



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADA A LA  
DETERMINACIÓN DE OLAS DE DISEÑO  
APLICACIÓN EN VALPARAÍSO, CHILE.**

**Alejandra Elizabeth Rojas Mackenna**

Enero 2015

PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADA A LA DETERMINACIÓN DE  
OLAS DE DISEÑO

APLICACIÓN EN VALPARAÍSO, CHILE.

Alejandra Elizabeth Rojas Mackenna

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

HUGO ACUÑA

Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

PATRICIO MONÁRDEZ

Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

PATRICIO WINCKLER

Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## DECLARACIÓN

---

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta memoria de titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención de Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

Alejandra Rojas Mackenna  
Alumna

---

Hugo Acuña Sfrasani  
Profesor Guía

## AGRADECIMIENTOS

---

Quisiera agradecer a todas las personas que me apoyaron de alguna manera para completar esta gran tarea; en especial por la ayuda de Dios, que me permitió hacer cosas que yo creía imposibles, ya que este trabajo significó para mí un gran desafío en el ámbito profesional pero que me permitió adquirir las herramientas básicas para el gran camino que se viene por delante como profesional.

Primeramente quiero agradecer la oportunidad que me dio Baird & Associates S.A. por darme el tema de desarrollo de mi memoria y facilitarme todos los instrumentos necesarios para llevar a cabo este proceso. Especialmente a mi profesor guía Hugo Acuña, quien tuvo la disponibilidad de ayudar con mis dudas y tomar de su tiempo para el desarrollo y revisión de este documento.

Además, quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a Manuel Contreras, quien en muchas oportunidades me ayudó a resolver problemas relacionados con la elaboración del algoritmo matemático en Matlab.

Finalmente agradezco el apoyo moral y la preocupación que tuvo mi familia, amigos y compañeros de trabajo.

## RESUMEN

---

En el diseño de estructuras costeras, el oleaje de diseño se basa sobre un análisis estadístico de valores extremos en aguas profundas para distintas clases de oleaje de acuerdo su origen y características, para luego ser propagadas hacia aguas someras. En general se asume que el carácter del oleaje que predomina en Chile es bi-modal (dos clases de oleaje en un mismo estado de mar), y para considerar eso en la práctica se acostumbra realizar una partición de los datos espectrales en aguas profundas, analizando por separado la energía proveniente del tercer cuadrante (SW) y del cuarto cuadrante (NW). Por otro lado, a medida que aumentan nuestra comprensión del oleaje, se ha observado que el oleaje reinante en Chile es de carácter multimodal en algunos casos, pudiendo distinguirse más de dos clases que pueden ser relevantes en el análisis de oleaje extremo. Al aplicar la partición espectral por cuadrante, no siempre es posible distinguir con claridad todas estas componentes que tiene el oleaje, especialmente aquéllas provenientes del NW que pueden ser relevantes en el cálculo de oleaje de diseño en casos específicos.

En este proyecto de título se propuso aplicar un método avanzado de partición de espectros, que permito identificar las constituyentes del espectro multimodal.

Se compararon los resultados obtenidos de la determinación del clima de oleaje de diseño, con estos criterios y con los métodos habitualmente utilizados en la ingeniería para realizar la partición de espectros, obteniéndose que el método de partición espectral multimodal es el más preciso, ya que este conserva la energía original de cada *peak* presente en cada estado de mar.

## ABSTRACT

---

In the design of coastal structures, design waves are chosen on the basis of statistical analysis of extreme events in deep waters for different class of waves in accordance with their origin and characteristic, then propagated to shallow waters. In general the wave climatology in the Easter South Pacific Shore is supposed to be bi-modal (two class of waves in the steady state spectrum), and for its consideration, is a common practice to make a partition of the deep waters spectral data, separately analyzing the energy of the incident waves form the third (SW) and fourth (NW) quadrant. On the other side, as our understanding of waves grows, it has been observed that some wave states in Chile have a multimodal character. In the partition by quadrants, is not always possible to distinguish with clarity all the wave components, especially the ones coming from the NW that can be relevant in the design wave calculation for specific cases.

This project sets an application of an advanced wave partition method, to allow the identification of multimodal spectral constituents.

The result of this method was compared with three other partition methods or criteria regularly used, and applied to the determination of extreme waves, concluded that the multimodal spectral partition method is the most accurate because it keep the energy of each peak present in each sea state.

# CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS, ALCANCES E HIPÓTESIS</b>	<b>5</b>
2.1	OBJETIVOS GENERALES	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.3	ALCANCES	5
2.4	HIPÓTESIS	5
<b>3.</b>	<b>MATERIALES</b>	<b>6</b>
3.1	ESPECTRO BI-DIMENSIONAL DE OLAS EN AGUAS PROFUNDAS	6
3.2	MATLAB	9
3.2.1	<i>DESCRIPCIÓN GENERAL</i>	9
3.2.2	<i>VERSIÓN</i>	10
3.3	XWAVE	10
<b>4.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>11</b>
4.1	OLEAJE EXTREMO O DE DISEÑO	11
4.1.1	<i>METODOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE DATOS EXTREMOS</i>	11
4.1.2	<i>PROCESO DE SELECCIÓN DE DATOS</i>	12
4.2	PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL	13
4.2.1	<i>PROBLEMÁTICA QUE ORIGINA LA METODOLOGÍA DE PARTICIÓN ESPECTRAL</i>	13
4.2.2	<i>RESEÑA HISTÓRICA DE LOS MÉTODOS DE PARTICIÓN</i>	13
4.3	CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA DE OLEAJE EN CHILE	14
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>16</b>
5.1	MÉTODOS DE PARTICIÓN	16
5.1.1	<i>ENERGÍA TOTAL</i>	16
5.1.2	<i>PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES</i>	17
5.1.3	<i>PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES</i>	18
5.1.4	<i>PARTICIÓN MULTIMODAL</i>	20
5.2	ALGORITMO DE PARTICIÓN MULTIMODAL	22
5.2.1	<i>AISLAMIENTO DEL PEAK DE ENERGÍA ESPECTRAL</i>	22
5.2.2	<i>IDENTIFICAR Y COMBINAR LOS PEAK ESPECTRALES QUE SON COMUNES</i>	22
5.2.3	<i>REMOCIÓN DE PARTICIONES CON ENERGÍAS BAJAS</i>	24
5.2.4	<i>CÁLCULO DE ESTADÍSTICAS PARA CADA PARTICIÓN</i>	24
5.2.5	<i>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO PARTICIONADOR</i>	24
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS DE PARTICIONES</b>	<b>26</b>
6.1	ENERGÍA TOTAL	26
6.2	PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES	28
6.3	PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES	29
6.4	PARTICIÓN MULTIMODAL	31

6.5	DISCUSIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS INTENSIDAD DE PERÍODOS -----	34
6.5.1	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR CUADRANTES</i> -----	34
6.5.2	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR SECTORES</i> -----	36
6.5.3	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIÓN MULTIMODAL</i> -----	38
6.5.4	<i>PARTICIÓN POR SECTORES VERSUS MULTIMODAL</i> -----	40
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS EN EL NODO VALPARAÍSO -----</b>	<b>43</b>
7.1	LISTA DE MAYORES TORMENTAS -----	44
7.1.1	<i>COMPARACIÓN DE SELECCIÓN DE TORMENTAS</i> -----	47
7.2	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE TORMENTAS -----	50
7.2.1	<i>TERCER CUADRANTE</i> -----	50
7.2.2	<i>CUARTO CUADRANTE</i> -----	52
7.2.3	<i>RESUMEN</i> -----	54
7.3	DISCUSIÓN: RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS -----	56
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----</b>	<b>58</b>
8.1	CONCLUSIONES -----	58
8.2	RECOMENDACIONES PARA INGENIERÍA -----	59
<b>9.</b>	<b>REFERENCIAS -----</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 1: ALGORITMO PARTICIONADOR DE ESPECTROS</b>		
<b>ANEXO 2: CONTROL DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE ERROR</b>		
<b>ANEXO 3: ANÁLISIS DEL CARÁCTER MULTIMODAL</b>		

## Lista de tablas

---

TABLA 5.1:	SECTORES IDENTIFICADOS POR LA INSPECCIÓN VISUAL. -----	19
TABLA 5.2:	RESUMEN DE METODOLOGÍAS. -----	21
TABLA 5.3:	PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE OLEAJE Y REMOCIÓN DE ENERGÍAS. -----	25
TABLA 6.1:	CRITERIOS DE SEPARACIÓN. -----	32
TABLA 7.1:	RESUMEN DE PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN UTILIZADOS. -----	43
TABLA 7.2:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO A LA ENERGÍA TOTAL Y EL MÉTODO DE PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES. -----	44
TABLA 7.3:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO AL MÉTODO DE PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES. -----	45
TABLA 7.4:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO AL MÉTODO DE PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL. -----	46
TABLA 7.5:	COMPARACIÓN DE SELECCIÓN DE TORMENTAS OBTENIDAS POR LA ENERGÍA TOTAL Y EL MÉTODO DE PARTICIÓN POR CUADRANTES. -----	48
TABLA 7.6:	COMPARACIÓN DE LA SELECCIÓN DE TORMENTAS ENTRE LOS RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES Y LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL MULTIMODAL. ---	49
TABLA 7.7:	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS NODO VALPARAÍSO. ENERGÍA TOTAL Y PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES. EL CÁLCULO SUPERIOR E INFERIOR INDICA LA BANDA DE CONFIANZA — + 2 DESVIACIONES ESTÁNDAR. -----	54

TABLA 7.8: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS NODO VALPARAÍSO. PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES Y PARTICIÓN MULTIMODAL. EL CÁLCULO SUPERIOR E INFERIOR INDICA LA BANDA DE CONFIANZA $- + 2$ DESVIACIONES ESTÁNDAR. -----	55
---	----

## Lista de figuras

FIGURA 1: EJEMPLOS DE ESPECTROS UNI-MODAL (A), BI-MODAL (B) Y TRI-MODAL (C).-----	1
FIGURA 2: EJEMPLO DE RECONSTRUCCIÓN ESPECTRAL. -----	3
FIGURA 3: POSICIÓN GEOGRÁFICAS NODO VALPARAÍSO. -----	4
FIGURA 4: ÁREA DE COBERTURA DE OLAS DEL PACÍFICO. -----	6
FIGURA 5: PUNTOS DE VALIDACIÓN OLAS DEL PACÍFICO. -----	7
FIGURA 6: GRÁFICO DE VALIDACIÓN DE HMO DE OLAS DEL PACÍFICO VS. TOPEX EN VALPARAÍSO. -----	8
FIGURA 7: COMPARACIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO, OLAS DEL PACÍFICO VS MEDICIONES DE LA BOYA TRIAXYS EN VALPARAÍSO. -----	9
FIGURA 8: PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL DISEÑO DE OLEAJE EXTREMO. -----	11
FIGURA 9: COMPARACIÓN ENTRE LAS SERIES SELECCIONADAS AM Y POT PARA UN PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1980 Y 1984. -----	12
FIGURA 10: PROCESO PARA DETERMINAR EL OLEAJE EXTREMO O DE DISEÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. -----	13
FIGURA 11: ENERGÍA TOTAL CONSIDERADA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE RESÚMENES. -----	17
FIGURA 12: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL (POR CUADRANTE) APLICADA A CADA ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	17
FIGURA 13: ROSA DE INTENSIDAD DE PERÍODO DEL NODO VALPARAÍSO. -----	19
FIGURA 14: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL (POR SECTORES) APLICADA A CADA ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	19
FIGURA 15: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADO A UN ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	20
FIGURA 16: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL. LA DIRECCIÓN DE LAS FLECHAS INDICA EL CAMINO DE MAYOR PENDIENTE. -----	22
FIGURA 17: ROSA DE INTENSIDAD NODO VALPARAÍSO – ENERGÍA TOTAL. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS.-----	26
FIGURA 18: EJEMPLOS DE ENERGÍAS OCULTAS AL CONSIDERAR EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE RESÚMENES CON LA ENERGÍA TOTAL DEL ESPECTRO. -----	27
FIGURA 19: RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES, NODO VALPARAÍSO. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS.-----	28
FIGURA 20: RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES, NODO VALPARAÍSO. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS. -----	30
FIGURA 21: ROSA DE INTENSIDAD DE PUNTO DE PERIODO PEAK EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN PEAK PARA LOS 30 AÑOS DE DATOS DE VALPARAÍSO. CONSIDERANDO TODAS LAS LISTAS DE PARTICIONES OBTENIDAS.-----	31
FIGURA 22: RESULTADOS DE AGRUPACIÓN POR PARTICIÓN MULTIMODAL, NODO VALPARAÍSO. A) SWELL REMOTO DEL NW Y B) SEA Y SWELL CERCANO DESDE EL NW AL S. -----	33
FIGURA 23: RESULTADOS DE AGRUPACIÓN POR PARTICIÓN MULTIMODAL, NODO VALPARAÍSO. A) SWELL REMOTO DEL SW Y W Y B) SEA - SWELL CERCANO DEL SW. -----	33
FIGURA 24: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y LOS RESULTADOS DE LAS PARTICIONES POR CUADRANTES (B) Y (C). -----	35
FIGURA 25: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y LOS RESULTADOS DE LAS PARTICIONES POR SECTORES (B), (C), (D) Y (E). -----	37
FIGURA 26: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y TODOS LOS RESULTADOS DE LA PARTICIÓN MULTIMODAL APLICADA A CADA ESPECTRO EN PARTICULAR (B). -	38

FIGURA 27: RESUMEN DE LAS AGRUPACIONES DE LOS SISTEMAS DE OLEAJES DETERMINADOS POR EL MÉTODO DE PARTICIÓN MULTIMODAL. -----	39
FIGURA 28: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA EL SWELL REMOTO DEL SW Y W. -----	40
FIGURA 29: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SEA Y SWELL CERCANO DEL SW. -----	41
FIGURA 30: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SWELL REMOTO DEL NW. -----	41
FIGURA 31: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SEA Y SWELL CERCANO DEL NW A S. -----	42
FIGURA 32: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES REMOTOS DEL TERCER CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	50
FIGURA 33: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES CERCANOS DEL TERCER CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	51
FIGURA 34: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES REMOTOS DEL CUARTO CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	52
FIGURA 35: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES CERCANOS DEL CUARTO CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009.-----	53

# 1. INTRODUCCIÓN

La definición del clima de oleaje de diseño en un proyecto de ingeniería habitualmente se basa en el análisis estadístico de valores extremos de altura de oleaje en aguas profundas, para diferentes períodos de retorno, las cuales son propagadas hacia aguas someras utilizando espectros sintéticos (Goda, 2000).

El concepto de espectro se atribuye a Newton al descubrir que la luz solar puede ser descompuesta en un espectro de colores de rojos a violetas mediante un prisma. Esto quiere decir que una gran cantidad de componentes de colores conforman el blanco, cuya intensidad de luz varía respecto a la longitud de onda. Esta técnica de descomposición ha sido aplicada en muchos fenómenos ondulatorios, como es en el caso del oleaje, donde el espectro de oleaje se refiere a una distribución de energía en función de frecuencias y direcciones. Por tanto el espectro de oleaje o estado de mar sobre un punto de la superficie del océano, representa la suma de sistemas de oleajes con diferentes frecuencias y direcciones y que fueron producidos durante una tormenta, en un instante determinado.

El espectro del oleaje puede presentar un carácter uni-modal (un sólo *peak* de energía), bi-modal (dos *peak* de energía), tri-modales (tres *peak* de energía) o más, como se muestra en la Figura 1; donde cada *peak* de energía representa un tipo de oleaje de origen y características similares.

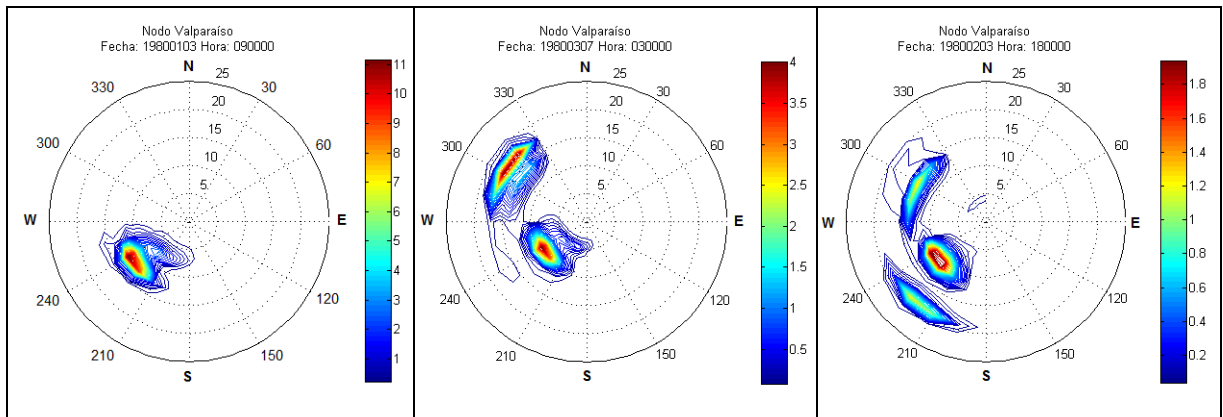


Figura 1: Ejemplos de espectros uni-modal (a), bi-modal (b) y tri-modal (c). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

Para desarrollar un análisis de valores extremos de manera correcta, se usan las mayores tormentas en aguas profundas. En el proceso de selección de estas tormentas se aplica una partición a los estados de mar de una base de datos espectral (según ciertos criterios de dirección y frecuencia), para luego clasificar las tormentas de acuerdo a su origen y características. En cada una de estas listas de tormentas, se seleccionan las mayores magnitudes de altura por medio del método POT (Valores sobre un umbral) y se extrapolan los datos con el mejor ajuste de distribución de probabilidad, para obtener las alturas de olas de diseño en función de diferentes períodos de retorno (Goda, Y., 2000).

En Chile se ha asumido, basados en observación y mediciones que predomina el carácter bi-modal del oleaje, por ello, se acostumbra realizar una partición de la base de datos espectral

en aguas profundas, analizando por separado la energía proveniente del tercer cuadrante (SW) y del cuarto cuadrante (NW).

El último tiempo, con el aumento de mediciones y el avance en la técnica se ha observado que el oleaje reinante en Chile es de carácter multimodal (Scott, D., D. Resio y C. Pantoja, 2002), con olas generadas localmente (sea<sup>1</sup>), swell<sup>2</sup> de generación cercana proveniente del NW, swell de generación remota del hemisferio sur, swell de generación remota del hemisferio norte y oleaje generado por ciclones tropicales en aguas adyacentes a América Central. Al aplicar la partición espectral por cuadrante, no siempre es posible distinguir con claridad todas estas componentes que tiene el oleaje, especialmente aquéllas provenientes del NW que pueden ser relevantes en el cálculo de oleaje de diseño.

En este proyecto de título, se utilizaron los datos espectrales 2D (frecuencia-dirección) del nodo Valparaíso de la base de datos de olas Chile IV (Baird, 2010), cuyas coordenadas geográficas son; latitud -33° y longitud -73° (ver Figura 3), para determinar las componentes espectrales de cada estado de mar. Esto se logró mediante la aplicación algoritmos matemáticos que están basados en el método de partición espectral multimodal. Después de aplicar la partición espectral multimodal, se agruparon los sistemas identificados según criterios predeterminados por las características del oleaje, reconstruyendo sus espectros individuales separados, a partir de los cuales se determinaron los parámetros espectrales de cada grupo formado (este proceso se explica en la Figura 2). Luego para cada clase o sistema de oleaje se obtienen las tormentas de diseño en aguas profundas.

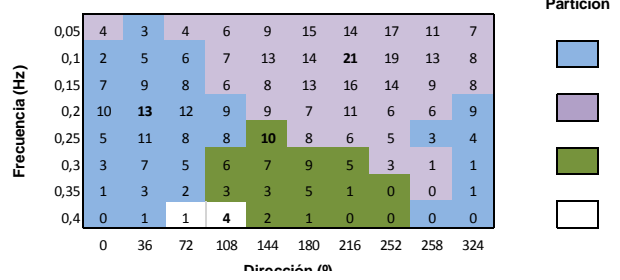
Considerando que una de las partes más importantes para la determinación del oleaje de diseño es la clasificación de las tormentas de acuerdo a su origen y características, se analizaron los resultados del oleaje de diseño obtenidos por el método de partición multimodal en conjunto a otras metodologías o criterios aplicados para la selección de tormentas.

---

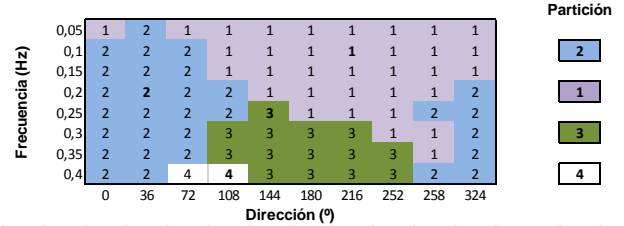
<sup>1</sup> *Sea*: Conocido también como mar de viento, son olas irregulares que se encuentran dentro de la zona de generación, producto de la acción de vientos o sistemas de tormentas locales, que se caracterizan por períodos de ola relativamente cortos.

<sup>2</sup> *Swell*: Conocido como mar de fondo, son olas regulares de origen remoto por que se han alejado de la zona de generación, las cuales se caracterizan por poseer una dirección principal y perfiles cuasi-sinusoidales con periodos más largos.

A cada espectro (de la base de datos de 30 años) se le aplica la partición espectral multimodal

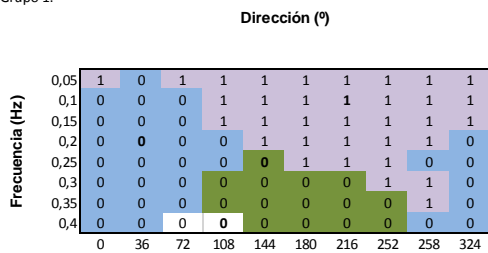


Se obtienen archivos temporales para cada espectro denominados *templates*, el 1 se le asigna a la partición con mayor energía

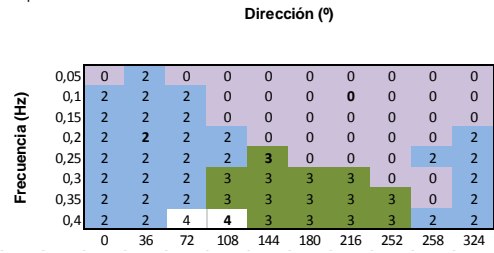


Con los resultados de la partición espectral multimodal: Se clasifica cada partición según el tipo de oleaje, de acuerdo a criterios preestablecidos y si dos o más particiones de un mismo espectro clasifican en el mismo grupo, estas se unen en una sola

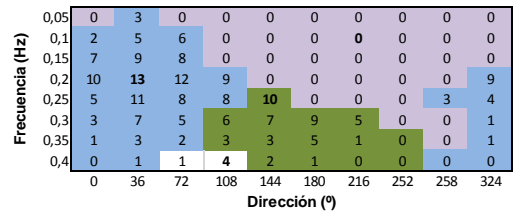
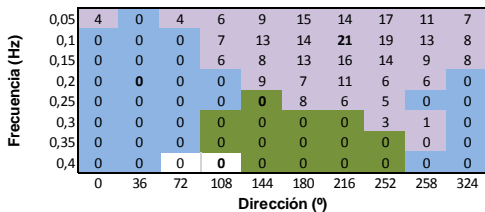
Grupo 1:



Grupo 2:

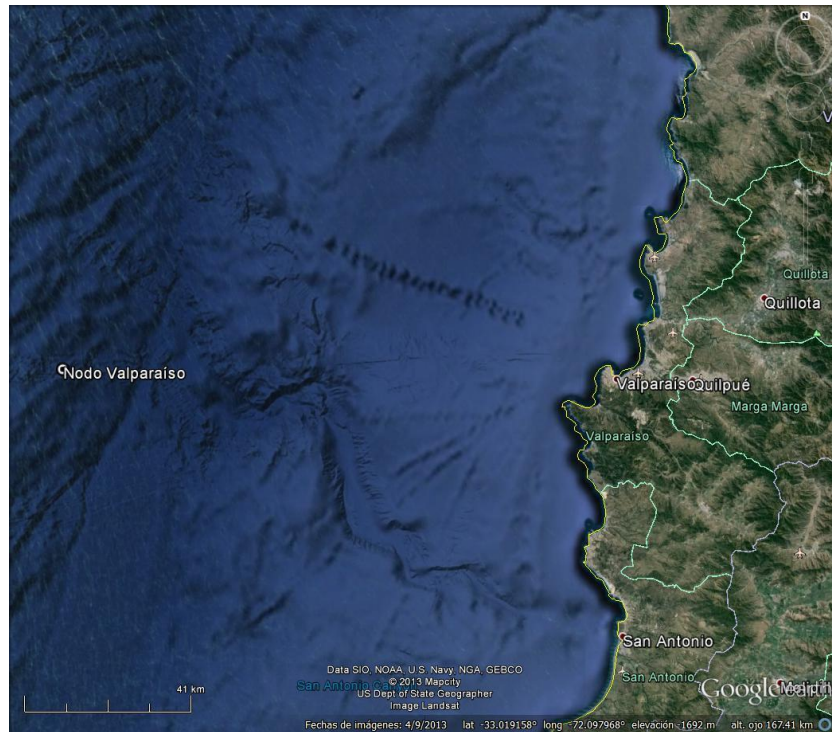


Se obtienen celdas para los diferentes tipos de oleajes que contiene la energía espectral de cada partición de forma aislada, según la posición del *templates* y la clasificación realizada



Para cada tipo de oleaje, se reconstruyen los espectros según el formato original de entrada para futuros análisis y se calculan los parámetros de resúmenes para cada espectro, generando archivos por separados según el tipo de oleaje clasificado

Figura 2: Ejemplo de reconstrucción espectral. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3: Posición geográficas nodo Valparaíso. Fuente: Google Earth.**

La motivación principal que llevó a desarrollar este proyecto de título fue contribuir con una nueva herramienta para determinar el oleaje de diseño de los proyectos de ingeniería que se desarrollan a lo largo de Chile, específicamente para aquellos casos protegidos del oleaje incidente proveniente del SW y que están directamente influenciados del oleaje del hemisferio Norte, que permita analizar por separado las tormentas en aguas profundas según su dirección de procedencia.

El aporte para las ciencias de ingeniería que proporcionó esta memoria fue sacar conclusiones respecto a qué método de selección de tormentas es el más adecuada para el diseño de una obra de ingeniería tomando en cuenta la dirección del oleaje extremo y recomendaciones para futuros proyectos con características de oleaje ya mencionadas.

Esta memoria parte de la base de que el lector tiene conocimientos del oleaje, por lo cual no se darán detalles de los conceptos básicos de esta materia. Para aquellos lectores interesados en nociones más generales respecto al oleaje se recomiendan las siguientes lecturas:

- Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. Singapore: World Scientific.
- Dean, R. y Darlymple, R., 1991. Water Wave Mechanics for engineers and Scientists. Singapore: World Scientific.
- Liu, Z. y Frigaard, P., 2001. Generation and analysis of random waves.

## **2. OBJETIVOS, ALCANCES E HIPÓTESIS**

### **2.1 OBJETIVOS GENERALES**

- 1) Aplicar un método avanzado de partición espectral multimodal.
- 2) Identificar las componentes espectrales de una base de datos de oleaje.
- 3) Realizar un análisis estadístico de valores extremos de altura significativa de oleaje con método tradicional y el método partición espectral multimodal propuesto.
- 4) Comparar y analizar los resultados con otras metodologías de particiones espectrales habitualmente utilizadas para seleccionar tormentas de acuerdo a su origen y características.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Implementar un algoritmo de partición multimodal de espectros.
- 2) Analizar el carácter multimodal del oleaje en Valparaíso.
- 3) Realizar un análisis de oleaje extremo en el nodo de Valparaíso, considerando la partición multimodal de espectros.

### **2.3 ALCANCES**

El proyecto corresponde a una definición de un método de separación espectral sencillo que actualmente se aplica en la práctica de ingeniería. Se analiza un caso específico, en Valparaíso, por lo cual la generalización de los resultados no es aún considerada.

### **2.4 HIPÓTESIS**

Es posible desarrollar una metodología técnica robusta y razonable, que permita identificar y aislar los múltiples componentes espectrales presentes en el oleaje, mediante algoritmos que permitan determinar las olas extremas según el tipo o constituyente del oleaje, incorporando de mejor manera la naturaleza física del oleaje y aumentando la precisión en el cálculo.

### 3. MATERIALES

#### 3.1 ESPECTRO BI-DIMENSIONAL DE OLAS EN AGUAS PROFUNDAS

El Proyecto Olas del Pacífico (2002 - 2010), desarrollado por Baird & Associates S.A., tuvo por objeto definir una base de datos de largo plazo de espectros direccionales de oleaje en aguas profundas sobre toda la costa del Pacífico (ver Figura 4).

Este proyecto se basa en un modelo hindcast de tercera generación, que en su versión IV considera la generación de olas en todo el Océano Pacífico desde 1980 a 2009. Dicha modelación numérica y la base de datos resultante fueron validadas en 13 puntos con las mediciones de la NOAA y datos satelitales (ver Figura 5). Esta es la más sofisticada iniciativa de modelación de oleaje llevada a cabo para definir el clima de olas a lo largo de toda la costa del Pacífico.

La página [www.olasdelpacifico.com](http://www.olasdelpacifico.com) cuenta con mayor información acerca de este proyecto.

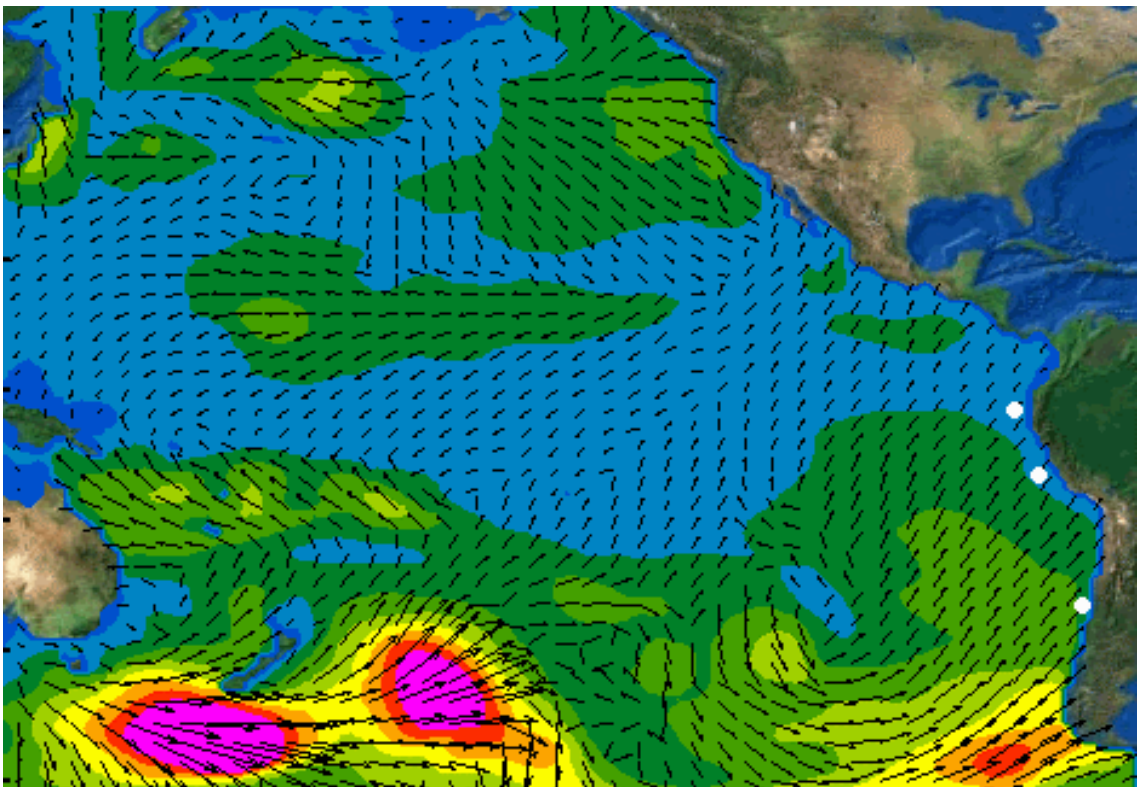


Figura 4: Área de cobertura de Olas del Pacífico. Fuente: Baird & Associates S.A.

