
%output the time series at given point in space. It gives both the period
%and the significant wave height, and could be extended to give peak
%direction and wind.
%
% function [data]=ReadFribNOAAWW3SinglePoint(year,month,myLat,myLon);
%
%
%Call ins: read_grib.m
%
%Inputs
%
%   year: 4digit year to be read
%   month: 2 digit month to be read
%   Lat: Latitude of the point to be called.
%   Longitude of the point to be called
%
%Output
%
%   data: a structure with fields
%       datenum= datenum of the time of the nowcast
%       Hs= Significant Wave height
%       Tp= Peak period
function [imp]=varReadGribNOAAWW3SinglePoint(x,myLat,myLon,hs,tp,dp,qq,ene,H);

%read the Hs file
eval(['g=read_grib('',hs{x},'',-1,'ScreenDiag'',0);']);

%define the point of interest
%for debug
%myLat=-33;
%myLon=287.5;
if myLon<0
    myLon=360+myLon;
end
%%
%estimate the length
npoints=length(g);

%create the grid
lat=g(1).gds.La1:-g(1).gds.Dj:g(1).gds.La2;
nlat=length(lat);
lon=g(1).gds.Lo1:g(1).gds.Di:g(1).gds.Lo2;
nlon=length(lon);
%find the index
idLat=find(lat==myLat);
idLon=find(lon==myLon);
%preallocate

```

```

data.datenum=zeros(npoints,1);
data.datenum1=data.datenum;
data.hour=data.datenum;
data.Hs=data.datenum;
data.Tp=data.datenum;
data.Dp=data.datenum;
data.date=data.datenum;

for jj=1:npoints
    %read the date
    data.datenum(jj)=datenum(g(jj).pds.year,g(jj).pds.month,g(jj).pds.day,...
        g(jj).pds.hour,0,0);
    %now read the data and assign it to the variable
    a=reshape(g(jj).fltarray,nlon,nlat)';
    data.Hs(jj)=a(idLat,idLon);

end
data.datenum1=((data.datenum-data.datenum(1,1))/0.125)+1;
clear g
if 1
    %now read the Tp file
    eval(['g=read_grib(''',tp{x},'',-1,'ScreenDiag',0);']);

    for jj=1:npoints
        a=reshape(g(jj).fltarray,nlon,nlat)';
        data.Tp(jj)=a(idLat,idLon);
    end
end
clear g
if 1
    %now read the Dp file
    eval(['g=read_grib(''',dp{x},'',-1,'ScreenDiag',0);']);

    for jj=1:npoints
        a=reshape(g(jj).fltarray,nlon,nlat)';
        data.Dp(jj)=a(idLat,idLon);
    end
end
clear j
%Asocia un numero que determina la hora de la medicion, lo cual ayudara en
%la seleccion de los parametros a trabajar.
if 1
for j=1:npoints;
    if datestr(data.datenum(j),15)=='00:00';
        data.hour(j)=0;
    elseif datestr(data.datenum(j),15)=='03:00';
        data.hour(j)=3;
    elseif datestr(data.datenum(j),15)=='06:00';
        data.hour(j)=6;

```

```

elseif datestr(data.datenum(j),15)=='09:00';
    data.hour(j)=9;
elseif datestr(data.datenum(j),15)=='12:00';
    data.hour(j)=12;
elseif datestr(data.datenum(j),15)=='15:00';
    data.hour(j)=15;
elseif datestr(data.datenum(j),15)=='18:00';
    data.hour(j)=18;
else datestr(data.datenum(j),15)=='21:00';
    data.hour(j)=21;
end;
end;
end;
clear j
%Se crea una estructura de datos llamada 'imp', la cual contendrá los
%parametros y la fecha de las 2 horas seleccionadas para el estudio.
if 1
D=find(data.hour==H(1));
E=find(data.hour==H(2));
imp.Hs1=zeros(length(D),1);
imp.Dp1=imp.Hs1;
imp.Tp1=imp.Hs1;
Datenum1=imp.Hs1;
imp.Hs2=zeros(length(E),1);
imp.Dp2=imp.Hs2;
imp.Tp2=imp.Hs2;
Datenum2=imp.Hs2;
n=1;
for j=1:length(D);
    imp.Hs1(n)=data.Hs(D(j));
    imp.Dp1(n)=data.Dp(D(j));
    imp.Tp1(n)=data.Tp(D(j));
    Datenum1(n)=data.datenum(D(j));
    n=n+1;
end;
clear j
n=1;
for j=1:length(E);
    imp.Hs2(n)=data.Hs(E(j));
    imp.Dp2(n)=data.Dp(E(j));
    imp.Tp2(n)=data.Tp(E(j));
    Datenum2(n)=data.datenum(E(j));
    n=n+1;
end;
X=datestr(Datenum1,30);
imp.Date1=cellstr(X);
Y=datestr(Datenum2,30);
imp.Date2=cellstr(Y);
end;

```

- EscribirArchivoSWAN1.m

```

function EscribirArchivoSWAN1(imp,i,k);
% Función que escribe la hoja de comando para la primera propagación en
% SWAN, Y trabaja anexa a la funcion datnoaa.m
f=fopen(char(strcat(imp(i,1).Date1(k),'.swn')), 'wt+');
fprintf(f, '$*****HEADING*****\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS ANIDACION SEGUN %s\n', ...
char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****MODEL STARTUP*****\n');
fprintf(f, 'SET NAUTICAL\n');
fprintf(f, 'COORD SPHERICAL CCM\n');
fprintf(f, 'NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 96.\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****MODEL INPUT*****\n');
fprintf(f, 'CGRID REGULAR -75.004 -39.004 0. 3.6 6 216 360 CIRCLE 180 0.02'...
' 0.25 27\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, 'INPGRID BOTTOM REGULAR -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833'...
' 0.00833\n');
fprintf(f, 'READING BOTTOM 1. 'ChileGrid.bot' 1 0 FREE\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****\n');
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -33.504 -75.004 -33.004 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,1).Hs1(k)), (imp(i,1).Tp1(k)), (imp(i,1).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -34.504 -75.004 -33.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,2).Hs1(k)), (imp(i,2).Tp1(k)), (imp(i,2).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -35.504 -75.004 -34.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,3).Hs1(k)), (imp(i,3).Tp1(k)), (imp(i,3).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -36.504 -75.004 -35.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,4).Hs1(k)), (imp(i,4).Tp1(k)), (imp(i,4).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -37.504 -75.004 -36.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,5).Hs1(k)), (imp(i,5).Tp1(k)), (imp(i,5).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -38.504 -75.004 -37.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,6).Hs1(k)), (imp(i,6).Tp1(k)), (imp(i,6).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -39.004 -75.004 -38.504 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,7).Hs1(k)), (imp(i,7).Tp1(k)), (imp(i,7).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -33.004 -73.704 -33.004 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,1).Hs1(k)), (imp(i,1).Tp1(k)), (imp(i,1).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -75.004 -39.004 -74.374 -39.004 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,7).Hs1(k)), (imp(i,7).Tp1(k)), (imp(i,7).Dp1(k)));
fprintf(f, 'BOUNDspec SEGMENT XY -74.374 -39.004 -73.754 -39.004 CONSTANT PAR'...
' %3.2f %3.2f %3.2f\n', (imp(i,8).Hs1(k)), (imp(i,8).Tp1(k)), (imp(i,8).Dp1(k)));
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, 'BREAKING CONSTANT 1.0 0.42\n');
fprintf(f, 'OFF QUAD\n');
fprintf(f, 'OFF WCAP\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$***** OUTPUT REQUESTS *****\n');
fprintf(f, '$\n');

```

```

fprintf(f,'GROUP ' 'OUTPUT' SUBGRID 0 216 0 360\n');
fprintf(f,'OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 216\n');
fprintf(f,'\n');
fprintf(f,'BLOCK ' 'OUTPUT' NOHEADER 'HSIG_%s.mat' LAY-OUT 1 HSIGN\n',...
char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'BLOCK ' 'OUTPUT' NOHEADER 'DEPTH_%s.mat' LAY-OUT 1 DEPTH\n',...
char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'NGRID ' 'NG1' -73.004 -36.004 0. 1.5 3 180 360\n');
fprintf(f,'NEStout ' 'NG1' 'N1_%s.dat'\n',char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'NGRID ' 'NG2' -74.104 -39.004 0. 1.8 3 216 360\n');
fprintf(f,'NEStout ' 'NG2' 'N2_%s.dat'\n',char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'TEST 1,0\n');
fprintf(f,'COMPUTE\n');
fprintf(f,'STOP\n');
fprintf(f,'$\n');
fclose(f);
return

```

- EscribirArchivoSWANAnidacion1_1.m

```

function EscribirArchivoSWANAnidacion1_1(imp,i,k);
% Función que escribe la hoja de comando para la segunda propagación en
% SWAN, para la primera malla anidada. Trabaja anexa a la funcion datnoaa.m
f=fopen(char(strcat(imp(i,1).Date1(k),'NESt1.swn'),'wt+'));
fprintf(f,'$*****HEADING*****\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$ PURPOSE OF TEST: ANIDACION 1 SEGUN %s\n',char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$*****MODEL STARTUP*****\n');
fprintf(f,'SET NAUTICAL\n');
fprintf(f,'COORD SPHERICAL CCM\n');
fprintf(f,'NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 96.\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$*****MODEL INPUT*****\n');
fprintf(f,'CGRID REGULAR -73.004 -36.004 0. 1.5 3 180 360 CIRCLE 180 0.02'...
' 0.25 27\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'INPGRID BOTTOM REGULAR -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833'...
' 0.00833\n');
fprintf(f,'READINP BOTTOM 1. 'ChileGrid.bot' 1 0 FREE\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****\n');
fprintf(f,'BOUNDnest1 NEST 'N1_%s.dat'\n',char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'BREAKING CONSTANT 1.0 0.42\n');
fprintf(f,'OFF QUAD\n');
fprintf(f,'OFF WCAP\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$***** OUTPUT REQUESTS *****\n');
fprintf(f,'$\n');

```

```

fprintf(f, 'GROUP ' 'OUTPUT' SUBGRID 0 180 0 360\n');
fprintf(f, 'RAY ' 'RAY01' -71.504 -36.004 -73.004 -36.004 360 -71.504 -33.004'...
' -73.504 -33.004\n');
fprintf(f, 'ISoline ' 'veril50' ' 'RAY01' DEpTh 50\n');
fprintf(f, 'OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 180\n');
fprintf(f, '\n');
fprintf(f, 'BLOCK ' 'OUTPUT' NOHEADER ' 'HSIG_N1_%s.mat' ' LAY-OUT 1 HSIGN\n', ...
char(imp(i,1).Date1(k));
fprintf(f, 'BLOCK ' 'OUTPUT' NOHEADER ' 'DEPTH_N1_%s.mat' ' LAY-OUT 1 DEP\n', ...
char(imp(i,1).Date1(k));
fprintf(f, 'TABLE ' 'veril50' NOHEADER ' 'HS50_N1_%s.mat' ' HSIGN\n', ...
char(imp(i,1).Date1(k));
fprintf(f, 'TABLE ' 'veril50' NOHEADER ' 'DP50_N1_%s.mat' ' DIR\n', ...
char(imp(i,1).Date1(k));
fprintf(f, 'TABLE ' 'veril50' NOHEADER ' 'TP50_N1_%s.mat' ' TPS', ...
char(imp(i,1).Date1(k));
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, 'TEST 1, 0\n');
fprintf(f, 'COMPUTE\n');
fprintf(f, 'STOP\n');
fprintf(f, '$\n');
fclose(f);
return

```

- EscribirArchivoSWANAnidacion1_1.m

```

function EscribirArchivoSWANAnidacion1_2(imp,i,k);
% Función que escribe la hoja de comando para la segunda propagación en
% SWAN, para la segunda malla anidada. Trabaja anexa a la funcion datnoaa.m
f=fopen(char(strcat(imp(i,1).Date1(k), 'NEST2.swn')), 'wt+');
fprintf(f, '$*****HEADING*****\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$ PURPOSE OF TEST: ANIDACION 2 SEGUN %s\n', char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****MODEL STARTUP*****\n');
fprintf(f, 'SET NAUTICAL\n');
fprintf(f, 'COORD SPHERICAL CCM\n');
fprintf(f, 'NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 96.\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****MODEL INPUT*****\n');
fprintf(f, 'CGRID REGULAR -74.104 -39.004 0. 1.8 3 216 360 CIRCLE 180 0.02'...
' 0.25 27\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, 'INPGRID BOTTOM REGular -75.9958 -41.9958 0. 551 1439 0.00833'...
' 0.00833\n');
fprintf(f, 'READING BOTTOM 1. ' 'ChileGrid.bot' ' 1 0 FREE\n');
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, '$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****\n');
fprintf(f, 'BOUNDnest1 NEST ' 'N2_%s.dat' '\n', char(imp(i,1).Date1(k)));
fprintf(f, '$\n');
fprintf(f, 'BREAKING CONSTANT 1.0 0.42\n');

```

```

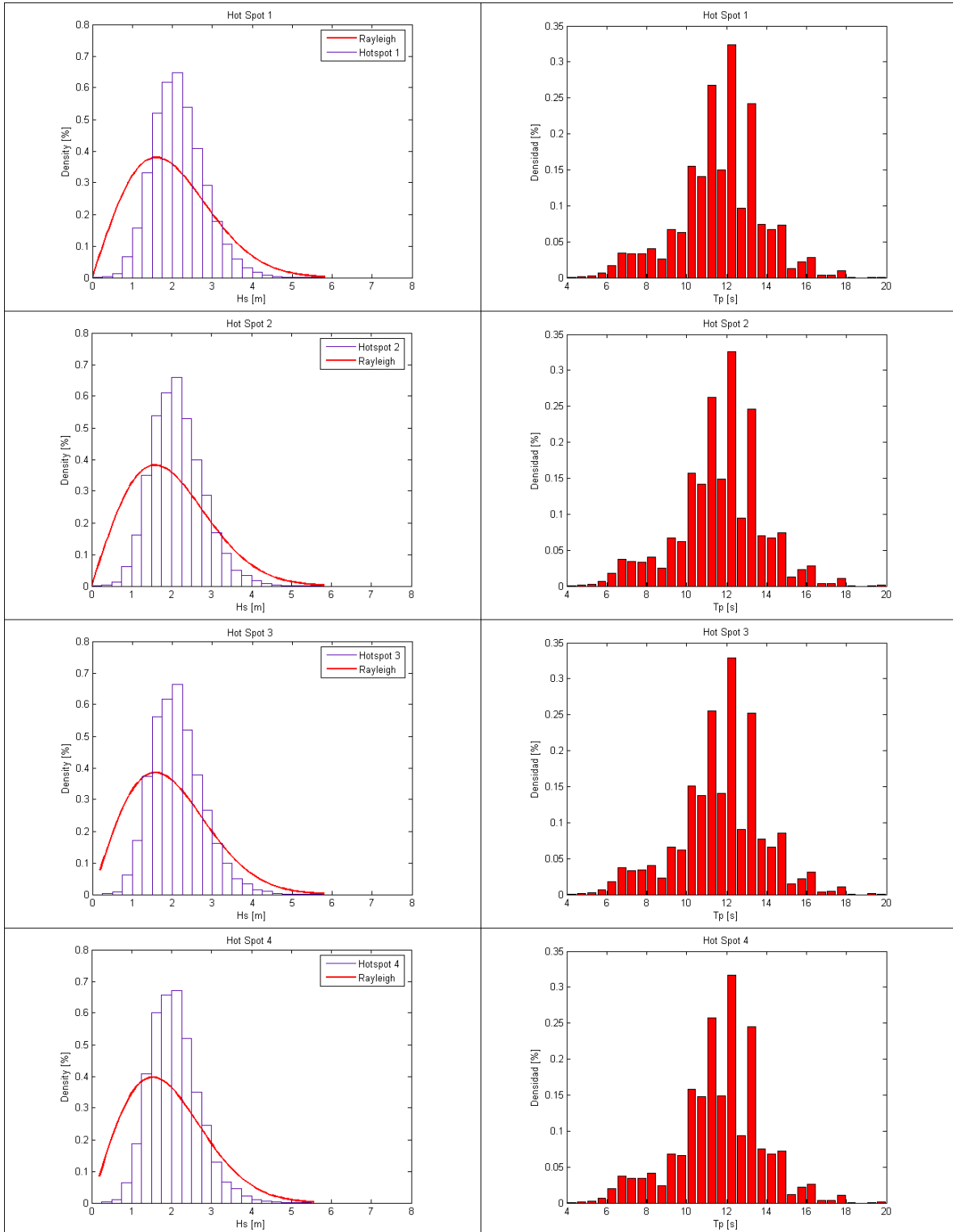
fprintf(f,'OFF QUAD\n');
fprintf(f,'OFF WCAP\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'$***** OUTPUT REQUESTS *****\n');
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 216 0 360\n');
fprintf(f,'RAY 'RAY01' -72.304 -39.004 -74.104 -39.004 360 -72.304 -36.004'...
    ' -74.104 -36.004 \n');
fprintf(f,'ISOLine 'veril50' 'RAY01' DEPTH 50\n');
fprintf(f,'OUTPUT OPTIONS BLOCK 4 216\n');
fprintf(f,'\n');
fprintf(f,'BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'HSIG_N2_%s.mat' LAY-OUT 1 HSIGN\n',...
    char(imp(i,1).Datel(k)));
fprintf(f,'BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'DEPTH_N2_%s.mat' LAY-OUT 1 DEP\n',...
    char(imp(i,1).Datel(k)));
fprintf(f,'TABLE 'veril50' NOHEADER 'HS50_N2_%s.mat' HSIGN\n',...
    char(imp(i,1).Datel(k)));
fprintf(f,'TABLE 'veril50' NOHEADER 'DP50_N2_%s.mat' DIR\n',...
    char(imp(i,1).Datel(k)));
fprintf(f,'TABLE 'veril50' NOHEADER 'TP50_N2_%s.mat' TPS',...
    char(imp(i,1).Datel(k)));
fprintf(f,'$\n');
fprintf(f,'TEST 1,0\n');
fprintf(f,'COMPUTE\n');
fprintf(f,'STOP\n');
fprintf(f,'$\n');
fclose(f);
return