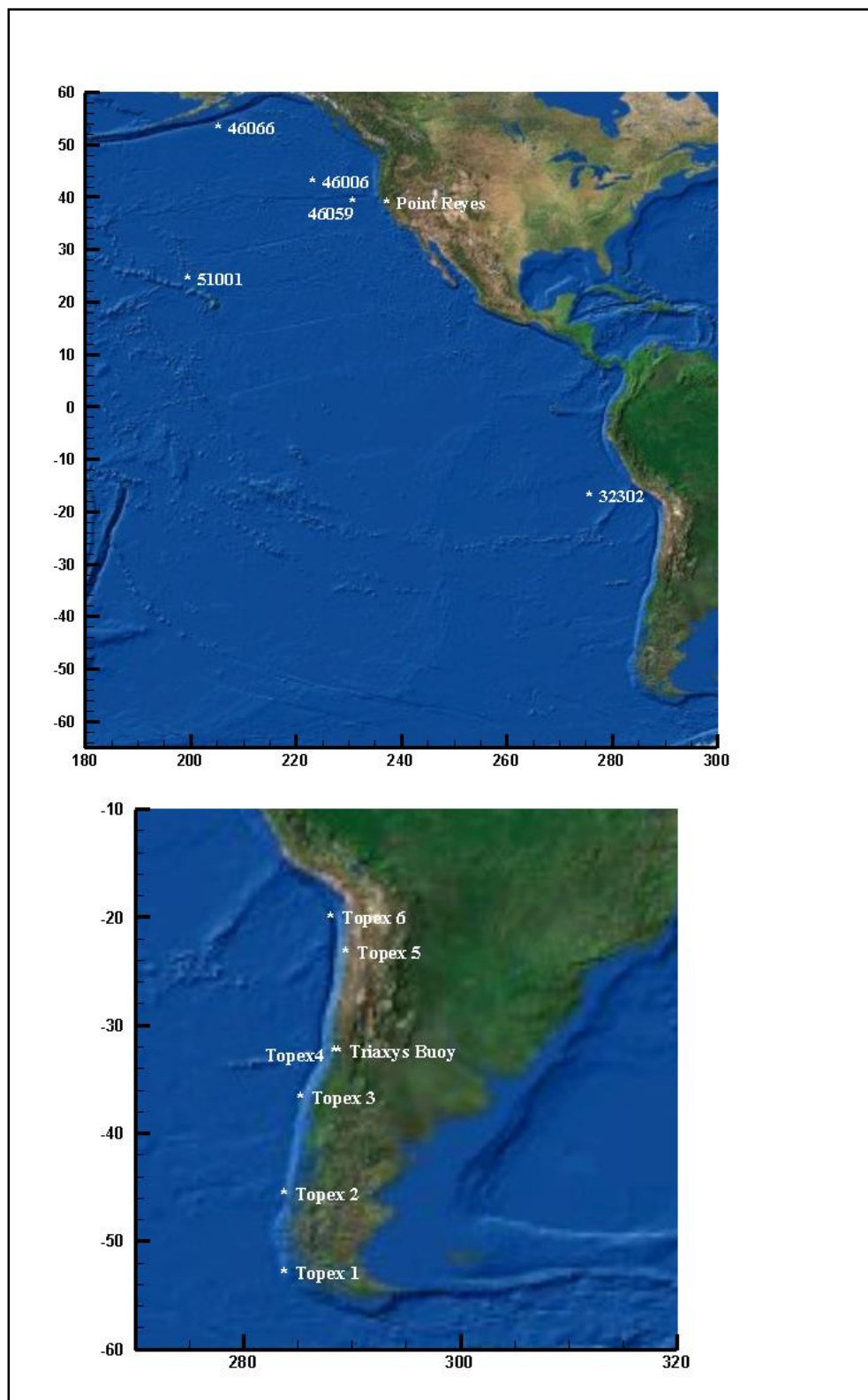
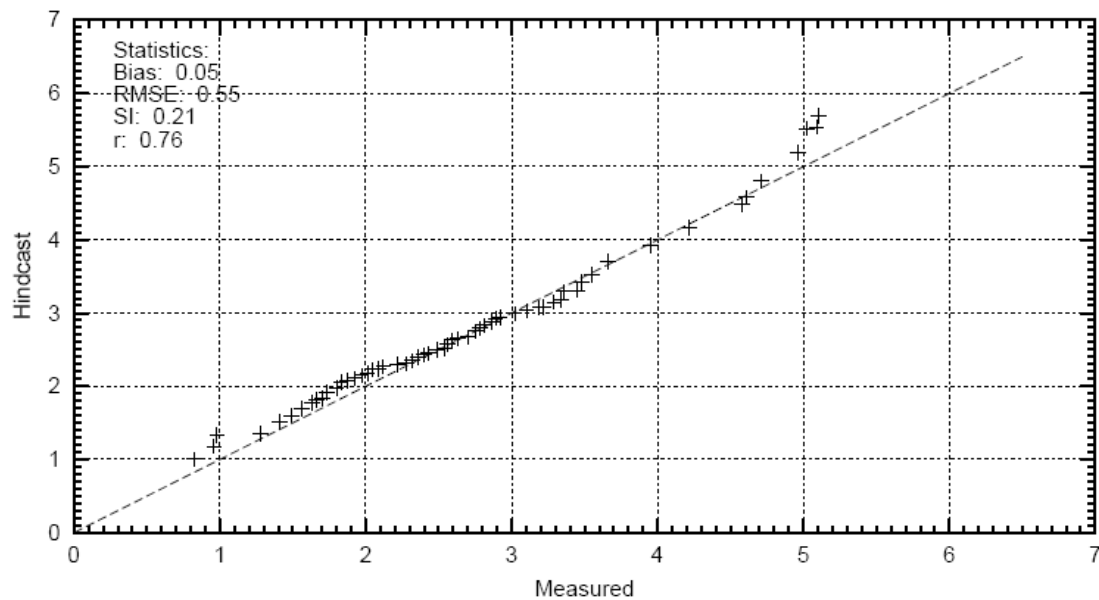


Figura 5: Puntos de validación Olas del Pacífico. Fuente: Baird & Associates S.A.

Para ilustrar el buen ajuste logrado, la Figura 6 presenta el gráfico de validación de los datos de la base de datos Olas del Pacífico comparado con las mediciones del satélite Topex, para la ubicación frente a Valparaíso.

Durante el proyecto Olas del Pacífico se puso especial énfasis en la validación de los resultados del hindcast contra las mediciones de boyas del SHOA, destacándose la boya direccional TriAXYS ubicada actualmente frente a Valparaíso (ver Figura 7).



Ubicación de Topex: Valparaíso 33°S 72°W

Figura 6: Gráfico de validación de Hmo de Olas del Pacífico vs. TOPEX en Valparaíso. Fuente: Baird & Associates S.A.

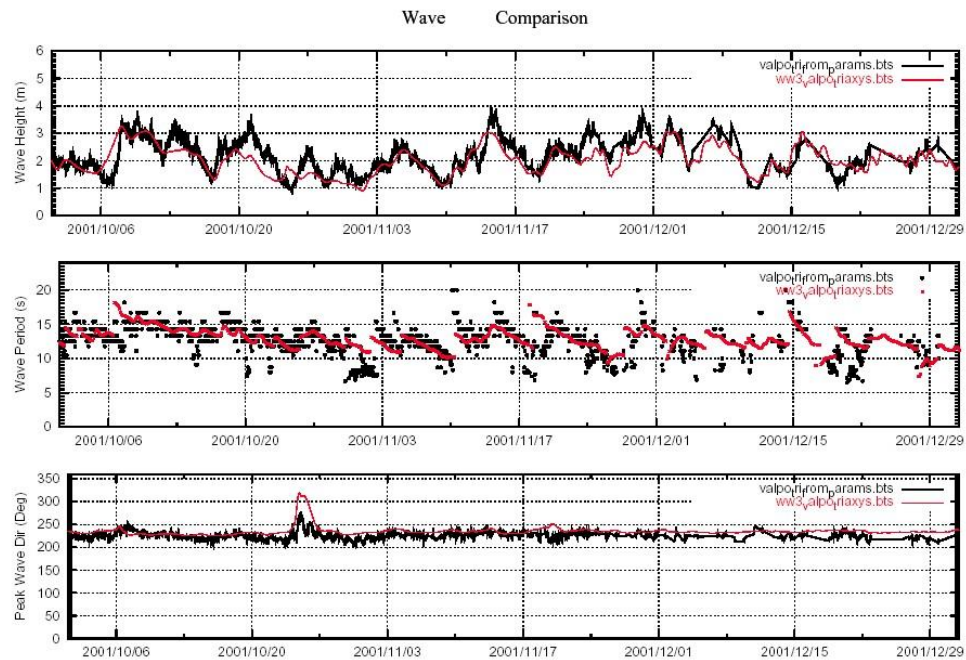


Figura 7: Comparación de las series de tiempo, Olas del Pacífico vs mediciones de la boya TriAXYS en Valparaíso. Fuente: Baird & Associates S.A.

## 3.2 MATLAB

Para todos los procesos involucrados con la partición de espectros, la formación de grupos de oleaje y gráficos de resultados, se utiliza el software matemático MATLAB, de MathWork Inc., hace posible la creación de códigos automáticos que procesan una gran cantidad de información en tiempos óptimos y que permiten alcanzar los objetivos específicos propuestos para este Proyecto de Título. En general este software se describe a continuación.

### 3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

MATLAB es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos integrados computacionales, visualización y fácil programación, con un ambiente de fácil uso donde los problemas y soluciones están expresados en notificaciones matemáticas familiares. En general MATLAB se utiliza para:

- Cálculos y matemáticas.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelación, simulación y prototipos.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Gráficos científicos o de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones, para la creación de interfaces gráficas para los usuarios.

MATLAB permite resolver problemas técnicos computacionales, especialmente aquellos con formulaciones que poseen vectores y matrices. Este fue originalmente escrito para proveer fácil acceso a software de matrices desarrollados por proyectos como LINPACK y EISPACK. Ahora, incorpora librerías con las funciones de estos proyectos.

### 3.2.2 VERSIÓN

Para el desarrollo de los algoritmos matemáticos escritos para este proyecto de título, se utilizó la versión 7.10 (Licencia Baird & Associates S. A.).

## 3.3 XWAVE

Se utiliza el software XWAVE versión 6.02.02, elaborado por Baird & Associates S. A., para generar las rosas de oleaje y el análisis extremo de oleaje.

El software X-Wave es una herramienta usada para la presentación y análisis de series de datos de oleaje y viento. Sus funciones básicas incluyen:

- Transforma el clima de aguas profundas a una profundidad especificada por el usuario usando refracción lineal.
- Rose Plot: presenta las series de tiempo de oleaje y viento en formato de rosa.
- Splatter Plot: presenta las series de tiempo de oleaje y viento en formato splatter.
- Time Series Plot: presenta los datos de la serie de tiempo en gráficos x-y.
- Accumulated Frequency Plot: presenta los resultados del análisis en formato barra de la frecuencia.
- Scatter Diagram: presenta los datos de la serie de tiempo de oleaje y viento en formato tabulado de la distribución de frecuencia.
- Storm Listing: genera una lista para la altura del oleaje que excede el valor umbral especificado por el usuario para cualquier escala temporal de la serie de tiempo.

Todos los gráficos mostrados pueden guardarse como archivos digitales para la presentación de reportes. X-Wave puede leer datos de series de tiempo en cualquier formato texto usando una herramienta para importar texto.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 OLEAJE EXTREMO O DE DISEÑO

La determinación del oleaje extremo es un aspecto importante para aplicaciones de ingeniería, específicamente para el diseño de estructuras marítimas y costeras, mediante el cual se define parámetros de oleaje (alturas) en función del período de retorno. El procedimiento general se describe en la Figura 8.

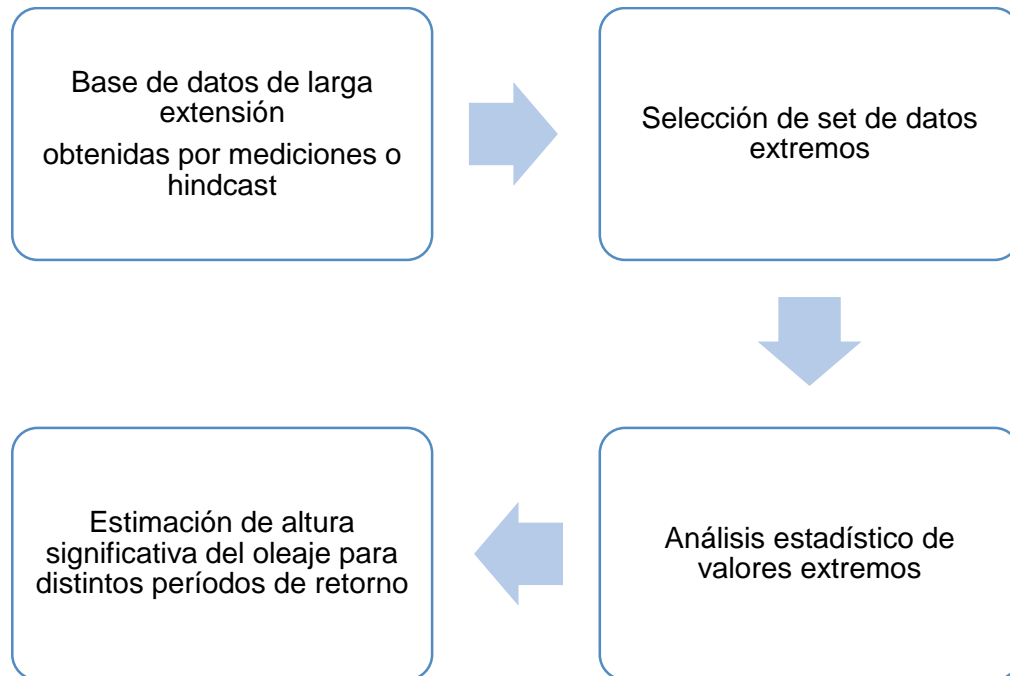


Figura 8: Procedimiento general para el diseño de oleaje extremo. Fuente: Liu, Z. y Frigaard, P., 2001.

#### 4.1.1 METODOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE DATOS EXTREMOS

La estimación de magnitudes máximas del oleaje se puede completar mediante el uso de dos series de alturas, llamadas series del Máximo Anual (AM<sup>3</sup>) y Valores sobre un umbral (POT<sup>4</sup>). Las series AM consisten en un valor de mayor magnitud de cada año del registro, mientras que las series POT consisten en mayores magnitudes sobre un valor umbral específico. Cada uno de ellos trata de representar la serie de *peaks*, un ejemplo de esto se presenta en la Figura 9.

<sup>3</sup> AM: Annual Maximum

<sup>4</sup> POT: Peak Over Threshold

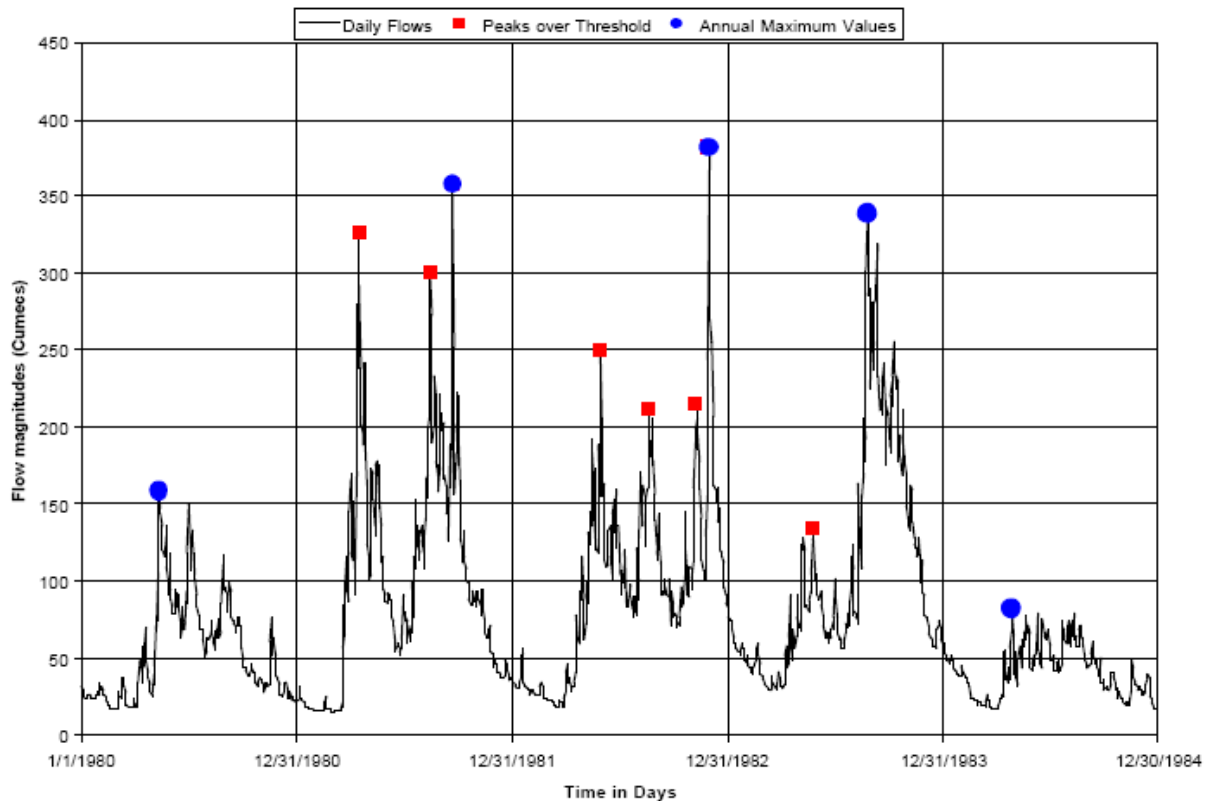


Figura 9: Comparación entre las series seleccionadas AM y POT para un periodo comprendido entre 1980 y 1984. Fuente: Mkhanda, S., et. Al.

#### 4.1.2 PROCESO DE SELECCIÓN DE DATOS

La implicancia para el objetivo de este proyecto es establecer las alturas extremas de oleaje según los diferentes sistemas de oleaje que se aproximan a la costa, específicamente para lugares que están protegidos del oleaje proveniente del SW, orientada principalmente a la etapa de partición espectral. En la Figura 10 se detalla el proceso para determinar el oleaje extremo y a continuación se explican los pasos:

- 1) A los estados de mar de la base de datos espectral en aguas profundas, se les aplica una partición (según ciertos criterios de dirección y frecuencia), para luego clasificar las tormentas de acuerdo a su origen y características, obteniéndose grupos de oleajes.
- 2) En cada grupo, que contiene una lista de tormentas, se seleccionan las mayores magnitudes de altura por medio del método POT.
- 3) De la selección por grupo, se extrapolan los datos con el mejor ajuste de distribución de probabilidad, para obtener las alturas de olas de diseño en función de diferentes períodos de retorno.

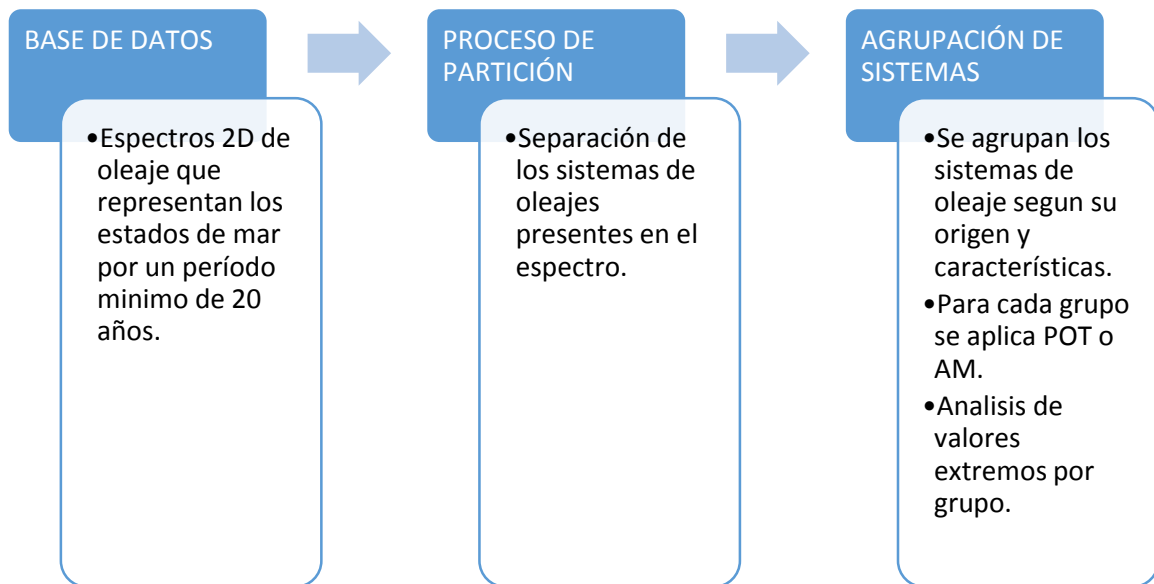


Figura 10: Proceso para determinar el oleaje extremo o de diseño. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL

### 4.2.1 PROBLEMÁTICA QUE ORIGINA LA METODOLOGÍA DE PARTICIÓN ESPECTRAL

La distribución de la variación total del campo superficial del oleaje se describe mediante matrices de energía espectral en función de la frecuencia y la dirección, lo cual conserva toda información referente a diferentes sistemas de oleajes presentes en un instante sobre cualquier punto superficial del océano. Estos espectros pueden ser obtenidos a partir de modelos numéricos de evolución de oleaje sobre una escala global y también por la utilización de boyas direccionales u otros instrumentos que realizan mediciones “*in situ*” de oleaje. Cada observación del set de datos del oleaje espectral representa un estado de mar, lo cual implica que mientras más grande sea el período de extracción mayor será la cantidad de datos obtenidos, los que podrían contener miles de espectros. Debido a la gran extensión, es necesario integrar el espectro direccional de oleaje para producir estimaciones estáticas que interpretan las condiciones del oleaje, y que son de mucha importancia para actividades científicas o de ingeniería. Cuando estas cantidades son obtenidas por la integración total del espectro, se identifican las tendencias en una serie particular de observaciones, pero ignoran algunos atributos esenciales del campo de oleaje cuando el viento Sea y Swell o múltiples sistemas están presentes (Extracto y traducción al español de Jeffrey L. Hanson & Owen M. Philips, 2001).

### 4.2.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LOS MÉTODOS DE PARTICIÓN

Debido a la necesidad de no perder los atributos que tienen las componentes espectrales del oleaje sobre un punto determinado de la superficie del agua, se han desarrollado herramientas

que permiten aislar de forma independiente los sistemas de oleaje presentes en un espectro, calcular parámetros estadísticos para cada uno de ellos e identificar las fuentes de tormentas que las generan:

- Primeramente Gerling 1992, estableció un método para caracterizar sistemas de oleaje desde secuencias temporales y espaciales que determinan estimaciones a partir de matrices del oleaje oceánico direccional espectral. Este método está separado en dos etapas. Primero, se calculan los parámetros de cada sistema de oleaje en términos de dirección, período y altura significativa de oleaje, que se representan en el espectro. Segundo, los sistemas de oleaje de un espectro son asociados a los sistemas similares de oleaje que posee un espectro vecino, con esto se determinan “sistemas del oleaje de gran escala” que representan la actividad ocurrida continuamente sobre grupos secuenciales de espectros. Con esto se preserva la información direccional de una manera más significativa en comparación al promedio de la dirección obtenida mediante el espectro total o por la descomposición del espectro en Sea y Swell.
- Luego, Hasselmann et al. 1994 implementó una aproximación para la partición del espectro con un proceso similar a lo que se hace con las imágenes espectrales de radares obtenidos de las predicciones modelo WAM. Con esto se divide el espectro en sub aéreas usando la aproximación invertida del área de captación aplicada en la hidrología para determinar las áreas de inundación. Para cada sub área se calculan los parámetros estadísticos (altura, frecuencia y dirección) y que permiten caracterizar la evolución de múltiples vientos Sea y sistemas de oleaje Swell a través del tiempo y el espacio, que reducen en gran manera los set de parámetros espectrales.
- Finalmente, Hanson y Philip 2001, basados en la idea de Hasselmann et al. 1994, crearon una herramienta automatizada para la partición de los espectros. En el cual se realizaron un análisis aplicado un caso práctico en Golfo de Alaska con datos espectrales de 6 días.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA DE OLEAJE EN CHILE

Debido a la gran extensión del Océano Pacífico, es posible distinguir variados componentes en las condiciones de oleaje que puede ser generado en esta gran masa de agua. En el caso particular de Chile, se han realizado estudios para determinar el clima de oleaje característico de sus costas (Scott, D., D. Resio y C. Pantoja, 2002 y Baird & Associates S. A., 2004) por un período de 40 años. Los resultados del este clima, han mostrado una variabilidad considerable en el oleaje incidente, detectando cuatro formas de oleaje que llegan a las costas chilenas:

- Swell del hemisferio Sur: Estas olas son generadas por ciclones extra- tropicales que tienen lugar mar adentro de la costa, entre las latitudes 30°S y 70°S. Este fenómeno está presente todo el año, pero presenta una mayor intensidad en los meses de invierno. Las olas incidentes a la costa chilena llegan con una dirección SW con alta energía, y períodos cortos (12 a 14 segundos), decreciendo su intensidad de Sur a Norte.
- Swell del hemisferio Norte: Estas olas son generadas en los alrededores de las Islas Aleutianas (situadas en el Océano Pacífico frente a la costa de Alaska, a una distancia de 15.000 kilómetros de Chile, 53° N 170° W), en los meses de verano de Chile. Las olas que inciden en la costa chilena llegan con una dirección NW, con períodos largos (20 a 25 segundos), decreciendo su intensidad de Norte a Sur.

- Olas generadas en la costa: Las olas son generadas por vientos locales que se producen en las cercanías de la costa, llamadas Sea. Estas olas tienen períodos relativamente cortos, y debido a su proximidad de la costa, no alcanza a desarrollarse el Swell.
- Olas generadas por ciclones tropicales: Son olas generadas por tormentas que se producen en las cercanías de las costas de América Central. Estos casos son muy poco frecuentes, por lo que rara vez son considerados en un clima de olas operacional. Sin embargo, deben ser considerados en el clima de oleaje extremo.

En consecuencia, se ha demostrado que los espectros direccionales del oleaje incidente de las costas chilenas son principalmente de carácter bi-modal, aunque en algunos casos podrían ser multimodales, ya que pueden existir más de dos tipos de oleaje interactuando sobre un punto determinado en aguas profundas (Baird & Associates S. A., 2004).

Considerando que la climatología de olas resulta ser compleja, es recomendable identificar y clasificar los componentes del espectro en aguas profundas mediante métodos avanzados de partición espectral, para así determinar el clima extremo del oleaje de acuerdo a su zona de generación y características particulares de cada sistema de oleaje.

## 5. METODOLOGÍA

En la determinación del clima de oleaje extremo que se utiliza para el diseño de estructuras marítimas, es importante aplicar un método adecuado para la selección de la lista de tormentas debido a la multimodalidad del oleaje (sección 4.2). Los modos espectrales corresponden a regiones de energías acumuladas del espectro direccional del oleaje  $S(f, \theta)$  que se atribuyen a sistemas de oleajes propagados sobre la superficie del océano desde un área específica, generado por el viento, las cuales se denominan componentes del oleaje. Las componentes del oleaje son identificadas y extraídas de los datos de oleaje usando métodos de separación o partición espectral, los cuales subdividen la base de datos. La clasificación de las tormentas de acuerdo a su origen y características apunta en esta dirección, ya que permite considerar de manera más adecuada el período y espacialmente la dirección de procedencia del oleaje.

Luego, la selección de tormentas mayores (sección 4.1.2) considerando las características del oleaje en las costas chilenas (sección 4.3) y clasificando adecuadamente las tormentas que inciden sobre un sitio puede marcar una diferencia significativa en la ola de diseño. Por ello, en este proyecto de título se realizó una comparación entre cuatro metodologías o criterios utilizados para clasificar las tormentas. A continuación se describen los métodos de partición utilizados para clasificar las tormentas presentes en el nodo Valparaíso, que separa la energía espectral de la base de datos y clasifica el oleaje según los criterios predeterminados.

En consideración al corto registro de tormentas extremas de oleaje que se cubre en un período de 30 años, Goda recomienda utilizar el método POT (Capítulo 11 de Goda, Y., 2000) ya que puede aumentar relativamente el número de datos. Por lo anterior, para la estimación de magnitudes máximas del oleaje en cada una de las series obtenidas, se aplicó dicho método. Para cada serie obtenida se consideró una separación entre tormentas mínima de 48 horas y una duración mínima de 24 horas. Para cada caso, el umbral se definió de tal forma de obtener una lista de 30 tormentas, equivalente al número de años de la base de datos. A cada lista de tormentas se escogió el mejor ajuste de distribución de probabilidad entre Exponencial y Gumbel (Valores extremos tipo I). Todos estos criterios han sido definidos por la experiencia práctica.

### 5.1 MÉTODOS DE PARTICIÓN

#### 5.1.1 ENERGÍA TOTAL

Para seleccionar las tormentas se considera la energía total de cada estado de mar (Figura 11), sin aplicar ningún tipo de partición o separación. Esta aproximación es la más conservadora desde el punto de vista de la altura del oleaje, pero en muchos casos puede ocultar componentes de oleaje que si bien tienen menos energía, pueden ser más desfavorables debido a la dirección de procedencia.

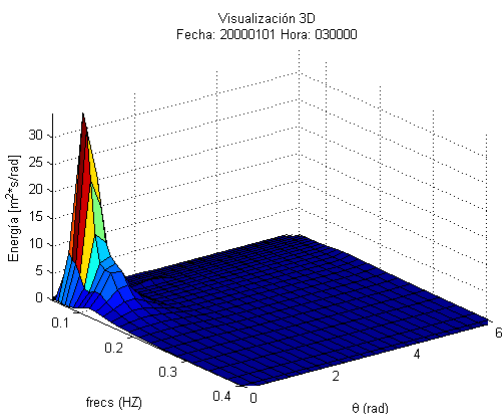


Figura 11: Energía total considerada para la estimación de parámetros de resúmenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

### 5.1.2 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES

Se considera las dos direcciones principales del clima de oleaje en Chile, provenientes del SW y NW. Para ello se reconstruyen dos bases de datos espectrales, una con la energía proveniente del 3<sup>er</sup> cuadrante y la otra con la energía del 4<sup>to</sup> cuadrante y de igual forma para todos los estados de mar. Es decir, se lleva a cabo por la siguiente clasificación del dominio espectral (Figura 12):

- 1) Partición 1; Direcciones desde 180 a 270 grados, considerando todos los períodos.
- 2) Partición 2; Direcciones desde 270 a 360 grados, considerando todos los períodos.

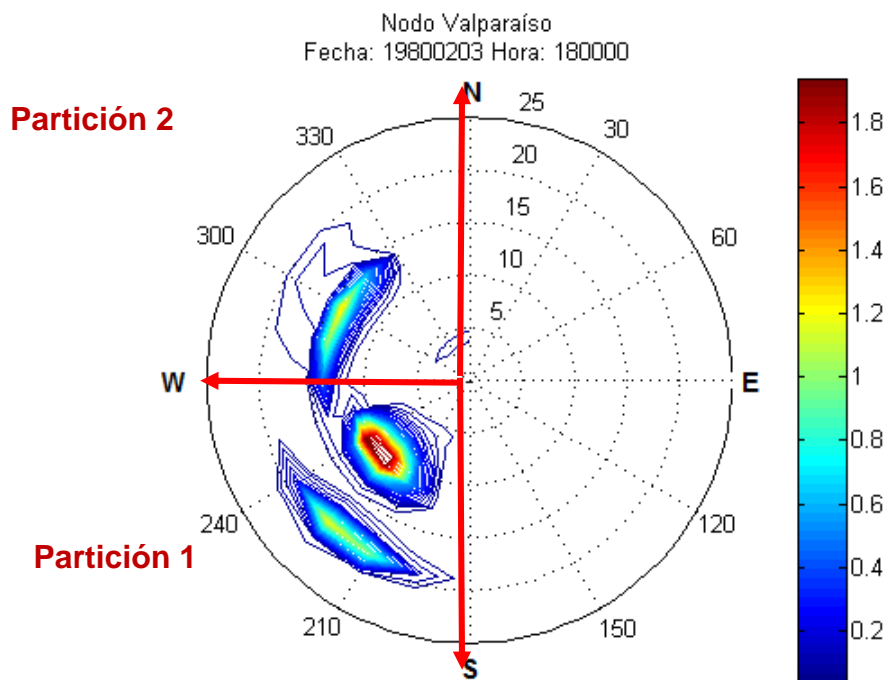


Figura 12: Ejemplo de partición espectral (por cuadrante) aplicada a cada estado de mar del nodo Valparaíso. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

### 5.1.3 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES

Método similar al criterio al anterior en su aplicación, con la diferencia de que este trato de considerar las modalidades del oleaje presentes en Chile para definir la partición del dominio espectral de cada estado de mar. Esto mediante la aplicación de los siguientes pasos:

- 1) Para cada estado de mar contenido en la base de datos espectral 2-D, se calcularon los parámetros de resúmenes más importantes, y luego se graficó en una rosa de oleaje según se muestra en la Figura 13, donde cada punto representa intensidad de períodos<sup>5</sup> para una determinado período y dirección.
- 2) Se realizó una inspección visual de la rosa y se analizó las componentes o tipos de oleaje presentes según las agrupaciones por dirección de procedencia y período, definiendo así los sectores como se muestra en la Tabla 5.1.
- 3) Se particionan todos los espectros según los sectores definidos en el paso anterior, Figura 14.