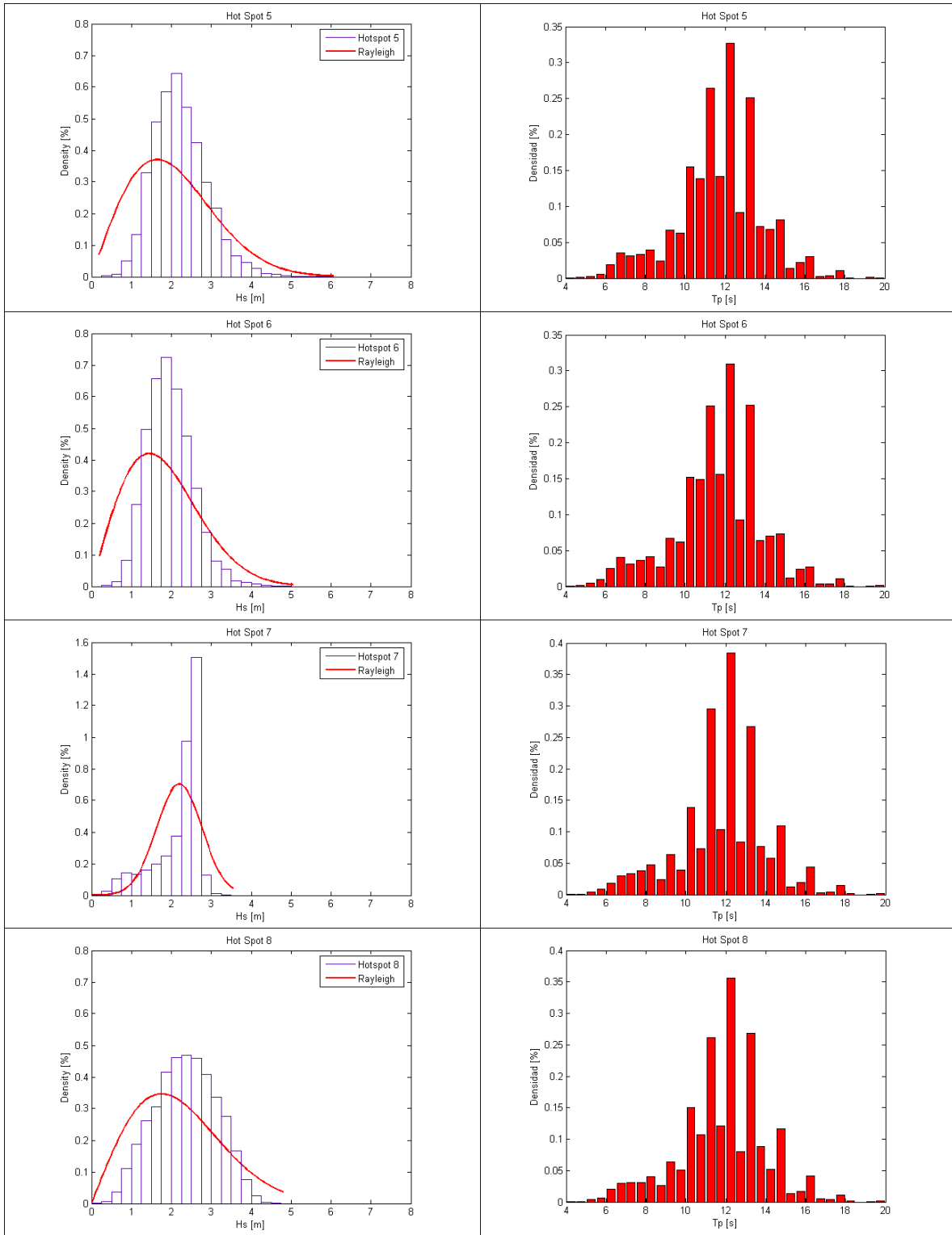
```

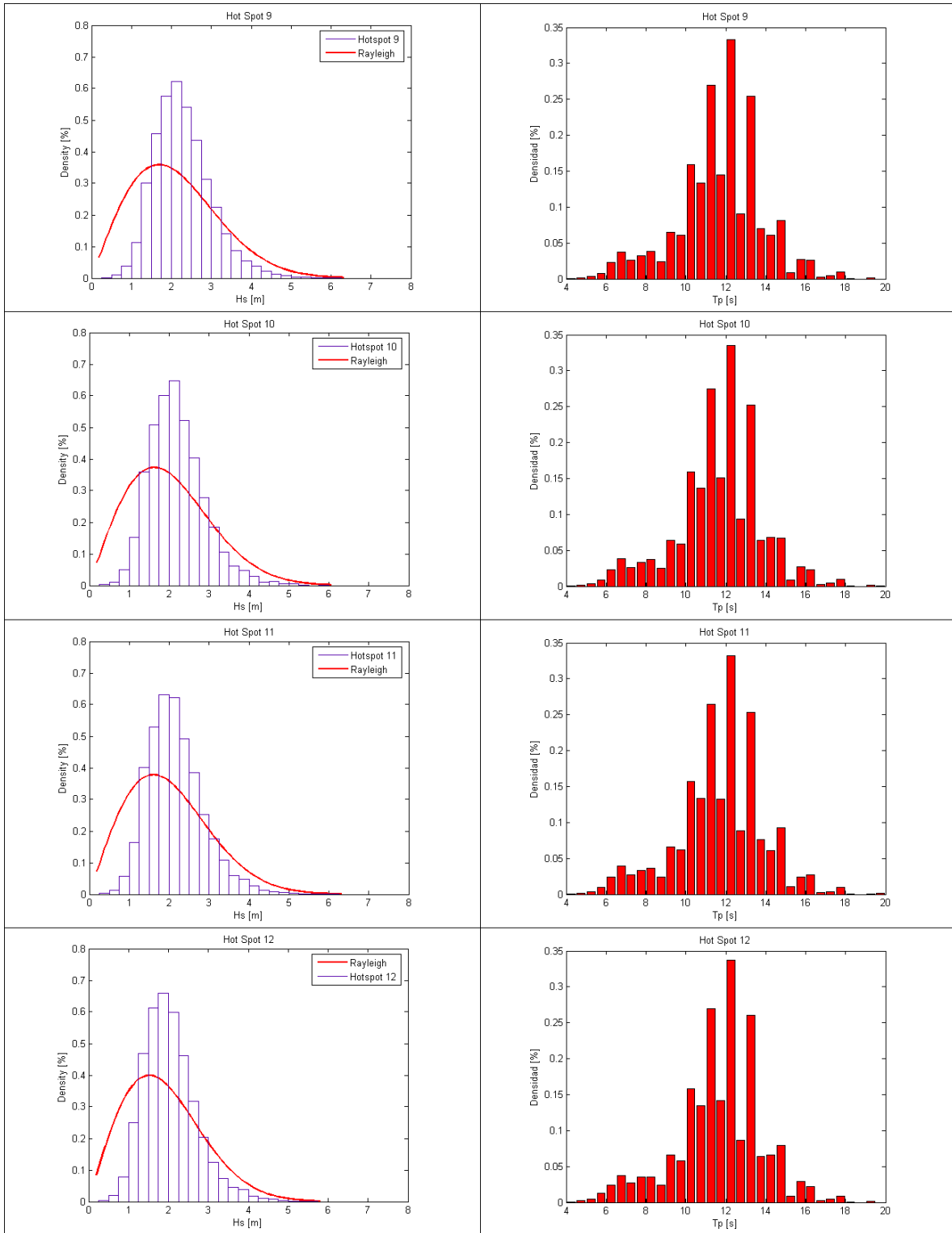
Para los siguientes anexos, se ha dispuesto la información ordenada de norte a sur, y numerada como se explica a continuación:

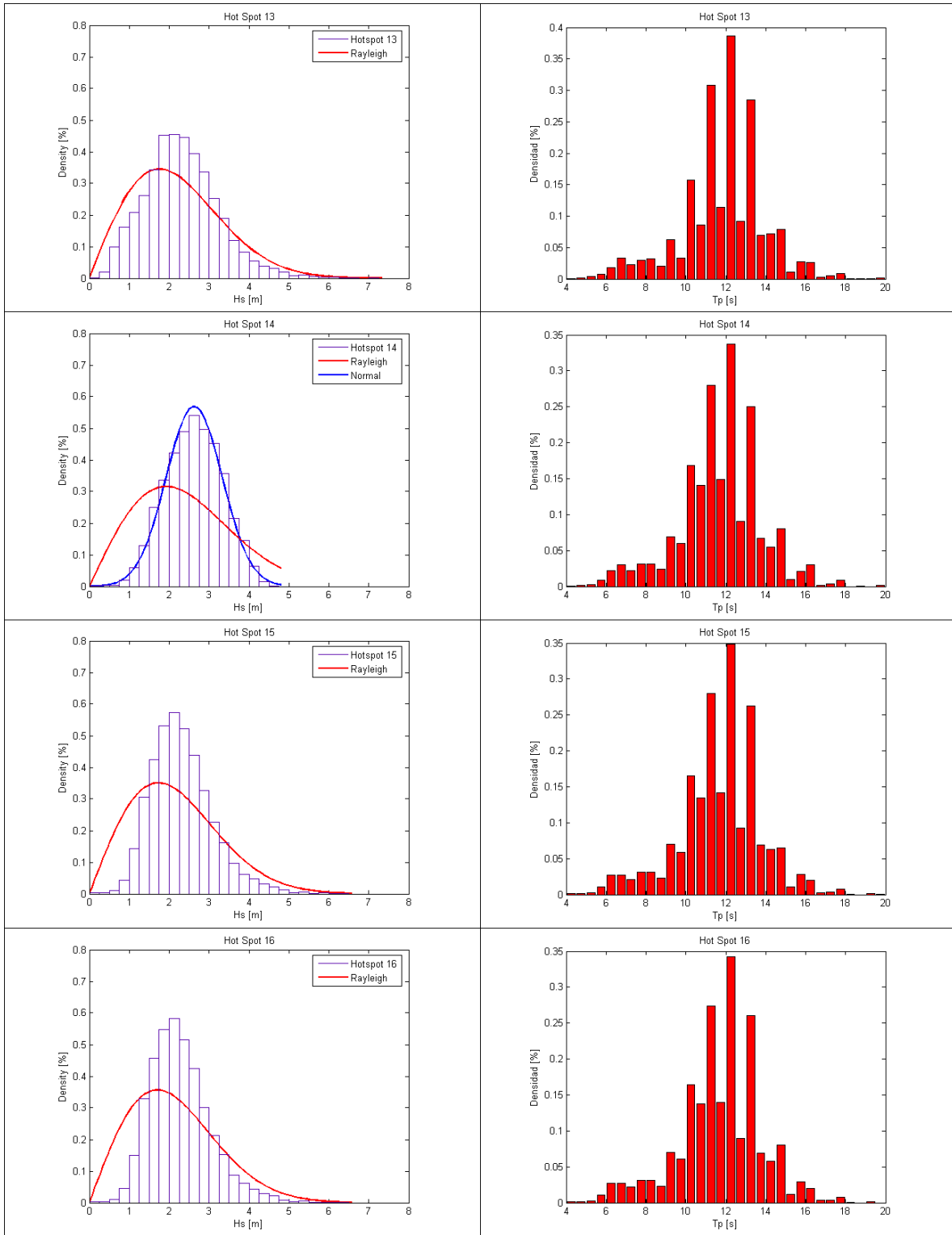
Hotspot	Zona
1	Punta Carranza
2	Punta Loros
3	Punta de Gallo (Tunquen)
4	Punta Peñablanca
5	Punta de Tralca
6	Punta Vera
7	Punta del Toro
8	Topocalma
9	Punta Lobos
10	Rucalonco
11	Boyecura
12	Puntilla del Infierno (Duaó)
13	Constitución Norte
14	Punta Carranza
15	Punta Nugure (Puyai)
16	Iglesia de Piedra (Cobquecura)
17	Monte Zorro
18	Mela (Norte Itata)
19	Península de Tumbes (Norte)
20	Punta Lavapié
21	Punta La Rosa
22	Punta Lebu
23	Punta Morhuilla
24	Lobería

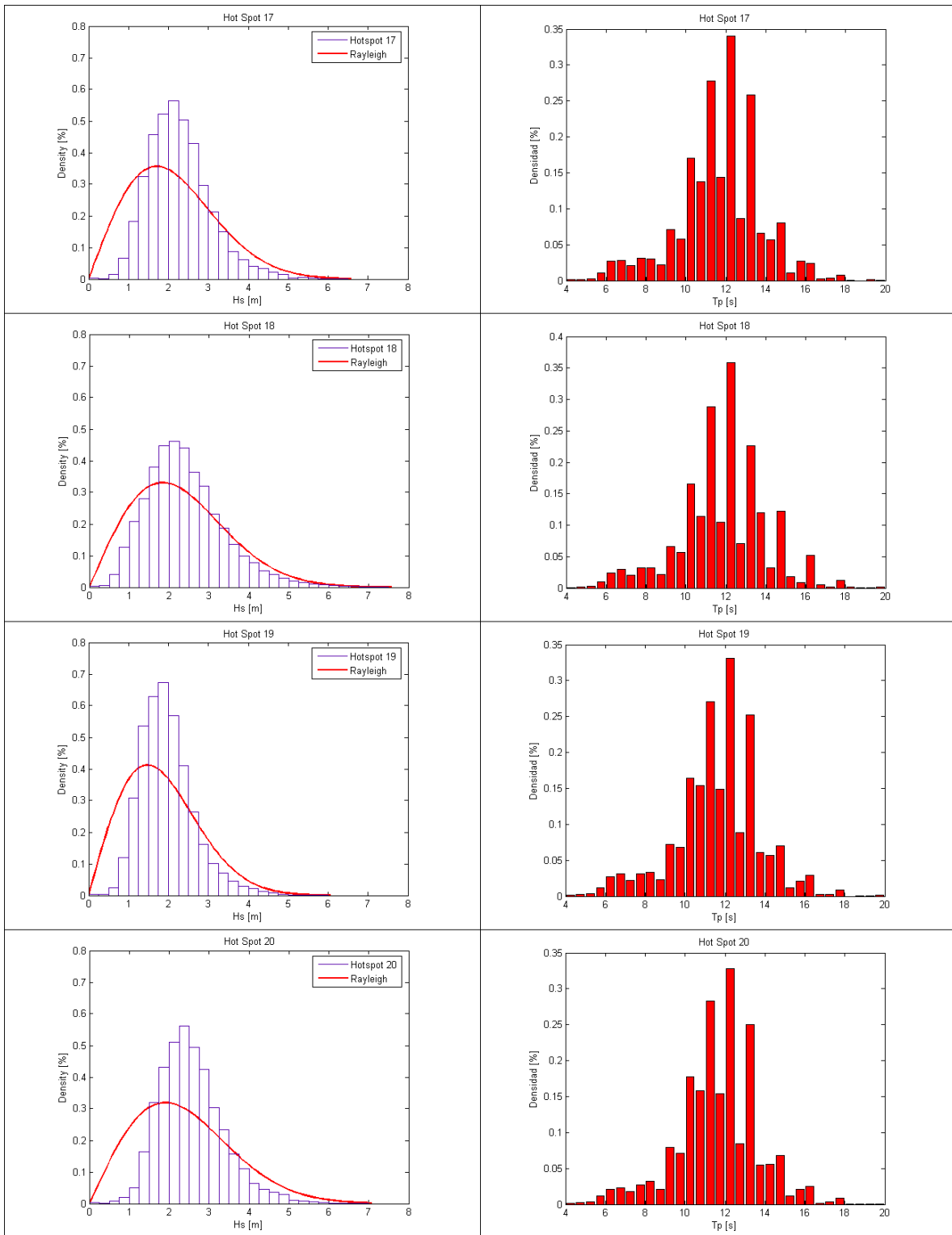
8.3. Anexo C. Histogramas H_s y T_p

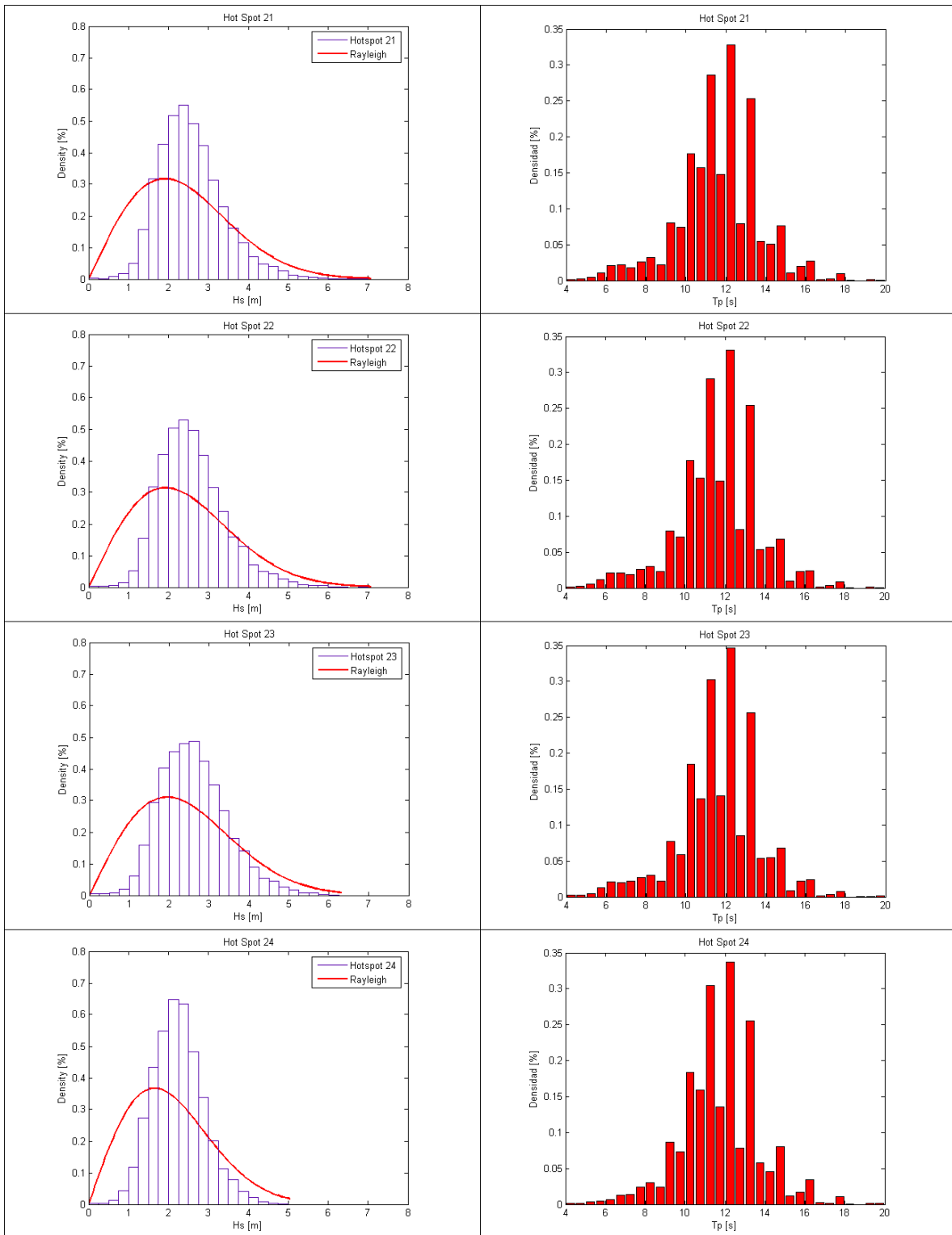




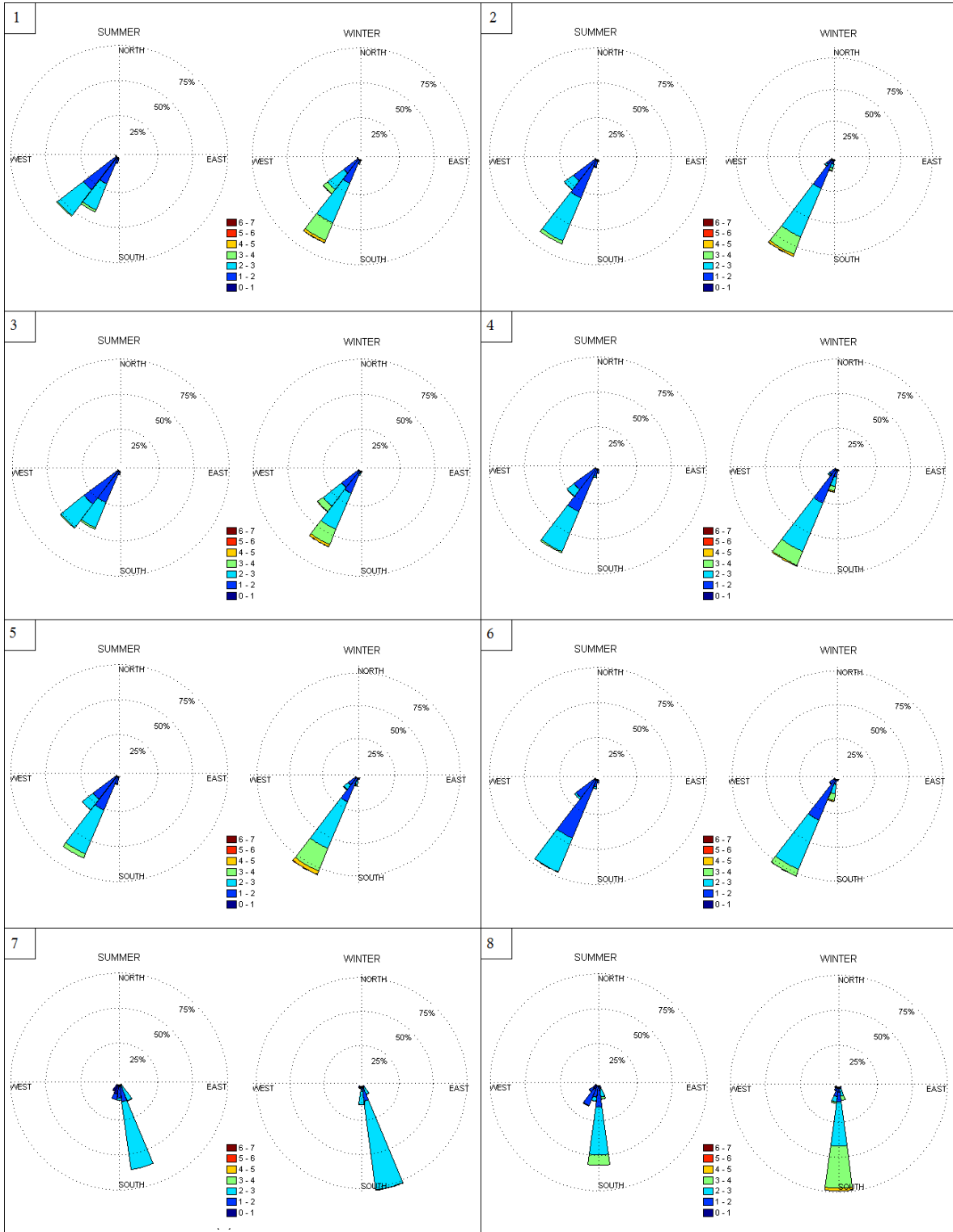