Como se puede apreciar en la Figura 14, los sectores definidos a partir de la totalidad de los parámetros de resúmenes (Figura 13) a veces no son representativos de algunos estados de mar. Lo mismo ocurre con la partición por cuadrantes (Figura 12).

---

<sup>5</sup> Intensidad de período: Con intensidad se refiere a la densidad de puntos, donde cada punto de la rosa representa un período (T) y dirección (D) asociado a un estado de mar. Un pixel de color ubicado en cierto (T, D) indica la cantidad de estados de mar que tienen ese mismo período y dirección. Ejemplo: el color verde claro tiene 100 o más estados de mar con el mismo T y D.

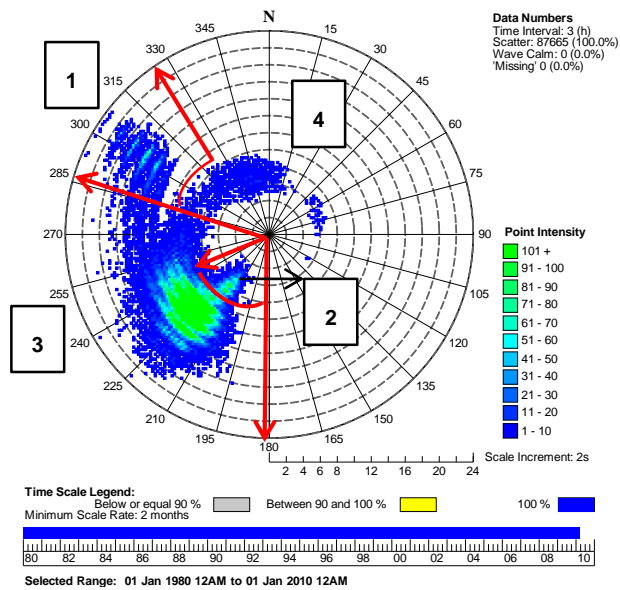


Figura 13: Rosa de intensidad de período del nodo Valparaíso. Fuente: Baird & Associates S.A.

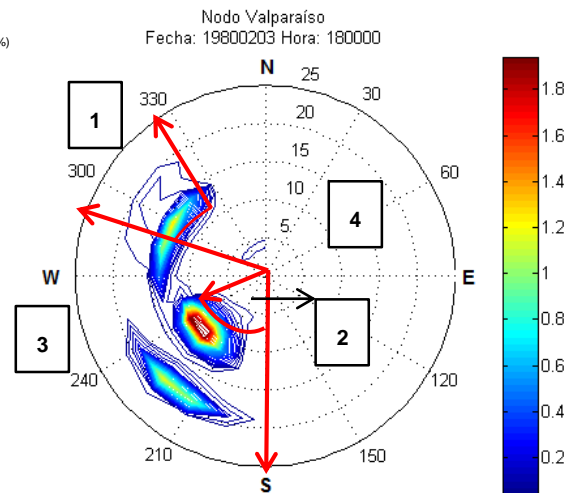


Figura 14: Ejemplo de partición espectral (por sectores) aplicada a cada estado de mar del nodo Valparaíso. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

Tabla 5.1: Sectores identificados por la inspección visual. Fuente: Elaboración propia.

Número	Nombre del grupo	Clasificación según Dirección <i>peak</i>	Clasificación según Período <i>peak</i>
1	Swell remoto del NW	$285^\circ \leq DPK < 320^\circ$	$T_p > 11.5 s$
2	Sea y Swell cercano del SW	$180^\circ \leq DPK < 245^\circ$	$T_p \leq 9 s$
3	Swell remoto del SW	$180^\circ \leq DPK < 245^\circ$ + $245^\circ \leq DPK < 285^\circ$	$T_p > 9 s$ + Todos los períodos
4	Sea y Swell cercano del NW a E	$285^\circ \leq DPK < 320^\circ$ + $320^\circ \leq DPK < 360^\circ$ + $0^\circ \leq DPK < 180^\circ$	$T_p \leq 11.5 s$ + Todos los períodos + Todos los períodos

#### 5.1.4 PARTICIÓN MULTIMODAL

A diferencia de los métodos anteriores, este considero las modalidades del oleaje en Chile, mediante la aplicación de algoritmos avanzados y automatizados que permiten identificar las componentes de cada estado de mar presente en la base de datos. De forma resumida, para cada espectro se aplicaron los siguientes pasos:

- 1) Aislamiento del *peak* de energía espectral (local).
- 2) Identificar y combinar los *peaks* espectrales que son comunes.
- 3) Remoción de particiones con energías bajas.
- 4) Cálculo de estadísticas para cada partición.

En la Figura 15 se muestra los resultados de la partición multimodal aplicado a un estado de mar en particular.

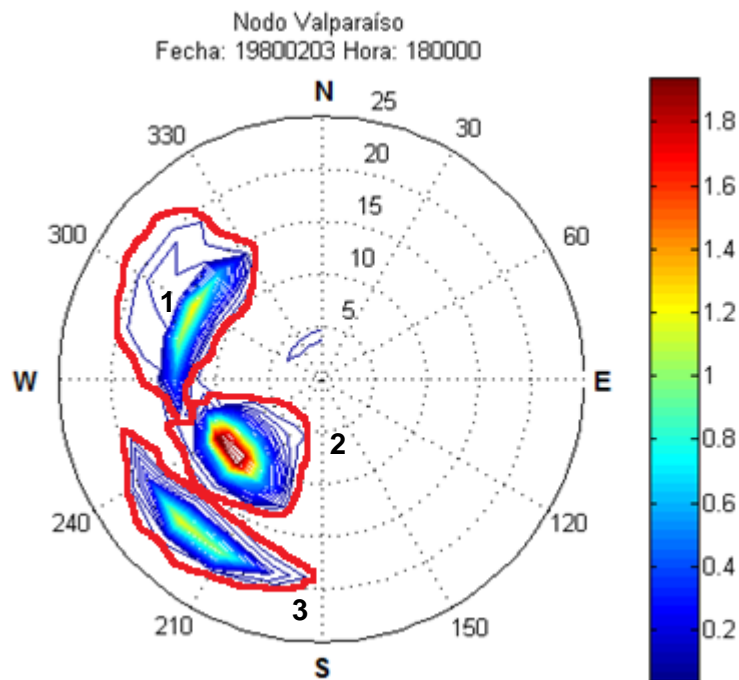


Figura 15: Ejemplo de partición espectral multimodal aplicado a un estado de mar del nodo Valparaíso.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

Considerando que se desea determinar las características peculiares de cada estado de mar presente en los 30 años del nodo Valparaíso, este método posee grandes ventajas sobre los anteriores al momento de analizar una gran cantidad de datos y determinar el clima extremo considerando estas características. La Tabla 5.2 muestra una comparación entre los cuatro métodos.

Tabla 5.2: Resumen de metodologías. Fuente: Elaboración propia.

Método	Característica
Energía total	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica ningún tipo de partición.</li> <li>• Aproximación más conservadora desde el punto de vista de la altura del oleaje.</li> <li>• Puede ocultar las componentes del oleaje de menor energía.</li> <li>• Menor esfuerzo computacional.</li> </ul>
Partición del dominio espectral por cuadrantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partición que se basa en las modalidades generales de toda la base de datos y no de cada espectro.</li> <li>• Reconstruye dos bases de datos espectrales, una con la energía proveniente del 3<sup>er</sup> cuadrante y la otra con la energía del 4<sup>to</sup> cuadrante.</li> <li>• Menor esfuerzo computacional.</li> </ul>
Partición del dominio espectral por sectores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partición que se basa en las modalidades generales de toda la base de datos y no de cada espectro.</li> <li>• En el caso de Valparaíso, reconstruye cuatro bases de datos, en función de la dirección y período <i>peak</i>.</li> <li>• Requiere alta experiencia práctica.</li> <li>• Menor esfuerzo computacional.</li> </ul>
Partición multimodal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza cada espectro e identifica las componentes del estado de mar, en base a los peaks de energía espectral.</li> <li>• Se distinguen con mayor claridad las componentes del oleaje según su procedencia.</li> <li>• La separación es más precisa, ya que no se trunca energía a los espectros.</li> <li>• Reconstruye la base de datos de acuerdo a las componentes espectrales de cada estado de mar.</li> <li>• La clasificación de las bases de datos, es posterior a la partición, según características comunes de cada una de ellas.</li> <li>• Alto esfuerzo computacional.</li> <li>• Menor experiencia práctica.</li> </ul>

## 5.2 ALGORITMO DE PARTICIÓN MULTIMODAL

Sobre la base del método Hanson & Phillips (2001), en adelante HP01, se desarrollaron rutinas en Matlab. Esta metodología facilita la división y aislación de cada espectro direccional de oleaje  $S(f, \theta)$  en distintos subconjuntos que representan los diferentes componentes del oleaje. Para cada sistema identificado del set de datos, se calcularon estadísticas representativas que servirán para futuros análisis. El concepto fue originalmente propuesto por Gerling (1992) y complementado en el trabajo de Hasselmann et al. (1994). La partición de cada espectro empleado por este método involucró cuatro pasos independientes, que se detallan a continuación.

### 5.2.1 AISLAMIENTO DEL PEAK DE ENERGÍA ESPECTRAL (LOCAL)

La idea detrás de este paso es análoga al concepto de las aéreas de captación en la hidrología, tomando el gráfico del espectro al revés. La partición del espectro es definido como el set de puntos de la matriz espectral en función de la frecuencia y dirección  $(f, \theta)$  cuyas trayectorias de mayor pendiente se dirigen a un mismo *peak* o máximo local. Para cada máximo local se le asocia un área de captación. Un ejemplo de este procedimiento se muestra en la Figura 16.

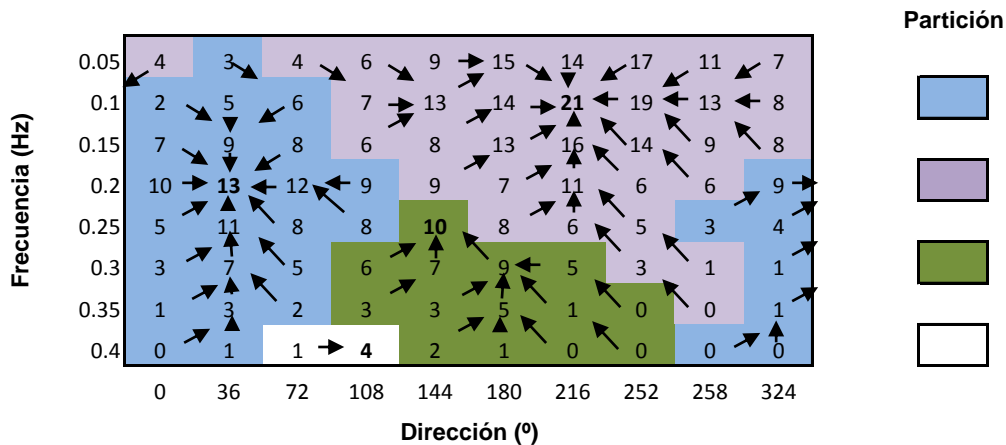


Figura 16: Ejemplo de partición espectral. La dirección de las flechas indica el camino de mayor pendiente. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2 IDENTIFICAR Y COMBINAR LOS PEAK ESPECTRALES QUE SON COMUNES

Tomando como referencia a lo aplicado por HP01, se evaluaron si los *peaks* fueron o no originados por la misma fuente. Los *peaks* con frecuencias similares podrían ser parte del mismo sistema si algunas condiciones se cumplen. Para ello se utilizaron dos criterios de evaluación, donde si uno de ellos se cumple, dos *peaks* son combinados en el mismo sistema.

1. **Separación entre *peaks*:** Se comparó la distancia entre *peaks* con la dispersión de cada *peak* individual, según la Ecuación I.

Ecuación I: Criterio de separación entre *peaks*.

$$\Delta f^2 \leq k \overline{\delta f^2}$$

Donde  $k$  es el factor de dispersión ajustado para optimizar la ejecución de la dispersión espectral,  $\Delta f^2$  es la distancia entre *peaks* (Ecuación II), y  $\overline{\delta f^2}$  es la dispersión de cada *peak* individual (Ecuación III).

**Ecuación II: Distancia entre *peaks*.**

$$\Delta f^2 = (f_{px,1} - f_{px,2})^2 + (f_{py,1} - f_{py,2})^2$$

Donde:

$$f_{px} = f_p \cos \theta_p \text{ y } f_{py} = f_p \sin \theta_p$$

**Ecuación III: Dispersión de cada *peak* individual.**

$$\overline{\delta f^2} = \overline{(f_x - \bar{f}_x)^2} + \overline{(f_y - \bar{f}_y)^2} = \overline{f_x^2} - \bar{f}_x^2 + \overline{f_y^2} - \bar{f}_y^2$$

Donde:

$$\bar{f}_x = \overline{f \cos \theta} = \frac{1}{e} \int_f \int_{\theta} S(f, \theta) f \cos \theta \partial \theta \partial f$$

$$\bar{f}_y = \overline{f \sin \theta} = \frac{1}{e} \int_f \int_{\theta} S(f, \theta) f \sin \theta \partial \theta \partial f$$

$$\overline{f_x^2} = \overline{f^2 \cos^2 \theta} = \frac{1}{e} \int_f \int_{\theta} S(f, \theta) f^2 \cos^2 \theta \partial \theta \partial f$$

$$\overline{f_y^2} = \overline{f^2 \sin^2 \theta} = \frac{1}{e} \int_f \int_{\theta} S(f, \theta) f^2 \sin^2 \theta \partial \theta \partial f$$

Donde:

**Ecuación IV: Energía total.**

$$e = \iint S(f, \theta) \partial \theta \partial f$$

2. **Mínimos entre *peaks*:** se combinan los *peaks* adyacentes si la mínima densidad de energía espectral sobre el “punto silla” entre los dos *peaks* es mayor que el menor *peak* multiplicado por el factor del *peak* mínimo  $\xi$  (el cual es optimizado por un set de observaciones particulares).

Para el caso del Nodo Valparaíso se tomaron los valores de 0.4 y 0.65 para los coeficientes  $k$  y  $\xi$ , respectivamente; cuya selección se explicó en la sección 5.2.5.1.

### 5.2.3 REMOCIÓN DE PARTICIONES CON ENERGÍAS BAJAS

Las particiones que tienen una energía total muy pequeña comparado con la energía total del espectro son consideradas insignificantes en el sentido que éstas no tienen un impacto importante sobre cualquier dominio del sistema de oleaje espectral. Típicamente, no se desea asimilar datos de estas particiones en los modelos. Por esto, se remueve cualquier partición que tenga una energía total menor que la energía umbral:

**Ecuación V: Criterio de remoción de particiones con bajas energías.**

$$e \leq \frac{A}{f_p^4 + B'}$$

$A$  y  $B'$  son elegidos para eliminar ruidos en regiones del espectro de poca energía. Alternativamente, la energía podría ser redistribuida sobre las otras particiones con el fin de conservar la energía total, pero para este caso solamente se excluyen del análisis por ser despreciables para determinar el oleaje de diseño.

Los parámetros  $A$  y  $B$  seleccionados para el nodo de Valparaíso fueron  $6 \times 10^{-6}$  y  $3 \times 10^{-3}$ , respectivamente, según lo indicado en la sección 5.2.5.1.

### 5.2.4 CÁLCULO DE ESTADÍSTICAS PARA CADA PARTICIÓN

El paso final es calcular, para cada partición restante, un número de parámetros estadísticos que capturan las características de los diferentes sistemas del oleaje. Como las particiones son asumidas como no correlacionadas, los cálculos pueden ser llevados independientemente para cada partición. Los parámetros que se obtuvieron para este proyecto de título se indican a continuación:

- Fecha y tiempo de la observación.
- El número de identificación de la partición.
- Altura significativa espectral del oleaje.
- Amplitud cuadrática media espectral del oleaje.
- Período *peak* y período energético.
- Dirección *peak* y media del oleaje.

### 5.2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO PARTICIONADOR

De acuerdo al método descrito, se escribió un código Matlab capaz de procesar de forma secuencial el total de espectros presentes en un archivo. Mediante una serie de sub-rutinas se obtienen los sistemas principales que componen cada espectro y los parámetros de resumen de ellos. Los pasos principales para la partición se obtuvieron sobre la base de secuencias creadas por Arnes y Krogstad (2001), que fueron modificadas para adaptarlos al formato de los archivos de espectros disponibles. Con el fin de satisfacer a las necesidades del proyecto se agregaron nuevas secuencias que permiten guardar la información requerida para un posterior análisis. Esta secuencia se encuentra con más detalles en ANEXO 1.

### 5.2.5.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Para el éxito del algoritmo de partición multimodal, elaborado de acuerdo a la metodología anteriormente descrita, se necesita de un buen ajuste de parámetros que estén de acuerdo a la climatología del oleaje en el sitio. La selección de parámetros se hace mediante iteraciones para optimizar la identificación de los sistemas de oleaje. Para el nodo Valparaíso, se utilizaron los parámetros determinados para el Pacífico Central en HP01 (Jeffrey L. Hanson & Owen M. Philips, 2001) con datos obtenidos de una boya Waverider (Tabla 5.3). Debido a que no existen coeficientes determinados para el Pacífico Sur y que su determinación implicaría un estudio aparte, se verificó que estos parámetros tuvieran un buen funcionamiento para la partición de espectros del nodo Valparaíso, lo cual se hizo mediante un control de calidad general y un análisis de error para las particiones del año 2000 (ANEXO 2).

Tabla 5.3: Parámetros utilizados para la identificación de sistemas de oleaje y remoción de energías. Fuente: Tabla 1 de Jeffrey L. Hanson & Owen M. Philips, 2001.

Observación			Parámetros seleccionados			
Localidad	Fecha	Fuente	$A$	$B$	$\kappa$	$\xi$
Pacífico Central	Febrero 1997	Datos de boya Waverider	$6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-3}$	0.4	0.65

### 5.2.5.2 RESULTADOS

La aplicación del algoritmo de partición multimodal entrega los siguientes resultados:

- Matrices *templates*.
- Matrices espectrales.
- Parámetros de resumen de los sistemas de oleaje identificado para cada estado de mar de la base de datos.
- Las frecuencias y direcciones espectrales.
- Fechas de los estados de mar.

## 6. RESULTADOS DE PARTICIONES

### 6.1 ENERGÍA TOTAL

En la Figura 17 se muestra la intensidad de períodos asociados a la energía total de cada estado de mar de la base de datos espectral del Nodo Valparaíso, sin considerar ningún tipo de clasificación, separación o agrupación.

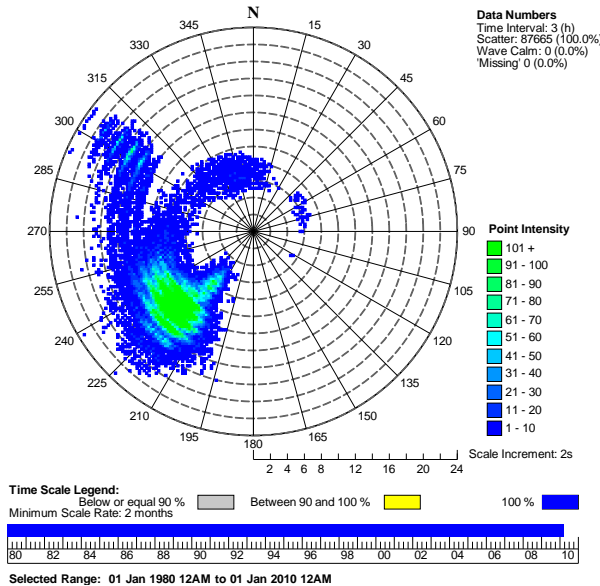


Figura 17: Rosa de intensidad nodo Valparaíso – Energía total. Considero todos los estados de mar de la base de datos. Fuente: Baird & Associates S.A.

De la intensidad de períodos para energía total (Figura 17), se observa que existe una predominancia de las componentes del SW (de mayor frecuencia). Sin embargo, pueden existir energía proveniente de otras direcciones que podrían quedar ocultas al considerar la energía total de cada espectro (presentada sólo por sus parámetros de resumen  $H_{mo}$ ,  $T_p$  y Dirección *peak*) para la identificación de tormentas, que determinan el clima de oleaje extremo. En la Figura 18 se muestra el ejemplo de dos espectros con más de un *peak*, presentes en la base de datos Olas Chile IV, el primero con dos modalidades provenientes del SW y NW, el segundo tres componentes dos de ellas provenientes del SW pero con diferentes períodos y una proveniente del NW.

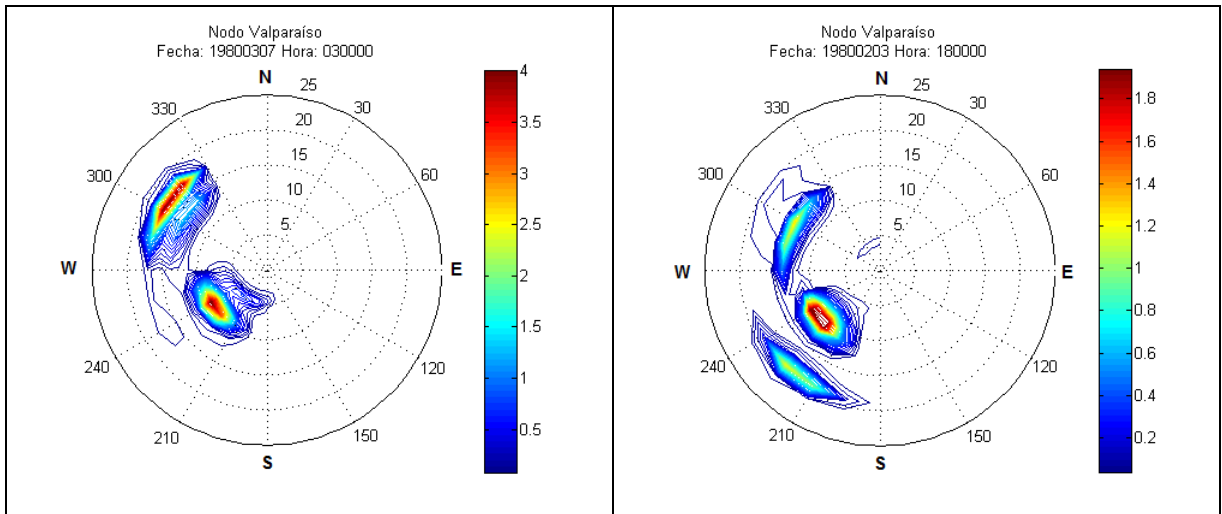


Figura 18: Ejemplos de energías ocultas al considerar el cálculo de los parámetros de resúmenes con la energía total del espectro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Olas Chile IV (Baird, 2010).

## 6.2 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES

En la Figura 19 se muestra la intensidad de períodos asociados al tercer cuadrante SW y al cuarto cuadrante NW de cada estado de mar de la base de datos espectral del Nodo Valparaíso, considerando una partición del dominio espectral por cuadrantes.

Al realizar una partición del dominio espectral por cuadrantes (Figura 19), que es un separación fija para todos los estados de mar, se destaca que la energía del oleaje proveniente del W se trunca y no se considera en el análisis extremo. Además, se mezclan dos o más eventos de características diferentes que no son comparables entre sí (peaks de energía).

En la línea rojas segmentada de la Figura 19, se puede apreciar que la partición del cuarto cuadrante contiene energía de los espectros pertenecientes al tercer cuadrante. Esto no ocurre con la partición multimodal.

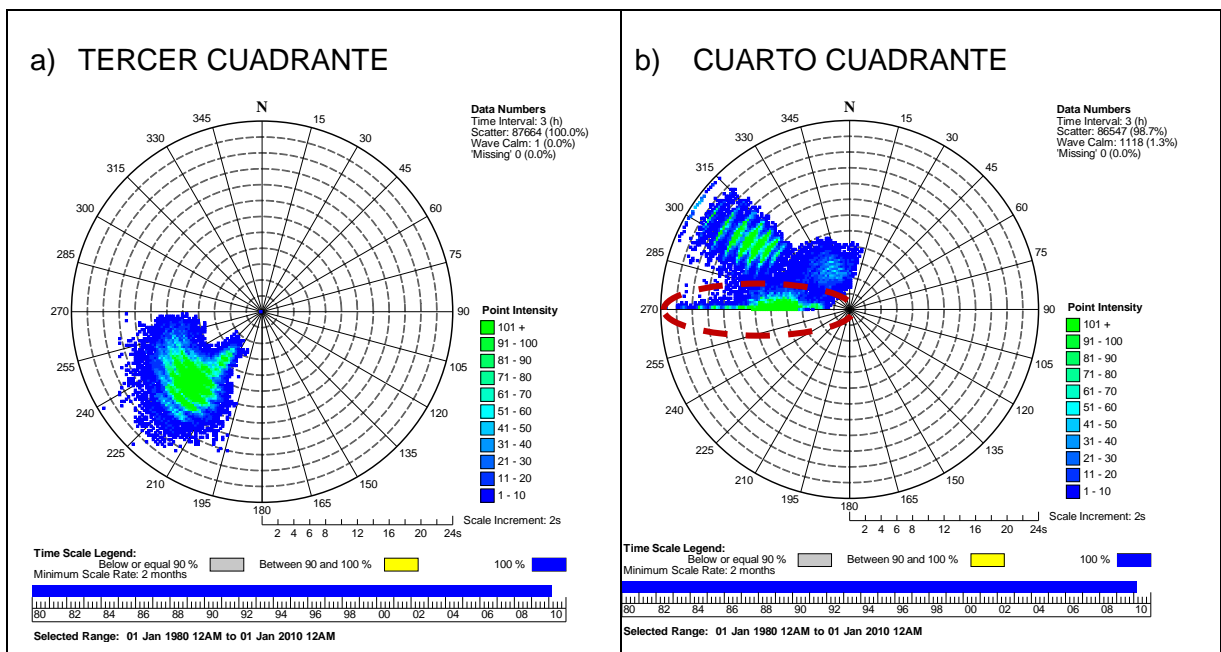


Figura 19: Resultados de la Partición del dominio espectral por cuadrantes, nodo Valparaíso. Considero todos los estados de mar de la base de datos. Fuente: Baird & Associates S.A.

### 6.3 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES

En la Figura 20 se muestra la intensidad de períodos asociados al Swell Remoto del SW y W, Sea y Swell Cercano del SW, Swell Remoto del NW, Sea y Swell Cercano del NW A NE correspondiente a cada estado de mar de la base de datos espectral del Nodo Valparaíso, considerando una partición del dominio espectral por sectores.

El método de partición del dominio espectral por sectores (Figura 20), da un resultado similar al método de partición por cuadrantes, con la diferencia que trata de ajustarse mejor a las características del clima de oleaje del nodo Valparaíso. Sin embargo, aún este tipo de separación sigue siendo imprecisa en algunos casos y no considera las características particulares de cada estado de mar, cortando así la energía de los sistemas de oleajes presentes en la base de datos.

Encerrado en líneas rojas en la Figura 20 se aprecian componentes de energía que pertenecen a otros tipos de sistemas de oleaje. Esto no ocurre con la partición multimodal.

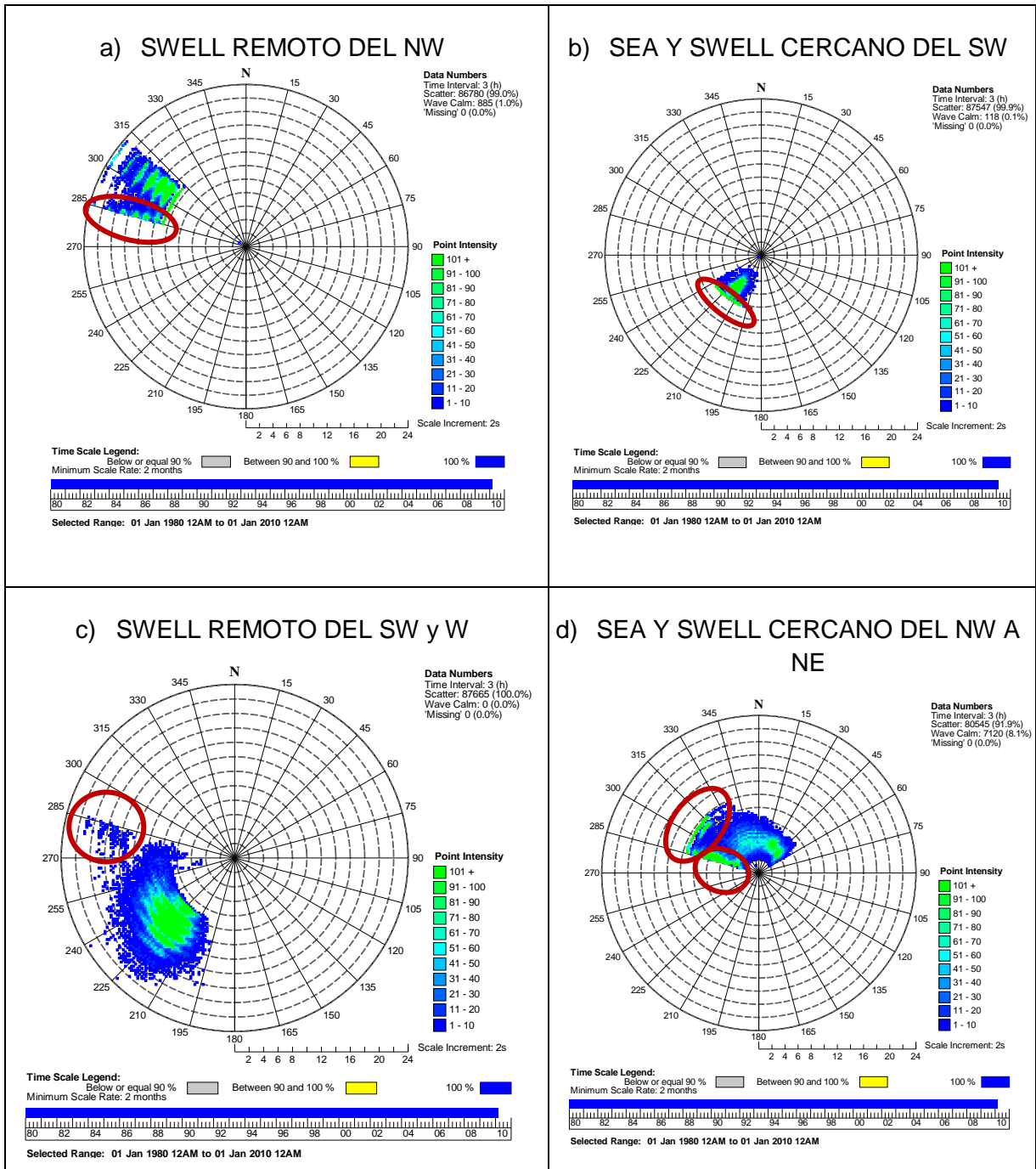


Figura 20: Resultados de la Partición del dominio espectral por sectores, nodo Valparaíso. Considero todos los estados de mar de la base de datos. Fuente: Baird & Associates S.A.

## 6.4 PARTICIÓN MULTIMODAL

La partición multimodal se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

- 1) Aplicación del algoritmo: A la base de datos de 30 años del Nodo Valparaíso, se le aplicó el algoritmo de partición multimodal (Sección 5.2). Generando una lista de todas las particiones desde 01 de enero del 1980 al 01 de enero del 2010.
- 2) Análisis del carácter multimodal: Se graficaron los resultados de todas las particiones obtenidas en cada espectro, mediante rosas de intensidad de períodos *peak* en función de la dirección *peak* (Figura 21), donde los colores verdes indican mayor densidad de puntos. Luego mediante observación visual, se definieron grupos de oleaje y se establecieron criterios de separación (según la Tabla 6.1).

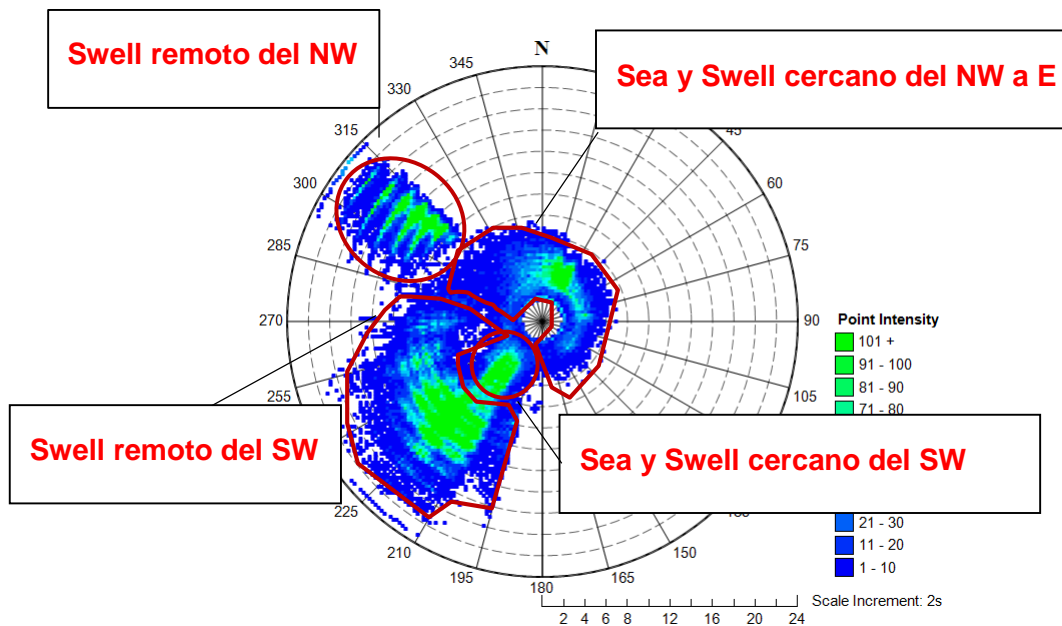


Figura 21: Rosa de intensidad de punto de período *peak* en función de la dirección *peak* para los 30 años de datos de Valparaíso. Considerando todas las listas de particiones obtenidas. Fuente: Baird & Associates S.A.

- 3) Separación y reconstrucción de archivos espectrales individuales: Considerando la lista de particiones (paso 1), se aplicó un algoritmo (ANEXO 3) para formar los grupos de acuerdo los criterios de separación (paso 2), reconstruyendo los archivos espectrales y paramétricos según los grupos formados. Con esto se generaron 4 archivos espectrales independientes por cada espectro o estado de mar, calculando directamente sus respectivos parámetros, generando así archivos paramétricos de acuerdo a los grupos.

Tabla 6.1: Criterios de separación. Fuente: Elaboración propia.

Número	Nombre del grupo	Clasificación según Dirección <i>peak</i>	Clasificación según Período <i>peak</i>
1	Swell remoto del NW	$285^\circ \leq DPK < 320^\circ$	$T_p > 11.5 \text{ s}$
2	Sea y Swell cercano del SW	$180^\circ \leq DPK < 245^\circ$	$T_p \leq 9 \text{ s}$
3	Swell remoto del SW	$180^\circ \leq DPK < 245^\circ$ + $245^\circ \leq DPK < 285^\circ$	$T_p > 9 \text{ s}$ + Todos los períodos
4	Sea y Swell cercano del NW a E	$285^\circ \leq DPK < 320^\circ$ + $320^\circ \leq DPK < 360^\circ$ + $0^\circ \leq DPK < 180^\circ$	$T_p \leq 11.5 \text{ s}$ + Todos los períodos + Todos los períodos

En la Figura 22 y Figura 23 se muestran la intensidad de períodos asociados a los resultados de las agrupaciones del Swell Remoto del NW, Sea y Swell Cercano desde el NW al S, Swell Remoto del SW y W, y Sea - Swell Cercano del SW, obtenidos a partir de la partición espectral multimodal de cada estado de mar de la base de datos espectral del Nodo Valparaíso.

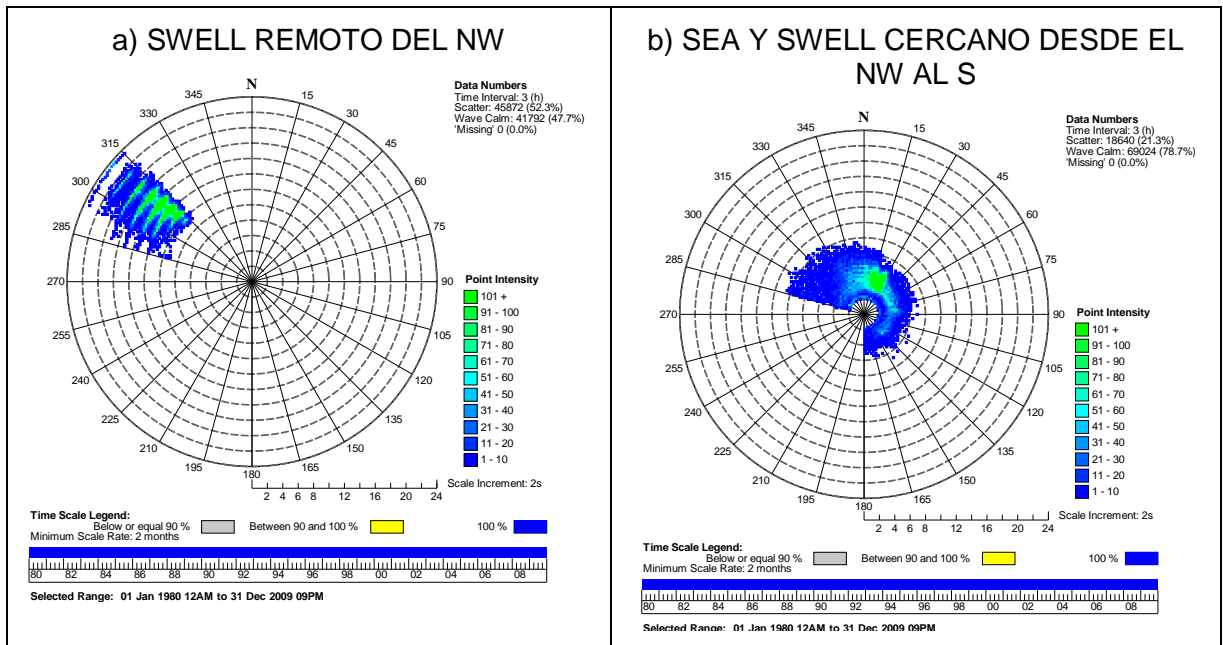


Figura 22: Resultados de agrupación por Partición Multimodal, nodo Valparaíso. a) Swell Remoto del NW y b) Sea y Swell Cercano desde el NW al S. Fuente: Baird & Associates S.A.

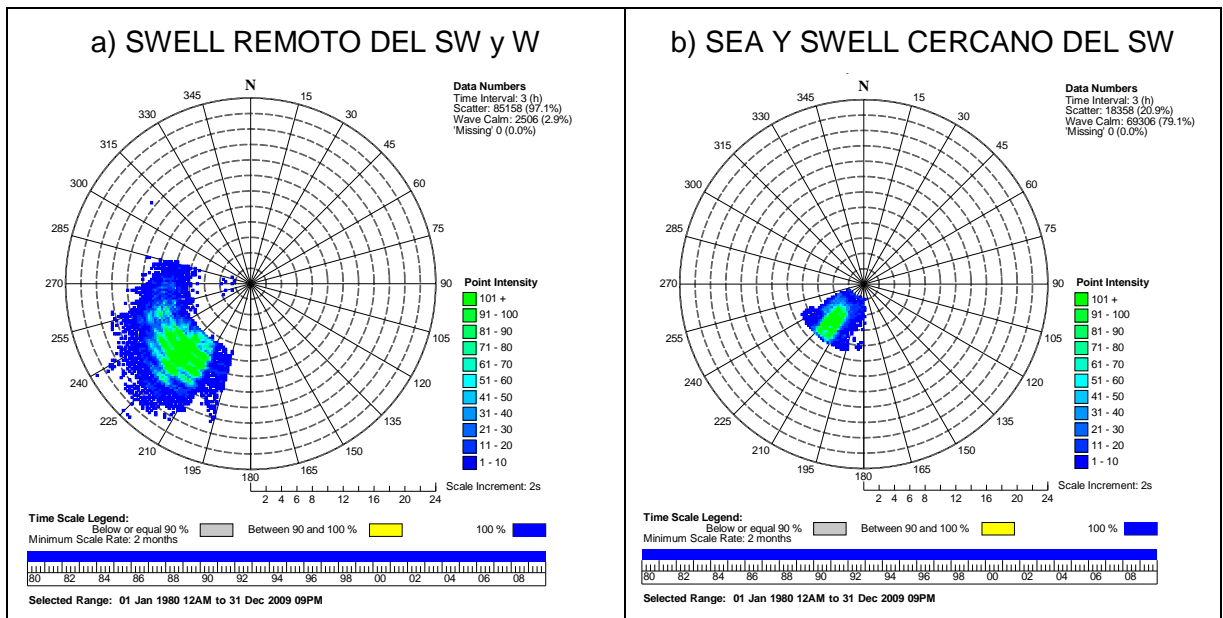


Figura 23: Resultados de agrupación por Partición Multimodal, nodo Valparaíso. a) Swell Remoto del SW y W y b) Sea - Swell Cercano del SW. Fuente: Baird & Associates S.A.

## 6.5 DISCUSIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS INTENSIDAD DE PERÍODOS

Como se mencionó anteriormente, la rosa de intensidad de períodos indica la cantidad de estados de mar que tienen un mismo período y dirección, que se manifiesta con el color del pixel. Con ello es posible visualizar en resumen la intensidad del período para toda la base de datos y así facilitar el análisis de los resultados obtenidos por los diferentes métodos de partición y determinar su precisión.

En la sección anterior se mostró que las particiones del dominio multimodal (Figura 22 y Figura 23), al ser un método más avanzado que considera las características particulares de cada espectro, no corta la energía de cada sistema que se encuentra presente en el estado de mar.

Con la finalidad de visualizar de mejor manera estos resultados, se realizaron comparaciones entre estos diferentes métodos o criterios de aplicación.

### 6.5.1 ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR CUADRANTES

En la aplicación de la separación del dominio espectral por cuadrantes, se desprecian todos los sistemas pertenecientes al primer y segundo cuadrante (que aparecen en la Figura 24, a), ya que no se consideran importantes para el cálculo de oleaje de diseño. Los resultados del tercer cuadrante (Figura 24, c), son similares al grupo que está concentrado en la dirección SW de la rosa para la energía total sin particionar. Por otro lado, los resultados del cuarto cuadrante (Figura 24, b) se ven diferentes a las intensidades de períodos presentes en la energía total, ya que se aprecian grupos con características diferentes; dos con intensidades de períodos significativos provenientes del NW (específicamente entre los 285 y 315 grados) y W (cuya energía se ve claramente afectada por el corte realizado en la dirección 270°), y otro de menor intensidad con períodos entre 2 a 8 segundos presentes en el sector norte del cuarto cuadrante y grandes intensidades provenientes del W. En general de la Figura 24, se observa que la partición por cuadrantes (aunque útil para ciertas aplicaciones) no es del todo precisa en determinar los límites de los sistemas de energías presentes en la base de dato espectral.

Por lo anterior, al considerar este tipo de partición, que clasifica tormentas provenientes del tercer y cuarto cuadrante, se calculan los parámetros de resúmenes sin considerar estos grupos observados, lo que podría hacer variar los resultados del clima de oleaje extremo o de diseño, despreciando algunas características peculiares de cada estado de mar.

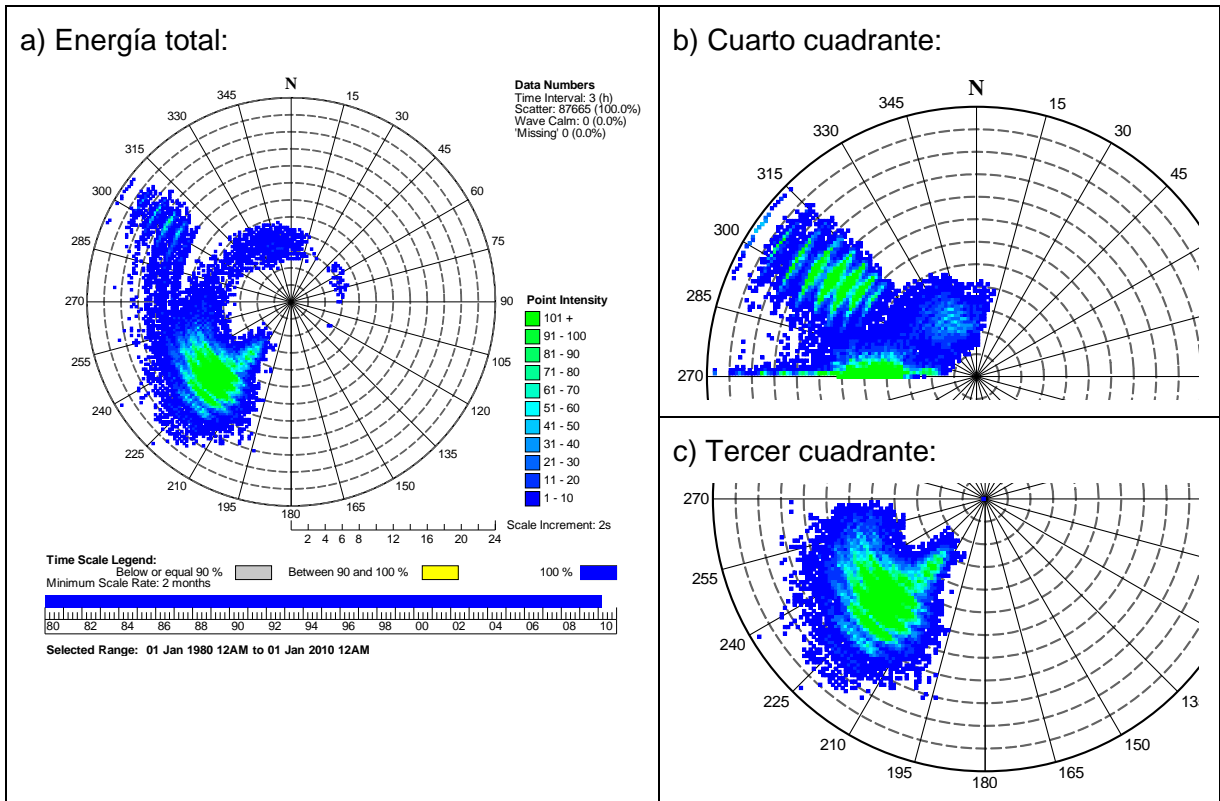


Figura 24: Comparación entre la intensidad de períodos de la energía total (a) y los resultados de las particiones por cuadrantes (b) y (c). Fuente: Baird & Associates S.A.

## 6.5.2 ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR SECTORES

En la Figura 25, se comparan los resultados obtenidos por el cálculo de la energía total del espectro sin aplicar ningún tipo de partición y los obtenidos por la partición del dominio espectral por sectores, en la cual se observa:

- En el Swell Remoto del SW y W (Figura 25, b), existe una gran concentración de energía en el SW pero tiene componentes del W que se ven claramente apartados de este grupo principal.
- De acuerdo a las intensidades de períodos para Sea y Swell cercano del SW (Figura 25, c), éstas se ven truncadas producto de la separación realizada a los 8 segundos de período.
- En el Swell Remoto del NW (Figura 25, d) se identifican dos grupos de intensidades, uno entre las direcciones 300 y 315 grados, y otro cercano a los 285 grados, donde este último claramente no pertenece al primer grupo mencionado producto al corte realizado a los 285 grados de la matriz espectral.
- Con respecto al Sea y Swell del NW y E (Figura 25, e), se destacan tres grupos de mayores intensidades, uno proveniente del NE de bajas frecuencias, otro del W con una dirección central de 285 grados aproximadamente (también de bajas frecuencias), y por último un grupo cercano al límite externo (alrededor de los 8 segundos de período) que pareciera ser parte del Swell Remoto del NW (Figura 25, d).

En general al aplicar el método de particiones del dominio espectral por sectores, sus resultados en comparación a los de la energía total (Figura 25, a) obtuvieron mayor información de las energías para cada grupo de oleaje, y tienen una mejor aproximación en determinar los límites de estas agrupaciones en comparación a los resultados de la separación del dominio espectral por cuadrantes (Figura 24). Sin embargo, a pesar de esto aún este método no puede determinar exactamente los límites de estas concentraciones de energías que se presentan en los estados de mar.

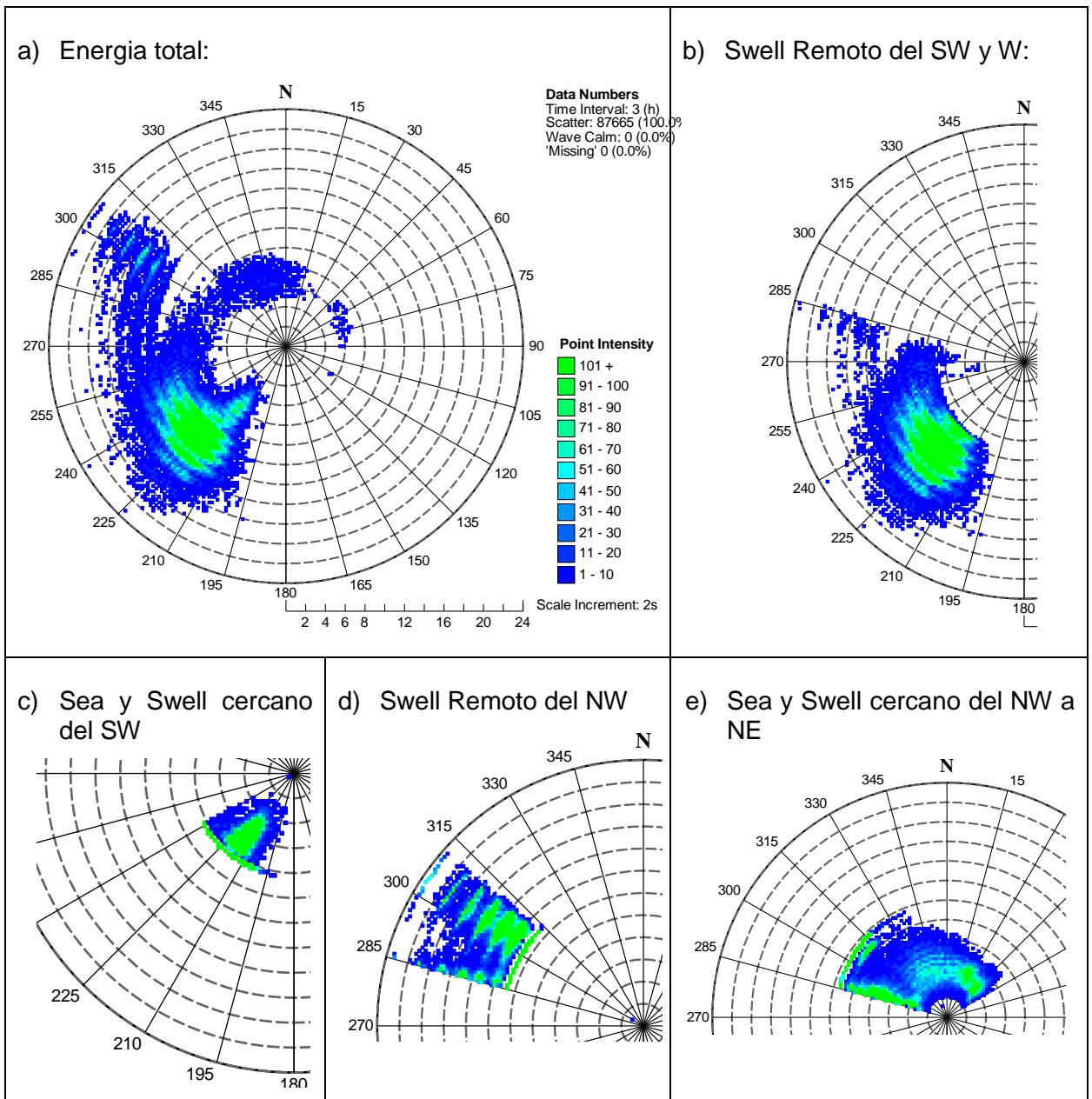


Figura 25: Comparación entre la intensidad de períodos de la energía total (a) y los resultados de las particiones por sectores (b), (c), (d) y (e). Fuente: Baird & Associates S.A.

### 6.5.3 ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIÓN MULTIMODAL

Realizando la partición multimodal de acuerdo a las características particulares de cada estado de mar (Figura 26, b), pertenecientes a la base de datos espectrales, se obtiene mayor información de las agrupaciones que forma el oleaje al llegar Nodo Valparaíso en comparación a los resultados de la energía total (Figura 26, a), ya que este describe lo que sucede con mayor detalle para cada uno de los espectros.

Estas particiones, al ser realizadas según las características peculiares de cada espectro, disminuyen el error por el corte de energía total de la base de datos (considerando el resultado de los 30 años), ya que realiza la separación de acuerdo a los valles espectrales de cada uno de los estados de mar, obteniendo así parámetros de resúmenes más representativos a las componentes del oleaje que fueron iniciadas o provinieron de diferentes lugares del Océano Pacifico. Por lo tanto, al separar el oleaje en grupos, según los resultados obtenidos en la rosa (Figura 26, b), no hará que la energía se corte, y los parámetros de resúmenes serán más representativos al área seleccionada.

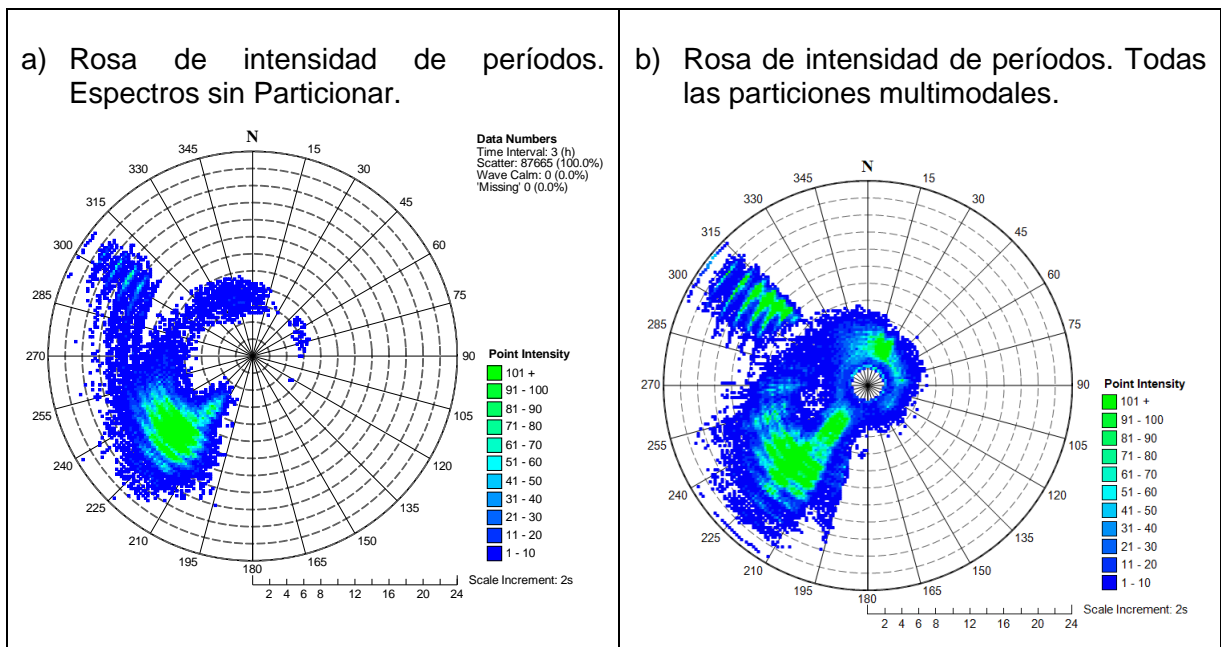


Figura 26: Comparación entre la intensidad de períodos de la energía total (a) y todos los resultados de la partición multimodal aplicada a cada espectro en particular (b). Fuente: Baird & Associates S.A.

A continuación se analizan los resultados de las agrupaciones seleccionadas:

- Swell Remoto del SW y W (Figura 27, a): Energías principalmente provenientes del SW, donde las intensidades de energías se ven claramente definidas por el mismo grupo.
- Sea y Swell cercano del SW (Figura 27, b): Intensidades de energías concentradas en las altas frecuencias, que se logra aislar respecto a otros sistemas de oleaje sin afectar los cambios de intensidad de período.
- Swell Remoto del NW (Figura 27, c): Grupos específico de energías provenientes del NW, que se encuentran concentrados en una clara dirección, aproximadamente 315 grados.

- Sea y Swell cercano del NW a NE (Figura 27, d): Grupo específico concentrado principalmente en la dirección NE, aproximadamente a los 15 grados, de altas frecuencias.

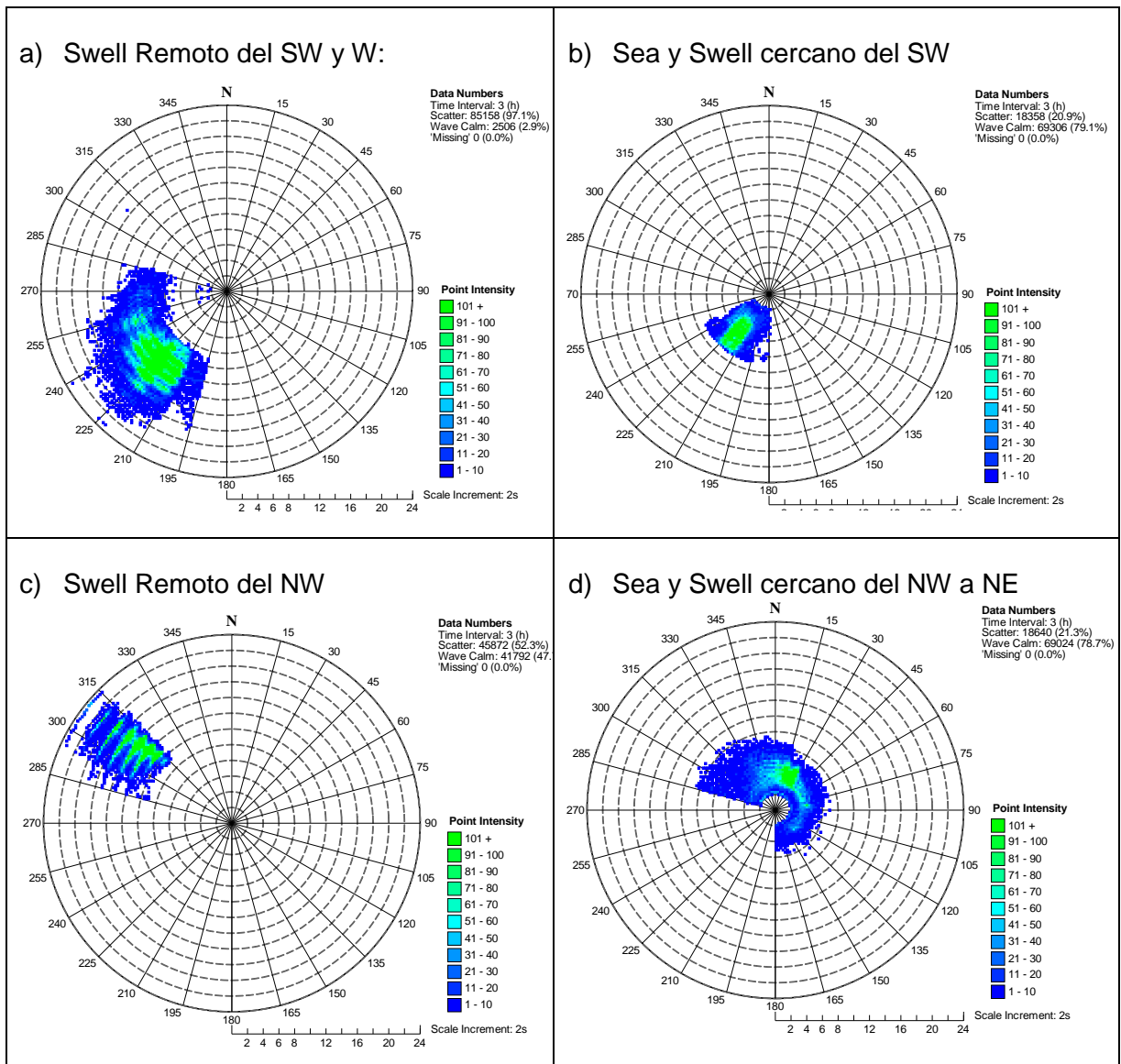


Figura 27: Resumen de las agrupaciones de los sistemas de oleajes determinados por el método de partición multimodal. Fuente: Baird & Associates S.A.

#### 6.5.4 PARTICIÓN POR SECTORES VERSUS MULTIMODAL

En la Figura 28, se comparan los resultados obtenidos con los métodos de partición del dominio espectral por sectores y del dominio espectral multimodal, específicamente para el Swell Remoto del SW y E, donde se observa que este último clasifica mejor las agrupaciones respecto a la intensidad de períodos.

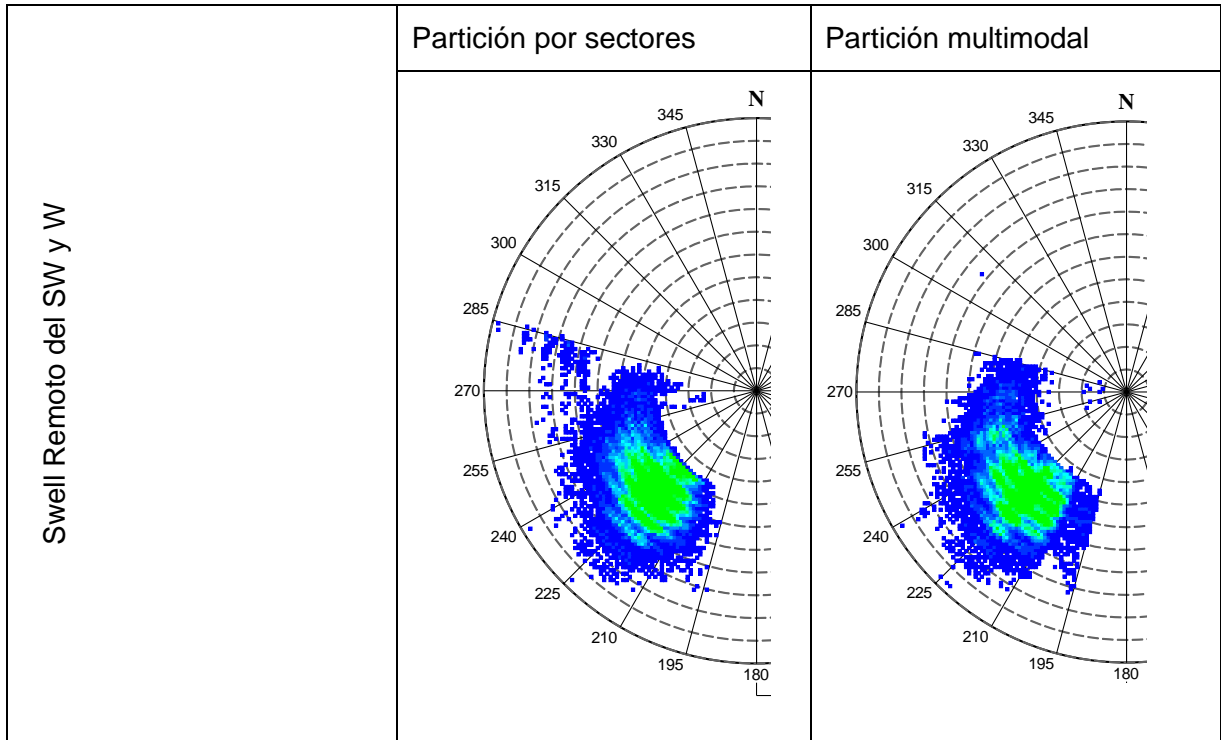


Figura 28: Comparación de resultados de intensidad de períodos para el Swell Remoto del SW y W.  
Fuente: Baird & Associates S.A.

Para el Sea y Swell cercano del SW (Figura 29) se observa que en ambos métodos los resultados son similares, pero con la diferencia que en la partición multimodal existe una mayor densidad de datos, por lo tanto una mayor información de los sistemas de oleaje agrupados en esa área. Por otro lado la partición por sectores produce un incremento sospechoso de intensidad en el límite inferior, lo que es el resultado de particionar los espectros en el lugar equivocado.