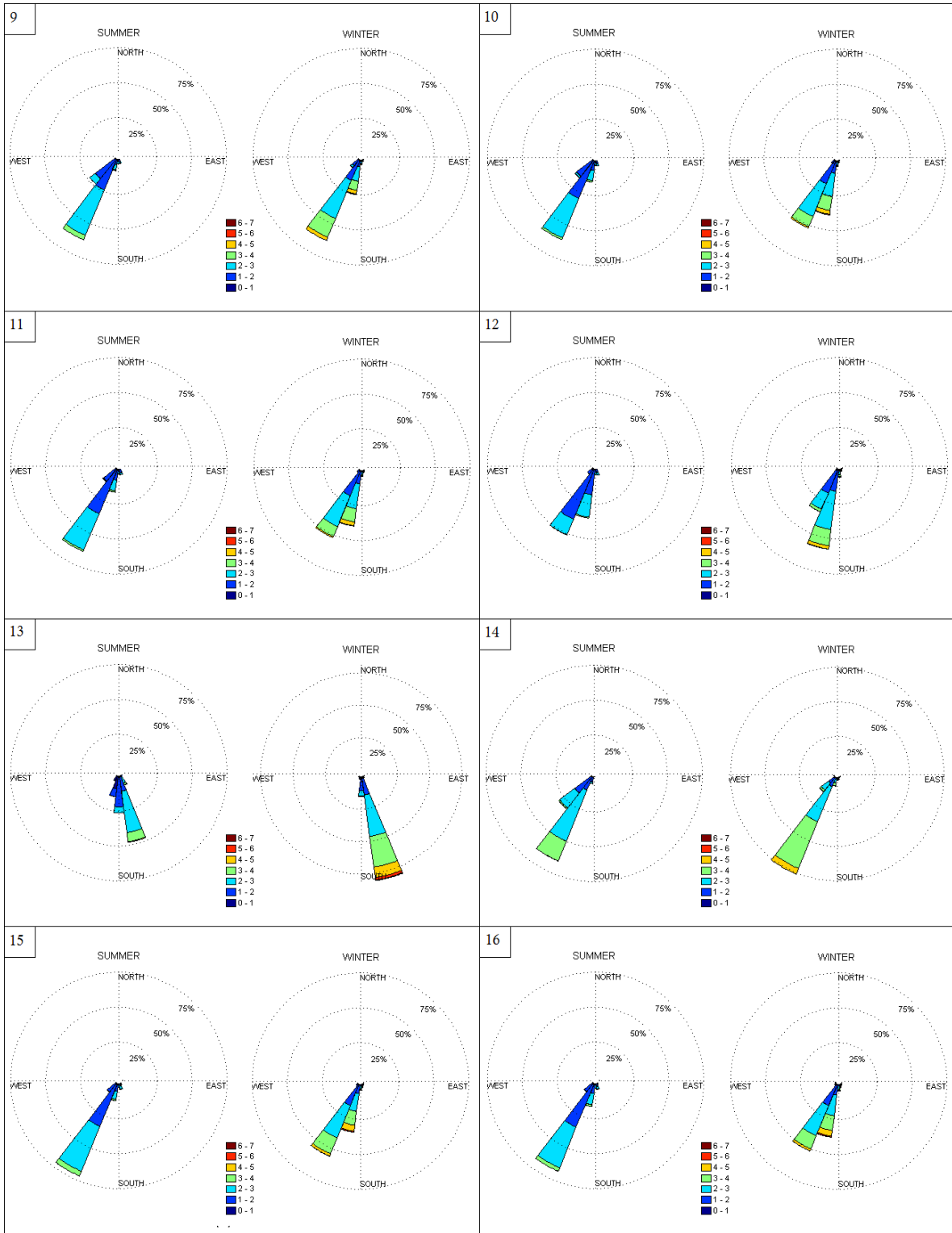


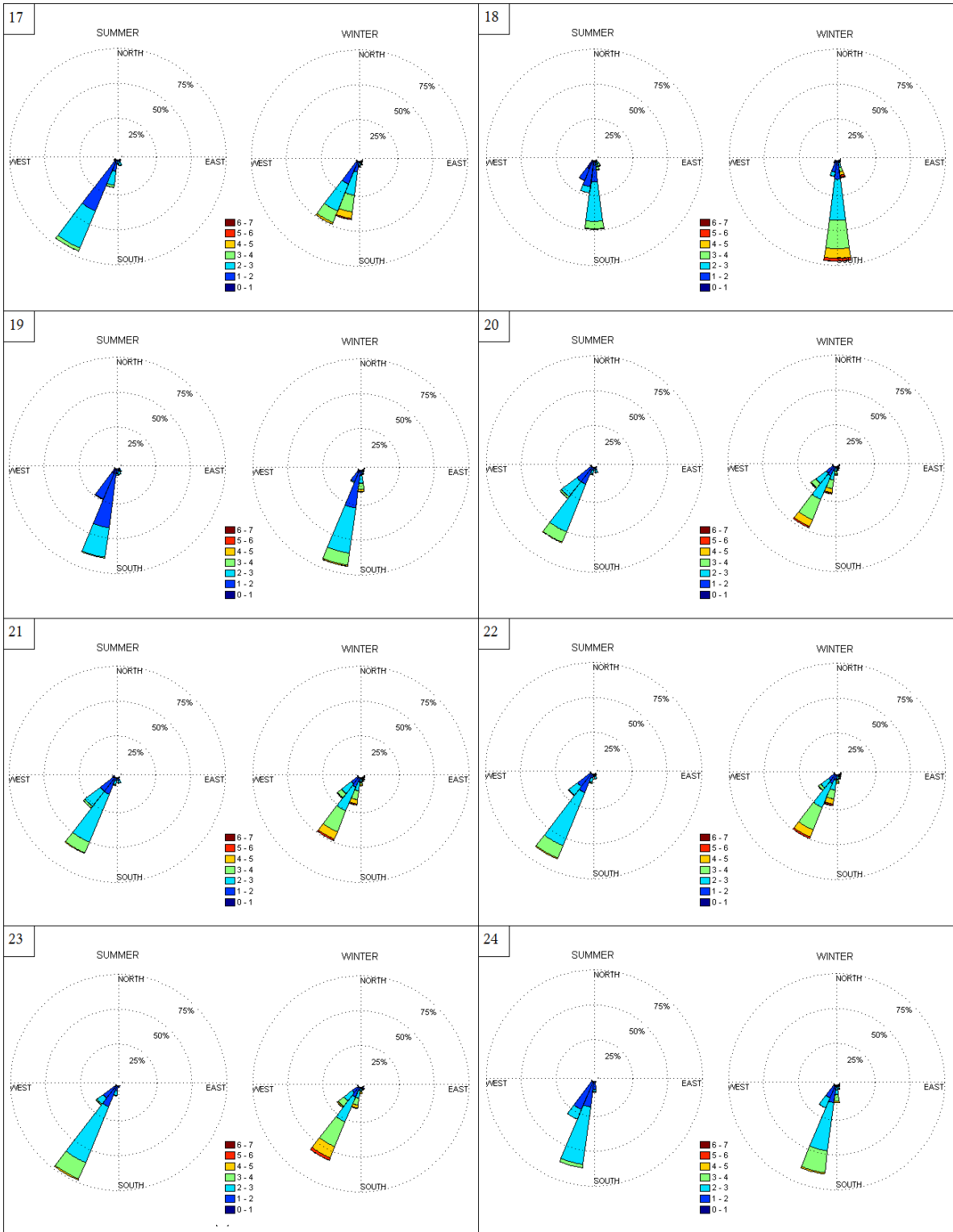




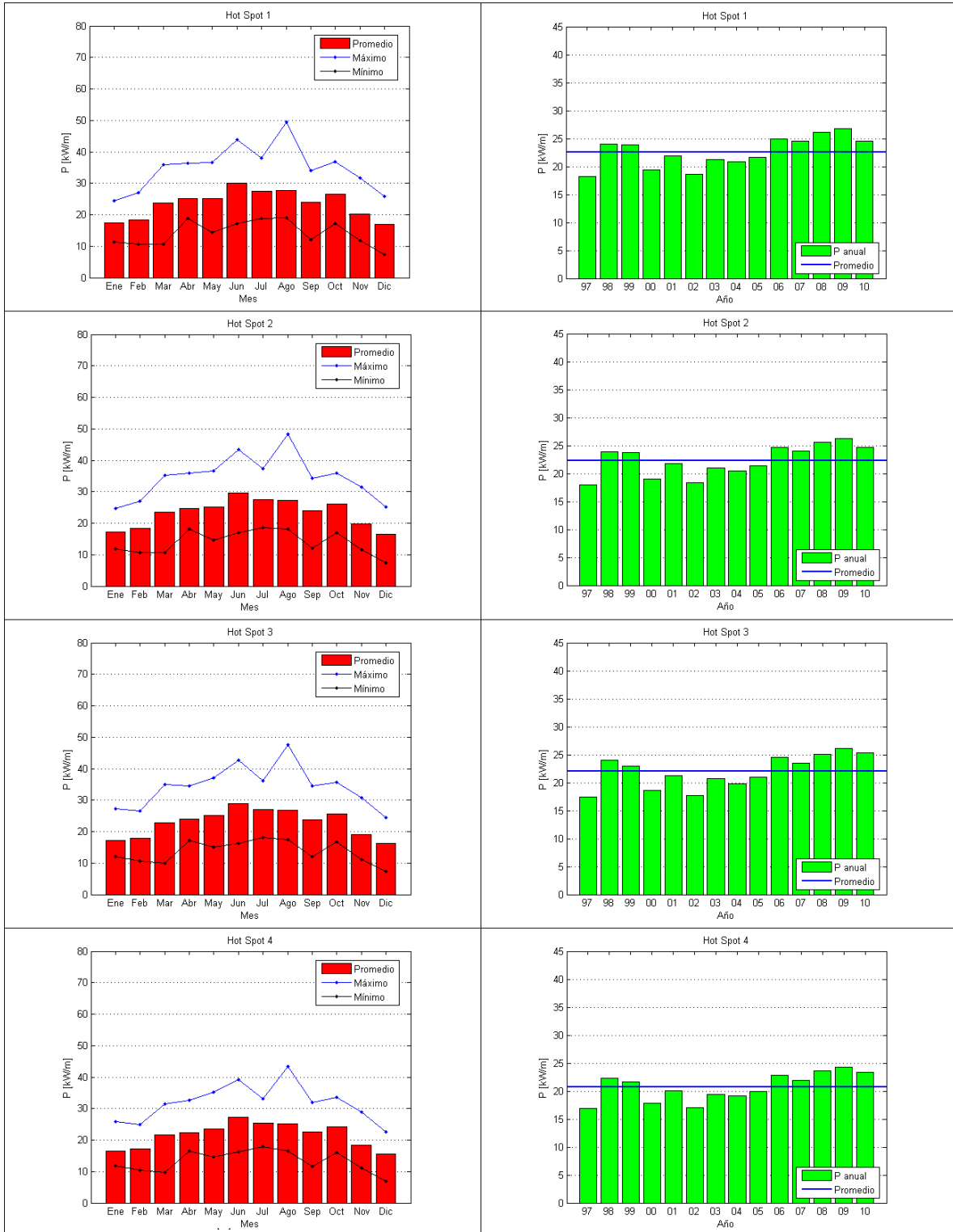
8.4. Anexo D. Rosas de oleaje

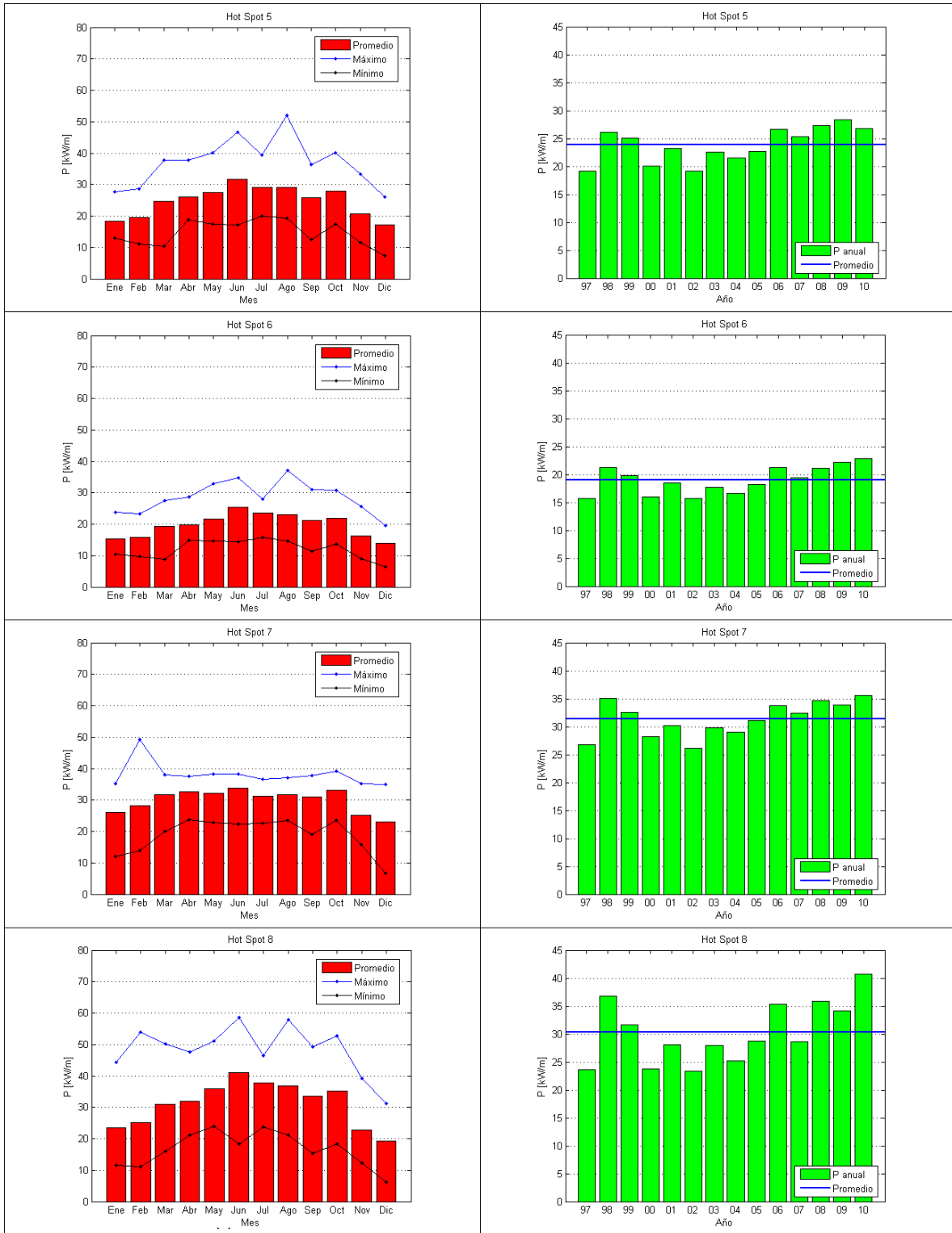


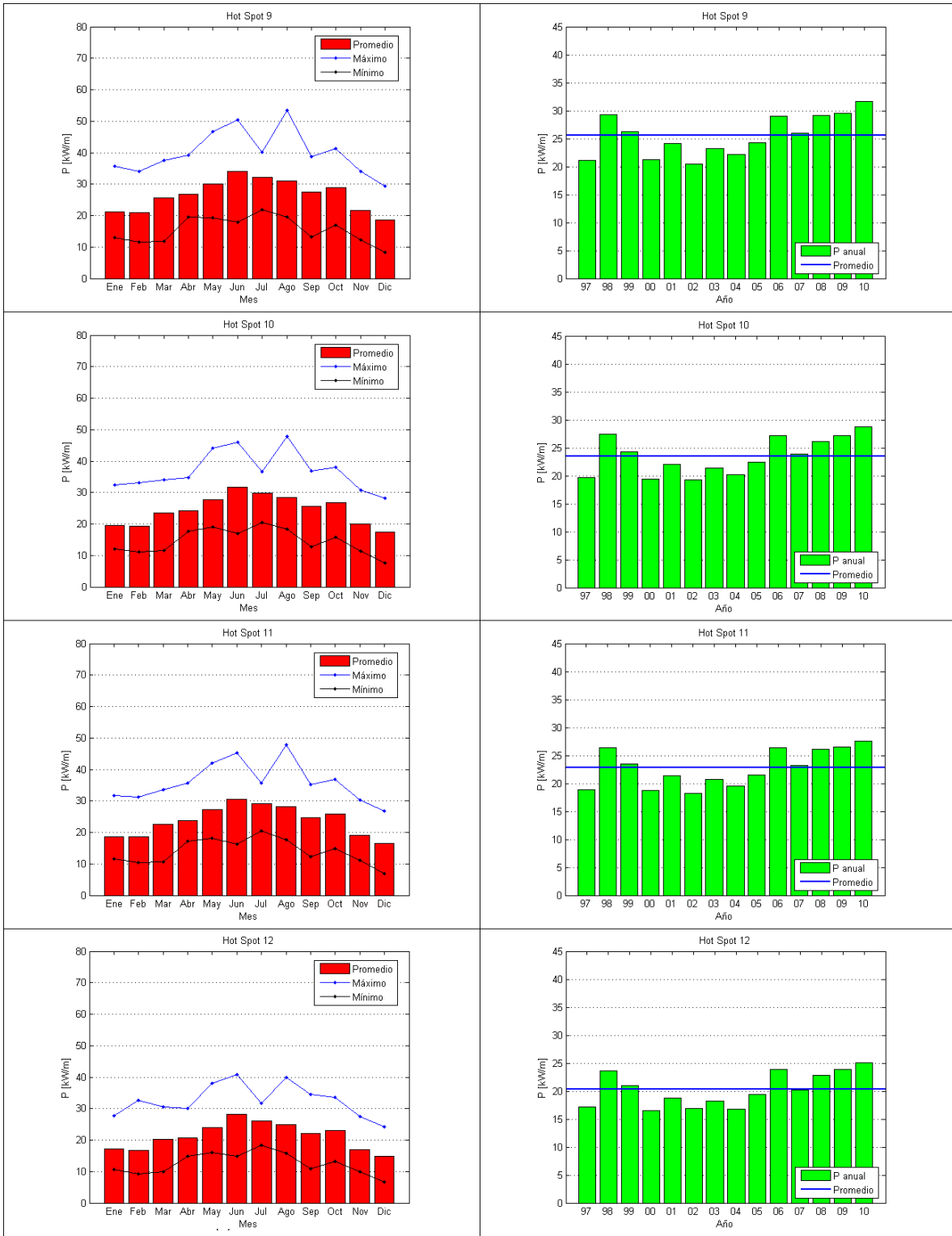


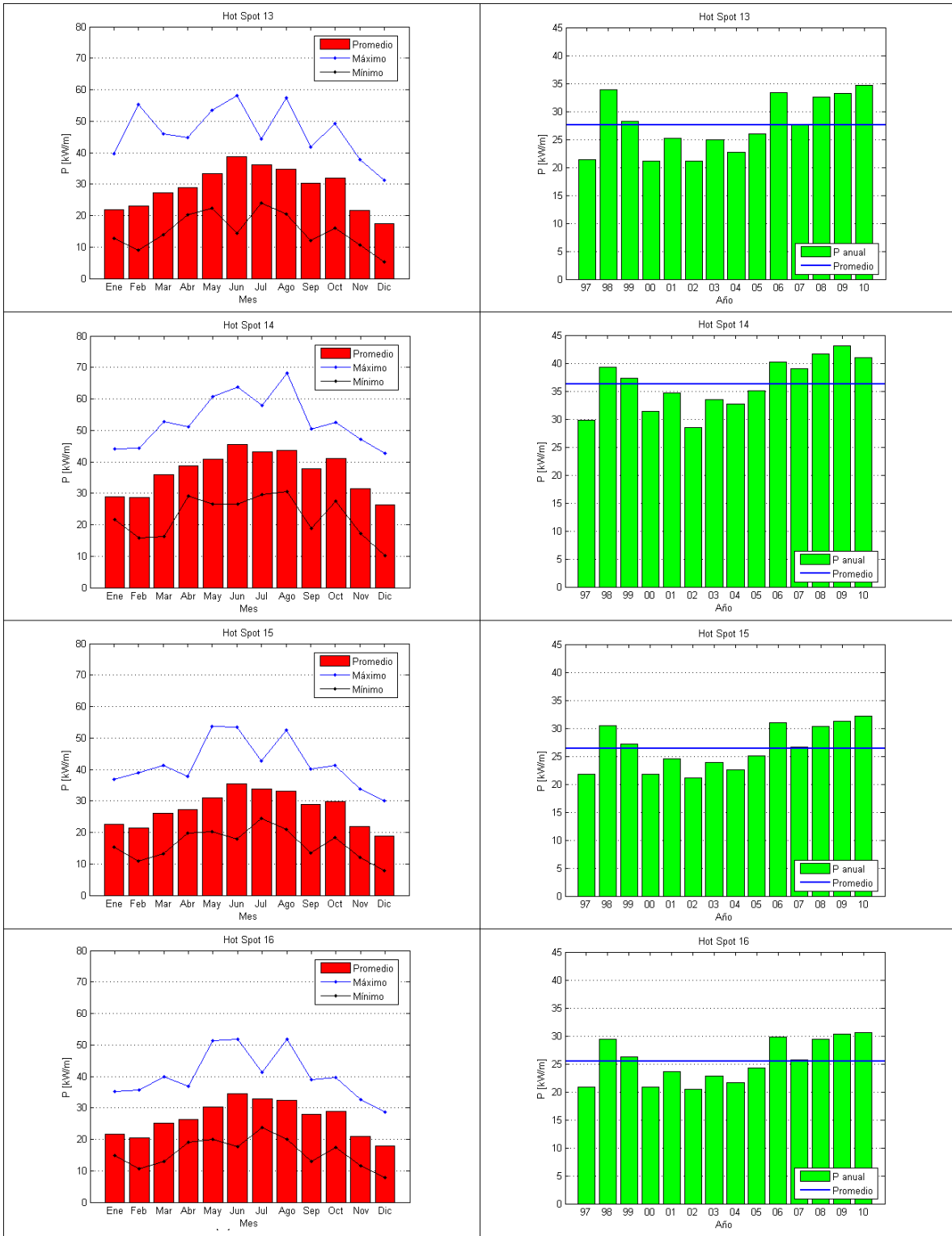


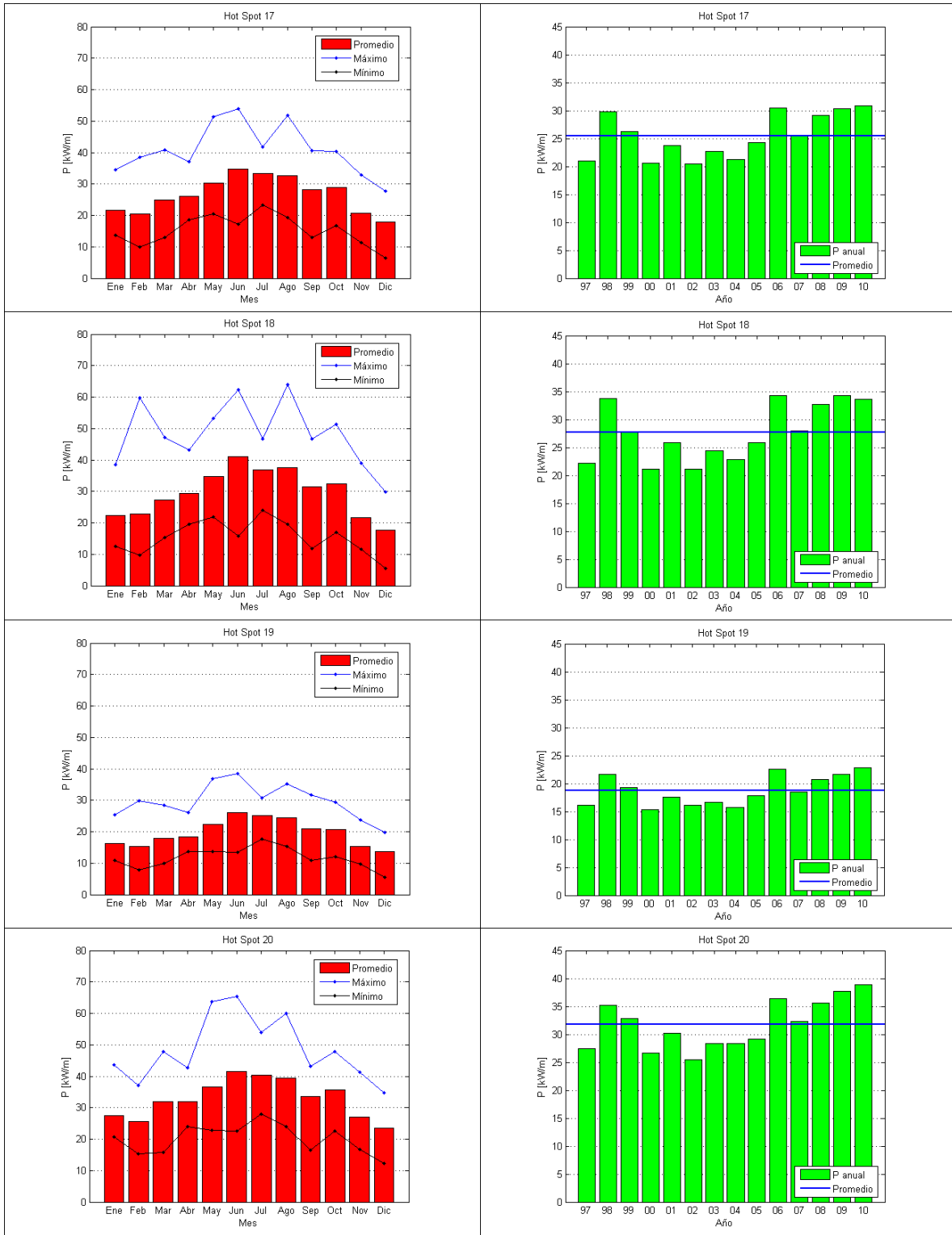
8.5. Anexo E. Histogramas de potencia (mensuales y anuales)

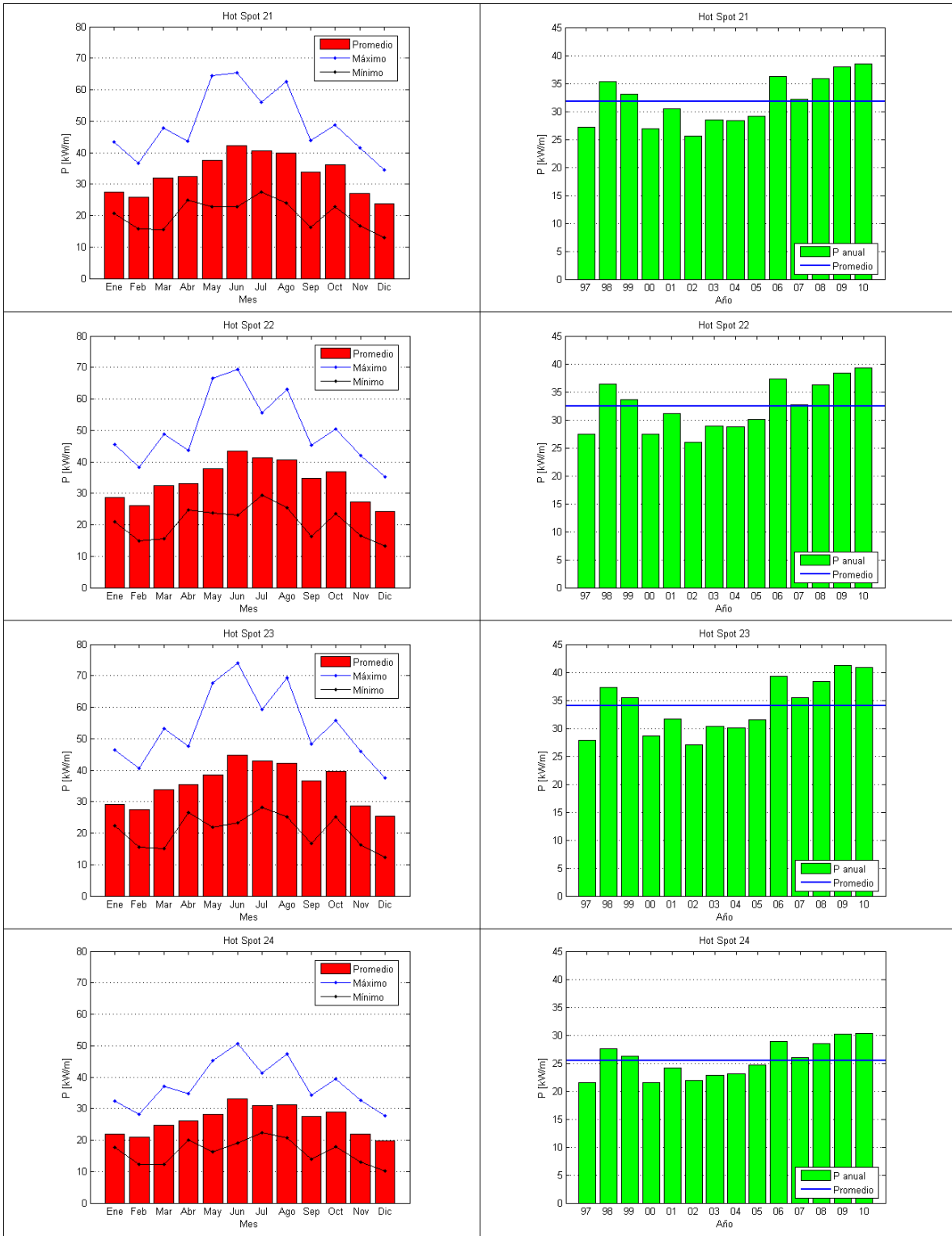