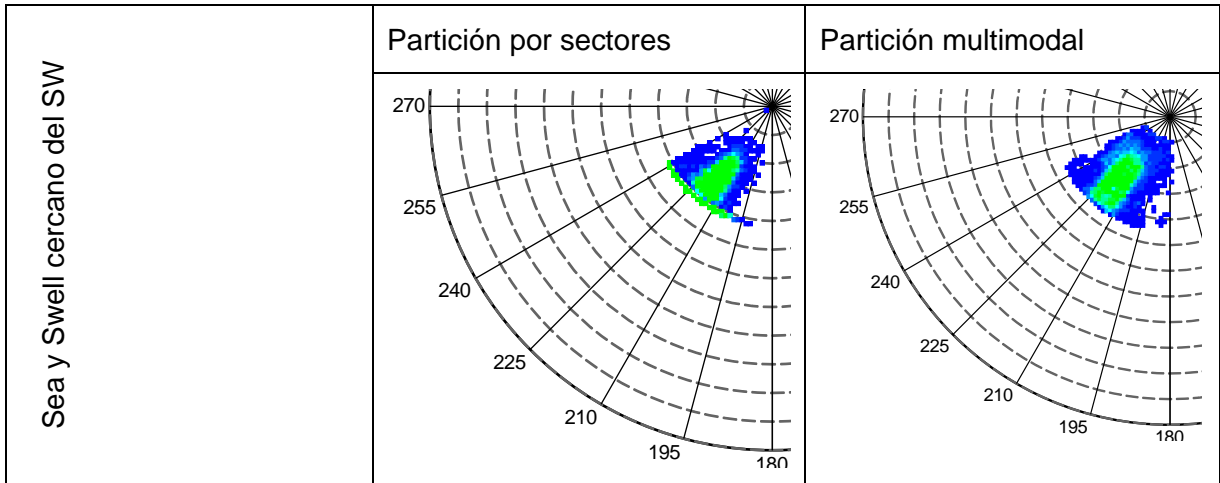


Figura 29: Comparación de resultados de intensidad de periodos para el Sea y Swell cercano del SW. Fuente: Baird & Associates S.A.

Al igual que los casos anteriores, el Swell Remoto del NW (Figura 30), se puede distinguir de mejor forma este grupo con la utilización de la partición multimodal, el cual obtiene un mejor desempeño, debido a que particionar los espectros de energía por los valles sin truncar la energía espectral. En la partición por sectores se puede apreciar cortes de energías.

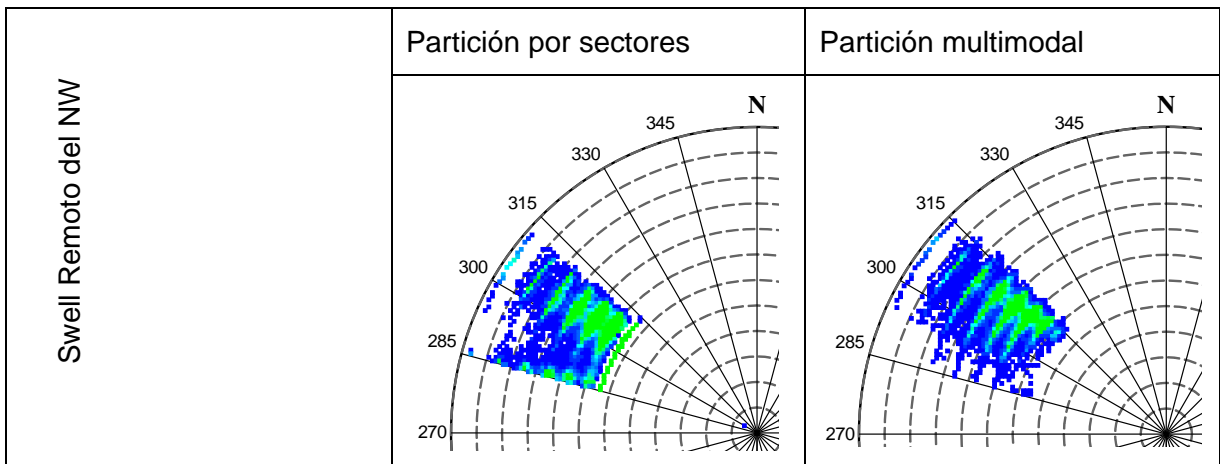


Figura 30: Comparación de resultados de intensidad de periodos para el Swell Remoto del NW. Fuente: Baird & Associates S.A.

Finalmente, de la Figura 31 se puede observar que al utilizar la partición del dominio espectral multimodal, es posible obtener mayor información de los sistemas espectrales pertenecientes del primer y segundo cuadrante, lo que representan sistemas de altas frecuencias que podrían ser provenientes de campo cercano o generación local, y que con el otro método no son identificadas. La partición por sectores no corta la energía espectral por donde corresponde, por lo que se aprecia varios *peak* de intensidades.

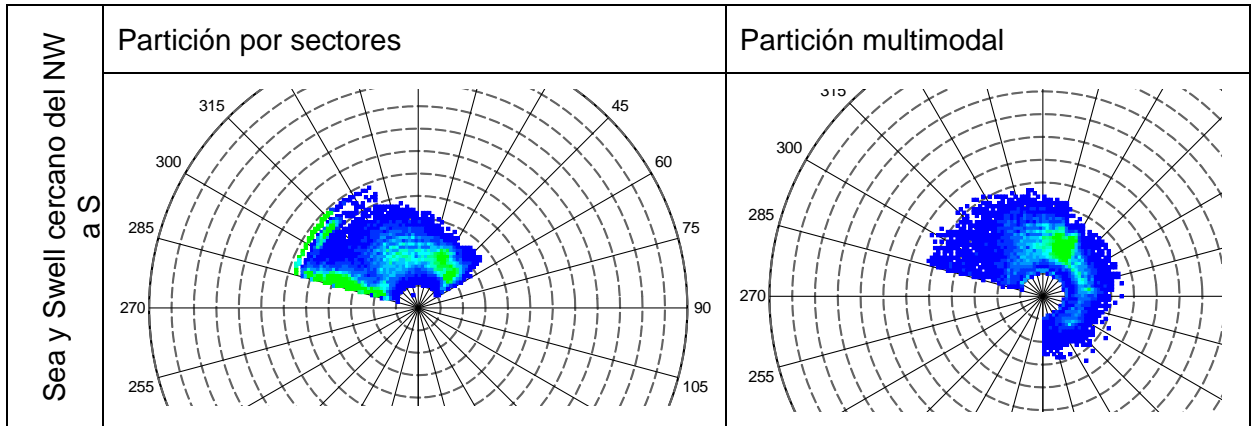


Figura 31: Comparación de resultados de intensidad de periodos para el Sea y Swell cercano del NW a S.  
Fuente: Baird & Associates S.A.

## 7. ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS EN EL NODO VALPARAÍSO

En el análisis de valores extremos de oleaje, que se utiliza para el diseño de estructuras marítimas, es importante aplicar un método adecuado para la selección de la lista de tormentas, implica: una clasificación de las tormentas de acuerdo a su origen y características, y selección de mayores tormentas (sección 4.1). Además, debido a las características del oleaje en las costas chilenas (sección 4.3), clasificar adecuadamente las tormentas que inciden sobre un sitio puede implicar una diferencia significativa en la altura de oleaje. Por ello, en este proyecto de título se realizó el análisis de acuerdo a los grupos formados en el análisis del carácter multimodal sobre el nodo Valparaíso y para verificar que esta metodología de selección de tormentas es la adecuada, se compara con los resultados de otras tres metodologías o criterios utilizados para clasificar las tormentas sobre el nodo Valparaíso.

La estimación de magnitudes máximas del oleaje, para los cuatro criterios analizados, se realizó mediante el método POT. Para cada serie obtenida se consideró una separación entre tormentas mínima de 48 horas y una duración mínima de 24 horas. Para cada caso, el umbral se definió de tal forma de obtener una lista de 30 tormentas. A cada lista de tormentas se escogió el mejor ajuste de distribución de probabilidad entre Exponencial y Gumbel (Valores extremos tipo I). Como se mencionó anteriormente, estos parámetros han sido definidos con la práctica. En la Tabla 7.1 se describe específicamente los parámetros y la función de probabilidad utilizado para cada lista.

Tabla 7.1: Resumen de parámetros de distribución utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Energía Total	Partición por Cuadrantes	Partición por sectores	Partición Multimodal
Energía Total	Tercer Cuadrante	Swell Remoto SW	Swell Remoto SW
Dist EV1 (Gumbel)	Dist Exponencial	Dist EV1 (Gumbel)	Dist EV1 (Gumbel)
u: 5,63	Beta 0,64	Beta 5,12	u: 5,39
alpha: 2,28	xo 4,73	xo 2,39	alpha: 1,96
	Cuarto Cuadrante	Sea y Swell Cercano SW	Sea y Swell Cercano SW
	Dist EV1 (Gumbel)	Dist EV1 (Gumbel)	Dist Exponencial
	u: 4,33	u: 2,64	Beta 0,30
	alpha: 3,03	alpha: 12,94	xo 3,19
		Swell Remoto NW	Swell Remoto NW
		Dist Exponencial	Dist EV1 (Gumbel)
		Beta 0,24	u: 1,53
		xo 1,21	alpha: 3,22
		Sea y Swell Cercano NW	Sea y Swell Cercano NW
	Dist EV1 (Gumbel)	Dist EV1 (Gumbel)	Dist EV1 (Gumbel)
	Beta 4,20	u: 4,22	
	xo 2,49	alpha: 2,03	

## 7.1 LISTA DE MAYORES TORMENTAS

La Tabla 7.2, Tabla 7.3 y Tabla 7.4 incluyen los listados de las 30 mayores tormentas en el Nodo Valparaíso, seleccionados de acuerdo a los métodos de partición antes mencionados.

**Tabla 7.2: Selección de mayores tormentas de acuerdo a la energía total y el método de partición del dominio espectral por cuadrantes. Fuente: Elaboración propia.**

Energía Total				PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES							
				TERCER CUADRANTE SW				CUARTO CUADRANTE NW			
Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)
20-jun-97	7,36	15,5	240	20-jun-97	6,66	15,5	240	23-jul-87	5,68	10,3	317
23-jul-87	7,20	15,5	257	18-may-86	6,50	15,5	252	16-ago-05	5,20	11,9	285
18-may-86	6,97	15,5	252	24-jul-87	6,13	15,5	254	11-jun-96	5,14	10,2	318
21-jun-83	6,41	15,5	222	21-jun-83	6,05	15,5	222	29-jul-01	5,08	9,4	331
04-jul-84	6,35	16,8	240	05-jul-09	6,02	15,8	238	06-sep-97	4,94	11,4	285
16-ago-05	6,35	12,7	268	14-jul-83	5,54	17,1	219	25-jul-89	4,91	9,4	316
05-jul-09	6,33	15,8	238	13-ago-95	5,54	15,6	226	16-ago-97	4,85	9,4	333
07-jun-06	6,20	13,7	253	18-may-81	5,52	17,2	221	15-jul-82	4,81	9,9	296
27-may-86	6,17	14,4	246	29-mar-09	5,52	16,9	223	22-may-94	4,71	12,2	280
23-may-05	6,06	12,9	251	25-may-85	5,46	15,3	236	27-may-86	4,69	8,6	326
23-may-94	5,91	13,6	259	10-may-80	5,42	14,6	233	07-jun-06	4,62	11,3	282
13-ago-95	5,91	15,6	227	04-jul-84	5,41	16,8	240	15-may-86	4,60	13,5	273
25-may-85	5,72	15,3	236	10-may-05	5,32	14,5	231	20-abr-86	4,50	8,8	331
11-jun-96	5,72	10,2	319	18-jun-94	5,31	15,4	236	13-jun-00	4,50	8,8	317
30-jul-01	5,72	9,4	335	04-sep-07	5,26	16,0	236	18-jul-80	4,49	9,5	317
10-may-80	5,70	14,6	234	06-ago-08	5,22	16,5	218	11-jun-97	4,47	9,5	329
14-jul-83	5,68	17,1	219	25-abr-02	5,19	15,7	221	11-jul-87	4,45	9,3	324
15-may-86	5,67	14,0	263	07-may-93	5,17	14,7	225	19-jun-97	4,40	9,0	301
18-may-81	5,58	17,2	221	18-jun-98	5,14	17,7	225	28-jul-88	4,36	8,8	336
17-ago-97	5,54	9,4	337	22-jun-04	5,11	15,3	240	22-jul-95	4,26	12,7	277
29-mar-09	5,54	16,9	223	04-jul-98	5,08	14,8	222	23-may-05	4,26	8,5	323
18-jun-94	5,49	15,4	236	16-may-82	5,07	14,8	238	20-may-03	4,24	11,4	280
07-sep-97	5,47	11,6	281	21-abr-04	5,02	13,6	220	29-may-97	4,21	9,5	319
26-jul-89	5,43	10,2	290	08-jun-06	5,01	13,9	250	20-may-08	4,21	12,2	280
10-may-05	5,38	14,5	231	29-oct-06	5,01	16,1	229	25-may-02	4,20	11,0	298
14-ago-88	5,36	14,2	236	14-ago-88	5,00	14,2	234	28-jun-09	4,20	11,8	286
07-may-93	5,34	14,8	222	12-ago-06	4,95	14,7	236	04-jul-84	4,03	8,5	307
05-sep-07	5,33	16,0	236	16-ago-05	4,85	12,9	258	01-jul-05	4,00	11,0	281
17-may-82	5,26	14,8	238	24-oct-03	4,83	16,6	220	21-jul-04	3,92	8,5	323
06-ago-08	5,24	16,5	218	02-jul-04	4,75	14,5	227	06-ago-90	3,78	8,5	332

De la Tabla 7.2 se observa que las tormentas seleccionadas para la energía total están entre los meses de mayo y septiembre, considerándose las ocurrencias en temporada de invierno principalmente. De esta misma tabla, la partición por cuadrantes arroja resultados similares, siendo para el tercer (eventos ocurridos entre abril – octubre) y cuarto cuadrante (eventos entre abril – septiembre) la temporada de invierno la que posee mayor concentración de tormentas. A pesar de esta similitud de temporada, las fechas de estas tormentas no son las mismas, esto es debido al método en el cual se separa la energía de un espectro para calcular los parámetros de resúmenes.

Tabla 7.3: Selección de mayores tormentas de acuerdo al método de partición del dominio espectral por sectores. Fuente: Elaboración propia.

PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES															
SWELL REMOTO DEL SW				SEA Y SWELL CERCANO DEL SW				SWELL REMOTO DEL NW				SEA Y SWELL CERCANO DEL NW			
Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)
20-jun-97	6,75	15,5	240	15-nov-98	2,85	8,4	215	04-feb-98	2,15	17,0	304	23-jul-87	5,77	9,8	332
18-may-86	6,62	15,5	252	17-ene-86	2,84	7,8	216	10-ene-95	1,83	18,6	304	29-jul-01	5,36	9,4	337
24-jul-87	6,43	15,5	255	22-ene-00	2,84	8,4	216	30-ene-83	1,82	19,1	305	11-jun-96	5,25	9,5	341
20-jun-83	6,04	15,5	222	30-dic-86	2,81	8,4	218	07-mar-83	1,80	18,7	307	16-ago-97	5,17	9,4	338
05-jul-09	6,04	15,8	238	24-dic-85	2,79	8,4	216	27-ene-81	1,60	18,9	304	03-may-05	4,86	9,1	332
04-jul-84	5,56	16,8	240	30-ene-90	2,79	8,4	214	24-mar-83	1,60	16,8	307	11-jun-97	4,71	9,3	334
13-ago-95	5,55	15,6	226	22-dic-81	2,78	8,4	211	20-feb-98	1,60	18,7	308	20-abr-86	4,69	8,6	336
18-may-81	5,48	17,2	221	24-ene-95	2,78	8,4	216	26-dic-94	1,55	18,7	305	06-jun-06	4,68	8,8	348
14-jul-83	5,48	17,1	219	04-dic-82	2,76	8,4	215	28-feb-98	1,54	17,1	305	28-jul-88	4,60	8,6	345
25-may-85	5,46	15,3	236	19-nov-82	2,75	8,4	214	08-mar-91	1,46	17,2	305	25-jul-89	4,60	9,2	321
29-mar-09	5,42	17,2	223	21-feb-83	2,73	8,4	212	28-mar-99	1,46	19,0	305	27-may-86	4,59	8,5	330
10-may-80	5,34	14,6	233	01-feb-87	2,73	8,4	220	14-ene-02	1,45	18,6	302	09-jul-87	4,56	9,1	332
23-may-94	5,33	13,8	255	02-ene-81	2,72	8,4	212	06-ene-80	1,44	19,0	305	17-jul-80	4,50	9,2	325
16-ago-05	5,33	12,8	265	25-feb-83	2,70	8,4	214	18-feb-83	1,43	19,0	302	15-jul-82	4,47	9,0	316
08-jun-06	5,28	13,8	252	18-ene-90	2,69	8,4	215	29-dic-85	1,43	19,0	304	13-oct-97	4,44	8,8	348
18-jun-94	5,25	15,4	236	06-ene-98	2,67	8,4	215	14-dic-87	1,40	18,6	307	12-jun-00	4,38	8,7	321
04-sep-07	5,19	16,0	236	22-nov-83	2,66	8,4	212	20-dic-93	1,36	18,9	305	11-may-81	4,36	8,7	354
10-may-05	5,17	14,5	231	05-dic-86	2,66	8,4	216	21-feb-86	1,35	17,0	305	29-may-97	4,31	9,2	323
16-may-82	5,11	14,8	238	11-feb-01	2,66	8,4	214	28-ene-90	1,34	18,9	304	19-may-08	4,29	8,4	6
22-jun-04	5,10	15,3	240	29-oct-83	2,64	8,4	218	18-dic-85	1,31	18,8	301	04-jul-96	4,27	9,2	318
06-ago-08	5,06	16,5	218	11-ene-84	2,64	8,4	215	18-ene-87	1,31	18,8	301	19-jun-97	4,16	8,6	318
07-may-93	5,05	14,8	221	04-feb-82	2,63	8,4	215	09-ene-87	1,30	19,2	306	20-may-03	4,15	9,1	316
14-ago-88	5,01	14,2	236	18-nov-94	2,62	8,4	217	25-ene-01	1,30	17,4	303	22-may-94	4,08	8,4	328
13-ago-09	4,99	14,5	248	17-feb-87	2,59	7,3	220	10-abr-93	1,28	17,4	305	20-jul-04	4,04	8,3	329
18-jun-98	4,97	17,7	225	05-dic-88	2,59	8,4	213	24-ene-02	1,28	16,8	305	15-may-86	3,94	8,2	335
29-oct-06	4,92	16,1	229	20-dic-95	2,56	7,6	218	17-ene-84	1,27	17,1	305	19-may-93	3,82	8,3	333
12-ago-06	4,87	14,7	236	29-nov-98	2,55	8,4	214	20-ene-98	1,27	18,4	305	02-ago-80	3,80	8,3	344
21-abr-04	4,73	13,6	220	05-dic-99	2,55	8,4	212	15-mar-83	1,25	18,9	304	06-ago-90	3,79	8,2	338
24-oct-03	4,72	16,6	220	16-feb-82	2,54	7,7	215	20-mar-87	1,23	17,1	305	02-jul-05	3,71	7,9	343
02-jul-04	4,59	14,5	227	28-dic-01	2,50	7,8	215	10-ene-06	1,22	16,8	304	08-may-82	3,50	8,0	319

Para el caso de los resultados de la partición espectral por sectores (Tabla 7.3) se observa que para el Swell Remoto del SW las tormentas aparecen en temporada de otoño - invierno (ente abril y agosto principalmente, exceptuando en una sola tormenta que ocurre en octubre), el Sea y Swell Cercano del SW posee tormentas que ocurren en verano (octubre a febrero), el Swell Remoto de NW los casos extremos aparecen en temporada verano (diciembre – abril) y por último él Sea y Swell Cercano del NW los eventos ocurren en temporada de invierno (abril – octubre). Por lo anterior, claramente al considerar diferentes métodos de partición para el espectro influye en los resultados de selección de eventos extremos, lo que puede hacer cambiar las características de diseño y el momento en el cual ocurren.

Tabla 7.4: Selección de mayores tormentas de acuerdo al método de partición espectral multimodal. Fuente: Elaboración propia.

PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL															
SWELL REMOTO DEL SW				SEA Y SWELL CERCANO DEL SW				SWELL REMOTO DEL NW				SEA Y SWELL CERCANO DEL NW			
Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)	Fecha del Peak	Hmo (m)	Tp (s)	DPK (°)
20-jun-97	7,36	15,5	240	16-feb-01	4,00	9,0	221	01-mar-98	2,61	15,6	310	23-jul-87	6,00	10,3	319
24-jul-87	7,19	15,5	257	12-ene-04	3,97	8,8	221	22-mar-83	2,34	16,5	311	11-jun-96	5,57	10,0	329
18-may-86	6,96	15,5	253	20-dic-85	3,96	8,8	223	20-feb-98	2,30	18,8	300	29-jul-01	5,48	9,4	335
20-jun-83	6,41	15,5	222	03-mar-96	3,69	8,7	224	10-ene-95	2,27	15,6	308	16-ago-97	5,29	9,4	337
04-jul-84	6,36	16,8	240	24-ene-00	3,65	8,2	221	20-ene-98	2,26	17,6	307	03-may-05	4,99	9,2	329
16-ago-05	6,35	12,7	269	05-ene-98	3,64	8,5	220	04-feb-98	2,20	17,0	307	20-abr-86	4,98	8,7	331
05-jul-09	6,18	15,8	239	02-feb-87	3,60	8,2	225	26-mar-93	2,12	17,1	300	10-jul-87	4,86	9,2	330
13-ago-95	5,91	15,6	225	31-ene-90	3,56	8,5	219	25-ene-81	2,07	18,7	301	06-jun-06	4,86	8,6	345
23-may-94	5,90	13,6	258	24-feb-83	3,55	8,5	214	29-ene-83	2,03	15,7	307	12-jun-00	4,84	8,8	306
25-may-85	5,72	15,3	237	20-nov-82	3,51	7,9	221	26-feb-87	1,97	20,9	308	11-jun-97	4,81	9,5	328
14-jul-83	5,69	17,1	221	17-nov-94	3,50	8,0	222	07-mar-83	1,83	19,2	310	17-jul-80	4,80	9,5	312
10-may-80	5,61	14,6	231	27-ene-99	3,49	8,5	223	22-mar-03	1,76	15,1	308	25-jul-89	4,73	9,0	326
18-may-81	5,60	17,2	222	11-ene-84	3,48	8,5	218	27-dic-94	1,57	18,7	309	28-jul-88	4,71	8,5	343
29-mar-09	5,54	16,9	224	06-dic-86	3,48	8,5	215	30-nov-99	1,57	16,9	311	29-may-97	4,68	9,6	314
08-jun-06	5,51	13,8	257	29-nov-88	3,46	8,4	222	08-mar-91	1,48	17,2	309	19-jun-97	4,58	8,4	311
18-jun-94	5,50	15,4	237	02-mar-83	3,44	8,9	213	28-mar-99	1,48	19,0	309	04-jul-96	4,49	9,3	307
26-jul-89	5,41	10,9	266	02-ene-81	3,43	8,4	215	15-ene-02	1,48	18,6	306	13-oct-97	4,47	8,8	347
15-jul-82	5,39	10,8	282	29-ene-98	3,43	8,4	219	18-feb-83	1,46	19,0	304	11-may-81	4,38	8,7	348
10-may-05	5,39	14,5	229	18-ene-86	3,42	8,2	223	06-ene-80	1,45	19,0	309	19-may-08	4,21	8,1	4
14-ago-88	5,36	14,2	236	17-feb-87	3,40	8,0	229	29-dic-85	1,45	18,9	308	20-jul-04	4,19	8,5	325
05-sep-07	5,32	16,0	236	03-dic-98	3,40	8,8	220	14-dic-87	1,42	18,6	311	12-jul-08	4,14	9,2	308
07-may-93	5,31	14,8	223	06-feb-84	3,36	8,5	218	09-nov-92	1,40	13,5	310	23-ago-96	4,07	8,3	344
16-may-82	5,26	14,8	242	30-nov-83	3,35	8,8	221	21-feb-86	1,37	17,0	308	24-jul-80	3,99	8,3	352
06-ago-08	5,24	16,5	220	04-feb-82	3,31	8,5	221	21-dic-93	1,37	19,0	310	15-jul-82	3,92	8,2	330
18-jun-98	5,19	17,7	225	22-feb-84	3,31	8,5	216	29-ene-90	1,36	18,9	308	20-ago-86	3,92	8,1	304
13-ago-09	5,14	14,5	249	25-ene-95	3,31	8,1	222	18-dic-85	1,35	18,8	303	08-ago-84	3,85	8,3	343
28-jun-00	5,06	12,9	242	18-ene-90	3,30	8,4	215	09-ene-87	1,32	19,2	311	02-ago-80	3,79	8,2	345
29-oct-06	5,04	16,1	228	31-dic-98	3,28	8,4	222	25-ene-01	1,32	17,3	307	14-may-86	3,71	7,8	337
24-oct-03	4,84	16,6	221	16-feb-81	3,27	8,2	218	10-abr-93	1,31	17,4	309	08-may-82	3,63	8,3	316
28-jun-09	4,83	12,2	278	17-dic-01	3,20	8,3	224	15-mar-83	1,30	18,9	307	02-jun-93	3,20	7,5	340

La partición multimodal de espectros entrega listas de tormentas (Tabla 7.4) en la cual se observa que para el Swell Remoto del SW los eventos ocurren en temporada de invierno principalmente (exceptuando algunos casos que aparecen en septiembre y octubre), pero para él Sea y Swell Cercano del SW las fechas de estas tormentas ocurren en verano (noviembre a marzo), por otro lado el Swell Remoto del NW ocurren durante el verano (noviembre a abril) y él Sea y Swell Cercano del NW estos corresponden a invierno.

En resumen respecto a las fechas de las tormentas, es clave utilizar el método adecuado de separación de espectros para determinar los eventos que realmente influenciarán las condiciones del oleaje sobre un sitio proyectado, lo cual se debe tomar en consideración.

De la selección de tormentas el parámetro más importante es la altura de oleaje espectral, ya que con ella se determinará el clima de oleaje extremo sobre el lugar de interés, que está en función de un período de retorno, pero tampoco se debe dejar de lado el factor dirección ya que este determinará su utilidad y operación de la estructura costera especialmente para un puerto.

De la selección de tormentas se resume lo siguiente:

1. Energía total; predominancia en invierno y dirección más frecuente de 236° N.
2. Partición por cuadrantes;

- a. Tercer Cuadrante SW, predominancia en invierno y dirección más frecuente de 236° N.
  - b. Cuarto cuadrante NW, predominancia en invierno y dirección más frecuente de 317° N.
3. Por Sectores:
- a. Swell Remoto del SW y W, predominante en invierno y dirección más frecuente de 236° N.
  - b. Sea y Swell Cercano del SW, predominante en verano y dirección más frecuente de 215° N.
  - c. Swell Remoto del NW, predominante en verano y dirección más frecuente de 305° N.
  - d. Sea y Swell Cercano del NW al E, predominante en Invierno y dirección más frecuente de 332° N.
4. Multimodal:
- a. Swell Remoto del SW y W, predominante en invierno y dirección más frecuente de 240° N.
  - b. Sea y Swell Cercano del SW, predominante en verano y dirección más frecuente de 221° N.
  - c. Swell Remoto del NW, predominante en verano y dirección más frecuente de 308° N.
  - d. Sea y Swell Cercano del NW al E, predominante en Invierno y dirección más frecuente de 329° N.

### 7.1.1 COMPARACIÓN DE SELECCIÓN DE TORMENTAS

En la Tabla 7.5 se presentan los resultados de la selección de tormentas obtenidos por la energía total y la partición espectral por cuadrantes (Tercer cuadrante SW y Cuarto cuadrante NW), en la cual se puede observar que:

- Las mayores magnitudes de alturas se encuentran en la energía total, ya que en el método de partición por cuadrante se separa la energía del espectro disminuyendo así sus magnitudes. Por otro lado, las magnitudes del tercer cuadrante SW son similares a la energía total, esto se puede atribuir por que la energía espectral está más concentrada en ese sector (mayor frecuencia de eventos).
- Para el caso del período *peak*, el tercer cuadrante SW tiene las mayores magnitudes, siendo los períodos de la energía total un poco más bajas que estas.
- En el caso de la dirección *peak*, los resultados de la energía total y el tercer cuadrante SW son similares con la única diferencia que la energía total abarca una amplitud mayor de direcciones, debido a que no se trunca la energía espectral como en la partición por cuadrantes.

Tabla 7.5: Comparación de selección de tormentas obtenidas por la energía total y el método de partición por cuadrantes. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Altura Hmo (m)		
	Energía Total	Tercer cuadrante SW	Cuarto cuadrante NW
Mínimo	5,2	4,8	3,8
Máximo	7,4	6,7	5,7
Promedio	5,9	5,4	4,5

Parámetro	Período Peak Tp (s)		
	Energía Total	Tercer cuadrante SW	Cuarto cuadrante NW
Mínimo	9,4	12,9	8,5
Máximo	17,2	17,7	13,5
Promedio	14,3	15,4	10,2

Parámetro	Dirección Peak DPK (°)		
	Energía Total	Tercer cuadrante SW	Cuarto cuadrante NW
Mínimo	218	218	273
Máximo	337	258	336
Promedio	251	232	307

La Tabla 7.6 muestra la comparación de los resultados obtenidos de la selección de tormentas por los métodos de partición del dominio espectral por sectores y el método de partición del dominio espectral multimodal, en la cual se destaca que:

- En el caso de oleaje tipo Swell Remoto del SW, las diferencias son menores. Las alturas son de mayor magnitud con el método de separación multimodal (5,7% de diferencia en promedio) y sus períodos son similares a los de la energía total (al comprar con la Tabla 7.5), pero la separación multimodal supera en un 2,6% a la partición por sectores. Las direcciones siguen siendo similares entre ambos métodos, solo con una diferencia del 2,4% en promedio.
- Para el Sea y Swell Cercano del SW, se observan mayores diferencias en el cálculo de altura. En la partición multimodal se obtienen magnitudes de alturas (en promedio 23% mayores) y períodos mayores (en promedio 2,1% de diferencia) en comparación a los obtenidos por el otro método. En el caso de las direcciones estas se mantienen similares con un solo un 2,3% de diferencia.
- Para ambos métodos, en la selección de tormentas para el Swell Remoto de NW poseen bajas magnitudes de alturas, sin embargo los resultados obtenidos por la separación multimodal son mayores (con una diferencia promedio del 14.8%). Respecto a este último método, el rango de variación de período es más amplio y su promedio es similar al obtenido por la separación por sectores (2,2% de diferencia). En cuanto a las direcciones éstas se mantienen de forma similar (solo con un 1% de diferencia).
- En la selección de tormentas para el Sea y Swell Cercano del NW las alturas son ligeramente mayores al aplicar el método de partición multimodal (en promedio 1,7%

mayores). En promedio los periodos en ambos métodos son iguales y las direcciones difieren en 1%.

**Tabla 7.6: Comparación de la selección de tormentas entre los resultados de la partición del dominio espectral por sectores y la partición del dominio espectral multimodal. Fuente: Elaboración propia.**

Tipo de oleaje	Swell Remoto del SW								
Parámetro	Altura Hmo (m)			Período Peak Tp (s)			Dirección Peak DPK (°)		
Método de Partición	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia
Mínimo	4,6	4,8	5,0	12,8	10,8	18,5	218	220	0,9
Máximo	6,8	7,4	8,3	17,7	17,7	0,0	265	282	6,0
Promedio	5,4	5,7	5,7	15,4	15,0	2,6	235	240	2,4

Tipo de oleaje	Sea y Swell Cercano del SW								
Parámetro	Altura Hmo (m)			Período Peak Tp (s)			Dirección Peak DPK (°)		
Método de Partición	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia
Mínimo	2,5	3,2	21,9	7,3	7,9	7,6	211	213	0,9
Máximo	2,9	4,0	28,8	8,4	9,0	6,7	220	229	3,9
Promedio	2,7	3,5	23,0	8,3	8,4	2,1	215	220	2,3

Tipo de oleaje	Swell Remoto del NW								
Parámetro	Altura Hmo (m)			Período Peak Tp (s)			Dirección Peak DPK (°)		
Método de Partición	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia
Mínimo	1,2	1,3	6,2	16,8	13,5	24,4	301	300	0,3
Máximo	2,2	2,6	17,6	19,2	20,9	8,1	308	311	1,0
Promedio	1,5	1,7	14,8	18,2	17,8	2,2	305	308	1,0

Tipo de oleaje	Sea y Swell Cercano del NW								
Parámetro	Altura Hmo (m)			Período Peak Tp (s)			Dirección Peak DPK (°)		
Método de Partición	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia	Por sectores	Multimodal	% Diferencia
Mínimo	3,5	3,2	9,4	7,9	7,5	5,3	6	4	50,0
Máximo	5,8	6,0	3,8	9,8	10,3	4,9	354	352	0,6
Promedio	4,4	4,5	1,7	8,8	8,8	0,0	321	318	1,0

De todo esto se puede decir que al considerar las modalidades de los espectros en particular para separar identificar las componentes del oleaje, permite ser más riguroso con el principio de la conservación de la energía (conservar la energía del sistema espectral por los valles) y los parámetros de resúmenes son más representativos del sistema al que pertenecen.

Sin embargo al considerar todo a la energía espectral para el cálculo de los parámetros de resúmenes, sus magnitudes serán siempre mayores en comparación a los otros métodos aplicados pero no permite obtener información de las componentes del oleaje que podrían afectar o influenciar en el diseño estructural de una obra de ingeniería que estén mayormente abiertos al oleaje proveniente del NW y tampoco permite identificar la dirección de los casos extremos que podrían ser importantes para la orientación de un puerto u otro tipo de estructura.