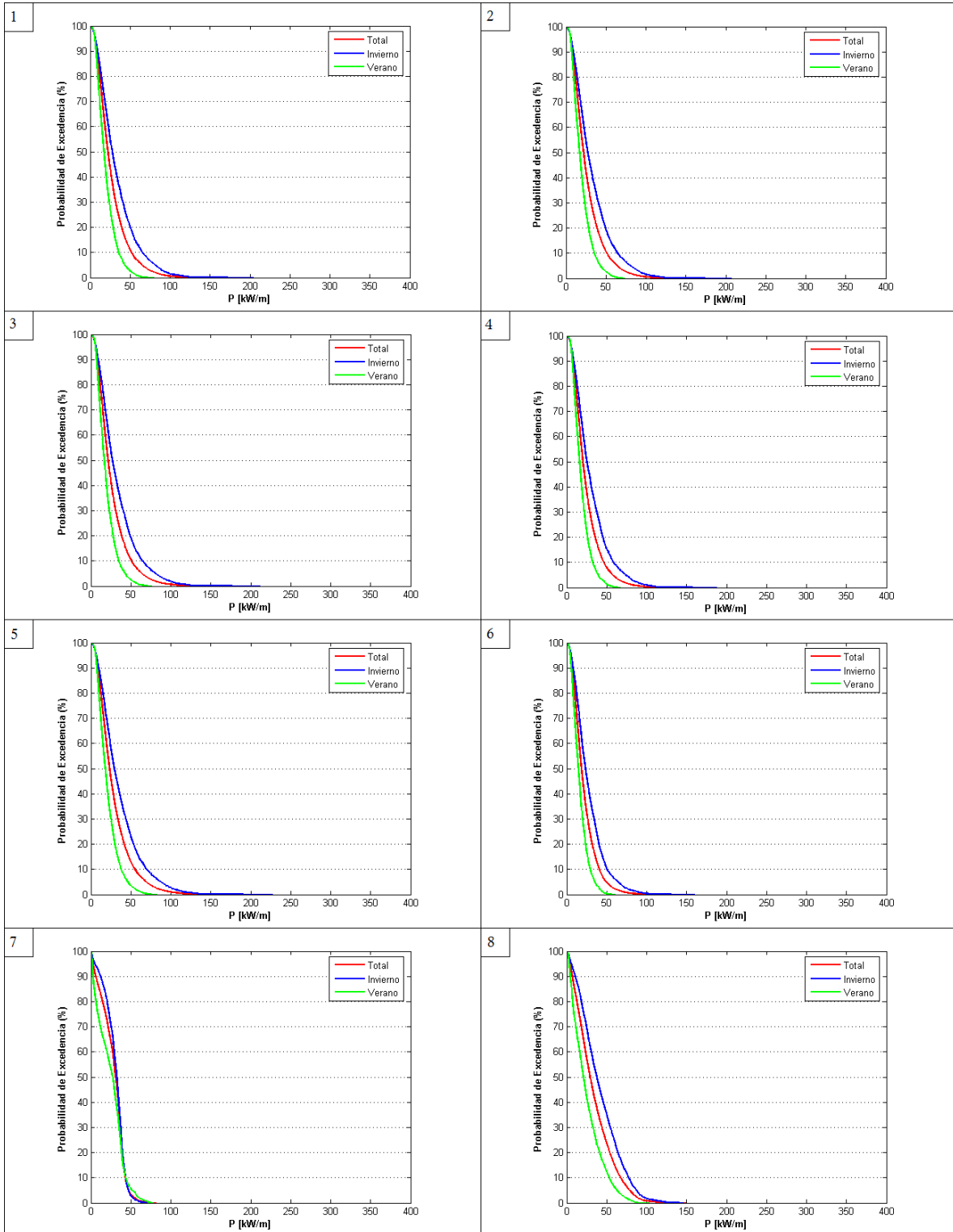


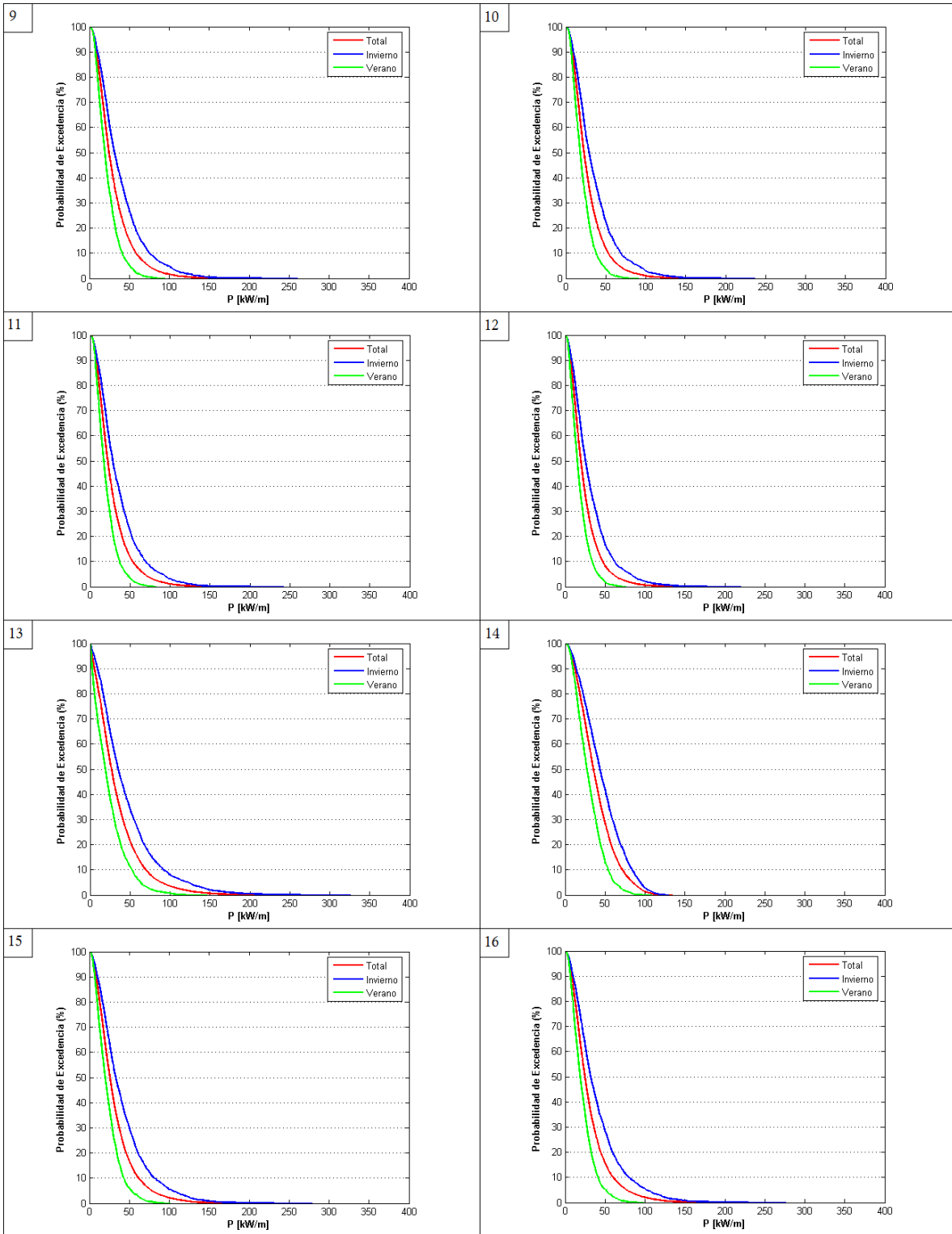




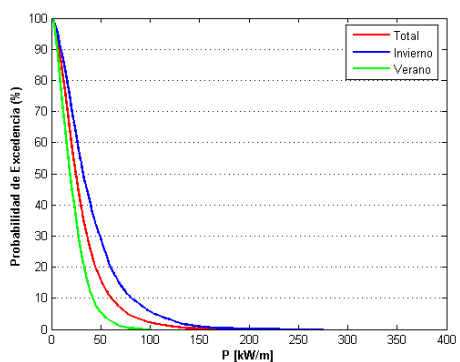


8.6. Anexo F. Probabilidad de excedencia

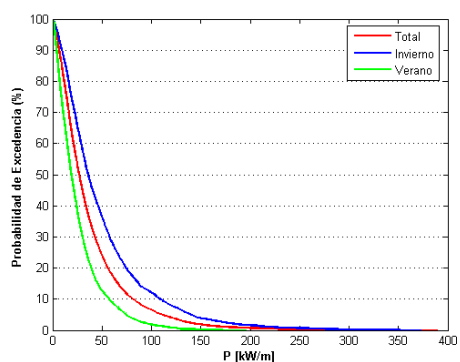




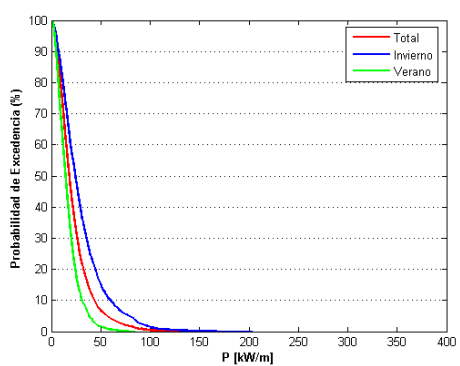
17



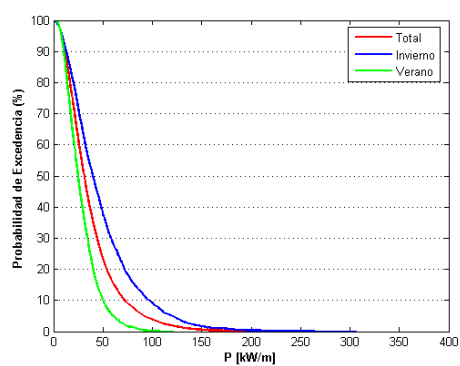
18



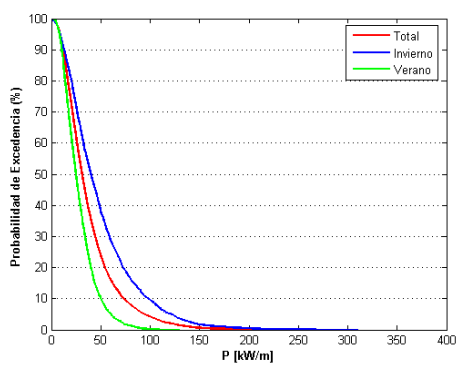
19



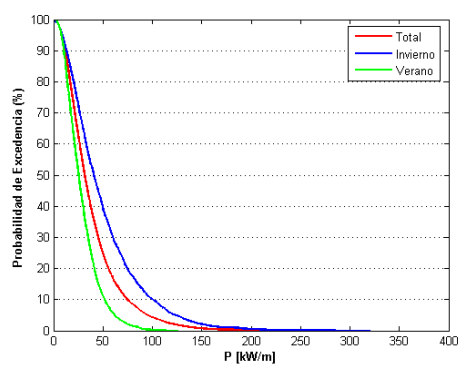
20



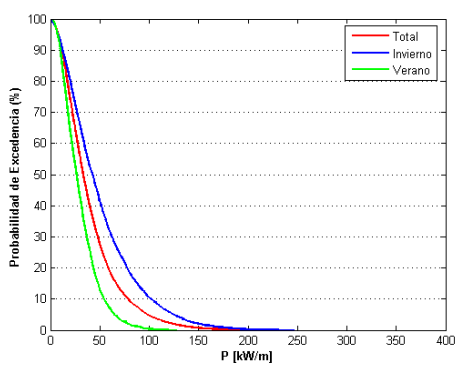