## 7.2 ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE TORMENTAS

### 7.2.1 TERCER CUADRANTE

#### 7.2.1.1 OLEAJE REMOTO

En la Figura 32 se comparan los resultados de la extrapolación de valores extremos obtenidos al aplicar los métodos de Energía Total, Partición por Cuadrantes (PC), Partición por Sectores (PS) y Partición Multimodal (PM), para el tercer cuadrante oleaje tipo remoto.

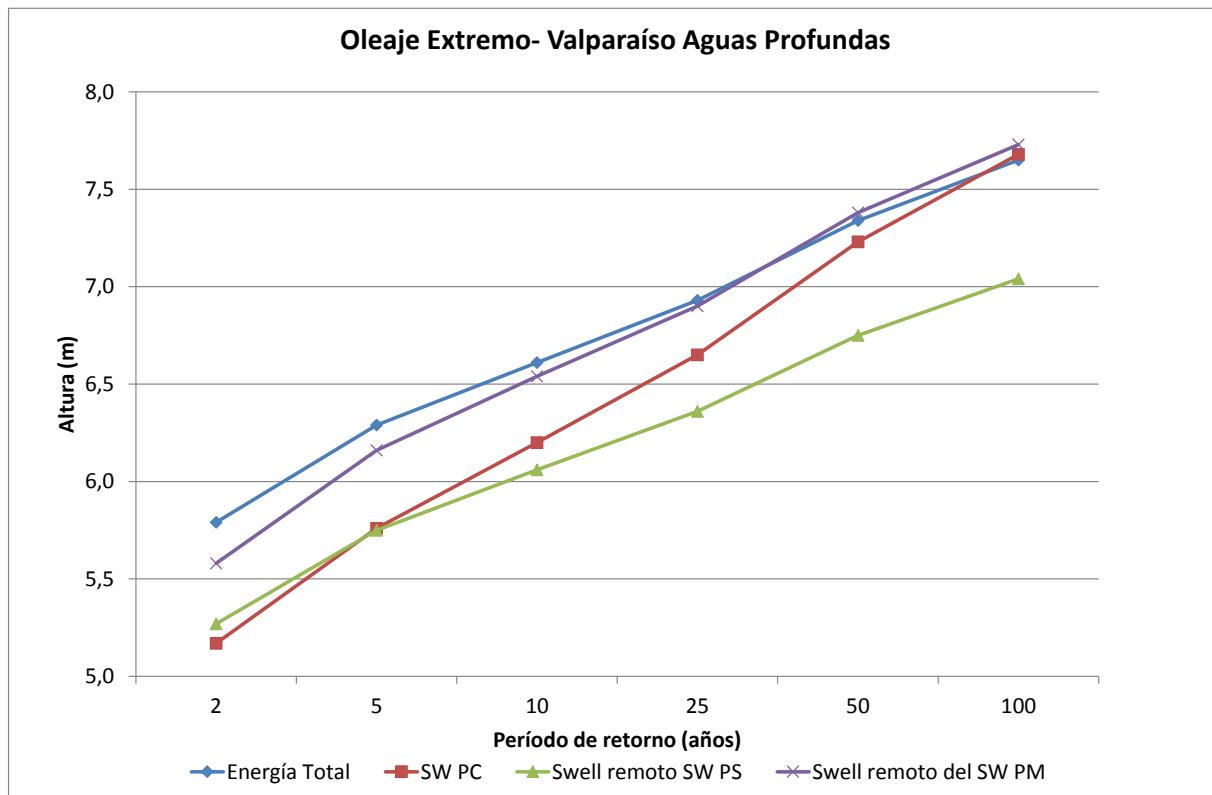


Figura 32: Comparación de resultados de altura extremas en función de períodos de retornos para oleajes remotos del tercer cuadrante. Basados en olas de 1980 a 2009.

De la Figura 32 se destaca lo siguiente:

- Los valores de altura de oleaje extremo para la energía total, en su mayoría son las de mayor magnitud, exceptuando en los períodos de retorno de 50 y 100 años cuyas magnitudes son superadas por el oleaje Swell Remoto SW PM pero de forma ligera, la diferencia no es significativa, esto se debe al efecto de pendiente por la extrapolación de datos. Siendo este criterio conservador, no significa un error para determinar las alturas de oleaje del SW, las representa bien considerando que a partir de los 25 años son significantes para todo tipo de estructura marítima.
- Al comparar el oleaje remoto del tercer cuadrante, se aprecia que las mayores magnitudes son obtenidas por el método de partición multimodal. Por otro lado, los resultados obtenidos por la separación espectral por cuadrantes, presenta una curva con una

pendiente considerable, con la menor magnitud en 2 años de período de retorno y alcanzando la magnitud de la energía total a los 100 años período de retorno. Por último, la curva del Swell Remoto SW PS es la que posee las más bajas magnitudes de altura.

- Los resultados de los métodos de partición por cuadrante (que considera tanto oleaje tipo Sea como Swell) y por sectores son menores a los resultados con partición multimodal, mostrando el efecto de truncar los espectros en los dos primeros métodos (PC y PS).
- En el caso de un sitio expuesto al oleaje del SW, se podría utilizar la energía total para determinar los valores de diseño.

### 7.2.1.2 OLEAJE CERCANO

En la Figura 33 se comparan los resultados de la extrapolación de valores extremos obtenidos al aplicar los métodos de Energía Total, Partición por Cuadrantes (PC), Partición por Sectores (PS) y Partición Multimodal (PM), para el tercer cuadrante oleaje tipo cercano.

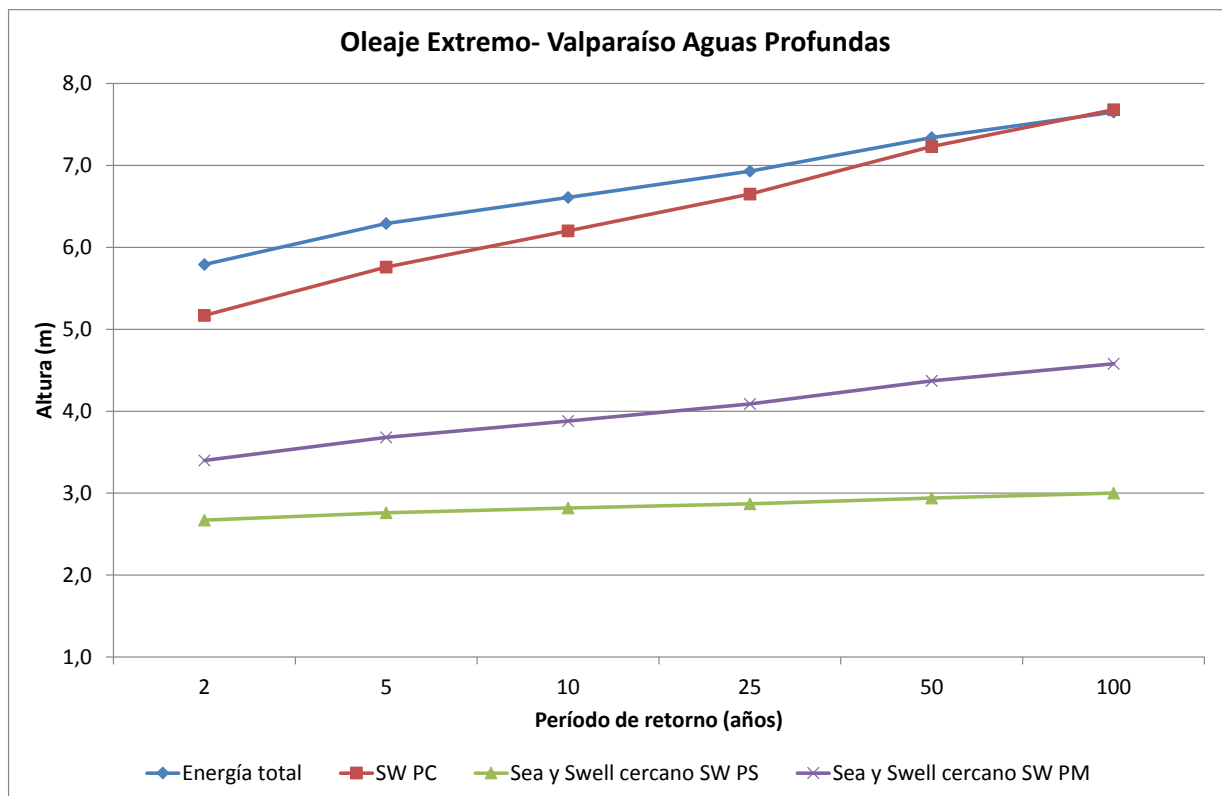


Figura 33: Comparación de resultados de altura extremas en función de períodos de retornos para oleajes cercanos del tercer cuadrante. Basados en olas de 1980 a 2009.

De la Figura 33 se destaca lo siguiente:

- La energía total, siempre será la que contiene mayores alturas por que representa la totalidad de los sistemas presentes en la base de datos, ya que no hace distinción por tipo de oleaje y representa la dirección más frecuente.

- Los resultados en el método de partición por cuadrantes claramente son menores que los de la energía total pero con mayores magnitudes a las curvas de alturas de las particiones por sectores y multimodal, en consideración a que éstas contienen oleaje tipo sea como tipo swell.
- Comparando los métodos que hacen distinción por el tipo de oleaje, se obtienen mayores magnitudes de alturas al aplicar el método de partición multimodal, cuyos valores se encuentran muy por encima de los valores obtenidos por el método de partición por sectores, ya que al igual que en el caso anterior, se conserva la energía de los sistemas de oleaje que componen este grupo (partición correcta que separa el espectro de energía por el valle).
- Las magnitudes de alturas de la partición por sectores (PS) son menores, por el efecto de truncar espectros.

## 7.2.2 CUARTO CUADRANTE

### 7.2.2.1 OLEAJE REMOTO

En la Figura 34 se comparan los resultados de la extrapolación de valores extremos obtenidos al aplicar los métodos de Energía Total, Partición por Cuadrantes (PC), Partición por Sectores (PS), Partición Multimodal (PM), para al cuarto cuadrante oleaje tipo remoto.

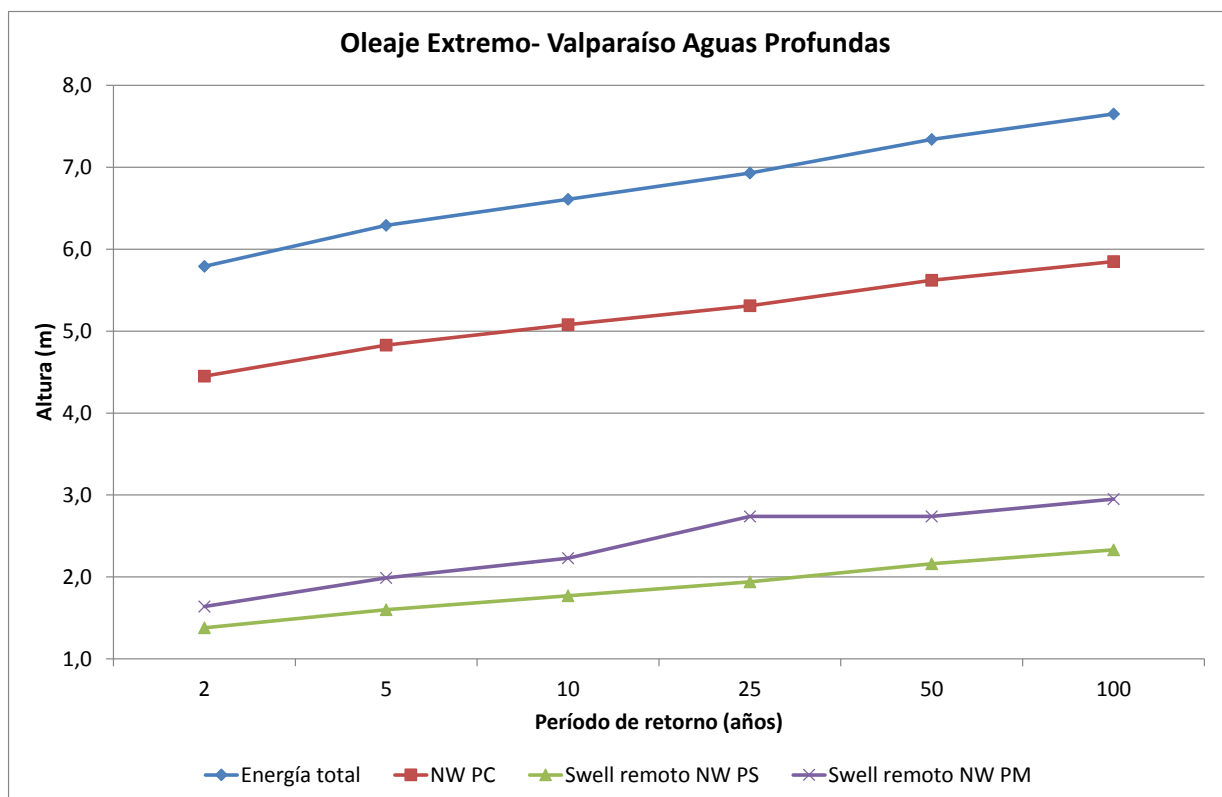


Figura 34: Comparación de resultados de altura extremas en función de períodos de retornos para oleajes remotos del cuarto cuadrante. Basados en olas de 1980 a 2009.

De la Figura 34 se destaca lo siguiente:

- Como es en los casos anteriores la energía total siempre será la que posea mayores magnitudes.
- La curva del cuarto cuadrante NW (PC) contiene tanto el oleaje tipo Sea como Swell, por esta razón sus magnitudes son mayores a los resultados de la partición por sectores (PS) y partición multimodal (PM). El método de partición por cuadrante, si bien permite reducir la cantidad excesiva de energía del análisis, ésta aun sobre conserva las alturas en comparación a los resultados del método por sectores y multimodal.
- Al comparar los resultados del Swell Remoto NW obtenido por el método de partición por sectores (PS) y la partición multimodal (PM) se observa que con este último método, se obtienen mayores alturas, ya que este conserva toda la energía del grupo presentes en el conjunto de espectros del nodo Valparaíso (particiona correctamente cada estado de mar de acuerdo a los valles). Las alturas del Swell Remoto NW PS son menores por el efecto de truncar espectros.

### 7.2.2.2 OLEAJE CERCANO

En la Figura 35 se comparan los resultados de la extrapolación de valores extremos obtenidos al aplicar los métodos: Energía Total, Partición por Cuadrantes (PC), Partición por Sectores (PS) y Partición Multimodal (PM), correspondientes al cuarto cuadrante oleaje tipo cercano.

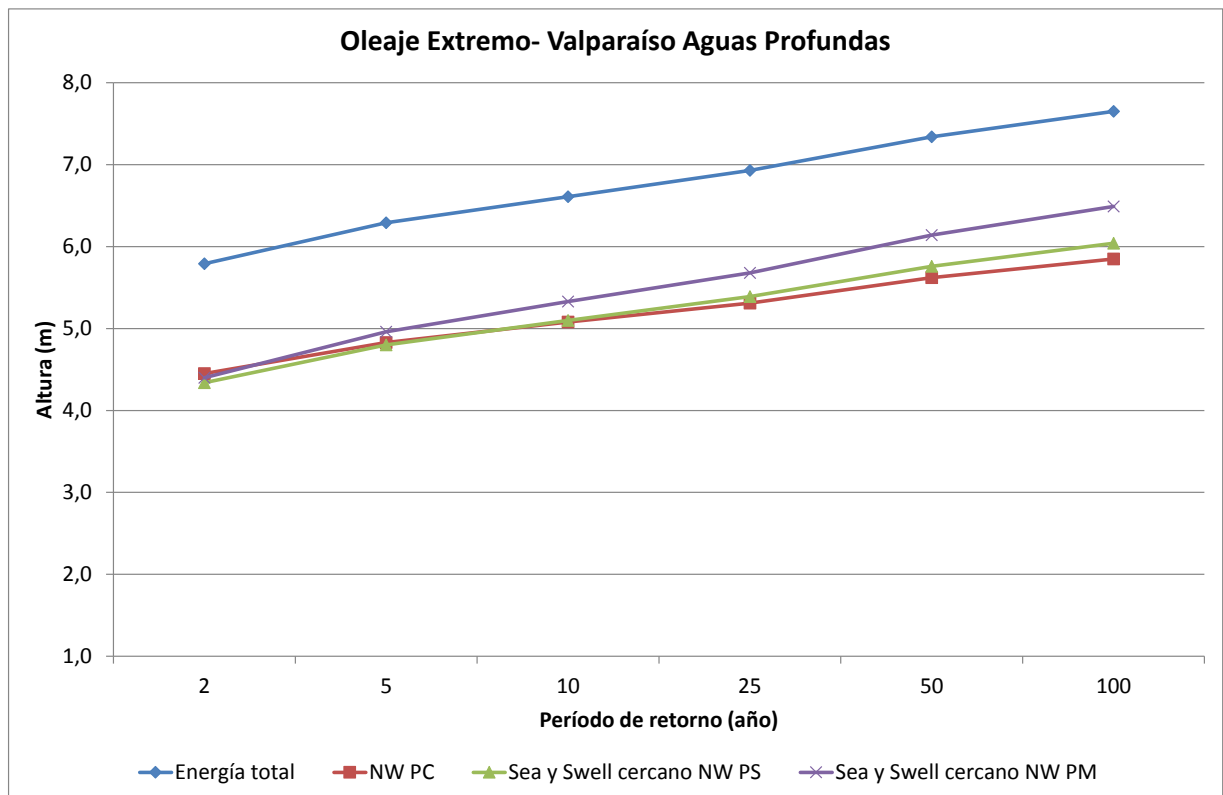


Figura 35: Comparación de resultados de altura extremas en función de períodos de retornos para oleajes cercanos del cuarto cuadrante. Basados en olas de 1980 a 2009.

De la Figura 35 se destaca lo siguiente:

- Con la energía total se obtienen siempre las mayores magnitudes y no necesariamente representa el oleaje cercano del cuarto cuadrante.
- Al incluir en la comparación los resultados de la partición por cuadrantes (PC), se observa que la curva NW PC es la que presenta menores magnitudes de alturas para el oleaje y no tiene mucha diferencia con los resultados de la partición por sectores (PS), cuyas magnitudes son ligeramente mayores a esta. Esto se produce por el efecto de truncar espectros.
- Considerando los resultados para el cuarto cuadrante y de oleaje cercano, se puede observar que las mayores magnitudes de alturas, luego de la energía total, son obtenidas por la aplicación del método de separación espectral multimodal.

### 7.2.3 RESUMEN

En la Tabla 7.8 y Tabla 7.8 se muestran los listados de alturas de olas más probables de altura de ola significativa de proyecto como función del período de retorno según los diferentes métodos de partición aplicados a la base de datos espectrales, graficados en Figura 32 a Figura 35.

**Tabla 7.7: Resultados del Análisis de valores extremos nodo Valparaíso. Energía total y Partición del dominio espectral por cuadrantes. El cálculo superior e inferior indica la banda de confianza  $\pm 2$  desviaciones estándar. Fuente: Elaboración propia.**

Método	Período de Retorno	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
<b>1- Energía Total</b>	Cálculo Superior	5,98	6,60	7,04	7,47	8,03	8,46
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>5,79</b>	<b>6,29</b>	<b>6,61</b>	<b>6,93</b>	<b>7,34</b>	<b>7,65</b>
	Cálculo Inferior	5,60	5,97	6,19	6,39	6,65	6,84
<b>2- Partición del dominio espectral por cuadrantes</b>	<i>2.1 Tercer cuadrante SW</i>						
	Cálculo Superior	5,33	6,14	6,74	7,35	8,16	8,76
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>5,17</b>	<b>5,76</b>	<b>6,20</b>	<b>6,65</b>	<b>7,23</b>	<b>7,68</b>
	Cálculo Inferior	5,01	5,38	5,66	5,94	6,31	6,59
	<i>2.2 Cuarto cuadrante NW</i>						
	Cálculo Superior	4,60	5,07	5,40	5,72	6,14	6,46
<b>Cálculo Promedio</b>	<b>4,45</b>	<b>4,83</b>	<b>5,08</b>	<b>5,31</b>	<b>5,62</b>	<b>5,85</b>	
Cálculo Inferior	4,31	4,59	4,75	4,91	5,10	5,24	

Tabla 7.8: Resultados del Análisis de valores extremos nodo Valparaíso. Partición del dominio espectral por sectores y partición multimodal. El cálculo superior e inferior indica la banda de confianza  $\pm 2$  desviaciones estándar. Fuente: Elaboración propia.

Método	Período de Retorno	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
3- Partición del dominio espectral por sectores	<i>3.1 Swell Remoto del SW</i>						
	Cálculo Superior	5,45	6,05	6,47	6,88	7,41	7,81
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>5,27</b>	<b>5,75</b>	<b>6,06</b>	<b>6,36</b>	<b>6,75</b>	<b>7,04</b>
	Cálculo Inferior	5,09	5,44	5,65	5,85	6,09	6,28
	<i>3.2 Sea y Swell Cercano del SW</i>						
	Cálculo Superior	2,70	2,81	2,89	2,97	3,07	3,14
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>2,67</b>	<b>2,76</b>	<b>2,82</b>	<b>2,87</b>	<b>2,94</b>	<b>3,00</b>
	Cálculo Inferior	2,64	2,70	2,74	2,78	2,82	2,86
	<i>3.3 Swell Remoto del NW</i>						
	Cálculo Superior	1,44	1,74	1,98	2,21	2,51	2,74
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>1,38</b>	<b>1,60</b>	<b>1,77</b>	<b>1,94</b>	<b>2,16</b>	<b>2,33</b>
	Cálculo Inferior	1,32	1,46	1,57	1,67	1,81	1,92
	<i>3.4 Sea y Swell cercano del NW</i>						
	Parámetro	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Cálculo Superior	4,52	5,09	4,59	5,88	6,39	6,78	
<b>Cálculo Promedio</b>	<b>4,34</b>	<b>4,80</b>	<b>5,10</b>	<b>5,39</b>	<b>5,76</b>	<b>6,04</b>	
Cálculo Inferior	4,17	4,51	4,71	4,89	5,13	5,30	
4- Partición multimodal	<i>4.1 Swell Remoto del SW</i>						
	Parámetro	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
	Cálculo Superior	5,80	6,52	7,04	7,53	8,18	8,67
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>5,58</b>	<b>6,16</b>	<b>6,54</b>	<b>6,90</b>	<b>7,38</b>	<b>7,73</b>
	Cálculo Inferior	5,36	5,79	6,04	6,27	6,58	6,80
	<i>4.2 Sea y Swell Cercano del SW</i>						
	Cálculo Superior	3,48	3,85	4,14	4,43	4,81	5,09
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>3,40</b>	<b>3,68</b>	<b>3,88</b>	<b>4,09</b>	<b>4,37</b>	<b>4,58</b>
	Cálculo Inferior	3,32	3,50	3,63	3,76	3,94	4,07
	<i>4.3 Swell Remoto del NW</i>						
	Cálculo Superior	1,78	2,22	2,53	3,23	3,23	3,52
	<b>Cálculo Promedio</b>	<b>1,64</b>	<b>1,99</b>	<b>2,23</b>	<b>2,74</b>	<b>2,74</b>	<b>2,95</b>
	Cálculo Inferior	1,52	1,77	1,92	2,25	2,25	2,38
	<i>4.4 Sea y Swell Cercano del NW</i>						
Parámetro	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	
Cálculo Superior	4,61	5,32	5,81	6,29	6,92	7,39	
<b>Cálculo Promedio</b>	<b>4,40</b>	<b>4,96</b>	<b>5,33</b>	<b>5,68</b>	<b>6,14</b>	<b>6,49</b>	
Cálculo Inferior	4,19	4,60	4,85	5,08	5,37	5,58	

### 7.3 DISCUSIÓN: RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

Al aplicar el método de la energía total para el oleaje extremo, se destacan tormentas entre mayo a septiembre (Tabla 7.2), con direcciones dentro de un rango de  $218^{\circ}$  a  $337^{\circ}$  y períodos desde 9.4 a 17.2 segundos (Tabla 7.5), cuyas alturas extremas representa bien el oleaje de SW (Tabla 7.7 y Figura 32). Las tormentas obtenidas por la energía total, están concentradas en el tercer cuadrante (solo 3 casos de 30 están en el cuarto cuadrante), no son representativas para el oleaje proveniente del cuarto cuadrante ya que sobre estima las magnitudes (Figura 34 y Figura 35), para el oleaje cercano del tercer cuadrante (Figura 33) al considerar que los períodos de eventos extremos son mayores a 9 segundos (Tabla 5.1).

Para la partición por cuadrantes en el tercer cuadrante se destaca con tormentas entre abril y octubre (Tabla 7.2), con alturas desde 4,8 a 6,7 m, períodos entre 12,9 y 17,7 segundos y direcciones entre  $218^{\circ}$  y  $258^{\circ}$  (Tabla 7.5). El cuarto cuadrante se destaca con tormentas entre abril y septiembre (Tabla 7.2), con alturas desde 3,8 a 5,7 m, períodos entre 8,5 y 13,5 segundos y direcciones entre  $273^{\circ}$  y  $336^{\circ}$  (Tabla 7.5). Al comparar estos resultados con los otros métodos para el tercer cuadrante oleaje tipo remoto (Figura 32) las alturas extremas subestiman las magnitudes para el oleaje proveniente del SW, exceptuando a los 100 años de período de retorno que alcanza los valores de la energía total y los valores de la partición espectral multimodal; en cuanto al cuarto cuadrante oleaje tipo remoto (Tabla 7.7 y Figura 34) las alturas extremas de la partición por cuadrantes sobre estiman las magnitudes para el oleaje proveniente del NW. Esta diferencia de estimaciones de alturas es producto del efecto de truncar espectros.

De los resultados de la partición espectral por sectores, se destacan tormentas para el Swell Remoto del SW entre abril y octubre (Tabla 7.3), con alturas desde 4,6 a 6,8 metros, períodos entre 12,8 y 17,7 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $218^{\circ}$  a  $265^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Sea y Swell Cercano del SW ocurren entre octubre y febrero (Tabla 7.3) y se aprecian alturas desde 2,5 a 2,9 metros, períodos entre 7,3 y 8,4 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $211^{\circ}$  a  $220^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Swell Remoto del NW ocurren entre diciembre y abril (Tabla 7.3) y se aprecian alturas desde 1,2 a 2,2 metros, períodos entre 16,8 y 19,2 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $301^{\circ}$  a  $308^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Sea y Swell Cercano del NW ocurren entre abril y octubre (Tabla 7.3) y se aprecian alturas desde 3,5 a 5,8 metros, períodos entre 7,9 y 9,8 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $216^{\circ}$  a  $6^{\circ}$  (Tabla 7.6). Al comparar resultados con los otros métodos de partición para el oleaje remoto del tercer cuadrante (Figura 32), el oleaje remoto del cuarto cuadrante (Figura 34), oleaje cercano tercer cuadrante (Figura 33) y el oleaje cercano cuarto cuadrante (Figura 35), se destaca que para todos estos casos este método subestima toda la estimación de alturas (Tabla 7.8).

En la partición espectral multimodal se destacan tormentas para el Swell Remoto del SW entre mayo y octubre (Tabla 7.4), con alturas desde 4,8 a 7,4 metros, períodos entre 10,8 y 17,7 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $220^{\circ}$  a  $282^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Sea y Swell Cercano del SW ocurren entre noviembre y marzo (Tabla 7.4) y se aprecian alturas desde 3,2 a 4 metros, períodos entre 7,9 y 9 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $213^{\circ}$  a  $229^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Swell Remoto del NW ocurren entre noviembre y abril (Tabla 7.4) y se aprecian alturas desde 1,3 a 2,6 metros, períodos entre 13,5 y 20,9 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $300^{\circ}$  a  $311^{\circ}$  (Tabla 7.6). Las tormentas para el Sea y Swell Cercano del NW ocurren entre mayo y octubre (Tabla 7.4) y se destacan alturas

desde 3,2 a 6 metros, períodos entre 7,5 y 10,3 segundos, y direcciones en un rango dentro de  $304^{\circ}$  a  $4^{\circ}$  (Tabla 7.6). En la Figura 32 se observa que los resultados de la partición espectral multimodal representan adecuadamente al oleaje proveniente del oleaje SW en consideración a que su curva de magnitudes no es muy diferente a la curva obtenida por el método de energía total. Para el oleaje remoto del cuarto cuadrante se destaca que este método es el más adecuado tomando en consideración a que las alturas son más bajas por viajar una mayor distancia (Figura 34) y no pueden ser comparadas con las magnitudes del oleaje remoto que proviene del SW, las cuales son dominantes en aguas profundas. En el oleaje cercano del cuarto cuadrante sucede algo similar al caso anterior, solo con la diferencia de que las alturas de diseño son de una magnitud mayor, por lo que este método puede ser más conservador para este tipo de oleaje (Figura 35). En cuanto a los resultados del oleaje cercano del tercer cuadrante, se observa que este método obtiene una mayor curva de oleaje respecto a la obtenida por el método por sectores (Figura 33).

En resumen se tiene que:

- Las tormentas de la energía total ocurren mayoritariamente en temporada de invierno y sólo son representativas para el oleaje proveniente del SW.
- Del método de partición espectral por cuadrantes, las tormentas para el tercer y cuarto cuadrante ocurren durante invierno principalmente. Este tipo de partición no hace distinción entre las constituyentes de espectro, es decir oleaje tipo sea o swell (cercano o remoto). Comparando estos resultados se tiene que:
  - a. El oleaje remoto del tercer cuadrante; presenta una gran pendiente con la menor magnitud de altura para 2 años de período de retorno y alcanzando los valores de la energía total a los 100 años.
  - b. El oleaje cercano del tercer cuadrante; subestimación ligera desde los 50 años de período de retorno en comparación de la energía total.
  - c. El oleaje remoto del cuarto cuadrante; es la de mayor magnitud después de la energía total.
  - d. El oleaje cercano del cuarto cuadrante; posee la curva de estimación de alturas de menor magnitud, ligeramente menor a los resultados de la partición por sectores.
- Con el método de partición espectral por sectores aparecen tormentas para el Swell Remoto del SW en invierno, Sea y Swell Cercano del SW en verano, Swell Remoto del NW en verano y el Sea y Swell Cercano del NW invierno. A pesar que los resultados de la lista de eventos extremos es coherente con las características de estos tipos de oleaje la estimación de alturas subestima estas magnitudes, siendo el método que obtiene menores magnitudes para todos los casos, por lo tanto, no es recomendable utilizar este método para definir el oleaje de diseño.
- Al igual que en el caso anterior, el método de separación espectral multimodal, dan resultados similares en cuanto a la aparición de eventos extremos, para el Swell Remoto del SW en invierno, Sea y Swell Cercano del SW en verano, Swell Remoto del NW en verano y Sea y Swell Cercano del NW invierno. Esto indica que los resultados son coincidentes con las características de estos tipos de oleaje. En comparación con los otros métodos este es el más se acerca a distinguir de forma adecuada el tipo de constituyente de cada espectro para luego hacer análisis separado, sin afectar la estimación de alturas según la dirección de incidencia.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos establecidos, resultados y análisis obtenidos en esta memoria, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. La implementación del algoritmo para la partición multimodal de espectro se logró con éxito. Esto facilita el proceso de análisis de una gran cantidad de datos en un tiempo relativamente corto.
2. Al analizar los resultados de esta implementación, las agrupaciones del oleaje del nodo Valparaíso son identificadas más fácilmente, siendo más precisa el análisis del carácter multimodal del oleaje considerando que se trata de un período de 30 años (una gran magnitud de datos).
3. Al tener los grupos de oleaje claramente identificados, según sus características y dirección de incidencia sobre el nodo, es posible obtener el clima de oleaje extremo específico para cada uno de estos grupos.
4. En general, los resultados obtenidos con la partición multimodal muestran alturas mayores que con otros métodos (exceptuando a la energía total), ya que se considera de forma más adecuada la energía de cada *peak* en el proceso de partición. Por definición la energía total dará las mayores alturas, sin embargo, este es un criterio conservador, pero razonablemente preciso para períodos de retornos de 50 y 100 años y uso en ingeniería.
5. Si se desea diferenciar las componentes del oleaje para aplicarlos en la determinación de la altura de oleaje de diseño, se llega la conclusión de que el método más preciso para completar esta tarea es el utilizar la partición multimodal del dominio espectral, debido a que por medio de éste conserva la energía original de cada *peak* presentes en cada estado de mar del nodo Valparaíso.
6. De acuerdo al análisis de valores extremos y las comparaciones de los diferentes métodos implementados; y considerando que la mayor parte de las bahías de las costas chilenas están protegidas por el oleaje que incide desde el SW en aguas profundas y directamente expuestas del oleaje que proviene del NW, se destaca lo siguiente:
  - a. No es recomendable utilizar por ningún motivo la partición espectral por sectores ya que subestima para todo los casos las magnitudes de alturas en función de los períodos de retorno, por el efecto de truncar espectros.
  - b. La utilización de la energía total es un método conservador, sin embargo, con esta no es posible considerar la incidencia de otras direcciones, sólo es representativa del oleaje del SW.
  - c. La partición espectral por cuadrantes podría ser utilizado para algunos casos ya que subestima ligeramente las magnitudes del oleaje proveniente del SW para período de retorno mayores a 50 años y sobre estima las magnitudes para el oleaje proveniente del NW (sólo para el caso del oleaje tipo remoto). En el caso del oleaje cercano del cuarto cuadrante posee las menores magnitudes en comparación al resto de los métodos, subestimando las alturas.