21



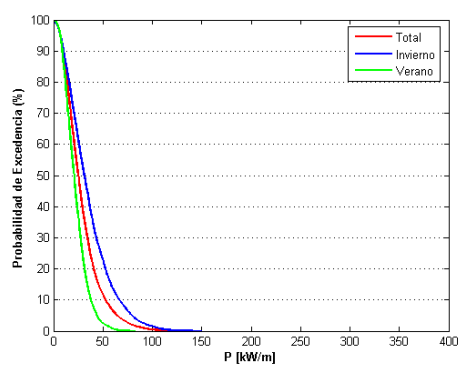
22



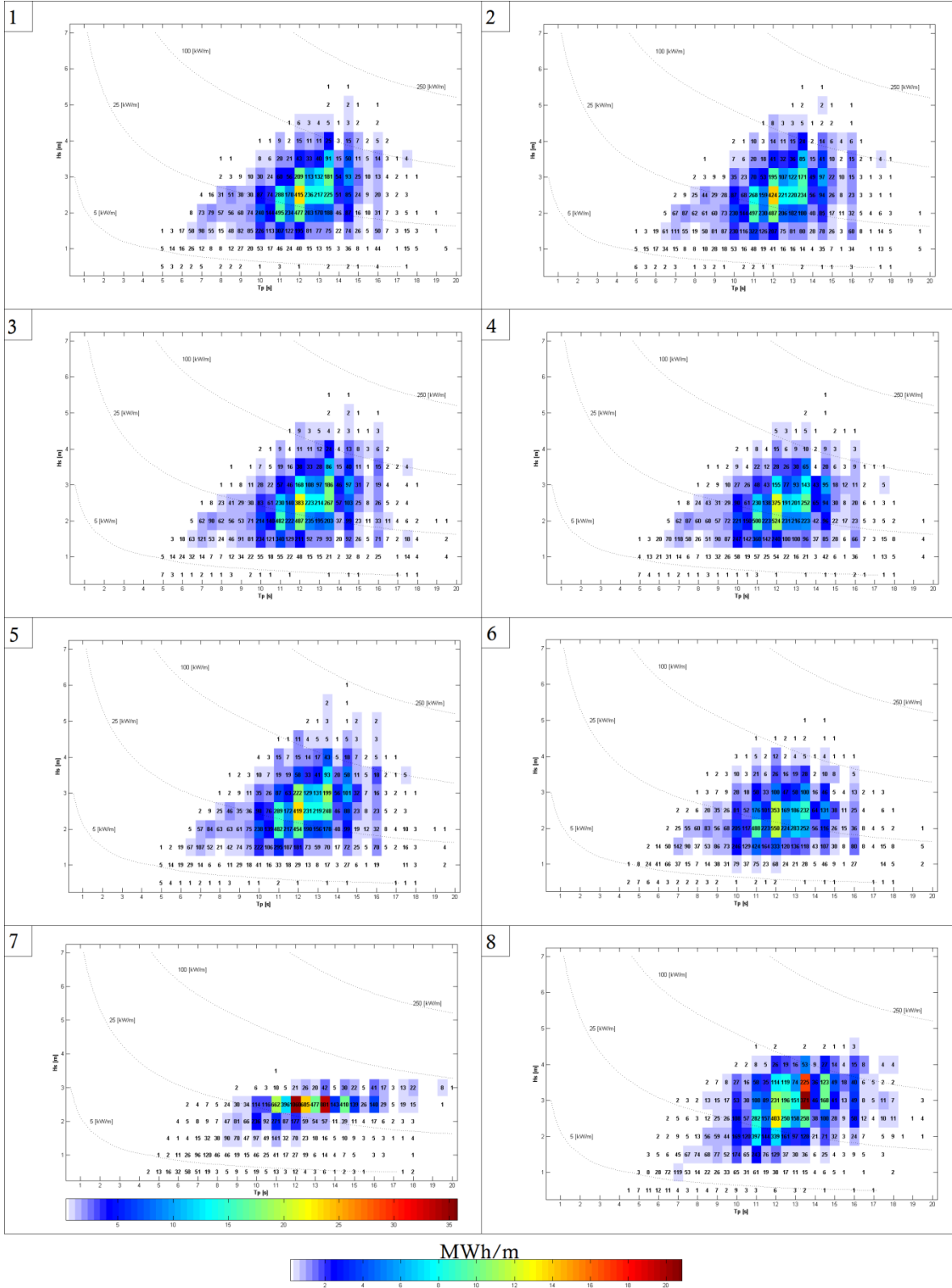
23

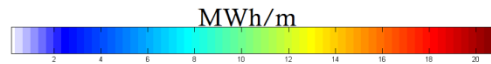
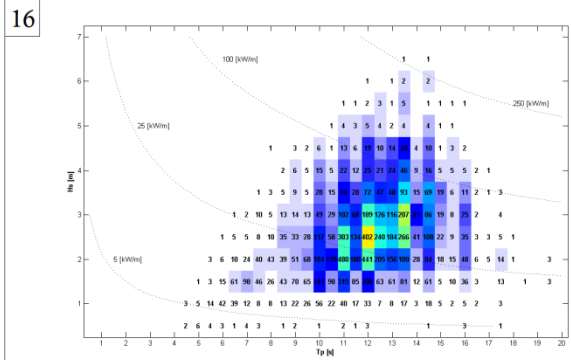
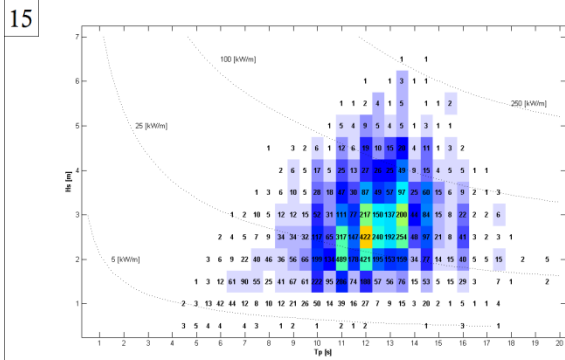
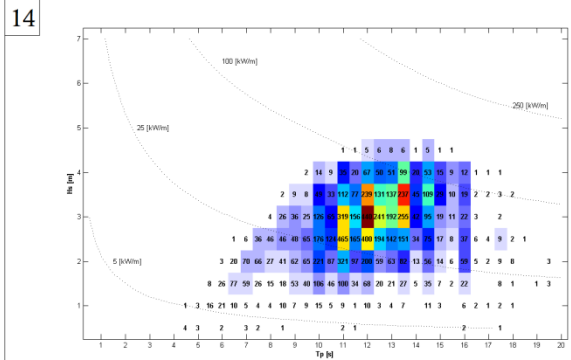
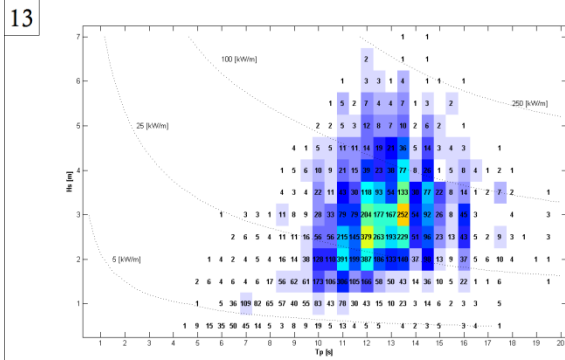
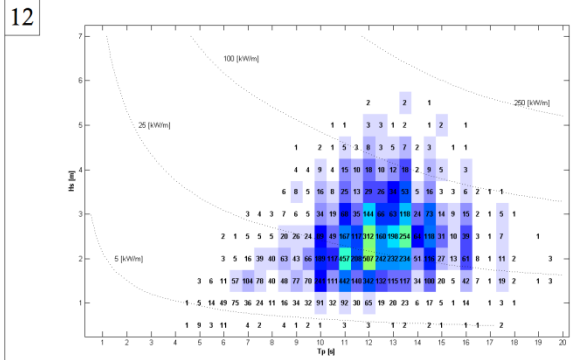
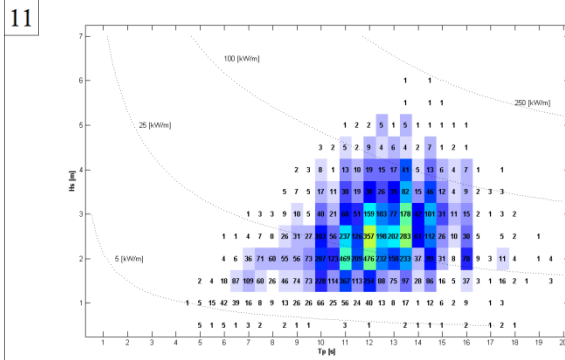
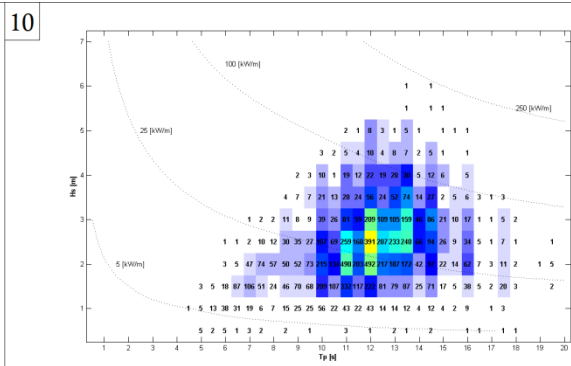