- d. El método de separación espectral multimodal es el más preciso, ya que no trunca la energía espectral de cada constituyente presente en un estado de mar, por lo que representa de forma adecuada todos los tipos de oleajes incidentes en aguas profundas de la bahía de Valparaíso.
- e. Las estimaciones de alturas con la partición multimodal para el tercer cuadrante son muy similares a las obtenidas por la energía total.

## 8.2 RECOMENDACIONES PARA INGENIERÍA

La partición multimodal es la más precisa, sin embargo otros métodos podrían ser usados:

1. Energía total para sitios expuestos al oleaje proveniente del SW.
2. En los casos de sitios protegidos del SW y expuestos al NW, se recomienda a utilizar la partición por cuadrantes, considerando la dirección más desfavorable, que es más conservador.
3. No se recomienda en ningún caso utilizar el método de partición espectral por sectores debido a que siempre subestima las magnitudes de altura.

## 9. REFERENCIAS

- [1.] Aarnes, J. & Krogstad, H., 2001. Partitioning sequence for the dissection of directional ocean wave spectra: A review. Work package 4 of the EnviWave research programme under the EU Energy, Environment and Sustainable Development program.
- [2.] Baird & Associates S. A., 2004. Suministro de una Base de Datos de Oleajes en Aguas Profundas en la Costa de Chile. Olas Chile.
- [3.] Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. Singapore: World Scientific.
- [4.] Hanson, J. & Tarcy, B., T. H., S. R., 2004. Pacific Hindcast Performance of Three Numerical Wave Models. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.
- [5.] Jeffrey L. Hanson & Owen M. Philips, 2001. Automated Analysis of Ocean Surface Directional Wave Spectra. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Volume 18, Issue 2 article 277. Disponible en <http://journals.ametsoc.org/loi/atot> (accedido en Abril del 2010).
- [6.] Scott, D., D. Resio y C. Pantoja, 2002. Swell Propagation and Nearshore Wave Climate, 7<sup>th</sup> International Workshop on Wave and Forecasting, Meteorological Service of Canada.
- [7.] Liu, Z. y Frigaard, P., 2001. Generation and analysis of random waves.
- [8.] Mkhandi, S., et. Al. Comparison between annual maximum and peaks over threshold models for flood frequency prediction (en línea). Disponible en [http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Cairo/pdf/COMPARISON\\_BETWEEN\\_ANNUAL\\_MAXIMUM.pdf](http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Cairo/pdf/COMPARISON_BETWEEN_ANNUAL_MAXIMUM.pdf) (accedido en Abril del 2014).

## **ANEXO 1: ALGORITMO PARTICIONADOR DE ESPECTROS**

El algoritmo general (Figura 36) incluye todos los procesos y subrutinas que hacen posible: la lectura de los espectros, el ingreso de los parámetros de control, el cálculo de los intervalos de frecuencia y dirección, la obtención de los datos del viento local y la partición de cada espectro analizado. Las salidas del algoritmo se definen en la Tabla 0.1 y las subrutinas se describen a continuación.

**Tabla 0.1: Términos importantes del algoritmo general. Fuente: Elaboración propia.**

<b>template</b>	Celda que guarda las matrices, en representación de cada espectro, cuyos valores indican el tipo de partición clasificada: -1: energía bajo el umbral y $\geq 1$ , número del sistema de oleaje ordenado de mayor a menor según la energía total de la partición.
<b>parametrosR_SWELL</b>	Parámetros de resúmenes para las particiones finales. Para este caso, el contenido de las columnas se indican: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fecha (año, mes, día).</li> <li>2. Hora (hora, minutos, segundo).</li> <li>3. Numero de sistema de oleaje ordenado de mayor a menor.</li> <li>4. Altura significativa espectral (<math>H_{mo}</math>).</li> <li>5. Amplitud cuadrática media del oleaje (<math>a_{rms}</math>).</li> <li>6. Período <i>peak</i> (<math>T_p</math>).</li> <li>7. Período energético (<math>T_e</math>).</li> <li>8. Dirección <i>peak</i> (<math>\theta_p</math>).</li> <li>9. Dirección media (<math>\bar{\theta}</math>).</li> </ol>
<b>node_info</b>	Información del viento de cada estado de mar: dirección y velocidad del viento a 10 metros de elevación [m/s].
<b>spec</b>	Celda que guarda las matrices del espectro direccional.

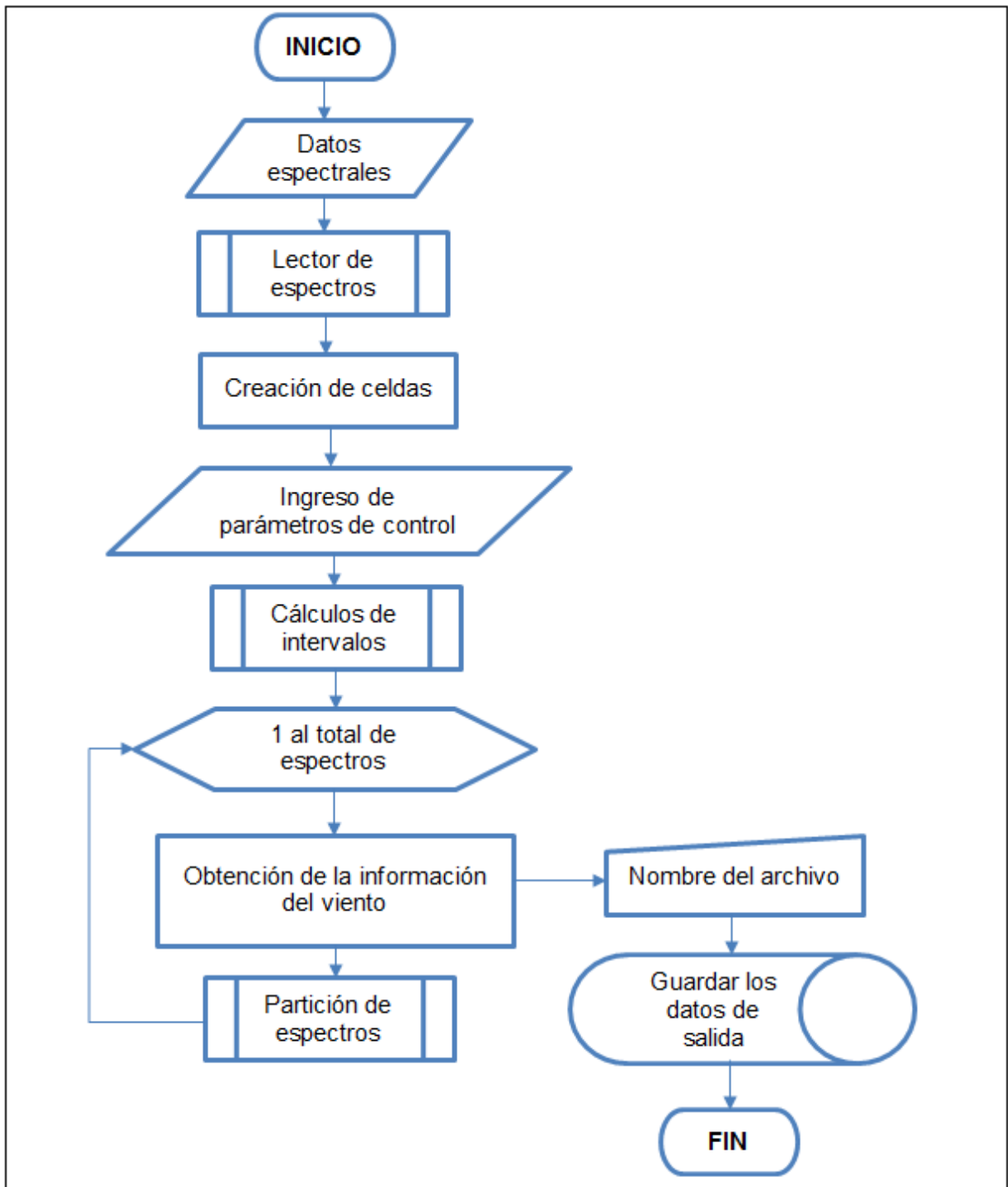


Figura 36: Diagrama de flujo de la rutina general. Fuente: Elaboración propia

## 1.1 LECTOR DE ESPECTRO

Se leen los archivos espectrales en un formato predeterminado y se ordena la información de cada espectro de acuerdo a las frecuencias y direcciones que contienen al inicio del archivo.

## 1.2 CREACIÓN DE CELDAS

Se crean celdas para guardar el resultado de las particiones finales (*template*) y los parámetros de resúmenes para cada sistema presente en cada espectro (*parametrosR\_SWELL*).

## 1.3 INGRESO DE PARÁMETROS DE CONTROL

Se ingresan los parámetros que controlan la energía umbral (*a* y *b*) y los parámetros para la clasificación de sistemas de oleajes (*kappa*: Criterio de dispersión de particiones y un: *Criterio de mínimos entre peaks*).

## 1.4 CALCULO DE INTERVALOS

Se calcula los intervalos de frecuencia y dirección para cada *bin* de la matriz espectral. Además, en este paso se transforma la dirección del oleaje de acuerdo a la convención meteorológica<sup>6</sup>.

## 1.5 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL VIENTO

Es el proceso en el que se extrae la información del viento a diez metros de elevación, dirección y velocidad, que posee cada espectro que contiene el archivo. Luego, para que la dirección del viento sea comparable con la dirección del oleaje, se convierte la dirección del viento de acuerdo a la convención oceanográfica<sup>7</sup>.

## 1.6 PARTICIÓN DE ESPECTRO

Mediante una sub-rutina (Figura 37) se realizan todos los pasos necesarios para identificar los sistemas que componen un espectro y obtener los parámetros de resumen de cada uno de ellos.

---

<sup>6</sup> La convención meteorológica, establece que la dirección del viento es el ángulo medido desde el Norte en sentido horario indicando desde donde viene el viento

<sup>7</sup> La convención oceanográfica, establece que la dirección del oleaje se define como el ángulo medido desde el Norte en sentido horario indicando hacia dónde va la ola.

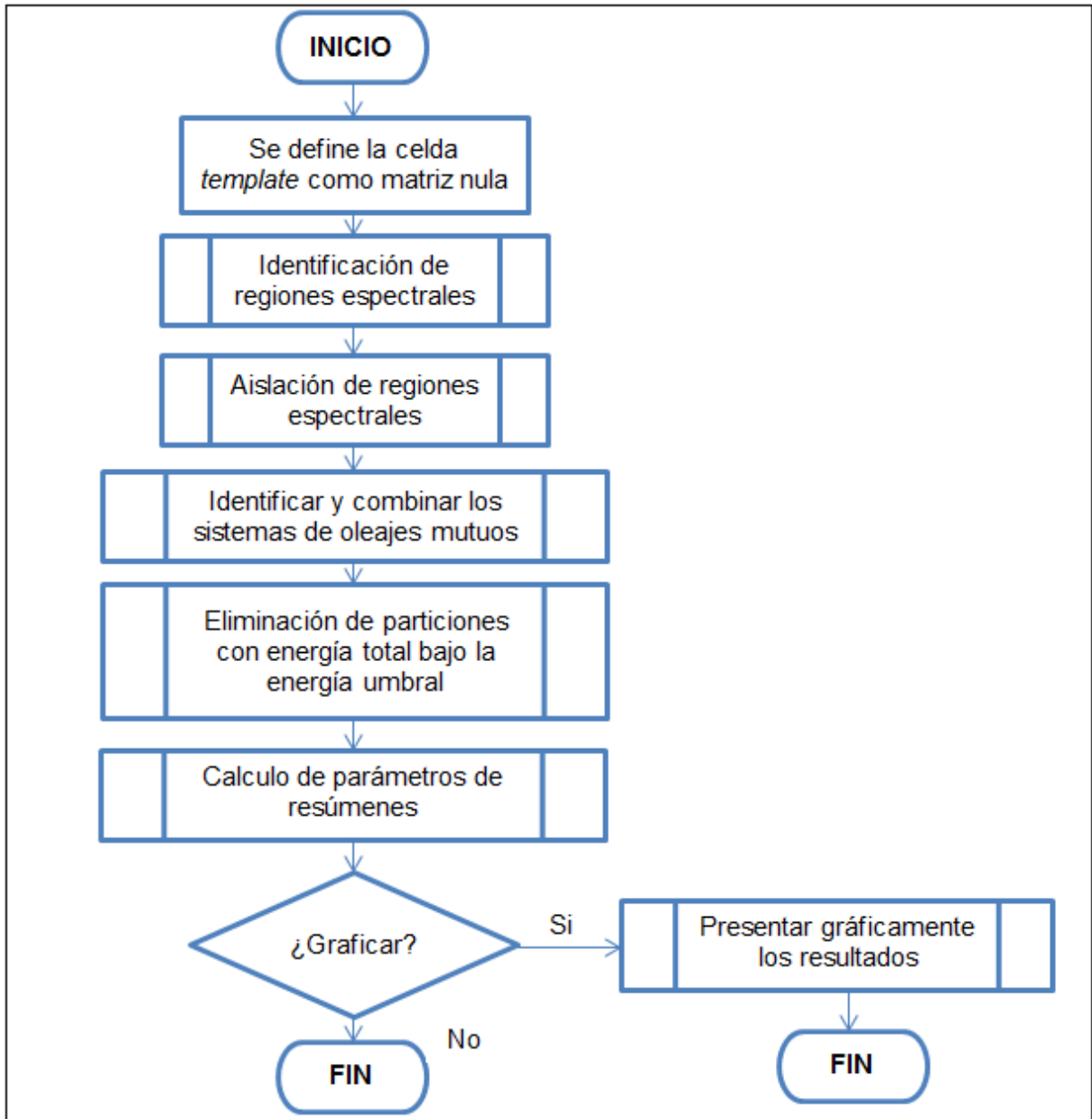


Figura 37: Diagrama de flujo del algoritmo particionador de espectros. Fuente: Elaboración propia.

### 1.6.1 IDENTIFICACIÓN DE REGIONES ESPECTRALES

Antes de comenzar este proceso, se extiende la matriz del espectro original  $S(f, \theta)$ , mediante columnas nulas en el sentido de las frecuencias, es decir, se crea una nueva matriz según se muestra a continuación:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & S(f_1, \theta_1) & \dots & S(f_{end}, \theta_1) & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & S(f_1, \theta_{end}) & \dots & S(f_{end}, \theta_{end}) & 0 \end{bmatrix}_{total\ direcciones \times (total\ frecuencias+2)}$$

La identificación de las regiones espectrales se lleva a cabo por un conjunto de sub-rutinas (Figura 38) que localiza los *peaks* locales de cada matriz espectral y que corresponden a las particiones iniciales (elaborado a semejanza del código Matlab que aparece en la sección 6 del documento *Partitioning sequences for the dissection of directional ocean wave spectra*). El proceso está separado básicamente en dos partes: 1) localizar los *peaks* locales y generar camino de mayor pendiente, 2) seguir el camino de mayor pendiente desde el *peak* local hacia atrás.

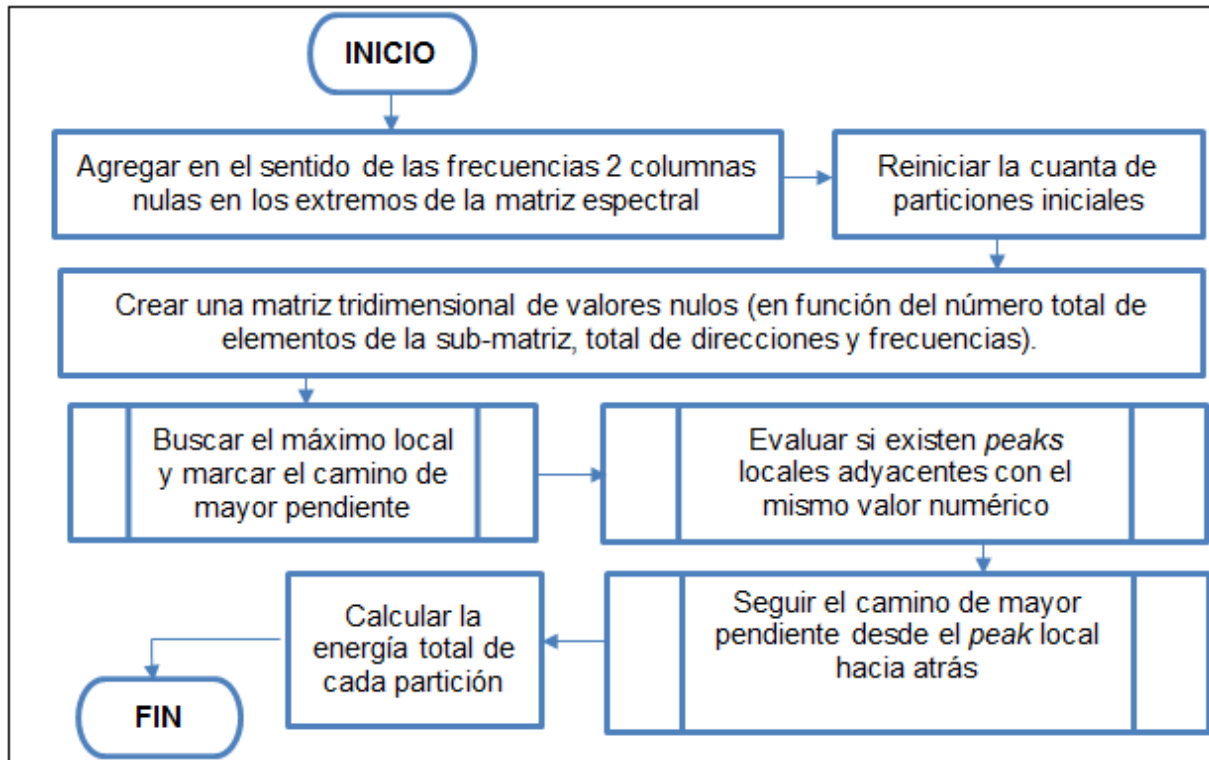


Figura 38: Diagrama de flujo de algoritmo para identificar regiones espectrales. Fuente: Elaboración propia.

## 1.6.2 LOCALIZAR LOS PEAKS LOCALES Y GENERAR CAMINO DE MAYOR PENDIENTE

Mediante esta sub-rutina (Figura 39), se identifica la energía máxima y marcar el camino de mayor pendiente, evaluando cada valor del espectro  $S(f, \theta)$  con los ocho valores vecinos, según los siguientes casos:

- **Caso 1:** para el límite superior de la matriz  $E(t, 1)$ , donde se analizan todos los valores vecinos de  $S(f_i, \theta_1)$ , es decir:

$$\begin{bmatrix} E(t-1, end) & E(t, end) & E(t+1, end) \\ E(t-1, 1) & [E(t, 1)] & E(t+1, 1) \\ E(t-1, 2) & E(t, 2) & E(t+1, 2) \end{bmatrix}_{t=2:total\ frecuencias+1}$$

- **Caso 2:** para la zona intermedia de la matriz  $E(t, r)$ , donde se analizan los valores vecinos de  $S(f_i, \theta_j)$ , es decir:

$$\left[ \begin{array}{ccc} E(t-1, r-1) & E(t, r+1) & E(t+1, r-1) \\ E(t-1, r) & [E(t, r)] & E(t+1, r) \\ E(t-1, r+1) & E(t, r+1) & E(t+1, r+1) \end{array} \right]_{\substack{r=2:\text{total direcciones}-1 \\ t=2:\text{total frecuencias}+1}}$$

- **Caso 3:** para el límite inferior de la matriz  $E(t, end)$ , donde se analizan todos los valores vecinos de  $S(f_i, \theta_{end})$ , es decir:

$$\left[ \begin{array}{ccc} E(t-1, end-1) & E(t, end-1) & E(t+1, end-1) \\ E(t-1, end) & [E(t, end)] & E(t+1, end) \\ E(t-1, 1) & E(t, 1) & E(t+1, 1) \end{array} \right]_{t=2:\text{total frecuencias}+1}$$

Si dentro de la sub-matriz analizada existe un máximo local se marca el camino de mayor pendiente de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

<p><math>(5 - k \times 3 - 1, t+1, r+k)</math>, donde <math>(t, r)</math> son las coordenadas del punto central en evaluación y <math>(5 - k \times 3 - 1)</math> es el camino de mayor pendiente.</p>	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px 10px;">-1</td> <td style="padding: 5px 10px;">9</td> <td style="padding: 5px 10px;">8</td> <td style="padding: 5px 10px;">7</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px 10px;">0</td> <td style="padding: 5px 10px;">6</td> <td style="border: 2px solid black; padding: 5px 10px;">5</td> <td style="padding: 5px 10px;">4</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px 10px;">1</td> <td style="padding: 5px 10px;">3</td> <td style="padding: 5px 10px;">2</td> <td style="padding: 5px 10px;">1</td> </tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px 10px;"></td> <td style="padding: 5px 10px; text-align: center;">-1</td> <td style="padding: 5px 10px; text-align: center;">0</td> <td style="padding: 5px 10px; text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px 10px;"></td> <td colspan="3" style="padding: 5px 10px; text-align: center;">t</td> </tr> </table>	-1	9	8	7	0	6	5	4	1	3	2	1		-1	0	1		t		
-1	9	8	7																		
0	6	5	4																		
1	3	2	1																		
	-1	0	1																		
	t																				

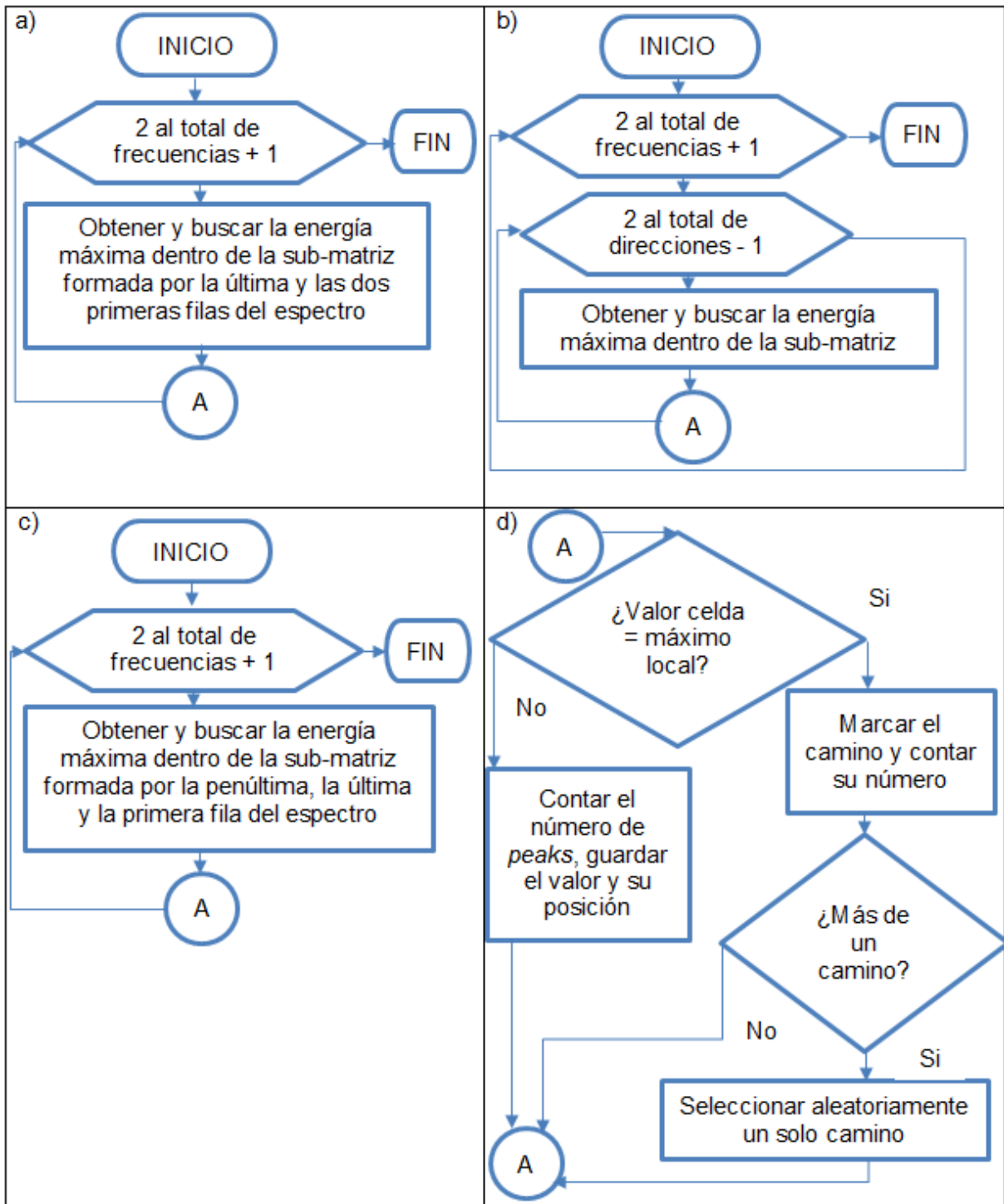


Figura 39: Diagrama de flujo para localizar los peaks locales y generar camino de mayor pendiente, según sea el caso: a) Límite superior, b) zona intermedia, c) Límite inferior y d) Proceso común para todos los casos. Fuente: Elaboración propia.

### 1.6.3 SEGUIR EL CAMINO DE MAYOR PENDIENTE DESDE EL PEAK LOCAL HACIA ATRÁS.

Corresponde a la segunda parte del proceso de aislar las regiones espectrales determinadas según el número de partición o *peak* local identificados en el paso anterior (Figura 40). Con este se ubican las coordenadas  $(Xp, Yp)$  y las energías espectrales ( $eP$ ) que pertenecen a cada partición según lo indicado en el recorrido del camino de mayor pendiente de cada punto.

Este proceso comienza, evaluando primeramente cada del *peak* local, verificando si los 8 vecinos que están alrededor del punto indican el camino de mayor pendiente, y todos aquellos vecinos que se cumplen con la condición, se guarda la posición de la energía espectral. Una vez que se hayan evaluado todos los vecinos, se repite este proceso para todos aquellos cumplieron con la condición, y así sucesivamente hasta llegar a la última celda del espectro perteneciente a la región. Esto se lleva a cabo considerando, los mismos tres casos definidos anteriormente, cuyo proceso se establece de la siguiente manera:

- **Caso 1:** para el límite superior de la matriz, si el índice en el sentido de la dirección es igual a 1 ( $Yp = 1$ ), donde se analizan todos los valores vecinos del punto  $(Xp, 1)$ , es decir:

$$\begin{bmatrix} (Xp - 1, end) & (Xp, end) & (Xp + 1, end) \\ (Xp - 1, 1) & [(Xp, 1)] & (Xp + 1, 1) \\ (Xp - 1, 2) & (Xp, 2) & (Xp + 1, 2) \end{bmatrix}_{Xp=2:total\ frecuencia+1}$$

- **Caso 2:** para la zona intermedia de la matriz, donde se analizan los valores vecinos del punto  $(Xp, Yp)$ , es decir:

$$\begin{bmatrix} (Xp - 1, Yp - 1) & (Xp, Yp + 1) & (Xp + 1, Yp - 1) \\ (Xp - 1, Yp) & [(Xp, Yp)] & (Xp + 1, Yp) \\ (Xp - 1, Yp + 1) & (Xp, Yp + 1) & (Xp + 1, Yp + 1) \end{bmatrix}_{Xp=2:total\ frecuencia+1}^{Yp=2:total\ direcciones-1}$$

- **Caso 3:** para el límite inferior de la matriz, si el índice en el sentido de la dirección es igual al total de direcciones 1 ( $Yp = end$ ), donde se analizan todos los valores vecinos del punto  $(Xp, end)$ , es decir:

$$\begin{bmatrix} (Xp - 1, end - 1) & (Xp, end - 1) & (Xp + 1, end - 1) \\ (Xp - 1, end) & [(Xp, end)] & (Xp + 1, end) \\ (Xp - 1, 1) & (Xp, 1) & (Xp + 1, 1) \end{bmatrix}_{Xp=2:total\ frecuencia+1}$$

Si dentro de la sub-matriz analizada se indica un camino de mayor pendiente se guarda la coordenada matricial de acuerdo a la siguiente nomenclatura:  $(5 + k \times 3 + 1, t + 1, r + k)$ , donde  $(t + 1, r + k)$  son las coordenadas del punto del camino de mayor pendiente desde el *peak* hacia atrás.

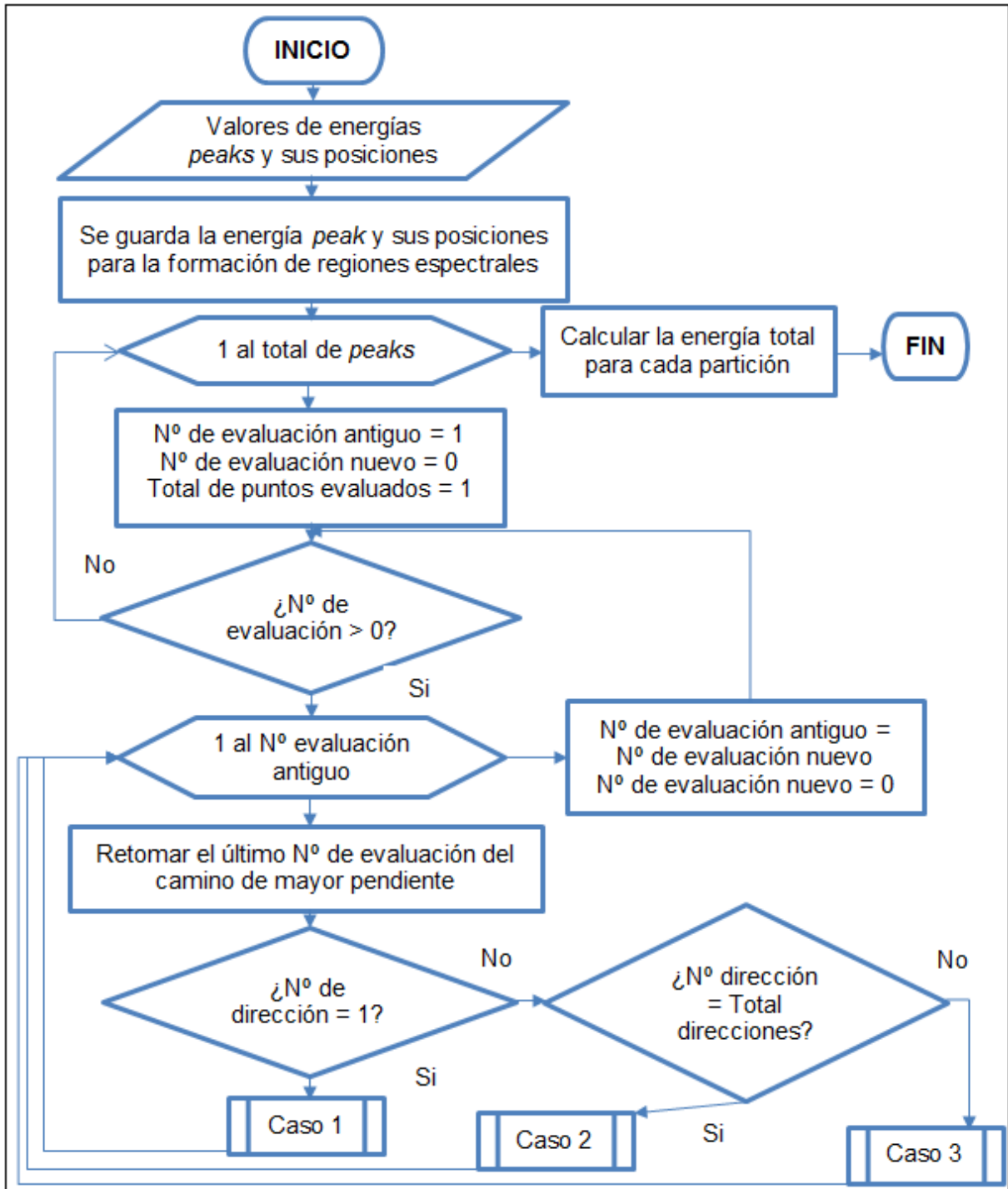


Figura 40: Diagrama de flujo para seguir el camino de mayor pendiente desde el *peak* local hacia atrás.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 1.6.4 AISLACIÓN DE PARTICIONES INICIALES

Se aísla cada partición inicial con la rutina que se muestra en la Figura 41. De los resultados obtenidos en el algoritmo anterior, se ordena la energía espectral ( $eP$ ) dentro de una matriz con las mismas dimensiones que el espectro original (fila correspondiente al índice de direcciones  $[Yp]$  y columnas correspondientes a los índices de frecuencia  $[Xp - 1]$ ). Cada una de estas matrices se guarda en celdas temporales según el número inicial de particiones.