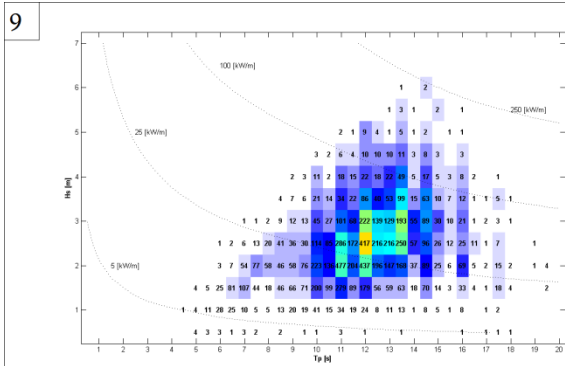


24

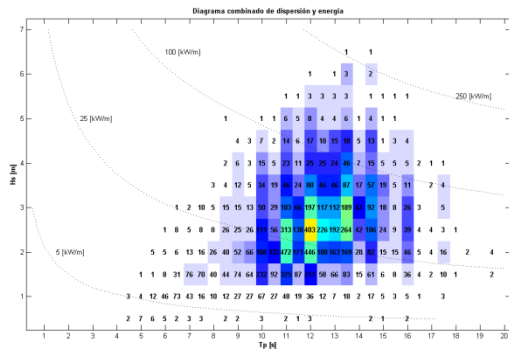


8.7. Anexo G. Diagramas de energía y dispersión

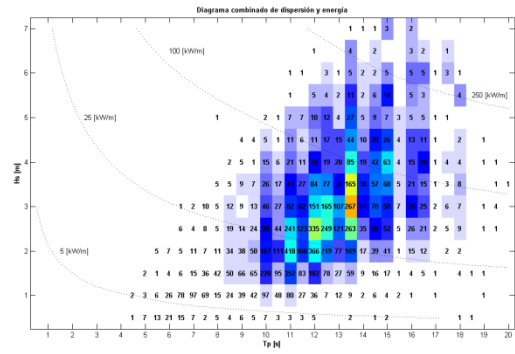




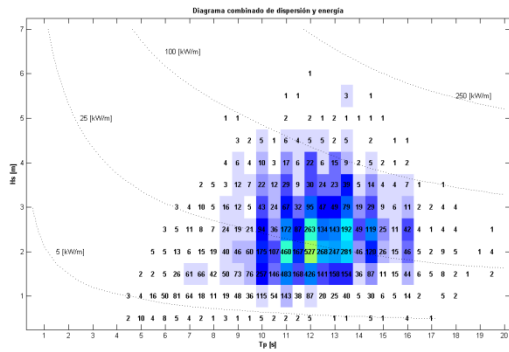
17



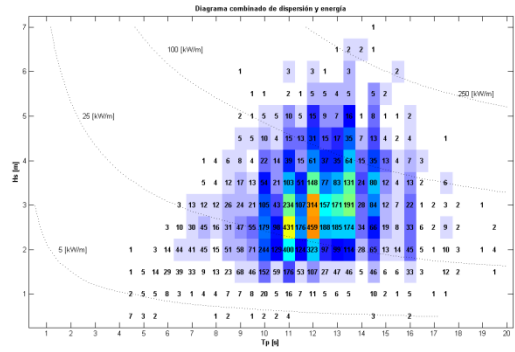
18



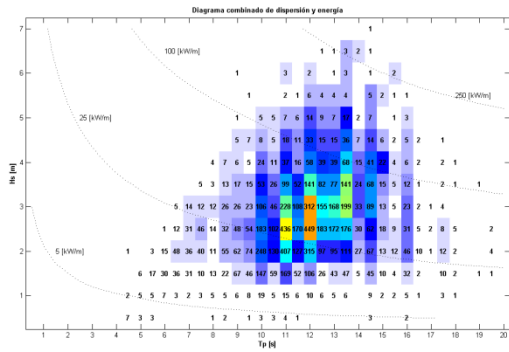
19



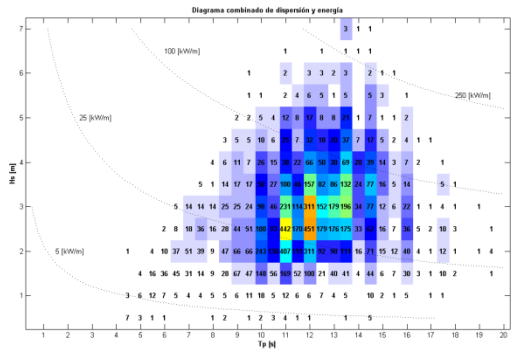
20



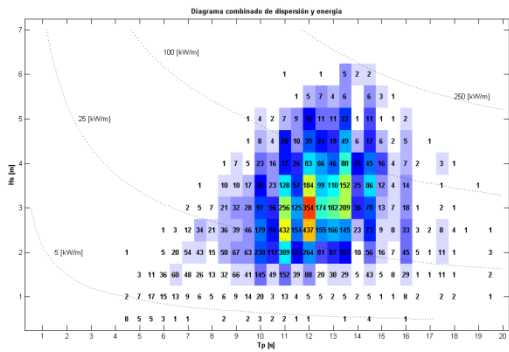
21



22



23



24