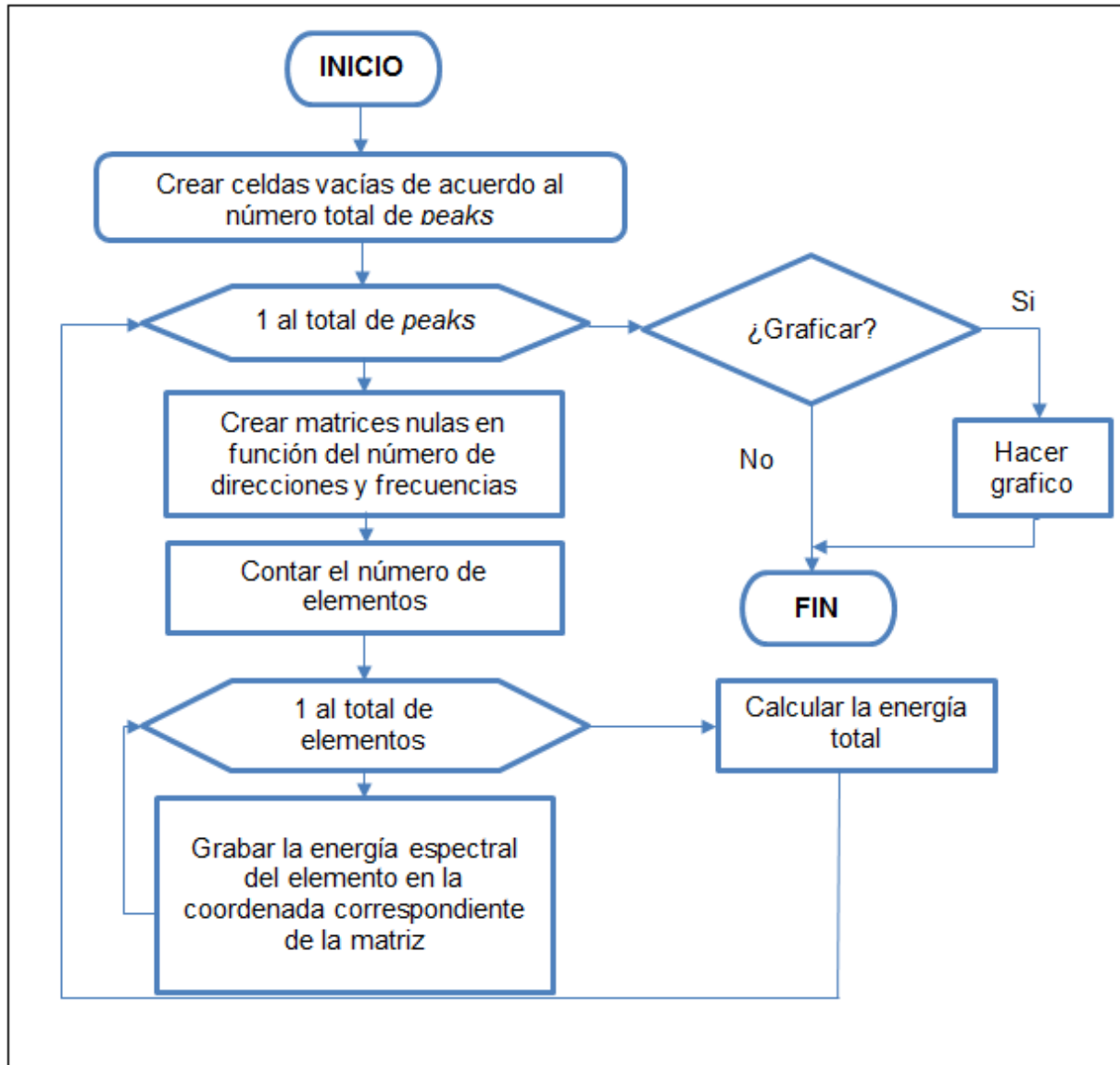


Figura 41: Diagrama de flujo para aislar las particiones iniciales y graficar resultados. Fuente: Elaboración propia.

Además, si se desea, se pueden visualizar los resultados y comprobar que estos sean razonables, mediante un gráfico que representa el contorno del espectro y el área abarca cada

partición inicial (marcada por diferencias de colores), según se muestra en el siguiente ejemplo:

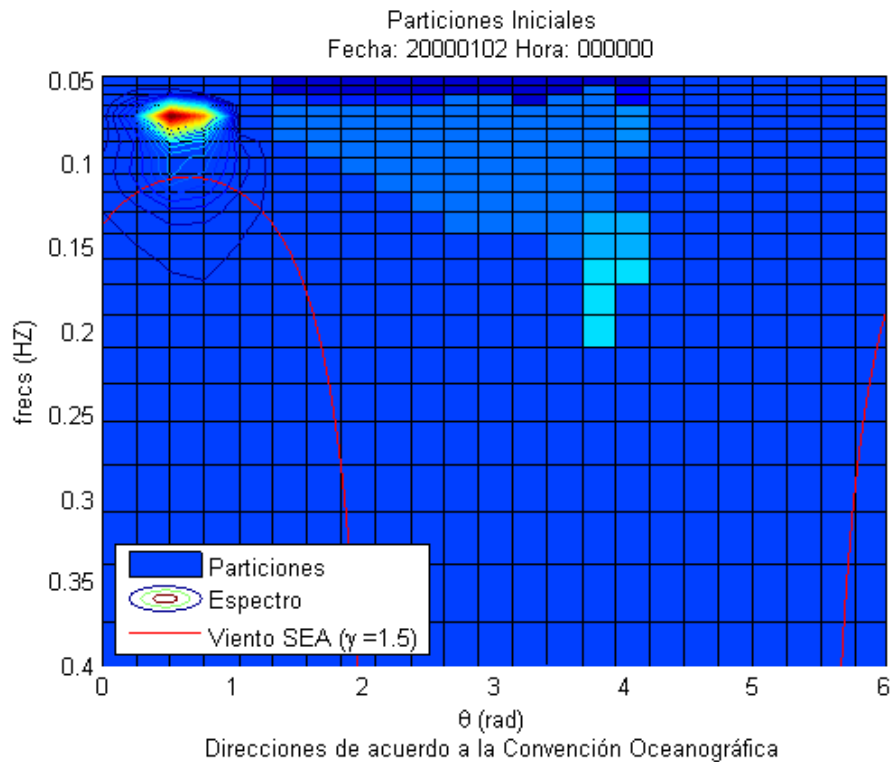


Figura 42: Particiones iniciales del espectro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos Olas Chile IV (Baird, 2010).

### 1.6.5 IDENTIFICACIÓN Y COMBINACIÓN DE SISTEMAS DE OLAJE MUTUOS

Se utiliza una función, Figura 43, que identifica las particiones pertenecientes al mismo sistema con el uso de los criterios anteriormente señalados (punto 5.2.2 memoria de título). El resultado de esta función es una matriz, denominada SPM, cuyo número de columnas representa el número de sistemas inicialmente asignados y el número de filas, los sistemas finales, donde las componentes se representan con valores no nulos.

Luego que se identifican los sistemas finales, las particiones que son comunes se combinan en una sola matriz y se calcula la energía total y frecuencia *peak*. Todo esto es posible gracias a una subrutina que se muestra en la Figura 44.

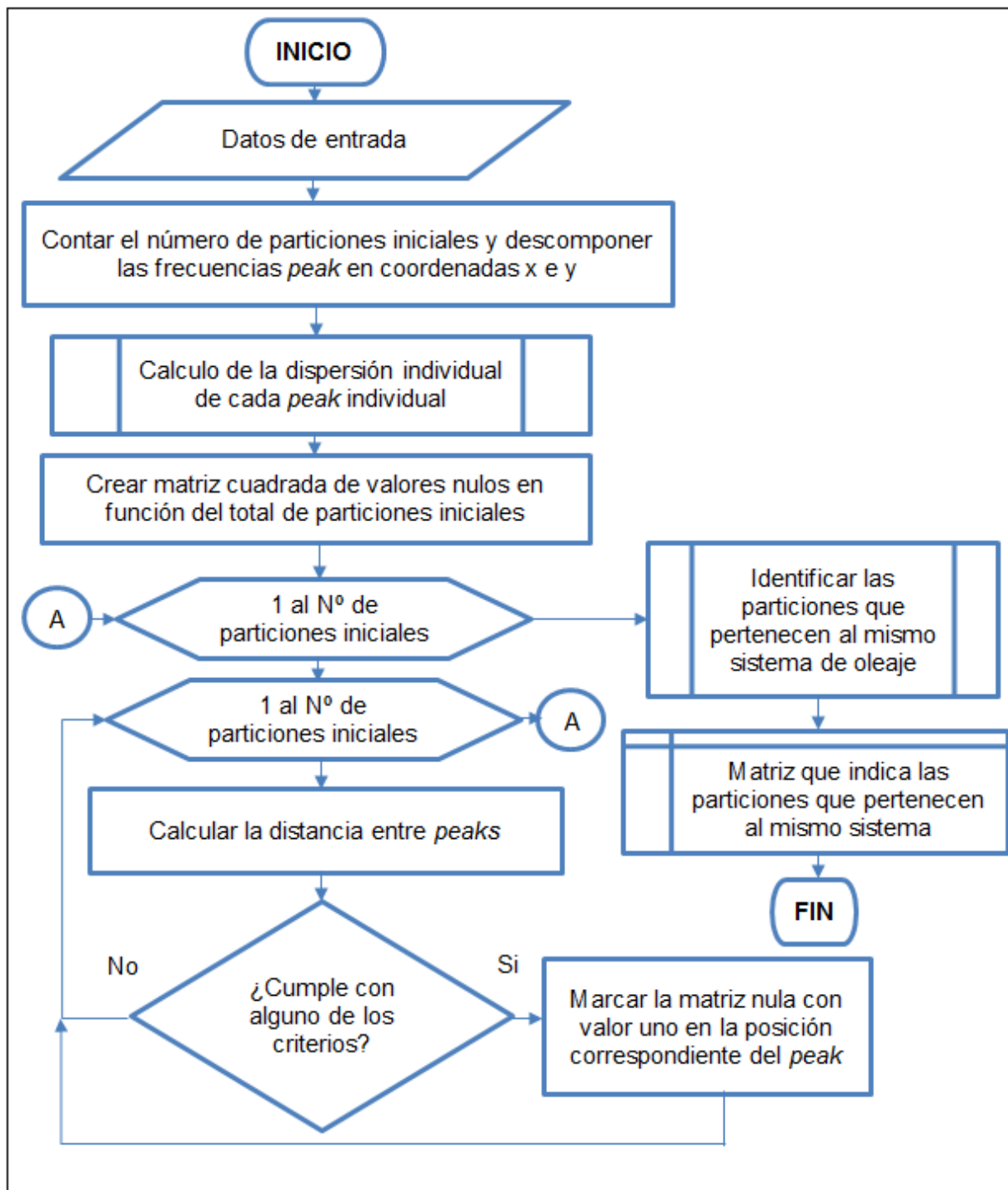


Figura 43: Diagrama de flujo para identificar los sistemas de oleaje mutuos. Fuente: Elaboración propia.

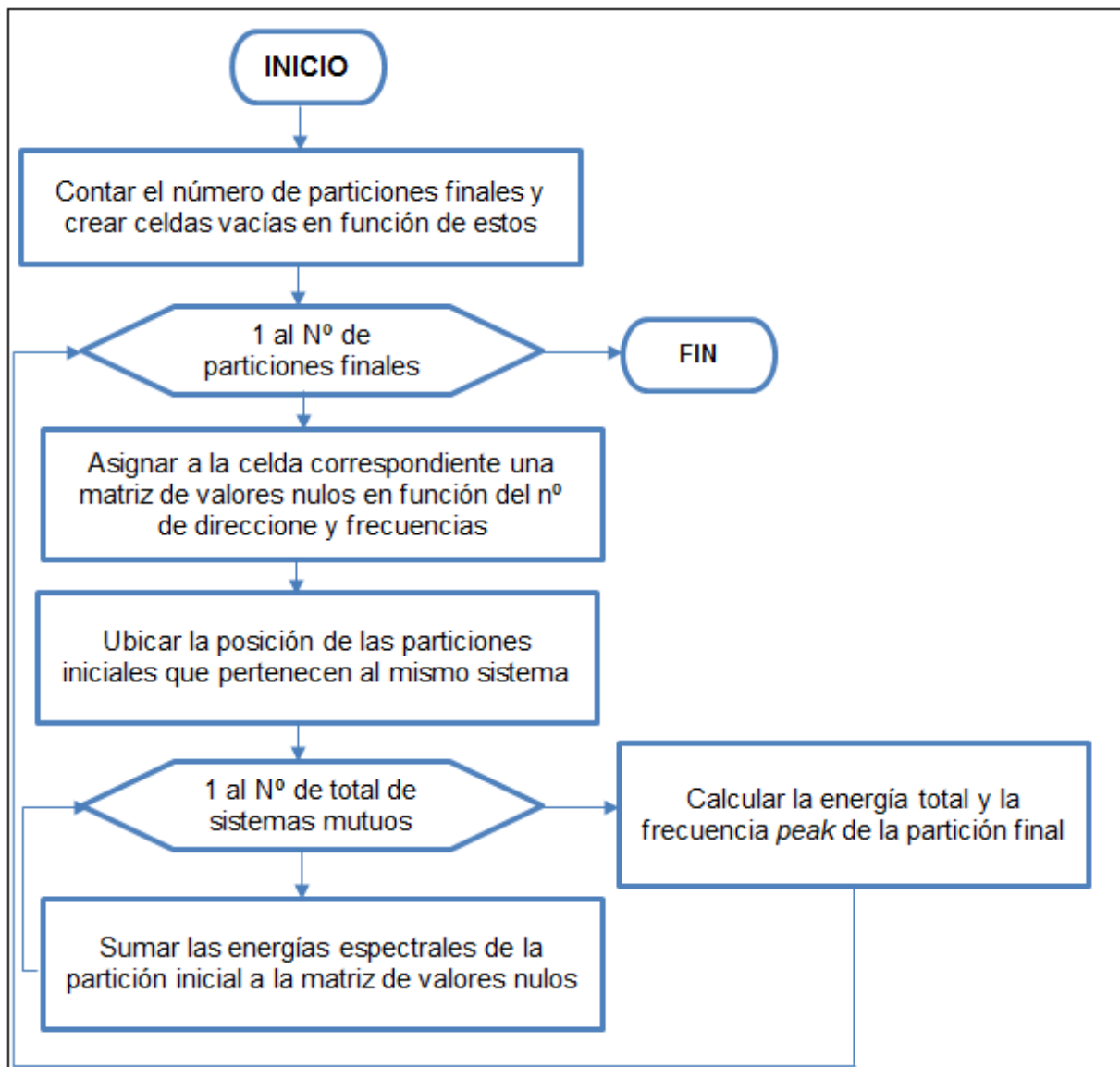


Figura 44: Diagrama de flujo para combinar los sistemas de oleajes mutuos y calcular la energía total y frecuencia *peak* para cada uno de los sistemas de oleaje finales. Fuente: Elaboración propia.

### 1.6.6 ELIMINACIÓN DE PARTICIONES CON ENERGÍA TOTAL BAJO A LA ENERGÍA UMBRAL

En este paso, se determina si las particiones resultantes se encuentran bajo la energía umbral. En la Figura 45 se representa el proceso de selección.

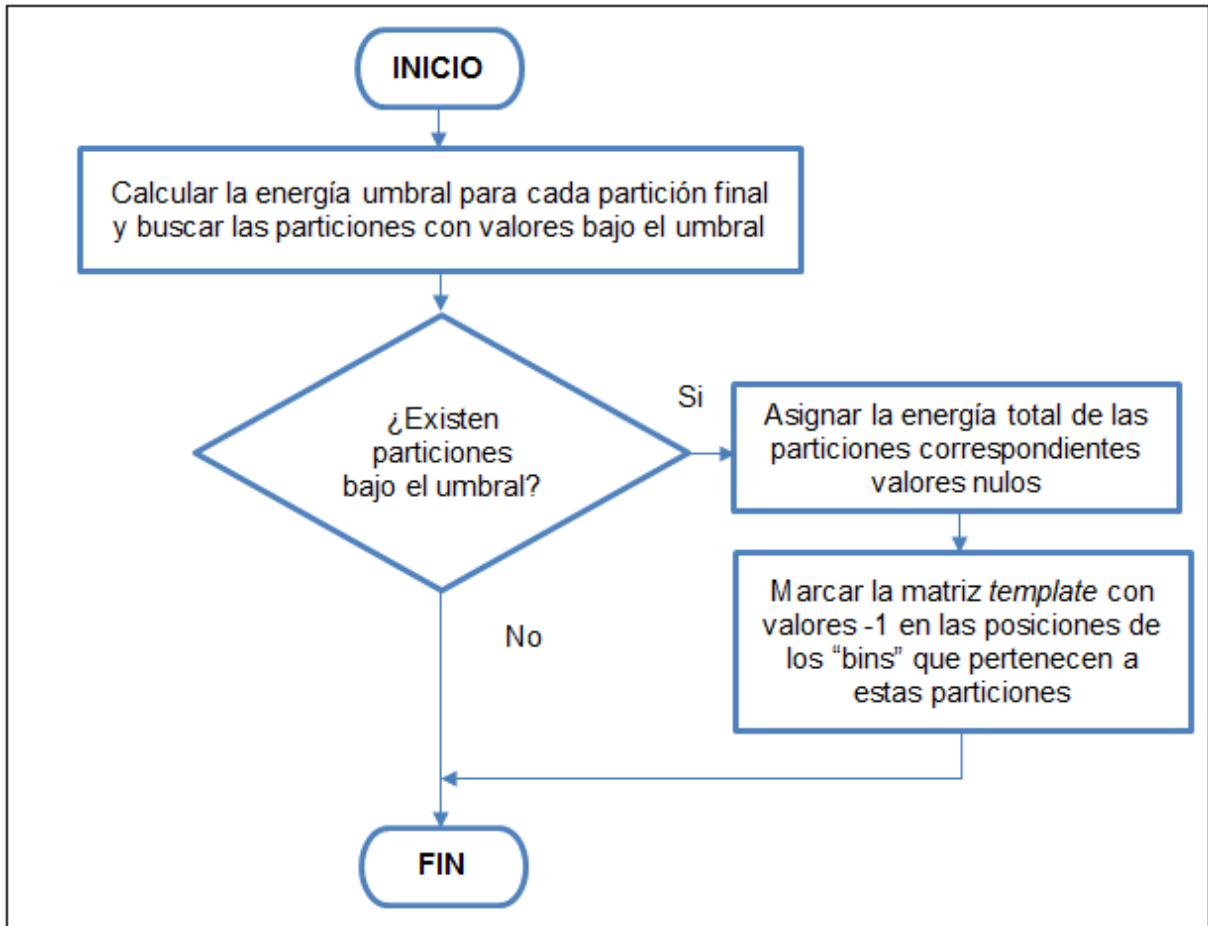


Figura 45: Diagrama de flujo para eliminar las particiones finales que estén bajo la energía umbral.  
Fuente: Elaboración propia.

### 1.6.7 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE RESÚMENES

Como procedimiento final, se calculan los parámetros de resúmenes más relevantes, útiles para próximos análisis, separados en celdas para los diferentes sistemas de oleaje determinados.

Junto con estos cálculos, se guardan los resultados de las particiones obtenidas para cada espectro que contiene la base de datos ingresada, mediante celdas que contienen sub-matrices cuyas dimensiones son las mismas al del espectro original pero representados por valores enteros, desde -1 al número total de sistemas de oleaje encontrados en el espectro específico.

### 1.6.8 REPRESENTACIÓN GRAFICA DE LOS RESULTADOS

Dentro de la rutina general existe la opción de graficar el contorno del espectro con sus respectivas particiones finales y graficar el espectro original en formato de tres dimensiones. Con estos es posible visualizar los últimos resultados que se tiene en el proceso de partición.

## **ANEXO 2: CONTROL DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE ERROR**

Con el objetivo de verificar el buen funcionamiento del algoritmo, se realizaron diferentes pruebas con todos los datos espectrales del nodo Valparaíso del año 2000. Utilizando los resultados del algoritmo que identifica las particiones de cada espectros, tales como: los parámetros de resúmenes obtenidos para cada componente de los diferentes espectros, el archivo de matrices *template* que corresponde a matrices con las mismas celdas del espectro original pero con números que indica el número de partición, el archivo de espectros analizados y la información específica de cada uno de ellos (profundidad, velocidad del viento, dirección del viento, velocidad de corriente y su dirección).

Como primer paso, se ordenan los parámetros de resúmenes con un algoritmo independiente al anterior, que toma cada uno de los archivos que contienen los parámetros de resúmenes para cada partición y que guarda los parámetros (Altura significativa espectral, amplitud cuadrática media, período *peak*, período energético, dirección *peak* y dirección media) en diferentes hojas de cálculo ordenados en forma horizontal de mayor a menor cada partición del espectro, como se ejemplifica en la Tabla 0.1 y Tabla 0.2.

**Tabla 0.1: Ejemplo de orden para el caso de alturas. Fuente: Resultados de partición espectral del espectro 20000101 de Olas Chile IV (Baird, 2010).**

Fecha	Hora	Hmo 1	Hmo 2	Hmo 3	Hmo 4	Hmo 5	Hmo 6
20000101	0	3.92142	0.3063	0	0	0	0
20000101	30000	3.91725	0.302141	0	0	0	0
20000101	60000	3.896722	0.299323	0	0	0	0
20000101	90000	3.855771	0.306249	0	0	0	0
20000101	120000	3.784174	0.311361	0	0	0	0
20000101	150000	3.674488	0.31878	0	0	0	0
20000101	180000	3.537588	0.325944	0	0	0	0
20000101	210000	3.405763	0.329283	0	0	0	0

**Tabla 0.2: Ejemplo para el caso de amplitud cuadrática media. Fuente: Resultados de partición espectral del espectro 20000101 de Olas Chile IV (Baird, 2010).**

Fecha	Hora	arms 1	arms 2	arms 3	arms 4	arms 5	arms 6
20000101	0	1.386222	0.108277	0	0	0	0
20000101	30000	1.384748	0.106807	0	0	0	0
20000101	60000	1.377491	0.105811	0	0	0	0
20000101	90000	1.363015	0.108259	0	0	0	0
20000101	120000	1.337706	0.110066	0	0	0	0
20000101	150000	1.298931	0.112689	0	0	0	0
20000101	180000	1.250537	0.115221	0	0	0	0
20000101	210000	1.203937	0.116401	0	0	0	0

El segundo paso es obtener un promedio de todas las matrices de la variable *tempalte*, cuyo resultado será una matriz final compuesta por números decimales (debido a que los valores de cada celda de las matrices pueden variar desde menos uno al total de swell identificados en el espectro), esta matriz final indica ciertos límites indicados con la diferencia de colores de las líneas. De manera de poder visualizar el resultado se grafica los contornos de la matriz promedio de las particiones que se muestra en Figura 46.

De forma similar se promedian todos los espectros de Valparaíso obtenidos para el año 2000, resultando una matriz espectral general, de la cual se grafican sus contornos para poder compararla con el gráfico de las particiones promedio. En la Figura 47 se representa el espectro promedio, del cual se puede ver que existen tres *peaks* locales, es decir que, los espectros en de la bahía de Valparaíso poseen una característica tri-modal producidos por el oleaje que llega al nodo proveniente de tres fuentes de tormentas generadas en diferentes sectores del Océano Pacífico y/o por oleaje generado por el viento local.

Comparando ambos resultados, se observa que:

- Aproximadamente el promedio de la variable *template* identifica las particiones que existen en el promedio de los espectros mediante las diferencias de colores que se ven en las líneas de la Figura 46.
- El promedio de la variable *template* encierra los *peaks* menores que se muestran en el promedio de los espectros, Figura 47.

En general se puede decir que la clasificación promedio del resultado del algoritmo realizado para particionar los espectros, según las diferentes componentes que estos posean, se realizan de forma correcta.

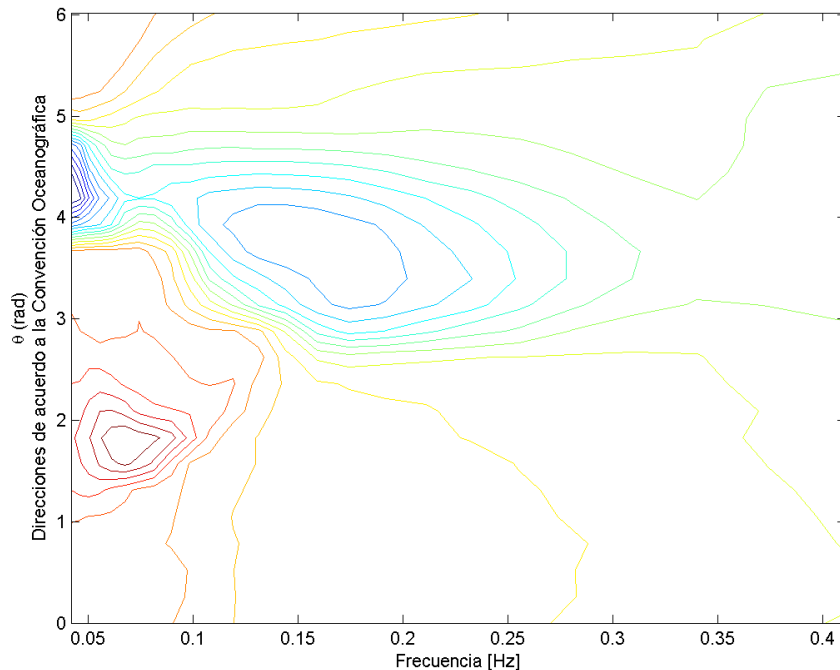


Figura 46: Promedio de particiones, Valparaíso 2000. Fuente: Elaboración propia.

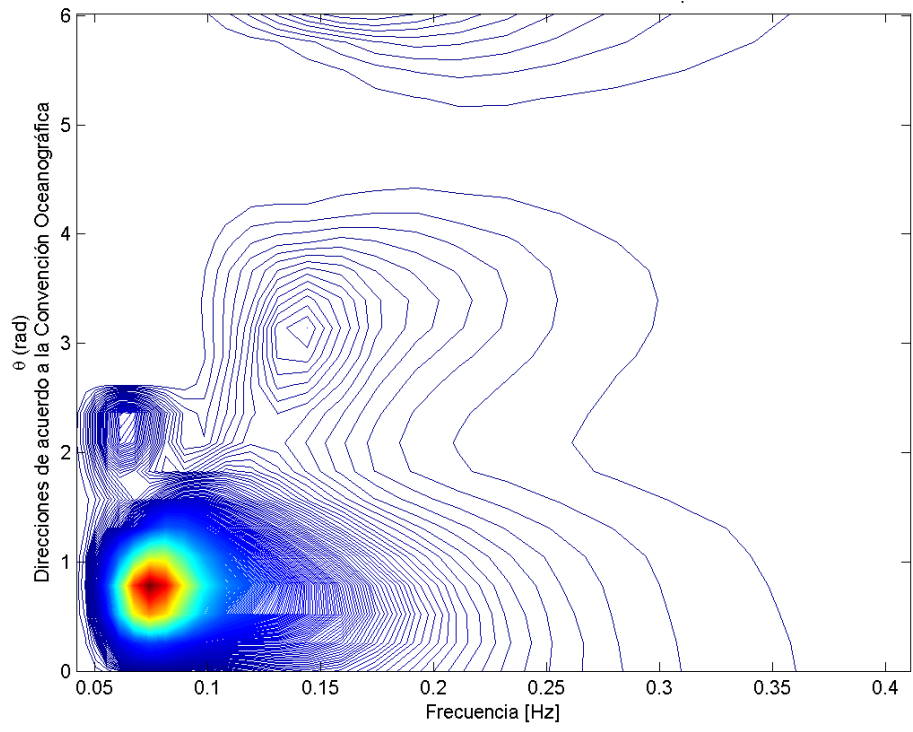


Figura 47: Promedio de espectros, Valparaíso 2000. Fuente: Elaboración propia.

## **ANEXO 3: ANÁLISIS DEL CARÁCTER MULTIMODAL**

Utilizando los parámetros de resúmenes obtenidos en el proceso de partición multimodal de espectros, se forman grupos de oleaje según las características similares que posean las componentes de los espectros. Para definir estos grupos, se realiza un análisis gráfico, para establecer los criterios de agrupación y que serán de utilidad para realizar el análisis de oleaje extremo por separado y determinar así las condiciones de diseño más desfavorables en aguas profundas. Basados en estos criterios, se establecen los grupos de oleaje presentes en el nodo Valparaíso, mediante la implementación de algoritmos en Matlab, según el diagrama que se muestra en la Figura 48.

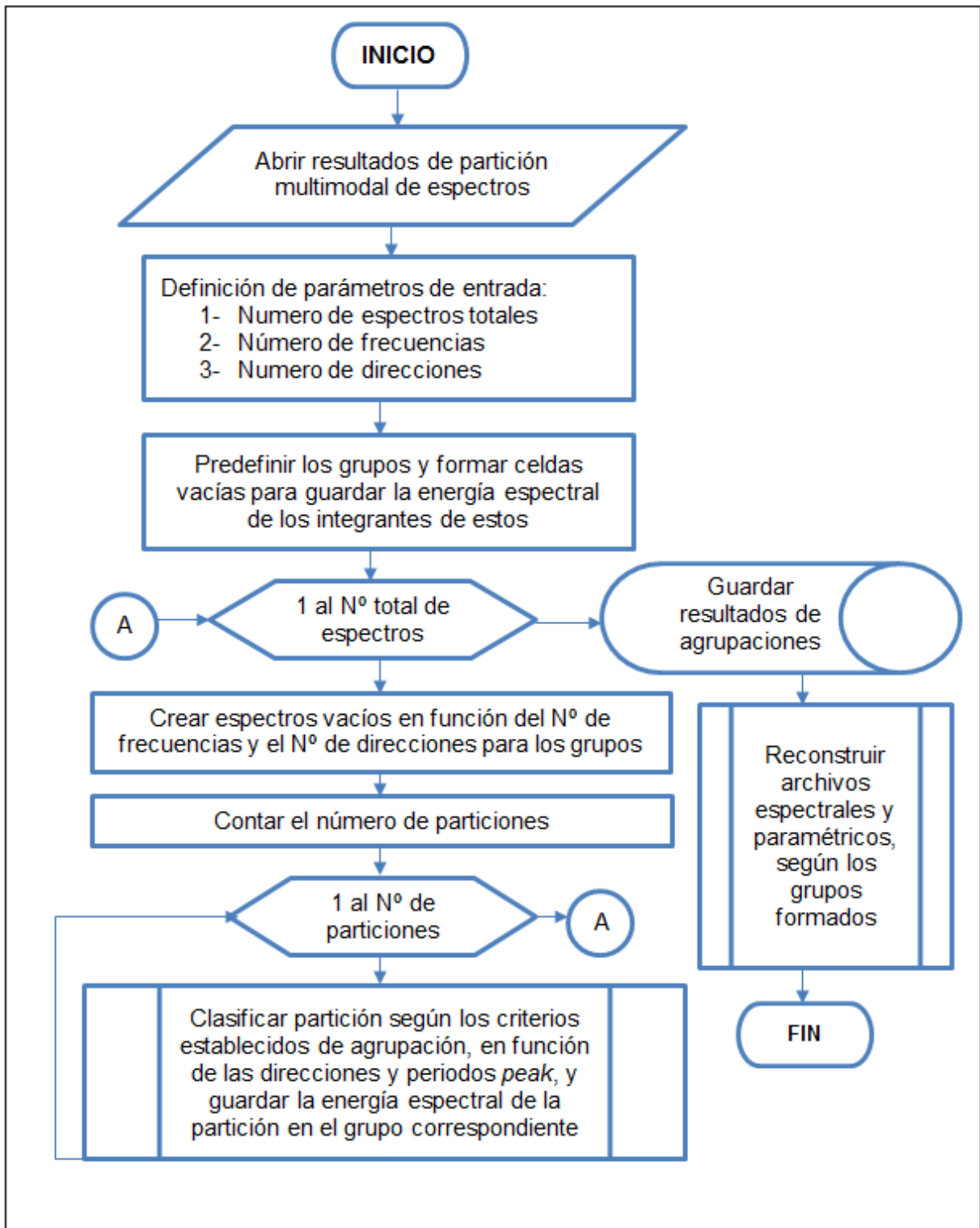


Figura 48: Diagrama de flujo para la formación de grupos. Fuente: Elaboración propia.